

PENGANTAR TEKNOLOGI MESIN PERKAKAS

Dr. Ir. Eko Indrawan, ST., M.Pd.
Dr. Bulkia Rahim, S.Pd., M.Pd.T.

Buku Pengantar Teknologi Mesin Perkakas membahas dasar-dasar teknologi pemesinan sebagai proses pembentukan benda kerja melalui pemotongan atau penyayatan material. Buku ini menjelaskan pengertian mesin perkakas, fungsi mesin dalam proses manufaktur, serta prinsip dasar pemotongan yang meliputi gerak utama, gerak makan, dan kedalaman potong. Pembahasan ini menjadi fondasi untuk memahami bagaimana alat potong, benda kerja, mesin parameter pemotongan, dan pengukuran saling berkaitan dalam menghasilkan komponen yang presisi.

Secara konseptual, buku ini membahas berbagai jenis mesin perkakas yang umum digunakan dalam proses pemesinan, antara lain mesin bubut, mesin frais, mesin sekrup, mesin gurdi, dan kepala pembagi. pembahasan disusun secara bertahap, mulai dari konsep dasar, fungsi mesin, gerak utama, gerak makan, kedalaman potong, geometri pahat, pemilihan parameter, hingga penerapan proses pemesinan pada benda kerja.



PENERBITAN & PERCETAKAN UNP PRESS
Jln. Prof. Dr. Hamka Air Tawar Padang
Sumatera Barat



PENGANTAR TEKNOLOGI MESIN PERKAKAS

Dr. Ir. Eko Indrawan, ST., M.Pd.
Dr. Bulkia Rahim, S.Pd., M.Pd.T.

PENGANTAR TEKNOLOGI MESIN PERKAKAS



Penerbitan & Percetakan
UNP PRESS

Dr. Ir. Eko Indrawan, ST., M.Pd.
Dr. Bulkia Rahim, S.Pd., M.Pd.T.

DUMMY

Penerbitan & Percetakan

UNP PRESS

**PENGANTAR TEKNOLOGI MESIN
PERKAKAS**

Dr. Ir. Eko Indrawan, ST, M.Pd

Dr. Bulkia Rahim, S.Pd., M.Pd.T

DUMMY

Penerbitan & Percetakan

UNP PRESS

UNDANG-UNDANG REPUBLIK INDONESIA
NO 19 TAHUN 2002
TENTANG HAK CIPTA
PASAL 72

KETENTUAN PIDANA SANGSI PELANGGARAN

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu Ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling singkat 1 (satu) bulan dan denda paling sedikit Rp 1.000.000, 00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan denda paling banyak Rp 5.000.000.000, 00 (lima milyar rupiah)
2. Barang siapa dengan sengaja menyerahkan, menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud dalam ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan denda paling banyak Rp 500.000.000, 00 (lima ratus juta rupiah).

PENGANTAR TEKNOLOGI MESIN PERKAKAS

DUMMY

Penerbitan & Percetakan

UNP PRESS

Dr. Ir. Eko Indrawan, ST, M.Pd

Dr. Bulkia Rahim, S.Pd., M.Pd.T

DUMMY

Penerbitan & Percetakan

UNP PRESS



2026

PENGANTAR TEKNOLOGI MESIN PERKAKAS

editor, Tim editor UNP Press

Penerbit UNP Press, Padang, 2020

1 (satu) jilid; 17.6 x 25 cm (B5)

Jumlah Halaman ix + 387 Halaman Buku

DUMMY

Penerbitan & Percetakan

UNP PRESS

ISBN :

DUMMY

Penerbitan & Percetakan

PENGANTAR TEKNOLOGI MESIN PERKAKAS

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang pada penulis

Hak penerbitan pada UNP Press

Penyusun: Dr. Ir. Eko Indrawan, ST, M.Pd., Dr. Bulkia Rahim, S.Pd.,
M.Pd.T

Editor Substansi: TIM UNPPRESS

Editor Bahasa: Dr. Muhammad Ihsan, S.PdI., M.Kom

Desain Sampul & Layout: TIM UNPPRESS

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan karunia-Nya, buku Pengantar Teknologi Mesin Perkakas ini dapat disusun sebagai bahan bacaan dan referensi pembelajaran bagi mahasiswa, peserta didik, instruktur, serta pihak-pihak yang mempelajari bidang teknik pemesinan. Buku ini disusun untuk memberikan pemahaman dasar mengenai mesin perkakas, prinsip pemotongan, penggunaan alat potong, parameter pemesinan, serta teknik pengecekan benda kerja secara benar dan aman.

Isi buku ini membahas berbagai jenis mesin perkakas yang umum digunakan dalam proses pemesinan, antara lain mesin bubut, mesin frais, mesin sekrup, mesin gurdi, dan kepala pembagi. Pembahasan disusun secara bertahap, mulai dari konsep dasar, fungsi mesin, gerak utama, gerak makan, kedalaman potong, geometri pahat, pemilihan parameter, hingga penerapan proses pemesinan pada benda kerja. Dengan susunan tersebut, pembaca diharapkan dapat memahami hubungan antara teori pemesinan dan praktik kerja bengkel secara lebih sistematis.

Semoga buku ini dapat memberikan manfaat dalam mendukung proses pembelajaran, meningkatkan keterampilan teknis, serta menumbuhkan sikap kerja yang teliti, aman, dan bertanggung jawab dalam bidang teknologi mesin perkakas.



Hormat Kami

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	V
DAFTAR ISI	VI
BAB 1 PENGANTAR TEKNOLOGI MESIN PERKAKAS	1
A. PENGERTIAN TEKNOLOGI MESIN PERKAKAS.....	1
B. FUNGSI MESIN PERKAKAS DALAM PROSES PEMESINAN	8
C. PRINSIP DASAR PEMOTONGAN: GERAK UTAMA, GERAK MAKAN, DAN KEDALAMAN POTONG.....	15
D. KLASIFIKASI PROSES PEMESINAN: BUBUT, FRAIS, SEKRAP, GURDI, DAN KEPALA PEMBAGI	23
BAB 2 MESIN BUBUT I: PAHAT, GEOMETRI, PARAMETER PEMOTONGAN, DAN PENCEKAMAN	33
A. PRINSIP KERJA MESIN BUBUT	33
B. JENIS-JENIS PAHAT BUBUT	40
C. TERMINOLOGI DAN GEOMETRI PAHAT BUBUT	47
D. SUDUT PAHAT DAN PEMILIHAN PAHAT BERDASARKAN MATERIAL BENDA KERJA	54
E. PARAMETER PEMOTONGAN.....	61
F. HUBUNGAN DIAMETER BENDA KERJA DENGAN PUTARAN SPINDEL	69
G. PENCEKAMAN BENDA KERJA PADA MESIN BUBUT	76
BAB 3 MESIN BUBUT II: BUBUT LURUT, TIRUS, ULIR, ALUR, PARTING OFF, DAN KARTEL	84
A. KLASIFIKASI HASIL PROSES BUBUT: SILINDRIS, KONIS, DAN EKSENTRIS.....	84
B. BUBUT LURUS ATAU MEMANJANG.....	91
C. BUBUT PENAMPANG ATAU FACING	97
D. BUBUT TIRUS	104
E. BUBUT ULIR.....	111
F. BUBUT ALUR DAN PARTING OFF.....	119

G. KARTEL ATAU KNURLING	127
H. KESALAHAN UMUM DAN KONTROL KUALITAS PADA OPERASI BUBUT KHUSUS	135
BAB 4 MESIN FRAIS: PRINSIP KERJA, KLASIFIKASI, PARAMETER, PEMOTONGAN, DAN PENCEKAMAN	142
A. PENGERTIAN DAN PRINSIP KERJA MESIN FRAIS	142
B. SISTEM SUMBU X, Y, DAN Z PADA MESIN FRAIS	150
C. PERBEDAAN PROSES FRAIS HORIZONTAL DAN FRAIS VERTIKAL	160
D. VARIASI OPERASI FRAIS HORIZONTAL	168
E. VARIASI OPERASI FRAIS VERTIKAL	175
F. PARAMETER PEMOTONGAN PROSES FRAIS	183
G. PEMILIHAN KONDISI PEMOTONGAN BERDASARKAN MATERIAL DAN CUTTER	192
H. METODE FRAIS NAIK ATAU UP MILLING	200
I. METODE FRAIS TURUN ATAU DOWN MILLING	207
J. PEMASANGAN ARBOR SUPPORT	215
K. PENCEKAMAN BENDA KERJA PADA RAGUM	222
BAB 5 MESIN SEKRAP I: MEKANISME KERJA, PROFIL PAHAT, DAN ELEMEN DASAR PEMOTONGAN ...	230
A. PENGERTIAN MESIN SEKRAP	230
B. MEKANISME KERJA MESIN SEKRAP	237
C. GERAK MAJU, GERAK BALIK, DAN PROSES PENYAYATAN 245	
D. PROFIL PAHAT SEKRAP	251
E. ELEMEN DASAR PROSES SEKRAP	257
F. PEMILIHAN KECEPATAN POTONG DAN GERAK MAKAN .	265
BAB 6 MESIN GURDI: GEOMETRI MATA GURDI, PARAMETER PEMOTONGAN, DAN PENGASAHAN	274
A. PENGERTIAN DAN FUNGSI MESIN GURDI	274

B. URUTAN KERJA PROSES PENGGURDIAN	280
C. GEOMETRI MATA GURDI.....	287
D. PEMILIHAN SUDUT MATA GURDI BERDASARKAN MATERIAL BENDA KERJA	294
E. PARAMETER PEMOTONGAN PROSES GURDI.....	302
F. PENGASAHAN MATA GURDI DENGAN TOOL GRINDER ...	309
G. PENGASAHAN MANUAL DENGAN TANGAN.....	317
BAB 7 KEPALA PEMBAGI, PEMBAGIAN LANGSUNG, DAN INTEGRASI APLIKASI MESIN PERKAKAS	325
A. FUNGSI KEPALA PEMBAGI DALAM PROSES FRAIS	325
B. KOMPONEN KEPALA PEMBAGI.....	331
C. RASIO RODA GIGI CACING DAN PRINSIP PEMBAGIAN	337
D. PEMBAGIAN SECARA LANGSUNG	342
E. PENGGUNAAN PIRING PEMBAGI	347
F. PEMBAGIAN MELALUI LUBANG	352
G. INTEGRASI PEMILIHAN PROSES: KAPAN MENGGUNAKAN BUBUT, FRAIS, SEKRAP, GURDI, DAN KEPALA PEMBAGI	360
DAFTAR PUSTAKA	369
GLOSARIUM	374
INDEKS 381	
TENTANG PENULIS.....	385
RINGKASAN ISI BUKU.....	387

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Hubungan Konseptual Antara Unsur Utama Teknologi Mesin Perkakas dan Dampaknya Terhadap Proses Pemesinan	4
Tabel 2.	Unsur Dasar Prinsip Kerja Mesin Bubut	34
Tabel 3.	Hubungan Prinsip Kerja Dan Risiko Kesalahan Pada Mesin Bubut.....	37
Tabel 4.	Ringkasan Parameter Pemotongan pada Proses Bubut.....	64
Tabel 5.	Perbandingan Ringkas Antara Bentuk Silindris, Konis, dan Eksentris.....	87
Tabel 6.	Perbandingan antara Bubut Alur dan Parting Off.....	121
Tabel 7.	Hubungan unsur kerja mesin frais dengan fungsi teknisnya	144
Tabel 8.	Hubungan sumbu operasi mesin frais dengan fungsi teknisnya	153
Tabel 9.	Unsur Dasar dalam Pengertian Mesin Sekrap.....	233

BAB 1

PENGANTAR TEKNOLOGI MESIN PERKAKAS

A. Pengertian Teknologi Mesin Perkakas

Teknologi mesin perkakas dapat dipahami sebagai bidang pengetahuan dan praktik yang membahas cara mesin, alat potong, benda kerja, perlengkapan bantu, dan parameter pemotongan bekerja bersama untuk menghasilkan komponen dengan bentuk, ukuran, dan kualitas permukaan tertentu. Istilah ini tidak hanya menunjuk pada mesin secara fisik, seperti mesin bubut, mesin frais, mesin sekrup, atau mesin gurdi. Di dalamnya juga terdapat cara berpikir teknis tentang bagaimana material dikurangi, bagaimana pahat diarahkan, bagaimana benda kerja dijepit, dan bagaimana hasil pemesinan dikontrol agar sesuai dengan tuntutan gambar kerja. Dalam kegiatan manufaktur, mesin perkakas berperan sebagai sarana utama untuk mengubah bahan mentah atau bahan setengah jadi menjadi komponen yang siap digunakan. Sebatang baja silinder, misalnya, belum dapat langsung dipakai sebagai poros sebelum melalui pembubutan, penghalusan permukaan, pengeboran, atau pembuatan alur sesuai kebutuhan rancangan. Pada titik inilah teknologi mesin perkakas hadir sebagai jembatan antara rancangan dan benda nyata. Ia mengubah ukuran yang tertulis di gambar teknik menjadi bentuk fisik yang dapat dipasang, diputar, ditumpu, atau dirakit dengan komponen lain.

Secara sederhana, mesin perkakas bekerja melalui proses pembuangan material. Bagian material yang tidak diperlukan disayat oleh pahat hingga tersisa bentuk yang dikehendaki. Proses ini tampak mudah jika hanya dilihat dari luar, tetapi sesungguhnya cukup rumit. Setiap penyayatan melibatkan gaya potong, panas, gesekan, getaran, keausan pahat, dan perubahan kualitas permukaan. Karena itu, pembahasan mesin perkakas tidak cukup berhenti pada nama mesin dan fungsi umumnya saja. Pengertian teknologi mesin perkakas juga perlu dibedakan dari pengertian mesin produksi secara umum. Tidak semua mesin produksi disebut mesin perkakas. Mesin perkakas memiliki ciri utama, yaitu digunakan untuk membentuk benda kerja melalui proses pemotongan, penyayatan, atau pembentukan geometris yang presisi. Mesin bubut menghasilkan permukaan silindris atau tirus melalui putaran benda kerja. Mesin frais menggunakan pisau

bermata jamak untuk membuat bidang datar, alur, atau profil tertentu. Mesin gurdi membuat lubang dengan mata bor yang berputar. Mesin sekrap menyayat benda kerja melalui gerak bolak balik pahat.

Jika dilihat dari sudut pandang pendidikan teknik, teknologi mesin perkakas adalah dasar untuk memahami hubungan antara teori pemesinan dan keterampilan praktik bengkel. Seseorang mungkin dapat menghafal rumus kecepatan potong, tetapi belum tentu mampu memilih putaran spindel yang aman untuk material tertentu. Sebaliknya, seseorang dapat terbiasa mengoperasikan mesin, tetapi tetap membutuhkan pemahaman teoritis agar pekerjaannya tidak hanya bergantung pada kebiasaan. Keduanya perlu berjalan bersama, meskipun dalam praktiknya keseimbangan ini sering tidak mudah dicapai. Mesin perkakas memiliki kedekatan langsung dengan istilah pemesinan. Pemesinan adalah proses membentuk benda kerja dengan cara membuang sebagian material menggunakan alat potong. Dalam konteks ini, teknologi mesin perkakas menjadi payung yang mencakup prinsip kerja mesin, karakter alat potong, sifat benda kerja, cara pencekaman, parameter pemotongan, keselamatan kerja, serta pemeriksaan hasil. Ivanov et al. (2024) menjelaskan bahwa metode pemesinan mencakup proses seperti turning, drilling, milling, grinding, dan pembuatan roda gigi, yang masing masing memiliki prinsip, penggunaan, serta kondisi kerja yang berbeda.

Pemahaman tersebut penting karena setiap mesin memiliki cara membuang material yang tidak sama. Pada mesin bubut, benda kerja berputar dan pahat bergerak menyayat. Pada mesin frais, pisau frais berputar dan benda kerja bergerak mengikuti arah pemakanan. Pada mesin sekrap, pahat bergerak maju mundur, sedangkan pemotongan terutama terjadi pada langkah maju. Pada mesin gurdi, mata gurdi berputar dan bergerak masuk ke benda kerja untuk membuat lubang. Perbedaan gerak ini menentukan jenis pahat, bentuk geram, gaya potong, dan risiko kesalahan yang mungkin muncul. Teknologi mesin perkakas juga berkaitan dengan ketelitian. Komponen mesin jarang hanya dituntut berbentuk benar secara kasatmata. Ia harus memenuhi ukuran, toleransi, kekasaran permukaan, kesesuaian bentuk, dan hubungan posisi antarbagiannya. Ivanov et al. (2024) menekankan bahwa kualitas produk manufaktur berkaitan dengan kesesuaian dimensi, bentuk, serta karakteristik lain terhadap gambar teknik. Artinya, benda

kerja tidak cukup disebut selesai hanya karena sudah menyerupai bentuk rancangan. Ia perlu diperiksa apakah ukuran diameter, panjang, kesikuan, kesejajaran, dan kehalusan permukaannya masih berada dalam batas yang diizinkan.

Di bengkel pemesinan, pengertian teknologi mesin perkakas sering kali terasa sangat konkret. Operator harus menentukan jenis mesin yang tepat, memasang benda kerja, memilih pahat, mengatur putaran, menentukan gerak makan, lalu memutuskan kedalaman potong. Keputusan itu tidak berdiri sendiri. Material aluminium tentu tidak diperlakukan sama dengan baja karbon, baja tahan karat, atau besi tuang. Pahat baja kecepatan tinggi juga tidak memiliki kemampuan yang sama dengan pahat karbida. Perbedaan kecil dalam pemilihan parameter dapat membuat permukaan lebih halus, pahat lebih awet, atau sebaliknya menimbulkan getaran dan hasil yang buruk. Dalam pengertian yang lebih luas, teknologi mesin perkakas bukan sekadar urusan mengoperasikan tuas dan tombol. Ia adalah sistem kerja. Di dalam sistem itu terdapat mesin sebagai sumber gerak, pahat sebagai alat penyayat, benda kerja sebagai material yang dibentuk, alat cekam sebagai penjamin kestabilan, operator sebagai pengambil keputusan, serta alat ukur sebagai pengendali kualitas. Jika salah satu unsur ini diabaikan, hasil pemesinan dapat menyimpang. Mesin yang baik tidak otomatis menghasilkan produk yang baik apabila pahat tumpul, benda kerja tidak tercekam kuat, atau parameter pemotongan dipilih secara asal.

Salah satu unsur dasar dalam teknologi mesin perkakas adalah gerak utama. Gerak utama adalah gerakan yang menghasilkan aksi pemotongan. Pada mesin bubut, gerak utama berasal dari putaran benda kerja. Pada mesin frais dan gurdi, gerak utama berasal dari putaran alat potong. Pada mesin sekrup, gerak utama berasal dari gerak bolak balik pahat. Meski tampak berbeda, semua gerak itu memiliki tujuan serupa, yaitu menciptakan kecepatan relatif antara pahat dan benda kerja agar material dapat disayat. Selain gerak utama, terdapat gerak makan. Gerak makan menentukan bagaimana pahat atau benda kerja bergerak secara bertahap selama pemotongan berlangsung. Pada pembubutan memanjang, pahat bergerak sejajar sumbu benda kerja. Pada proses facing, pahat bergerak ke arah radial menuju atau menjauhi pusat benda kerja. Pada proses frais, benda kerja dapat digerakkan terhadap pisau frais melalui meja mesin. Gerak makan yang terlalu

besar dapat mempercepat proses, tetapi sering membuat permukaan lebih kasar dan beban pahat meningkat. Gerak makan yang terlalu kecil dapat memberi hasil halus, tetapi waktu produksi menjadi lebih lama.

Unsur berikutnya adalah kedalaman potong. Kedalaman potong menunjukkan seberapa tebal lapisan material yang dibuang dalam satu lintasan pemesian. Untuk pekerjaan kasar atau roughing, kedalaman potong biasanya dibuat lebih besar agar material cepat berkurang. Untuk pekerjaan akhir atau finishing, kedalaman potong dibuat lebih kecil agar ukuran lebih terkendali dan permukaan lebih halus. Namun, keputusan ini tidak boleh dibuat secara kaku. Kondisi mesin, kekakuan benda kerja, jenis pahat, dan sifat material tetap perlu dipertimbangkan. Keterkaitan antara gerak utama, gerak makan, dan kedalaman potong dapat dilihat sebagai inti awal teknologi mesin perkakas. Ketiganya menentukan laju pembuangan material, kualitas permukaan, gaya pemotongan, temperatur, dan umur pahat. Trinh (2024) menegaskan bahwa kekasaran permukaan dalam pemesian dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pernyataan ini menunjukkan bahwa kualitas hasil tidak muncul secara kebetulan. Ia merupakan akibat dari kombinasi keputusan teknis yang saling berhubungan. Tabel berikut memperlihatkan hubungan konseptual antara unsur utama teknologi mesin perkakas dan dampaknya terhadap proses pemesian.

Tabel 1. Hubungan Konseptual Antara Unsur Utama Teknologi Mesin Perkakas dan Dampaknya Terhadap Proses Pemesian

Unsur teknologi mesin perkakas	Makna dalam proses pemesian	Contoh penerapan	Dampak terhadap hasil
Mesin	Sumber gerak dan pengarah proses	Mesin bubut, frais, sekrup, gurdi	Menentukan jenis bentuk yang dapat dibuat
Pahat atau cutting tool	Alat yang menyayat material	Pahat bubut, pisau frais, mata gurdi	Mempengaruhi gaya potong, kehalusan, dan umur alat
Benda kerja	Material yang	Baja karbon,	Menentukan

	dibentuk	aluminium, besi tuang	pilihan pahat dan parameter pemotongan
Pencekaman atau clamping	Cara menahan benda kerja agar stabil	Chuck, ragum, collet, face plate	Mempengaruhi keamanan dan ketelitian hasil
Parameter pemotongan	Nilai kerja proses pemesinan	Kecepatan potong, gerak makan, kedalaman potong	Menentukan produktivitas, panas, getaran, dan kualitas permukaan
Pengukuran	Pemeriksaan kesesuaian hasil	Jangka sorong, mikrometer, dial indikator	Menjamin ukuran dan toleransi sesuai rancangan

Dari tabel tersebut terlihat bahwa teknologi mesin perkakas tidak dapat dipahami secara terpisah pisah. Mesin tanpa pahat tidak menghasilkan penyayatan. Pahat tanpa pencekaman yang baik dapat menimbulkan getaran atau bahkan kecelakaan. Parameter pemotongan tanpa pengukuran hanya menghasilkan perkiraan, bukan kepastian. Di sinilah letak karakter teknologi mesin perkakas sebagai bidang yang menuntut ketelitian, pengalaman, dan nalar teknis. Dalam praktik industri, pengertian teknologi mesin perkakas juga semakin dekat dengan isu efisiensi. Proses pemesinan tidak hanya ditanya apakah dapat menghasilkan bentuk tertentu, tetapi juga apakah prosesnya hemat waktu, hemat energi, aman, dan konsisten. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan sebagai integrasi antara peralatan, proses, dan strategi, termasuk pengendalian energi, optimasi proses, cairan pendingin, dan pemilihan teknologi pemotongan. Gagasan ini memperluas cara pandang tradisional yang kadang hanya memusatkan perhatian pada hasil akhir benda kerja.

Meski begitu, teknologi mesin perkakas konvensional tetap menjadi fondasi yang tidak dapat dilewati. Mesin CNC, sensor digital, simulasi pemesinan, dan sistem pemantauan berbasis data tetap bekerja di atas prinsip dasar pemotongan. Putaran spindel masih harus sesuai dengan diameter dan material. Gerak makan masih mempengaruhi gaya dan kekasaran permukaan. Kedalaman potong tetap menentukan beban pahat dan waktu proses. Perbedaannya, pada sistem modern, keputusan itu makin sering

dibantu oleh perangkat lunak, data sensor, atau model prediksi. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa estimasi keausan pahat pada proses frais dapat dikembangkan melalui analisis sinyal multi sensor dan algoritma machine learning. Temuan seperti ini menarik, tetapi tidak boleh membuat pembahasan dasar menjadi kabur. Sensor hanya dapat membaca gejala proses; pemahaman mekanis tetap diperlukan untuk menafsirkan mengapa pahat aus, mengapa getaran meningkat, atau mengapa permukaan benda kerja memburuk. Dengan kata lain, teknologi digital memperkaya teknologi mesin perkakas, bukan menggantikannya secara penuh.

Satu hal yang sering kurang diperhatikan adalah peran benda kerja sebagai bagian aktif dalam proses. Benda kerja bukan sekadar objek pasif yang dipotong. Sifat materialnya menentukan respons terhadap panas, gaya, dan gesekan. Aluminium cenderung lebih mudah dipotong, tetapi dapat menempel pada pahat jika kondisi tidak tepat. Baja keras membutuhkan pahat dan parameter yang lebih hati-hati. Besi tuang menghasilkan geram yang berbeda dari baja liat. Perbedaan seperti ini membuat pengertian teknologi mesin perkakas selalu terkait dengan ilmu bahan. Pahat juga memiliki kedudukan sentral. Bentuk pahat, sudut potong, radius ujung, bahan pahat, dan kondisi ketajaman akan mempengaruhi proses. Pahat yang sesuai dapat menyayat dengan stabil, menghasilkan geram yang terkontrol, dan menjaga permukaan benda kerja tetap baik. Pahat yang salah dapat menimbulkan panas berlebih, permukaan kasar, suara berisik, atau kerusakan pada benda kerja. Das et al. (2022) dalam kajian pemesinan keras menunjukkan bahwa kecepatan, gerak makan, dan kedalaman potong berkaitan dengan respons seperti kekasaran permukaan, gaya potong, dan keausan pahat.

Pencekaman merupakan unsur yang tampak sederhana, tetapi sangat menentukan. Benda kerja yang tidak tercekam kuat dapat bergeser, bergetar, atau terlepas. Pada mesin bubut, chuck, collet, dua senter, dan face plate dipilih sesuai bentuk serta ukuran benda kerja. Pada mesin frais atau sekrap, ragum dan klem dipakai untuk menjaga posisi benda kerja selama penyayatan. Ketepatan pencekaman bukan hanya masalah keamanan, melainkan juga masalah kualitas. Benda kerja yang miring sedikit saja dapat menghasilkan ukuran yang salah. Teknologi mesin perkakas juga memuat dimensi keselamatan kerja. Proses pemesinan melibatkan benda berputar, sisi tajam, geram panas, cairan pendingin, serta

gaya potong yang cukup besar. Kesalahan kecil, seperti lengan baju terlalu longgar di dekat spindel atau kunci chuck tertinggal pada kepala tetap, dapat menimbulkan risiko serius. Karena itu, memahami mesin perkakas berarti memahami batas aman pengoperasian mesin, bukan hanya mengejar kecepatan kerja. Operator yang baik tidak sekadar cepat, tetapi mampu bekerja terkendali.

Dalam pembelajaran awal, teknologi mesin perkakas sebaiknya dipahami melalui hubungan antara bentuk yang ingin dibuat dan proses yang paling masuk akal untuk mencapainya. Benda berbentuk poros lebih mudah dipahami melalui mesin bubut. Bidang datar, alur, atau permukaan bertingkat sering lebih sesuai dikerjakan dengan mesin frais atau sekrap. Lubang dikerjakan dengan mesin gurdi, meskipun penyelesaian lebih presisi dapat melibatkan proses lain seperti reaming atau boring. Kepala pembagi digunakan ketika pekerjaan membutuhkan pembagian sudut atau keliling, misalnya pada pembuatan roda gigi atau bidang bersisi banyak. Pembengkokan seperti itu membantu kita melihat bahwa setiap mesin memiliki wilayah kerja yang khas. Tidak semua bentuk harus dipaksakan pada satu mesin. Pilihan proses yang tepat justru menjadi bagian dari kecakapan teknologi mesin perkakas. Seorang teknisi perlu bertanya, bentuk apa yang dibutuhkan, material apa yang digunakan, toleransi seperti apa yang diminta, alat apa yang tersedia, dan risiko apa yang perlu dikendalikan. Pertanyaan pertanyaan ini membuat pemesinan menjadi kegiatan yang sistematis, bukan sekadar mencoba sampai berhasil.

Teknologi mesin perkakas juga memiliki hubungan erat dengan waktu produksi dan biaya. Parameter pemotongan yang terlalu konservatif dapat membuat waktu pengerjaan terlalu lama. Sebaliknya, parameter yang terlalu agresif dapat mempercepat kerusakan pahat, menurunkan kualitas permukaan, dan meningkatkan kemungkinan produk ditolak. Keseimbangan antara produktivitas dan kualitas merupakan persoalan nyata dalam bengkel maupun industri. Kadang pilihan terbaik bukan yang paling cepat, melainkan yang paling stabil dan dapat diulang dengan hasil konsisten. Di sisi lain, perkembangan teknologi tidak menghapus kebutuhan terhadap keterampilan manual. Mesin modern dapat menyimpan program, membaca koordinat, dan menjalankan lintasan pahat secara otomatis. Namun, pengaturan

awal, pemilihan alat, pemasangan benda kerja, pemeriksaan ukuran, serta interpretasi kondisi pemotongan tetap membutuhkan manusia yang memahami proses. Bahkan ketika sistem sudah terotomasi, kesalahan konsep pada tahap perencanaan dapat menghasilkan kesalahan berulang dengan kecepatan lebih tinggi. Inilah alasan mengapa dasar mesin perkakas tetap relevan di tengah otomasi.

Pengertian teknologi mesin perkakas juga perlu mencakup pengendalian kualitas. Hasil pemesinan harus diperiksa dengan alat ukur yang sesuai. Diameter poros dapat diperiksa dengan mikrometer, panjang dengan jangka sorong, kerataan dengan dial indikator atau metode lain yang relevan. Pemeriksaan tidak hanya dilakukan setelah semua proses selesai. Pada pekerjaan tertentu, pengukuran antara perlu dilakukan agar kesalahan tidak terlambat diketahui. Sikap seperti ini membentuk budaya kerja presisi. Dalam konteks pembelajaran, istilah seperti cutting speed, feed, depth of cut, roughing, finishing, tool life, dan surface roughness sebaiknya tidak hanya diterjemahkan, tetapi dipahami maknanya dalam proses nyata. Cutting speed bukan sekadar angka pada rumus, melainkan kecepatan relatif yang mempengaruhi panas dan keausan. Feed bukan sekadar gerak makan, melainkan penentu ketebalan geram dan tekstur permukaan. Depth of cut bukan hanya kedalaman pemotongan, melainkan besaran beban yang diterima pahat dan mesin.

B. Fungsi Mesin Perkakas dalam Proses Pemesinan

Mesin perkakas memiliki fungsi utama sebagai sarana untuk mengubah benda kerja menjadi komponen yang memiliki bentuk, ukuran, dan kualitas tertentu. Dalam proses pemesinan, bahan awal jarang langsung memiliki bentuk yang sesuai dengan kebutuhan rancangan. Sebatang baja, aluminium, atau besi tuang masih perlu dibentuk melalui penyayatan yang terarah. Mesin perkakas menyediakan gerak, kekakuan, dan kendali agar penyayatan itu tidak berlangsung sembarangan, melainkan mengikuti ukuran dan bentuk yang sudah direncanakan. Fungsi mesin perkakas dapat dibaca sebagai penghubung antara gambar teknik dan benda nyata. Gambar teknik memuat diameter, panjang, alur, lubang, bidang rata, sudut, toleransi, serta simbol kekasaran permukaan. Semua itu masih berupa informasi sampai mesin perkakas bekerja mengubahnya menjadi bentuk fisik. Di bengkel, proses ini tampak sederhana. Operator memasang benda kerja, memilih pahat,

mengatur putaran, lalu menyayat material. Namun di balik tindakan yang tampak rutin itu, terdapat keputusan teknis yang menentukan apakah hasilnya layak digunakan atau hanya sekadar menyerupai bentuk rancangan.

Mesin perkakas juga berfungsi sebagai pengendali gerak relatif antara alat potong dan benda kerja. Pada proses bubut, benda kerja berputar dan pahat bergerak menyayat secara translasi. Pada proses frais, pisau frais berputar, sedangkan benda kerja digerakkan melalui meja mesin. Pada proses gurdi, mata gurdi berputar sambil bergerak masuk ke dalam benda kerja untuk membuat lubang. Pada proses sekrup, pahat bergerak maju mundur dan pemotongan terjadi saat langkah maju. Perbedaan gerak ini menunjukkan bahwa setiap mesin memiliki cara sendiri dalam membuang material. Pembuangan material menjadi inti dari proses pemesinan, tetapi fungsi mesin perkakas tidak berhenti pada kegiatan memotong. Mesin harus mampu menjaga posisi pahat terhadap benda kerja agar ukuran tetap terkendali. Sedikit pergeseran pada benda kerja dapat membuat diameter poros tidak sesuai, bidang menjadi miring, atau lubang bergeser dari titik yang ditentukan. Karena itu, mesin perkakas bekerja bukan hanya sebagai alat produksi, tetapi juga sebagai alat kendali geometri.

Dalam manufaktur, geometri komponen sering lebih penting daripada bentuk kasatmata. Dua benda kerja mungkin terlihat sama, tetapi salah satunya gagal dipasang karena selisih diameter hanya beberapa persepuluh milimeter. Situasi seperti ini lazim terjadi pada poros, rumah bantalan, roda gigi, atau komponen sambungan. Ivanov et al. (2025) menempatkan kualitas produk manufaktur dalam hubungan dengan ketelitian ukuran, bentuk, kekasaran permukaan, dan kesesuaian terhadap persyaratan teknis. Pandangan ini membantu menjelaskan mengapa fungsi mesin perkakas selalu dekat dengan pengendalian kualitas. Fungsi berikutnya adalah menyediakan gerak utama. Gerak utama merupakan gerakan yang membuat proses pemotongan terjadi. Tanpa gerak utama, pahat hanya menyentuh benda kerja tanpa menyayatnya. Pada mesin bubut, putaran spindel menghasilkan gerak utama melalui benda kerja. Pada mesin frais dan gurdi, putaran spindel diberikan pada alat potong. Pada mesin sekrup, gerak utama muncul dari langkah maju pahat. Meskipun mekanismenya berbeda, tujuan dasarnya sama, yaitu menciptakan kecepatan relatif antara pahat dan material.

Selain gerak utama, mesin perkakas berfungsi mengatur gerak makan. Gerak makan menentukan perpindahan pahat atau benda kerja dari satu bagian material ke bagian lain selama proses berlangsung. Pada pembubutan memanjang, pahat bergerak sejajar sumbu benda kerja. Pada pembubutan penampang atau facing, pahat bergerak ke arah radial. Pada frais, meja mesin dapat digerakkan pada sumbu tertentu untuk menghasilkan bidang atau alur. Gerak makan yang tepat membuat penyayatan berlangsung stabil, sedangkan gerak makan yang kurang tepat dapat mempercepat keausan pahat atau membuat permukaan menjadi kasar. Kedalaman potong juga dikendalikan melalui mesin perkakas. Kedalaman potong menunjukkan seberapa besar lapisan material yang diambil dalam satu lintasan. Pada pekerjaan awal atau roughing, kedalaman potong biasanya dibuat lebih besar agar material cepat berkurang. Pada pekerjaan akhir atau finishing, kedalaman potong dibuat lebih kecil agar ukuran dan permukaan lebih terjaga. Meski begitu, keputusan ini tidak boleh dibuat secara kaku. Material, pahat, kekakuan mesin, dan kekuatan pencekaman tetap perlu dipertimbangkan.

Fungsi mesin perkakas dalam proses pemesinan juga tampak dari kemampuannya menghasilkan bentuk yang berbeda-beda. Mesin bubut lebih dekat dengan pekerjaan berbentuk silindris, tirus, ulir, alur, dan permukaan ujung. Mesin frais mampu menghasilkan bidang datar, permukaan bertingkat, alur, slot, dan profil tertentu. Mesin sekrap digunakan untuk bidang rata, bidang tegak, bidang menyudut, serta alur tertentu. Mesin gurdi dipakai untuk membuat lubang awal, memperbesar lubang, atau menyiapkan proses lanjutan. Masing-masing mesin tidak berdiri sebagai alat yang serba bisa, tetapi sebagai pilihan proses yang perlu disesuaikan dengan bentuk kerja. Di sinilah fungsi mesin perkakas berhubungan dengan perencanaan proses. Sebelum benda kerja dipasang pada mesin, perlu diputuskan proses apa yang paling tepat. Sebuah poros bertingkat lebih masuk akal dikerjakan pada mesin bubut. Sebuah pelat dengan alur lurus dapat dikerjakan pada mesin frais atau sekrap, tergantung ukuran, jumlah, dan tingkat ketelitian yang diminta. Lubang baut pada bidang datar biasanya dimulai dengan proses gurdi. Jika komponen membutuhkan pembagian keliling, misalnya segi enam atau roda gigi, kepala pembagi dapat dipakai sebagai alat bantu pada mesin frais.

Pemilihan mesin yang tepat membantu mengurangi waktu pengerjaan dan menekan risiko kesalahan. Memaksakan suatu bentuk pada mesin yang kurang sesuai bisa saja dilakukan, tetapi sering tidak efisien. Hasilnya mungkin lebih lama, lebih sulit dijepit, atau lebih besar kemungkinan menyimpang. Dalam praktik bengkel, kecermatan memilih mesin sering menjadi pembeda antara pekerjaan yang lancar dan pekerjaan yang penuh penyesuaian ulang. Pengalaman operator memang penting, tetapi pengalaman itu tetap perlu ditopang pemahaman proses. Mesin perkakas juga berfungsi sebagai tempat bertemunya pahat, benda kerja, dan parameter pemotongan. Pahat tidak dapat bekerja sendiri. Benda kerja tidak dapat berubah bentuk tanpa gerak dan gaya. Parameter pemotongan tidak bermakna jika mesin tidak mampu menjalankannya secara stabil. Kecepatan potong, putaran spindel, gerak makan, dan kedalaman potong perlu dipilih sebagai satu kesatuan. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kualitas kekasaran permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat pahat, dan sifat benda kerja. Ini menunjukkan bahwa fungsi mesin perkakas selalu bersifat sistemik, bukan tunggal. Fungsi mesin perkakas sebagai penopang produktivitas muncul melalui pembagian pekerjaan kasar dan pekerjaan akhir. Pada tahap roughing, tujuan utamanya adalah mengurangi material dalam waktu relatif singkat. Permukaan yang dihasilkan belum harus sangat halus, asalkan ukuran masih menyisakan batas untuk pengerjaan akhir. Pada tahap finishing, fokus kerja bergeser pada ketepatan ukuran dan kualitas permukaan. Pola ini membuat proses pemesinan lebih masuk akal karena kecepatan produksi dan kualitas hasil tidak diperlakukan sebagai hal yang saling meniadakan.

Mesin perkakas juga berfungsi menjaga pengulangan hasil. Dalam produksi satuan, operator mungkin hanya perlu membuat satu komponen. Dalam produksi berulang, mesin harus mampu menghasilkan bentuk yang sama berkali-kali. Hal ini membutuhkan pencekaman yang konsisten, setelan parameter yang stabil, dan pemeriksaan ukuran yang teratur. Kesalahan kecil yang diulang dalam produksi banyak akan menjadi kerugian besar. Karena itu, fungsi mesin perkakas dalam industri tidak hanya membentuk, tetapi juga menjaga konsistensi. Pada proses pemesinan, fungsi keselamatan tidak boleh ditempatkan sebagai tambahan belaka. Mesin perkakas bekerja dengan putaran, gaya potong, geram tajam,

panas, dan bagian bergerak. Benda kerja yang tidak tercekam kuat dapat terlepas. Pahat yang dipasang terlalu panjang dapat bergetar atau patah. Kunci chuck yang tertinggal pada mesin bubut dapat menjadi bahaya serius saat spindel berputar. Maka, fungsi mesin perkakas harus selalu dibaca bersama prosedur kerja aman. Pencekaman adalah salah satu bentuk nyata dari fungsi keselamatan sekaligus fungsi ketelitian. Pada mesin bubut, benda kerja dapat dipasang dengan dua senter, chuck, collet, atau face plate. Pilihan tersebut bergantung pada bentuk dan ukuran benda kerja. Benda kerja panjang membutuhkan dukungan agar tidak melentur. Benda kerja pendek dapat dijepit langsung pada chuck. Benda kerja dengan bentuk tidak beraturan sering membutuhkan face plate dan klem tambahan. Jika pencekaman tidak sesuai, proses yang secara teori benar dapat menghasilkan benda kerja yang salah.

Fungsi mesin perkakas juga berkaitan dengan pembentukan permukaan. Komponen mesin tidak hanya dituntut memiliki ukuran yang benar, tetapi juga permukaan yang sesuai dengan fungsi pakainya. Permukaan poros yang terlalu kasar dapat mempercepat keausan bantalan. Bidang dudukan yang tidak rata dapat menyebabkan sambungan tidak stabil. Lubang yang buruk dapat menyulitkan pemasangan baut atau pin. Karena itu, proses pemesinan selalu berhubungan dengan kualitas permukaan, bukan hanya pengurangan material. Trinh (2024) menekankan bahwa prediksi kekasaran permukaan dapat membantu pemilihan kondisi pemotongan, mengurangi biaya, dan meningkatkan kualitas hasil pemesinan. Gagasan ini sejalan dengan praktik bengkel. Operator yang memahami hubungan antara putaran, gerak makan, jenis pahat, dan material akan lebih mudah menyesuaikan proses. Ia tidak sekadar menaikkan kecepatan untuk mempercepat pekerjaan, tetapi memperkirakan akibatnya pada pahat, panas, geram, dan permukaan benda kerja.

Fungsi mesin perkakas dalam konteks modern juga meluas ke efisiensi energi. Produksi tidak lagi hanya dinilai dari jumlah komponen yang dihasilkan. Energi yang dipakai, umur pahat, penggunaan cairan pendingin, dan waktu tidak produktif mulai menjadi perhatian. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan melalui integrasi peralatan, proses, dan strategi. Pawanr dan Gupta (2024) juga menunjukkan bahwa efisiensi energi dalam proses pemesinan dapat ditingkatkan melalui desain

mesin, pemodelan konsumsi energi, optimasi parameter, dan pemanfaatan kecerdasan buatan. Hal ini membuat fungsi mesin perkakas semakin luas, dari alat pembentuk komponen menjadi bagian dari sistem manufaktur yang efisien. Meski teknologi terus bergerak ke arah digital, fungsi dasar mesin perkakas tidak berubah secara mendasar. Mesin tetap harus menghasilkan gerak, menahan benda kerja, membawa pahat, dan mengendalikan penyayatan. Sensor, perangkat lunak, dan sistem otomatisasi membantu membaca kondisi proses, tetapi tidak menggantikan prinsip dasar pemotongan. Putaran yang salah tetap menghasilkan panas berlebih. Pencekaman yang buruk tetap memicu getaran. Pahat yang aus tetap menurunkan kualitas permukaan.

Perkembangan computer numerical control atau CNC memperlihatkan fungsi mesin perkakas yang lebih terprogram. Pada mesin CNC, lintasan pahat dapat diatur melalui kode dan perangkat lunak. Namun, program yang baik tetap memerlukan pengetahuan tentang pahat, material, urutan proses, dan parameter pemotongan. Program dapat menjalankan lintasan dengan teliti, tetapi ia tidak otomatis memahami bahwa benda kerja terlalu panjang, pahat terlalu kecil, atau pencekaman kurang aman. Peran manusia tetap hadir pada tahap perencanaan, pengaturan, dan evaluasi hasil. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa estimasi keausan pahat pada proses frais dapat dilakukan melalui sinyal multi sensor dan algoritma machine learning. Informasi semacam ini memperkaya cara membaca fungsi mesin perkakas. Mesin tidak lagi hanya dipandang sebagai alat yang bergerak, tetapi sebagai sumber data proses. Getaran, suara, arus motor, dan temperatur dapat memberi petunjuk tentang kondisi pahat atau stabilitas pemotongan. Meski begitu, data hanya bermanfaat jika ditafsirkan dengan pemahaman proses yang memadai.

Dalam pekerjaan nyata, keausan pahat menjadi salah satu faktor yang paling sering mengganggu fungsi mesin perkakas. Pahat yang aus membuat gaya potong meningkat, permukaan memburuk, dan ukuran sulit dijaga. Das et al. (2022) memperlihatkan bahwa pemodelan berbasis machine learning dapat digunakan untuk mengoptimalkan parameter pada proses bubut keras dan memprediksi karakteristik pemesinan seperti kekasaran permukaan. Temuan ini memberi gambaran bahwa fungsi mesin perkakas kini juga dipahami melalui pendekatan prediktif, tidak hanya melalui pengalaman operator. Fungsi mesin

perkakas sebagai alat pendidikan teknik juga penting. Melalui mesin perkakas, pembelajar dapat melihat hubungan langsung antara teori dan hasil. Rumus kecepatan potong tidak lagi menjadi angka abstrak ketika putaran spindel benar benar diatur. Gerak makan tidak lagi sekadar istilah ketika terlihat bekas sayatan pada permukaan benda kerja. Kedalaman potong menjadi nyata ketika pahat mulai mengambil material dan mesin mulai menerima beban. Pengalaman ini sulit digantikan oleh teori saja. Agar fungsi tersebut mudah dibayangkan, alur kerja pemesinan dapat dijelaskan sebagai ilustrasi konseptual. Proses dimulai dari kebutuhan bentuk komponen, lalu dilanjutkan dengan pemilihan material. Setelah itu dipilih mesin yang sesuai, alat potong yang tepat, metode pencekaman yang aman, dan parameter pemotongan yang wajar. Benda kerja kemudian disayat, diperiksa, dan bila perlu disesuaikan kembali. Ilustrasi ini menegaskan bahwa mesin perkakas bekerja di tengah rangkaian keputusan, bukan sebagai alat yang berdiri sendiri. Fungsi ekonomi mesin perkakas juga tidak dapat diabaikan. Mesin yang digunakan dengan parameter tepat dapat mempercepat pengerjaan, memperpanjang umur pahat, dan mengurangi benda kerja gagal. Sebaliknya, kesalahan memilih proses dapat membuat biaya meningkat. Waktu terbuang untuk penyetelan ulang, pahat cepat rusak, dan benda kerja mungkin harus dibuat ulang. Dalam produksi, kegagalan seperti itu tidak hanya merugikan secara teknis, tetapi juga secara finansial.

Dalam bengkel kecil, fungsi mesin perkakas sering terlihat dari fleksibilitasnya. Satu mesin bubut dapat digunakan untuk membuat poros, meratakan ujung benda kerja, membuat ulir, membuat alur, atau memotong benda kerja. Mesin frais dapat dipakai untuk bidang datar, alur, permukaan bertingkat, dan pekerjaan pembagian tertentu dengan alat bantu. Fleksibilitas ini membuat mesin perkakas menjadi tulang punggung pekerjaan manufaktur, perawatan, dan perbaikan. Dalam industri yang lebih besar, fungsi mesin perkakas bergerak menuju spesialisasi. Mesin dapat dirancang untuk pekerjaan tertentu dengan kecepatan tinggi, pengulangan yang baik, dan integrasi dengan sistem produksi lain. Pada tingkat ini, fungsi mesin perkakas bukan hanya menghasilkan komponen, tetapi juga masuk ke dalam aliran produksi. Mesin harus selaras dengan jadwal produksi, sistem inspeksi, perawatan, dan kebutuhan kualitas. Kinerja satu mesin dapat mempengaruhi keseluruhan lini kerja. Fungsi mesin perkakas juga dapat dilihat

dari kemampuannya memperbaiki atau memulihkan komponen. Dalam kegiatan perawatan mesin, tidak semua komponen harus selalu diganti baru. Beberapa komponen dapat dibubut ulang, diratakan, dibuatkan alur baru, atau diperbesar lubangnya sesuai kebutuhan. Pekerjaan semacam ini membutuhkan kecermatan, karena benda kerja biasanya tidak lagi berbentuk bahan mentah, melainkan komponen bekas yang mungkin sudah aus atau berubah bentuk.

Ada satu hal yang perlu dipegang hati-hati. Mesin perkakas yang baik tidak menjamin hasil yang baik jika cara penggunaannya keliru. Banyak kesalahan pemesinan justru muncul bukan karena mesin tidak mampu, melainkan karena keputusan proses kurang tepat. Pahat salah pilih, benda kerja kurang kuat dicekam, kecepatan terlalu tinggi, gerak makan terlalu besar, atau pengukuran tidak dilakukan pada waktu yang semestinya. Maka, fungsi mesin perkakas hanya berjalan penuh ketika mesin, operator, alat potong, benda kerja, dan metode kerja berada dalam hubungan yang benar.

C. Prinsip Dasar Pemotongan: Gerak Utama, Gerak Makan, dan Kedalaman Potong

Prinsip dasar pemotongan merupakan inti dari setiap proses pemesinan. Apa pun jenis mesinnya, baik bubut, frais, sekrup, maupun gundi, proses pembentukan benda kerja selalu terjadi karena ada gerakan relatif antara alat potong dan material yang dikerjakan. Gerakan ini tidak muncul secara acak. Mesin perkakas mengaturnya agar pahat dapat menyayat material secara terkendali, menghasilkan geram, dan membentuk permukaan sesuai ukuran yang direncanakan. Dalam pemesinan, benda kerja tidak dibentuk dengan cara menekan material secara bebas, melainkan dengan membuang bagian yang tidak diperlukan. Bagian yang terbuang itu disebut geram. Geram dapat berbentuk serpihan pendek, pita memanjang, atau pecahan kecil, tergantung jenis material, geometri pahat, serta parameter pemotongan. Dari sini terlihat bahwa proses pemotongan bukan hanya soal pahat menyentuh benda kerja. Ada interaksi mekanis, panas, gesekan, dan perubahan bentuk material yang berlangsung sangat cepat di sekitar mata potong.

Tiga unsur yang selalu muncul dalam proses pemotongan adalah gerak utama, gerak makan, dan kedalaman potong. Ketiganya sering dibahas secara terpisah agar mudah dipahami,

tetapi dalam praktiknya bekerja bersama. Gerak utama menciptakan kecepatan pemotongan. Gerak makan mengarahkan pahat atau benda kerja agar penyayatan bergerak sepanjang lintasan tertentu. Kedalaman potong menentukan tebal lapisan material yang diambil dalam satu lintasan. Jika salah satu unsur dipilih secara keliru, hasil pemesinan dapat berubah cukup jauh. Gerak utama adalah gerakan yang membuat proses penyayatan benar benar terjadi. Pada mesin bubut, gerak utama berupa putaran benda kerja yang dijepit pada spindel. Pahat diam relatif terhadap dudukannya, lalu bergerak menyayat mengikuti arah tertentu. Pada mesin frais, gerak utama berasal dari putaran pisau frais atau cutter. Pada mesin gurdi, mata gurdi berputar dan sekaligus bergerak masuk ke benda kerja. Pada mesin sekrap, gerak utama berasal dari langkah maju pahat, sedangkan langkah balik umumnya tidak melakukan penyayatan.

Perbedaan sumber gerak utama ini membuat tiap mesin memiliki karakter kerja yang berbeda. Mesin bubut sangat cocok untuk benda berbentuk silindris karena benda kerja berputar pada sumbunya. Mesin frais lebih sesuai untuk bidang datar, alur, atau bentuk bertingkat karena alat potong bermata jamak dapat menyayat permukaan secara berulang. Mesin sekrap bekerja dengan pahat bermata tunggal yang bergerak lurus, sehingga lazim dipakai untuk bidang datar atau alur tertentu. Mesin gurdi lebih khusus digunakan untuk membuat lubang atau memperbesar lubang. Gerak utama berkaitan langsung dengan kecepatan potong atau cutting speed. Kecepatan potong menunjukkan jarak tempuh titik potong dalam satuan waktu. Dalam proses bubut, nilai ini berkaitan dengan diameter benda kerja dan putaran spindel. Secara umum, semakin besar diameter benda kerja pada kecepatan potong yang sama, putaran spindel perlu dibuat lebih rendah. Sebaliknya, benda kerja berdiameter kecil membutuhkan putaran lebih tinggi untuk mencapai kecepatan potong yang sama. Hubungan ini sering menjadi sumber kesalahan bagi pemula, karena mereka melihat putaran mesin, tetapi belum tentu memahami kecepatan potong yang terjadi di permukaan benda kerja.

Pada pembubutan, rumus umum kecepatan potong dapat ditulis sebagai $v = \pi \times d \times n \div 1000$, dengan v sebagai kecepatan potong dalam meter per menit, d sebagai diameter benda kerja dalam milimeter, dan n sebagai putaran spindel dalam putaran per menit. Rumus ini tidak dimaksudkan untuk membuat pembahasan

terasa matematis semata. Justru dari rumus sederhana itu terlihat bahwa diameter benda kerja dan putaran spindel tidak dapat dipilih secara terpisah. Keduanya membentuk kondisi pemotongan yang menentukan panas, gaya potong, dan umur pahat. Pemilihan kecepatan potong perlu memperhatikan jenis material benda kerja dan bahan pahat. Material lunak seperti aluminium biasanya dapat dikerjakan dengan kecepatan potong lebih tinggi dibandingkan baja keras. Pahat karbida umumnya mampu bekerja pada kecepatan lebih tinggi daripada pahat baja kecepatan tinggi atau high speed steel. Namun, anggapan bahwa kecepatan lebih tinggi selalu lebih baik perlu dihindari. Kecepatan yang terlalu tinggi dapat mempercepat keausan pahat, menaikkan temperatur, dan menurunkan kualitas permukaan.

Kajian pemesinan modern tetap menempatkan kecepatan potong sebagai variabel penting. Das et al. (2022) menunjukkan bahwa kecepatan, gerak makan, dan kedalaman potong digunakan sebagai parameter masukan dalam pemodelan proses bubut keras untuk memprediksi kekasaran permukaan, gaya potong, dan keausan pahat. Artinya, tiga unsur dasar yang dipelajari pada mesin konvensional masih menjadi dasar analisis pada pendekatan modern berbasis data. Perbedaannya terletak pada cara membaca dan mengoptimalkan proses, bukan pada hilangnya prinsip dasar pemotongan. Gerak makan atau feeding adalah perpindahan pahat atau benda kerja selama proses penyayat berlangsung. Jika gerak utama membuat pemotongan terjadi, gerak makan membuat pemotongan berjalan mengikuti lintasan kerja. Pada mesin bubut, gerak makan dapat berlangsung sejajar sumbu benda kerja atau ke arah radial. Gerak makan sejajar sumbu biasanya digunakan pada pembubutan memanjang. Gerak makan radial digunakan pada pembubutan muka atau facing. Perbedaan arah ini mengubah bentuk permukaan yang dihasilkan.

Pada mesin frais, gerak makan biasanya diberikan melalui gerakan meja mesin. Benda kerja digerakkan terhadap pisau frais yang berputar. Karena pisau frais memiliki beberapa mata potong, gerak makan juga dapat dinyatakan sebagai gerak makan per gigi atau feed per tooth. Nilai ini menentukan beban yang diterima tiap mata potong saat menyayat. Jika gerak makan terlalu kecil, proses menjadi lambat dan pahat dapat bergesekan terlalu lama dengan permukaan benda kerja. Jika terlalu besar, beban pahat meningkat, permukaan menjadi kasar, dan risiko patah pahat bertambah. Pada

mesin sekrap, gerak makan memiliki karakter lain. Pahat melakukan penyayatan pada langkah maju, lalu kembali tanpa memotong pada langkah balik. Gerak makan diberikan secara bertahap setiap siklus langkah, sehingga permukaan benda kerja tersayat sedikit demi sedikit. Pada mesin gurdi, gerak makan terjadi saat mata gurdi bergerak masuk ke dalam material. Nilainya mempengaruhi pembentukan geram, gaya dorong, temperatur, dan kualitas lubang.

Gerak makan memiliki pengaruh kuat terhadap kekasaran permukaan. Pada banyak proses, semakin besar gerak makan, bekas sayatan pada permukaan cenderung lebih jelas. Namun, hubungan ini tidak selalu berdiri sendiri. Radius ujung pahat, kekakuan mesin, jenis material, cairan pendingin, dan kondisi pahat juga ikut menentukan. Trinh (2024) menegaskan bahwa prediksi kekasaran permukaan dalam pemesinan perlu mempertimbangkan parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pernyataan ini penting karena mencegah pemahaman yang terlalu sederhana, seolah olah satu parameter saja dapat menjelaskan seluruh kualitas hasil. Kedalaman potong atau depth of cut menunjukkan seberapa besar lapisan material yang dibuang dalam satu lintasan penyayatan. Pada mesin bubut, kedalaman potong dapat dipahami sebagai selisih radial antara diameter awal dan diameter akhir benda kerja. Jika diameter awal benda kerja 40 mm dan setelah dibubut menjadi 38 mm, pengurangan diameter total adalah 2 mm, sedangkan kedalaman potong radialnya 1 mm. Contoh sederhana ini membantu membedakan antara pengurangan diameter dan kedalaman potong yang benar benar diterima oleh pahat.

Dalam pekerjaan kasar atau roughing, kedalaman potong biasanya dibuat lebih besar agar material cepat berkurang. Pada tahap ini, tujuan utamanya bukan memperoleh permukaan paling halus, melainkan mendekatkan benda kerja ke ukuran akhir secara efisien. Pada pekerjaan akhir atau finishing, kedalaman potong dibuat lebih kecil agar ukuran lebih mudah dikontrol dan permukaan lebih halus. Pemilihan ini tidak boleh dilakukan hanya berdasarkan kebiasaan. Kondisi mesin, panjang benda kerja, kekakuan pencekaman, jenis pahat, dan material tetap harus diperiksa.

Kecepatan potong yang tinggi mungkin masih aman jika gerak makan dan kedalaman potong rendah. Gerak makan yang

cukup besar mungkin masih dapat diterima jika material lunak dan pahat kuat. Kedalaman potong besar dapat menghemat waktu pada roughing, tetapi hanya jika mesin, pahat, dan pencekaman mampu menahan gaya pemotongan. Di sinilah penilaian teknis dibutuhkan. Keseimbangan ketiga parameter tersebut sering disebut kondisi pemotongan atau cutting condition. Kondisi pemotongan yang baik bukan selalu yang paling cepat, melainkan yang paling sesuai dengan tujuan kerja. Untuk membuat poros kasar sebelum ukuran akhir, pilihan parameter dapat dibuat lebih agresif. Untuk membuat permukaan akhir yang akan bersentuhan dengan bantalan, parameter harus lebih hati-hati. Situasi ini menunjukkan bahwa pemesinan selalu memiliki konteks. Angka parameter tidak boleh dilepaskan dari fungsi komponen yang sedang dikerjakan.

Pada proses bubut, hubungan antara diameter benda kerja dan putaran spindel layak diberi perhatian khusus. Benda kerja berdiameter besar memiliki keliling yang lebih panjang. Jika diputar terlalu cepat, kecepatan potong pada permukaannya dapat menjadi terlalu tinggi. Benda kerja kecil sebaliknya membutuhkan putaran lebih tinggi agar kecepatan potongnya cukup. Karena itu, operator tidak seharusnya menghafal satu angka putaran untuk semua diameter. Ia perlu memahami hubungan antara diameter, putaran, dan kecepatan potong. Pada proses frais, prinsip yang sama muncul melalui diameter pisau frais. Pisau berdiameter besar menghasilkan kecepatan potong lebih tinggi pada putaran yang sama dibandingkan pisau kecil. Jumlah mata potong juga mempengaruhi gerak makan total. Jika pisau memiliki banyak gigi, meja dapat bergerak lebih cepat pada feed per tooth yang sama. Namun, ini tetap perlu disesuaikan dengan kekuatan pahat, kekakuan mesin, dan bentuk benda kerja. Pengaturan yang tampak menghemat waktu dapat menjadi masalah jika menyebabkan getaran atau permukaan bergelombang.

Pada proses gurdi, gerak utama dan gerak makan bekerja secara bersamaan pada mata gurdi. Mata gurdi berputar untuk memotong, lalu bergerak aksial untuk masuk ke dalam benda kerja. Jika gerak makan terlalu besar, lubang dapat menjadi kasar, mata gurdi terbebani, dan geram sulit keluar. Jika gerak makan terlalu kecil, mata gurdi dapat lebih banyak menggesek daripada memotong. Gesekan ini menaikkan temperatur dan dapat mempercepat tumpulnya sisi potong. Pada proses sekrap, pemotongan terjadi secara tidak kontinu karena pahat menyayat

pada langkah maju dan kembali pada langkah balik. Walaupun ritmenya berbeda dari bubut dan frais, prinsip dasar tetap sama. Ada gerak utama, ada gerak makan, dan ada kedalaman potong. Pemahaman ini membantu kita melihat bahwa perbedaan antar mesin bukan berarti prinsip pemotongannya benar benar terpisah. Mesin hanya memberi bentuk gerak yang berbeda untuk tujuan penyayatan yang sama.

Kedalaman potong juga berhubungan dengan gaya potong. Semakin tebal lapisan material yang diambil, semakin besar gaya yang harus ditahan oleh pahat, mesin, dan alat cekam. Pada benda kerja panjang, gaya ini dapat menyebabkan lenturan. Pada pahat yang dipasang terlalu menjulur, gaya tersebut dapat menimbulkan getaran. Pada pencekaman yang kurang kuat, benda kerja dapat bergeser. Maka, pemilihan kedalaman potong sebenarnya bukan hanya persoalan kecepatan produksi, melainkan juga persoalan kestabilan sistem kerja. Keausan pahat menjadi salah satu akibat langsung dari pemilihan parameter yang kurang tepat. Pahat yang dipaksa bekerja pada kecepatan tinggi, gerak makan besar, dan kedalaman potong besar akan menerima panas dan beban mekanis yang lebih berat. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa estimasi keausan pahat pada proses frais dapat dilakukan melalui sinyal multi sensor dan algoritma machine learning. Walaupun pendekatan ini sudah modern, gejala yang dibaca tetap berasal dari proses dasar yang sama, yaitu interaksi antara pahat, benda kerja, gerak makan, dan kedalaman pemotongan.

Kualitas permukaan juga sangat dipengaruhi oleh tiga parameter dasar tersebut. Permukaan yang terlalu kasar dapat mengganggu fungsi komponen, terutama pada pasangan gesek,udukan bantalan, atau bidang sambungan. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa kualitas produk manufaktur berkaitan dengan ketelitian, kekasaran permukaan, dan kemampuan komponen memenuhi persyaratan teknis. Dalam konteks ini, pengaturan parameter pemotongan bukan hanya persoalan bengkel, tetapi bagian dari pengendalian mutu produk. Panas yang muncul selama pemotongan tidak boleh diabaikan. Gesekan antara pahat, geram, dan benda kerja menghasilkan temperatur tinggi di daerah potong. Kecepatan potong yang naik biasanya meningkatkan temperatur. Gerak makan dan kedalaman potong yang besar juga menambah energi pemotongan. Cairan pendingin atau coolant dapat membantu menurunkan temperatur, mengurangi gesekan, dan

membawa geram keluar dari daerah potong. Namun, penggunaan pendingin tetap harus sesuai material, jenis pahat, dan jenis proses.

Pembahasan tentang parameter pemotongan juga mulai terkait dengan efisiensi energi. Mesin perkakas tidak hanya mengubah bentuk benda kerja, tetapi juga mengonsumsi energi. Pawanr dan Gupta (2024) membahas bahwa efisiensi energi pemesinan dapat ditingkatkan melalui desain mesin yang lebih efisien, pemodelan konsumsi energi, optimasi parameter, serta pemanfaatan kecerdasan buatan. Wang et al. (2023) juga menempatkan pemesinan berkelanjutan sebagai integrasi antara peralatan, proses, dan strategi. Kedua pandangan ini menunjukkan bahwa gerak utama, gerak makan, dan kedalaman potong kini tidak hanya dinilai dari sisi teknis, tetapi juga dari sisi keberlanjutan. Walaupun isu keberlanjutan terdengar seperti pembahasan industri modern, dasarnya tetap dekat dengan praktik bengkel sehari-hari. Parameter yang terlalu boros membuat mesin bekerja lebih lama atau lebih berat dari yang diperlukan. Pahat yang cepat aus menambah biaya dan limbah alat potong. Benda kerja gagal berarti material, energi, dan waktu terbuang. Maka, memahami prinsip pemotongan dengan benar sebenarnya juga membantu mengurangi pemborosan.

Dalam pembelajaran awal, kesalahan yang sering muncul adalah memperlakukan parameter pemotongan sebagai angka yang tinggal diambil dari tabel. Tabel memang membantu, terutama sebagai titik awal. Namun, tabel tidak selalu tahu kondisi mesin di bengkel, kekakuan pencekaman, kualitas pahat yang tersedia, atau pengalaman operator. Karena itu, nilai dari tabel perlu dibaca sebagai rujukan, bukan sebagai jawaban mutlak. Penyesuaian tetap dibutuhkan, terutama ketika muncul getaran, suara tidak wajar, geram berubah warna, atau ukuran mulai menyimpang. Geram dapat menjadi petunjuk awal kondisi pemotongan. Geram yang terbentuk baik biasanya menunjukkan pahat bekerja cukup stabil. Geram yang terlalu panjang dapat mengganggu keselamatan dan perlu dikendalikan. Geram yang berubah warna menjadi terlalu gelap dapat mengindikasikan panas tinggi. Geram yang pecah tidak teratur kadang menunjukkan getaran atau pemilihan parameter yang kurang sesuai. Pengamatan seperti ini memang tampak sederhana, tetapi sering berguna sebelum pengukuran yang lebih formal dilakukan.

Pada pekerjaan roughing, operator biasanya menerima permukaan yang belum halus selama ukuran masih menyisakan ruang untuk proses akhir. Gerak makan dapat dibuat lebih besar, kedalaman potong juga relatif besar, dan kecepatan potong dipilih agar pahat tetap aman. Pada pekerjaan finishing, orientasinya berubah. Gerak makan diperkecil, kedalaman potong dibuat ringan, dan kecepatan potong dapat disesuaikan untuk memperoleh permukaan yang lebih baik. Perpindahan strategi ini perlu dipahami agar satu jenis parameter tidak dipakai untuk semua tahap pekerjaan. Prinsip pemotongan juga menuntut perhatian terhadap kekakuan sistem. Sistem pemesinan terdiri atas mesin, pahat, benda kerja, dan alat cekam. Jika salah satu bagian kurang kaku, parameter yang secara teori aman bisa menjadi bermasalah. Benda kerja panjang dan ramping, misalnya, mudah melentur saat dibubut. Pahat yang menjulur terlalu jauh dari dudukannya dapat bergetar. Ragum atau chuck yang tidak menjepit dengan baik dapat membuat benda kerja bergeser. Kondisi ini membuktikan bahwa parameter pemotongan harus dibaca bersama kondisi fisik sistem.

Dalam konteks mesin modern seperti Computer Numerical Control, prinsip gerak utama, gerak makan, dan kedalaman potong tetap berlaku. Perbedaannya, pengaturan dilakukan melalui program dan sistem kendali. Program dapat mengatur lintasan pahat dengan presisi, tetapi nilai spindle speed, feed rate, dan kedalaman pemotongan tetap harus dipilih dengan benar. Mesin CNC tidak menghapus kebutuhan memahami proses. Ia justru membuat kesalahan parameter dapat terulang lebih cepat jika sejak awal perencanaannya keliru. Pemahaman prinsip pemotongan juga membantu dalam membaca klasifikasi proses pemesinan. Mesin bubut, frais, sekrup, dan gurdi tampak berbeda dari bentuk fisiknya. Namun, jika dilihat dari prinsip dasar, semuanya memiliki pola yang dapat dibandingkan. Ada sumber gerak utama, ada arah gerak makan, ada kedalaman potong, ada alat potong, ada benda kerja, dan ada hasil permukaan. Kerangka ini membuat pembahasan tiap mesin berikutnya lebih mudah dipahami.

Dalam praktik, tidak ada parameter yang benar benar bebas dari kompromi. Kecepatan tinggi dapat mempercepat pekerjaan, tetapi berisiko meningkatkan panas dan keausan. Gerak makan besar dapat menaikkan produktivitas, tetapi dapat memperkasar permukaan. Kedalaman potong besar dapat mengurangi jumlah lintasan, tetapi menaikkan gaya potong. Pilihan terbaik biasanya

berada di antara tuntutan waktu, umur pahat, kualitas permukaan, dan keselamatan kerja. Mungkin tidak selalu ada satu angka yang sempurna, tetapi selalu ada rentang kerja yang lebih masuk akal. Pemotongan yang baik dapat dikenali dari proses yang stabil. Suara mesin relatif halus, geram terbentuk wajar, pahat tidak cepat berubah warna, benda kerja tidak bergetar, dan ukuran mendekati target. Pemotongan yang buruk sering memberi tanda lebih awal. Mesin bergetar, permukaan bergaris, geram terlalu panas, atau pahat cepat tumpul. Tanda-tanda ini perlu dibaca sebagai informasi proses, bukan sekadar gangguan. Operator yang peka terhadap gejala tersebut biasanya lebih cepat melakukan koreksi.

Pemeriksaan hasil tetap diperlukan meskipun parameter sudah dipilih dengan benar. Proses pemesinan selalu memiliki variasi. Pahat dapat aus selama proses berlangsung, benda kerja dapat memuai karena panas, dan mesin dapat memiliki kelonggaran mekanis. Karena itu, pengukuran diameter, panjang, kerataan, atau kekasaran permukaan menjadi bagian dari pengendalian proses. Pemahaman parameter tanpa pemeriksaan hasil hanya menghasilkan keyakinan, belum tentu kepastian. Prinsip dasar pemotongan memberi landasan untuk memasuki pembahasan klasifikasi proses pemesinan. Setelah memahami gerak utama, gerak makan, dan kedalaman potong, kita dapat melihat mengapa mesin bubut berbeda dari mesin frais, mengapa proses gurdi memiliki karakter khusus, dan mengapa mesin sekrap menyayat dengan cara yang berbeda. Perbedaan itu tidak lagi tampak sebagai daftar istilah, melainkan sebagai variasi cara mesin mengatur hubungan antara pahat dan benda kerja.

D. Klasifikasi Proses Pemesinan: Bubut, Frais, Sekrap, Gurdi, dan Kepala Pembagi

Klasifikasi proses pemesinan diperlukan agar pembahasan mesin perkakas tidak berhenti pada daftar nama mesin. Dalam praktik bengkel, setiap mesin memiliki wilayah kerja yang khas, pola gerak yang berbeda, dan jenis hasil yang tidak selalu dapat saling menggantikan. Mesin bubut, frais, sekrap, gurdi, dan kepala pembagi dapat dipahami sebagai kelompok utama yang sering ditemui dalam pekerjaan pemesinan dasar. Kelimanya membentuk peta awal untuk membaca bagaimana benda kerja dibentuk dari bahan mentah menjadi komponen yang memiliki ukuran, bentuk, dan fungsi tertentu. Pemesinan sendiri dapat dipahami sebagai proses mengurangi material dari benda kerja melalui penyayatan

yang terkendali. Dalam proses itu selalu ada benda kerja, alat potong, gerak utama, gerak makan, kedalaman potong, dan alat bantu untuk menjaga posisi benda kerja. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa metode pemesinan mencakup proses seperti turning, drilling, reaming, milling, grinding, dan pemesinan roda gigi, dengan prinsip dan penerapan yang berbeda. Dengan cara pandang ini, klasifikasi proses bukan sekadar pemisahan nama mesin, melainkan pemisahan cara kerja.

Mesin bubut menjadi salah satu proses pemesinan paling dasar karena mekanisme kerjanya mudah diamati. Benda kerja berputar pada spindel, sedangkan pahat bergerak menyayat secara translasi. Karena gerak utama diberikan pada benda kerja, mesin bubut sangat cocok untuk membentuk permukaan yang berhubungan dengan sumbu putar. Poros, bushing, pin, ulir luar, ulir dalam, dan permukaan tirus merupakan contoh pekerjaan yang sering dikaitkan dengan mesin bubut. Dalam proses bubut, pahat yang digunakan umumnya bermata tunggal atau single point cutting tool. Satu mata potong bekerja pada satu titik kontak utama dengan benda kerja. Kondisi ini membuat proses bubut relatif mudah dipahami dari sisi prinsip pemotongan, tetapi bukan berarti selalu mudah dikerjakan. Ketelitian pembubutan sangat dipengaruhi oleh kecepatan potong, gerak makan, kedalaman potong, geometri pahat, kekakuan benda kerja, dan cara pencekaman. Das et al. (2022) menunjukkan bahwa pada proses bubut keras, parameter seperti kecepatan, gerak makan, dan kedalaman potong dapat digunakan untuk memprediksi kekasaran permukaan, gaya potong, dan keausan pahat.

Hasil utama proses bubut dapat dikelompokkan menjadi bentuk silindris, tirus, eksentris, ulir, alur, dan permukaan muka. Bentuk silindris muncul ketika diameter benda kerja dibuat seragam sepanjang sumbu. Bentuk tirus muncul ketika diameter pada salah satu ujung berbeda dari ujung lainnya. Bentuk eksentris muncul ketika benda kerja memiliki lebih dari satu sumbu putar atau pusat geometri yang tidak berhimpit. Dalam pekerjaan sehari-hari, bentuk-bentuk ini sering muncul pada poros bertingkat,udukan bantalan, pulley kecil, atau sambungan berulir. Mesin frais memiliki karakter yang berbeda. Pada proses frais, alat potong atau cutter berputar sebagai gerak utama, sedangkan benda kerja biasanya bergerak mengikuti gerak meja. Alat potong pada mesin frais memiliki lebih dari satu mata potong, sehingga sering disebut

alat potong bermata jamak atau multi point cutting tool. Karena mata potongnya bekerja bergantian, proses frais mampu menghasilkan bidang datar, bidang bertingkat, alur, slot, permukaan menyudut, dan profil yang lebih kompleks dibandingkan banyak operasi dasar pada mesin bubut.

Frais sering dipilih ketika benda kerja tidak berpusat pada sumbu putar. Pelat yang harus dibuat alur, blok yang memerlukan bidang datar presisi, atau komponen dengan permukaan bertingkat lebih mudah dijelaskan melalui proses frais. Pada mesin frais, gerak dapat terjadi pada sumbu X, Y, dan Z. Sumbu X biasanya berkaitan dengan gerak meja ke kiri dan kanan, sumbu Y dengan gerak meja maju dan mundur, sedangkan sumbu Z dengan gerak naik turun untuk mengatur kedalaman potong. Tiga sumbu ini membuat mesin frais lebih fleksibel untuk membentuk permukaan datar dan bentuk prismatic. Frais juga memiliki variasi metode pemotongan, misalnya frais naik atau up milling dan frais turun atau down milling. Pada frais naik, arah gerak benda kerja berlawanan dengan arah putaran mata potong di titik kontak. Pada frais turun, arah gerak benda kerja searah dengan gerak mata potong di titik kontak. Perbedaan ini mempengaruhi gaya pemotongan, kecenderungan getaran, kualitas permukaan, dan kebutuhan kekakuan mesin. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa proses frais modern dapat dianalisis melalui sinyal sensor untuk memperkirakan keausan pahat pada berbagai kondisi operasi, tetapi dasar prosesnya tetap berpijak pada hubungan antara alat potong berputar, benda kerja, dan parameter pemotongan.

Mesin sekrap, atau shaping machine, bekerja dengan prinsip yang lebih linear. Pahat bergerak maju mundur, dan pemotongan terjadi terutama pada langkah maju. Saat pahat kembali, umumnya tidak terjadi penyayatan. Karena pola gerakannya seperti itu, mesin sekrap lazim digunakan untuk membuat bidang datar, bidang tegak, bidang menyudut, dan alur tertentu. Walaupun dalam industri modern sebagian pekerjaan sekrap banyak digantikan oleh frais atau mesin CNC, pemahaman proses sekrap tetap penting karena menunjukkan prinsip pemotongan dengan pahat bermata tunggal dalam gerak bolak balik. Sekrap memiliki nilai pembelajaran yang cukup kuat. Gerak potongnya mudah dilihat, pembentukan geramnya tampak jelas, dan hubungan antara gerak makan serta kedalaman potong dapat diamati langsung. Pada saat pahat menyayat permukaan benda kerja, operator dapat membaca

suara pemotongan, bentuk geram, dan bekas lintasan pahat. Mungkin karena ritmenya lebih lambat dibanding frais, mesin sekrap sering membantu pembelajar memahami bahwa pemesinan bukan sekadar menghidupkan mesin, tetapi mengendalikan proses penyayatan.

Mesin gurdi atau drilling machine berfungsi utama untuk membuat lubang. Pada proses ini, mata gurdi berputar dan bergerak masuk ke benda kerja secara aksial. Lubang yang dibuat dapat menjadi lubang akhir atau menjadi tahap awal untuk proses lanjutan seperti reaming, boring, atau pembuatan ulir dalam. Proses gurdi terlihat sederhana, tetapi kualitas lubang sangat bergantung pada geometri mata gurdi, titik awal pengeboran, pencekaman benda kerja, kecepatan putar, gerak makan, serta kemampuan geram keluar dari lubang. Gurdi sering dianggap sebagai proses tambahan, padahal dalam perakitan mesin, lubang memiliki peran yang sangat besar. Lubang baut, lubang pin, lubang pelumas, lubang dudukan poros, dan lubang pengarah semuanya membutuhkan posisi serta ukuran yang tepat. Kesalahan kecil pada titik lubang dapat membuat komponen sulit dirakit. Pada lubang yang dalam, geram yang tidak keluar dengan baik dapat menimbulkan panas, memperburuk permukaan, bahkan mematahkan mata gurdi. Trinh (2024) menegaskan bahwa kualitas permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja, sehingga proses sederhana seperti gurdi tetap perlu dipahami sebagai proses teknis yang terkendali.

Kepala pembagi perlu ditempatkan secara hati-hati dalam klasifikasi ini. Secara teknis, kepala pembagi bukan proses pemotongan utama seperti bubut, frais, sekrap, atau gurdi. Ia lebih tepat dipahami sebagai alat bantu pada mesin frais untuk membagi keliling benda kerja menjadi bagian yang sama atau sesuai perhitungan tertentu. Meski begitu, keberadaannya penting karena beberapa pekerjaan tidak dapat diselesaikan hanya dengan gerak meja biasa. Pembuatan segi enam, segi delapan, alur berulang, spline, dan roda gigi membutuhkan pembagian sudut yang cermat. Kepala pembagi bekerja dengan prinsip pengaturan putaran benda kerja melalui mekanisme roda gigi cacing dan piring pembagi. Dalam banyak kepala pembagi konvensional, rasio yang umum digunakan adalah 40 banding 1, yang berarti satu putaran penuh benda kerja memerlukan empat puluh putaran engkol pada

mekanisme pembagi. Rasio ini memungkinkan operator membagi keliling benda kerja dengan lebih teliti. Penerapannya sangat dekat dengan proses frais, karena benda kerja yang sudah dibagi posisinya kemudian disayat oleh pisau frais.

Klasifikasi ini juga membantu memilih proses yang paling wajar untuk suatu pekerjaan. Jika komponen yang akan dibuat berupa poros bertingkat dengan ulir di ujungnya, mesin bubut menjadi pilihan awal yang logis. Jika komponen berupa blok dengan permukaan datar dan alur memanjang, mesin frais lebih tepat dipertimbangkan. Jika pekerjaan berupa bidang datar sederhana pada benda kerja besar dan fasilitas terbatas, mesin sekrup masih dapat digunakan. Jika diperlukan lubang baut pada pelat, proses gurdi menjadi tahap yang hampir tidak terhindarkan. Ilustrasi konseptual pemilihan proses dapat dibayangkan dari pertanyaan sederhana. Apakah benda kerja harus berputar untuk menghasilkan bentuknya. Jika ya, proses bubut biasanya menjadi kandidat utama. Apakah permukaan yang dibentuk berupa bidang datar, alur, atau profil pada blok. Jika ya, frais atau sekrup dapat dipertimbangkan. Apakah bentuk utama yang dibutuhkan adalah lubang. Jika ya, gurdi menjadi proses awal. Apakah permukaan benda kerja harus dibagi menjadi beberapa bagian sama pada kelilingnya. Jika ya, kepala pembagi diperlukan sebagai alat bantu.

Pembacaan seperti ini tidak boleh dibuat terlalu kaku. Dalam praktik, satu komponen sering membutuhkan lebih dari satu proses. Sebuah poros dapat dibubut lebih dahulu, lalu diberi lubang dengan gurdi, dibuat alur pasak dengan frais, dan mungkin diperiksa kembali ukurannya. Sebuah roda gigi dapat dimulai dari pembubutan blank, kemudian difrais menggunakan kepala pembagi. Sebuah blok mesin dapat diratakan dengan frais, digurdi, lalu diberi lubang ulir. Klasifikasi proses membantu memahami urutan kerja, bukan membatasi proses seolah olah satu komponen hanya boleh dikerjakan pada satu mesin. Perbedaan antarproses juga terlihat pada jenis pahat. Pahat bubut dan pahat sekrup sama sama bermata tunggal, tetapi arah gerak dan cara pembebanannya berbeda. Pisau frais bermata jamak, sehingga tiap gigi hanya menyayat pada sebagian waktu putaran. Mata gurdi memiliki geometri khusus karena harus memotong sambil membentuk lubang dan mengeluarkan geram dari ruang yang terbatas. Perbedaan geometri alat potong ini membuat parameter pemotongan tiap proses tidak dapat disamakan begitu saja.

Benda kerja menjadi faktor penting dalam klasifikasi proses. Benda kerja berbentuk silinder panjang sering lebih mudah dipasang pada mesin bubut dengan chuck atau dua senter. Benda kerja berbentuk balok lebih lazim dijepit pada ragum mesin frais atau ragum mesin sekrap. Benda kerja tipis yang akan digurdi perlu ditahan agar tidak berputar mengikuti mata gurdi. Benda kerja yang hendak dibagi kelilingnya perlu dijepit pada kepala pembagi dengan posisi yang stabil. Pilihan proses selalu berhubungan dengan cara menahan benda kerja. Kualitas hasil juga berbeda menurut proses. Bubut dapat menghasilkan permukaan silindris yang baik bila pahat, putaran, gerak makan, dan pencekaman sesuai. Frais dapat menghasilkan bidang datar dan alur dengan ketelitian yang baik, terutama jika mesin kaku dan pisau dalam kondisi tajam. Sekrap dapat memberi bidang datar, tetapi waktu pengerjaannya cenderung lebih lama. Gurdi menghasilkan lubang, tetapi ketelitian lubang kadang masih perlu ditingkatkan dengan proses lanjutan. Kepala pembagi membantu ketelitian pembagian sudut, tetapi kualitas pemotongan tetap bergantung pada proses frais yang mengikutinya.

Dari sisi produktivitas, proses frais dan bubut sering menjadi tulang punggung pemesinan karena fleksibilitas serta kecepatannya. Sekrap lebih terbatas, tetapi tetap berguna dalam pembelajaran dan pekerjaan tertentu. Gurdi hampir selalu hadir sebagai proses pendukung karena banyak komponen membutuhkan lubang. Kepala pembagi digunakan lebih khusus ketika pekerjaan memerlukan pembagian keliling. Pawanr dan Gupta (2024) menjelaskan bahwa efisiensi pemesinan berkaitan dengan desain mesin, pemodelan energi, optimasi parameter, dan pemanfaatan metode cerdas. Artinya, pemilihan proses tidak hanya berdampak pada bentuk benda kerja, tetapi juga pada waktu, energi, dan biaya. Dalam konteks pemesinan berkelanjutan, pemilihan proses perlu mempertimbangkan pemborosan material, umur pahat, konsumsi energi, dan jumlah penyetulan. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan melalui integrasi peralatan, proses, dan strategi. Pandangan ini relevan untuk klasifikasi proses karena keputusan memilih bubut, frais, sekrap, gurdi, atau penggunaan kepala pembagi akan mempengaruhi keseluruhan alur produksi. Proses yang secara teknis mampu belum tentu paling efisien bila penyetelannya terlalu rumit atau menghasilkan terlalu banyak waktu menganggur.

Pada mesin bubut, efisiensi sering diperoleh melalui pemilihan urutan operasi yang tepat. Misalnya, benda kerja dijepit sekali, kemudian dilakukan pembubutan muka, pembubutan diameter luar, pembuatan alur, dan pembuatan ulir bila memungkinkan. Semakin sedikit benda kerja dilepas pasang, semakin kecil risiko kesalahan posisi. Namun, ada kondisi ketika benda kerja harus dibalik atau dipasang ulang. Di sinilah operator perlu menimbang ketelitian, keamanan, dan kemudahan pengukuran. Pada mesin frais, urutan kerja juga menentukan hasil. Permukaan acuan biasanya dibuat lebih dahulu, lalu permukaan lain dikerjakan berdasarkan acuan tersebut. Jika acuan awal kurang baik, kesalahan dapat terbawa ke proses berikutnya. Alur, lubang, dan bidang bertingkat perlu direncanakan agar pencekaman tetap kuat. Ketika kepala pembagi digunakan, titik pusat dan keselarasan sumbu benda kerja menjadi makin penting karena kesalahan kecil dapat membuat pembagian tidak merata.

Pada mesin sekrap, perhatian sering tertuju pada panjang langkah, posisi pahat, dan arah pemakanan. Pahat harus memiliki jarak bebas yang cukup agar tidak menggesek benda kerja secara berlebihan. Benda kerja harus dijepit kuat karena gaya potong pada langkah maju dapat mendorong benda kerja keluar dari posisi. Walaupun prosesnya tampak lebih lambat, sekrap memberi pelajaran penting tentang kontrol langkah, gerak makan bertahap, dan pembentukan permukaan melalui lintasan lurus. Pada mesin gurdi, titik awal pengeboran harus disiapkan dengan baik. Lubang yang bergeser sejak awal sulit diperbaiki pada tahap berikutnya. Dalam banyak pekerjaan, penandaan titik, penggunaan penitik, pemilihan mata gurdi, dan pencekaman benda kerja menjadi bagian yang tidak dapat dipisahkan dari proses. Jika lubang harus presisi, proses gurdi sering hanya menjadi tahap awal sebelum lubang diselesaikan dengan proses lain. Ini menunjukkan bahwa klasifikasi proses tidak hanya memisahkan mesin, tetapi juga menunjukkan keterkaitan antaroperasi.

Kepala pembagi memperluas kemampuan mesin frais. Tanpa kepala pembagi, operator dapat membuat bidang datar atau alur lurus, tetapi akan kesulitan membagi keliling benda kerja secara presisi. Dengan kepala pembagi, benda kerja dapat diputar bertahap sesuai jumlah bagian yang dibutuhkan. Pembuatan kepala baut segi enam, roda gigi sederhana, atau alur berulang pada poros menjadi lebih terarah. Perangkat ini mengajarkan bahwa dalam

pemesinan, alat bantu sering sama pentingnya dengan mesin utama. Ada kecenderungan untuk menganggap mesin yang lebih modern selalu lebih baik. Anggapan ini perlu diuji. Mesin CNC memang unggul dalam pengulangan, lintasan kompleks, dan integrasi program. Namun, pemilihan proses dasar tetap harus benar. Program CNC untuk membubut, mengefrais, atau mengebor tetap berpijak pada prinsip gerak utama, gerak makan, kedalaman potong, pahat, dan pencekaman. Jika prinsip dasarnya salah, otomasi hanya mempercepat terjadinya kesalahan.

Klasifikasi proses pemesinan juga membantu membaca risiko keselamatan. Mesin bubut memiliki risiko benda kerja berputar, geram panjang, dan pencekaman yang kurang kuat. Mesin frais memiliki risiko kontak dengan pisau bermata jamak dan benda kerja yang terdorong oleh gaya pemotongan. Mesin sekrap memiliki gerakan bolak balik yang membutuhkan ruang bebas. Mesin gurdi memiliki risiko benda kerja ikut berputar jika tidak dijepit. Kepala pembagi menambah kebutuhan pemeriksaan pencekaman karena benda kerja diputar dan disayat dalam beberapa posisi.

Pada sisi pembelajaran, klasifikasi proses memberi urutan berpikir yang lebih rapi. Kita tidak langsung dipaksa mengingat seluruh komponen mesin, tetapi terlebih dahulu memahami fungsi umum tiap proses. Bubut untuk bentuk berputar. Frais untuk bidang dan profil. Sekrap untuk penyayatan lurus bolak balik. Gurdi untuk lubang. Kepala pembagi untuk pembagian sudut atau keliling. Ringkasan ini memang sederhana, mungkin terlalu ringkas untuk pekerjaan industri yang kompleks, tetapi cukup baik sebagai pintu masuk. Setelah pintu masuk itu terbuka, pembahasan dapat diperluas ke parameter, pahat, pencekaman, keselamatan, dan kontrol kualitas. Pada setiap proses, pertanyaan teknisnya akan berulang. Pahat apa yang dipakai. Benda kerja dijepit bagaimana. Putaran berapa yang sesuai. Gerak makan seberapa besar. Kedalaman potong aman atau tidak. Bagaimana hasilnya diperiksa. Pertanyaan pertanyaan inilah yang membuat klasifikasi proses menjadi berguna, bukan sekadar definisi.

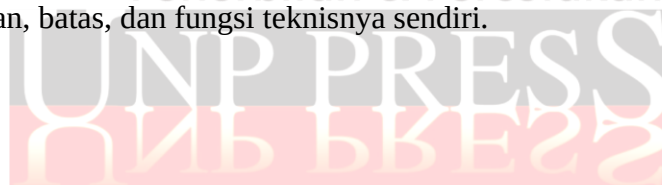
Klasifikasi juga memperlihatkan bahwa pemesinan adalah kegiatan yang saling terhubung. Satu proses dapat menyiapkan proses berikutnya. Pembubutan dapat menyiapkan bentuk dasar sebelum frais. Frais dapat membuat bidang acuan sebelum gurdi. Gurdi dapat membuat lubang awal sebelum pembesaran lubang

atau pembuatan ulir. Kepala pembagi dapat mengatur posisi benda kerja agar frais menghasilkan bentuk berulang. Hubungan ini membuat perencanaan proses menjadi bagian penting dalam pekerjaan mesin perkakas. Dalam praktik bengkel, pemilihan proses sering dipengaruhi oleh fasilitas yang tersedia. Bengkel kecil mungkin tidak memiliki semua mesin, sehingga operator harus menyesuaikan metode kerja. Namun, penyesuaian tidak boleh berarti mengabaikan prinsip. Jika suatu pekerjaan dipindahkan ke mesin lain, perlu dipastikan bahwa pencekaman, arah gaya potong, ketelitian, dan keselamatan tetap terkendali. Kreativitas bengkel memang diperlukan, tetapi kreativitas yang baik tetap memiliki alasan teknis.

Klasifikasi proses pemesinan juga membantu memahami batas setiap mesin. Mesin bubut tidak ideal untuk semua bidang datar pada benda kerja balok. Mesin frais tidak selalu paling efisien untuk membuat poros panjang. Mesin sekrap tidak cocok untuk produksi massal yang menuntut kecepatan tinggi. Mesin gurdi tidak selalu menghasilkan lubang dengan ketelitian akhir. Kepala pembagi tidak memotong sendiri, tetapi membantu mengatur posisi benda kerja. Mengetahui batas ini sama pentingnya dengan mengetahui kemampuan mesin. Kualitas produk menjadi alasan utama mengapa klasifikasi proses harus dipahami. Ivanov et al. (2025) menempatkan kualitas produk dalam hubungan dengan ketelitian dimensi, bentuk, dan kondisi permukaan. Jika proses yang dipilih tidak sesuai, kualitas akan sulit dicapai meskipun operator bekerja hati-hati. Misalnya, lubang presisi tidak cukup hanya digurdi jika toleransinya ketat. Permukaan dudukan yang harus rata mungkin perlu difrais dengan setelan yang tepat. Poros yang harus konsentris perlu diproses dengan pencekaman yang sesuai pada mesin bubut.

Di tingkat yang lebih lanjut, klasifikasi proses menjadi dasar untuk menyusun rute produksi. Rute produksi menentukan urutan mesin, urutan pencekaman, urutan pemotongan, dan urutan pemeriksaan. Rute yang baik mengurangi perpindahan benda kerja yang tidak perlu dan menjaga acuan ukuran tetap konsisten. Rute yang buruk membuat proses lebih lama dan meningkatkan risiko kesalahan. Dalam hal ini, klasifikasi proses bukan hanya materi pengantar, tetapi juga dasar perencanaan manufaktur. Pembahasan klasifikasi proses pemesinan memberi landasan untuk masuk ke subbab berikutnya mengenai peran pahat, benda kerja,

pencekaman, parameter pemotongan, dan keselamatan kerja. Setelah mengetahui jenis prosesnya, kita perlu memahami unsur apa saja yang menentukan keberhasilan proses tersebut. Mesin hanyalah satu bagian dari sistem. Pahat, benda kerja, alat cekam, parameter, operator, dan alat ukur bekerja bersama membentuk hasil akhir. Klasifikasi yang baik tidak membuat kita menghafal nama mesin secara terpisah, melainkan membantu melihat hubungan antara bentuk komponen dan cara membuatnya. Bubut, frais, sekrup, gurdi, dan kepala pembagi membentuk kerangka dasar untuk membaca pekerjaan pemesinan. Dari kerangka ini, pembahasan tiap mesin dapat dikembangkan lebih dalam tanpa kehilangan arah. Kita dapat bergerak dari konsep umum menuju teknik khusus dengan pemahaman bahwa setiap proses memiliki alasan, batas, dan fungsi teknisnya sendiri.



BAB 2

MESIN BUBUT I: PAHAT, GEOMETRI, PARAMETER PEMOTONGAN, DAN PENCEKAMAN

A. Prinsip Kerja Mesin Bubut

Mesin bubut bekerja melalui hubungan sederhana, tetapi sangat menentukan, antara benda kerja yang berputar dan pahat yang bergerak menyayat. Benda kerja dipasang pada spindel, lalu diputar pada sumbu utama mesin. Pahat ditempatkan pada kedudukan pahat dan diarahkan mendekati permukaan benda kerja secara terkendali. Dari pertemuan gerak putar dan gerak lurus inilah material tersayat sedikit demi sedikit hingga bentuk yang direncanakan mulai terbentuk. Prinsip ini membuat mesin bubut berbeda dari banyak mesin perkakas lain. Pada proses frais, alat potong yang berputar menjadi pusat gerak utama. Pada mesin bubut, justru benda kerja yang berputar, sedangkan pahat bergerak secara translasi. Perbedaan ini tampak kecil, tetapi pengaruhnya besar terhadap bentuk komponen yang dapat dihasilkan. Karena benda kerja berputar pada sumbu tertentu, mesin bubut sangat cocok untuk membuat benda berbentuk silindris, tirus, beralur, atau berulir.

Dalam pembubutan, pahat tidak sekadar menyentuh permukaan benda kerja. Pahat masuk ke material dengan kedalaman tertentu, menahan gaya potong, menerima gesekan, lalu memisahkan lapisan material dalam bentuk geram. Geram yang keluar dari permukaan benda kerja menjadi tanda bahwa proses pemotongan benar benar terjadi. Jika geram tidak terbentuk dengan baik, biasanya ada sesuatu yang perlu diperiksa, entah ketajaman pahat, sudut pahat, kecepatan putar, gerak makan, atau kekakuan pencekaman. Secara mekanis, proses bubut dapat dipahami sebagai pemotongan yang berlangsung secara berulang pada permukaan benda kerja berputar. Setiap putaran membawa bagian permukaan benda kerja kembali melewati ujung pahat. Pahat kemudian menyayat lapisan tipis material sesuai arah geraknya. Dalam pekerjaan memanjang, pahat bergerak sejajar sumbu benda kerja. Dalam pekerjaan penampang, pahat bergerak ke arah radial menuju pusat atau menjauhi pusat benda kerja.

Gerak utama pada mesin bubut berasal dari spindel. Spindel terhubung dengan sistem penggerak mesin dan berfungsi memutar

benda kerja melalui alat cekam, seperti chuck, collet, atau pelat pembawa. Kecepatan putaran spindel dinyatakan dalam revolutions per minute atau rpm. Nilai rpm tidak boleh dipilih secara sembarang kerana berkaitan langsung dengan diameter benda kerja, jenis material, jenis pahat, dan kualitas permukaan yang diharapkan. Gerak makan merupakan gerak pahat terhadap benda kerja selama proses penyayatan berlangsung. Pada pembubutan memanjang, gerak makan membuat pahat bergerak sejajar sumbu benda kerja, sehingga diameter benda kerja berkurang sepanjang bagian tertentu. Pada pembubutan muka, gerak makan berlangsung melintang, sehingga permukaan ujung benda kerja menjadi rata. Perbedaan arah gerak makan ini penting kerana menentukan bentuk permukaan yang dihasilkan.

Kedalaman potong menunjukkan seberapa tebal lapisan material yang diambil dalam satu lintasan. Pada pekerjaan kasar atau roughing, kedalaman potong biasanya dibuat lebih besar agar material cepat berkurang. Pada pekerjaan akhir atau finishing, kedalaman potong dibuat lebih kecil agar ukuran lebih mudah dikendalikan dan permukaan lebih halus. Mungkin terlihat sederhana, tetapi keputusan ini sering menjadi pembeda antara hasil yang stabil dan hasil yang penuh getaran. Tabel berikut menyajikan hubungan antara unsur utama proses bubut dan dampaknya terhadap hasil pemesinan. Tabel ini perlu dibaca sebagai peta awal, bukan sebagai daftar yang terpisah dari praktik. Dalam proses nyata, satu unsur hampir selalu mempengaruhi unsur lain.

Tabel 2. Unsur Dasar Prinsip Kerja Mesin Bubut

Unsur kerja	Makna dalam proses bubut	Dampak terhadap hasil
Putaran spindel	Gerak utama yang memutar benda kerja	Menentukan kecepatan relatif pemotongan
Pahat bubut	Alat potong bermata tunggal	Menentukan bentuk geram dan kualitas permukaan
Gerak makan	Gerak pahat sepanjang lintasan penyayatan	Mempengaruhi laju pemotongan dan kekasaran permukaan
Kedalaman potong	Tebal material yang dibuang setiap lintasan	Mempengaruhi beban pahat, waktu kerja, dan getaran
Pencekaman	Cara menahan benda	Menentukan keamanan,

	kerja agar stabil	konsentrisitas, dan ketelitian
Pengukuran	Pemeriksaan ukuran setelah atau selama proses	Menjamin kesesuaian hasil dengan gambar kerja

Tabel tersebut menunjukkan bahwa prinsip kerja mesin bubut tidak dapat hanya dijelaskan melalui satu gerakan. Putaran spindel tanpa pahat tidak menghasilkan bentuk baru. Pahat yang tajam pun tidak cukup jika benda kerja tidak tercekam dengan baik. Gerak makan yang terlalu besar dapat mempercepat pemotongan, tetapi permukaan menjadi lebih kasar. Kedalaman potong yang terlalu besar dapat mempercepat proses, tetapi juga menaikkan beban mesin dan risiko getaran. Dalam literatur manufaktur modern, proses bubut termasuk ke dalam kelompok turning, yaitu proses pemesinan yang menggunakan gerak rotasi benda kerja untuk membentuk permukaan. Ivanov, Evtuhov, Dehtiarov, dan Trojanowska (2025) menjelaskan bahwa metode pemesinan seperti turning, drilling, milling, dan grinding memiliki prinsip kerja serta kondisi penggunaan yang berbeda. Artinya, mesin bubut perlu dipahami melalui cara kerjanya sendiri, bukan hanya sebagai salah satu mesin yang ada di bengkel. Karena benda kerja berputar pada sumbunya, hasil paling khas dari mesin bubut adalah permukaan berbasis putaran. Poros lurus, poros bertingkat, bushing, pin, pulley kecil, danudukan bantalan merupakan contoh komponen yang sangat dekat dengan proses bubut. Bentuknya mungkin berbeda beda, tetapi logikanya sama, yaitu membentuk material di sekitar sumbu putar. Dari sinilah muncul istilah permukaan silindris, tirus, dan eksentris dalam pembahasan dasar mesin bubut.

Permukaan silindris terbentuk ketika diameter benda kerja relatif sama sepanjang sumbu putarnya. Bentuk ini tampak pada poros pejal, pipa, atau batang silinder yang disiapkan sebagai komponen sambungan. Permukaan tirus terbentuk ketika diameter pada satu ujung berbeda dari ujung lainnya. Permukaan eksentris muncul ketika pusat putaran tidak berhimpit dengan pusat geometri tertentu. Salah satu hal yang perlu diperhatikan adalah titik kontak antara pahat dan benda kerja. Pada titik kecil itu terjadi tekanan yang tinggi, gesekan, panas, dan deformasi material. Das et al. (2022) menunjukkan bahwa pada proses hard turning, kecepatan

potong, gerak makan, dan kedalaman potong berkaitan dengan kekasaran permukaan, gaya potong, serta keausan pahat. Temuan tersebut memperkuat pemahaman bahwa kualitas hasil bubut bukan kebetulan, melainkan akibat dari kombinasi parameter yang dipilih. Kecepatan potong sering menjadi parameter pertama yang diperhatikan karena menunjukkan seberapa cepat permukaan benda kerja melewati mata pahat. Rumus dasarnya dapat ditulis sebagai v sama dengan π dikali d dikali n , lalu dibagi 1000, dengan v sebagai kecepatan potong dalam meter per menit, d sebagai diameter benda kerja dalam milimeter, dan n sebagai putaran spindel dalam rpm. Rumus ini membantu operator memahami mengapa benda kerja berdiameter besar tidak boleh selalu diputar dengan rpm yang sama seperti benda kerja kecil.

Hubungan antara diameter dan putaran spindel cukup penting dalam pembubutan. Untuk kecepatan potong yang sama, benda kerja berdiameter kecil membutuhkan putaran spindel lebih tinggi. Benda kerja berdiameter besar membutuhkan putaran lebih rendah. Jika aturan ini diabaikan, pahat dapat bekerja terlalu panas atau justru pemotongan menjadi tidak efektif. Dalam praktik bengkel, kesalahan ini sering muncul ketika operator hanya meniru rpm pekerjaan sebelumnya tanpa menghitung ulang diameter benda kerja.

Prinsip kerja mesin bubut juga bergantung pada kestabilan pengecaman. Benda kerja yang terpasang tidak sentris akan menghasilkan putaran yang tidak stabil. Akibatnya, pahat menyayat secara tidak merata, permukaan menjadi bergelombang, ukuran sulit dikendalikan, dan suara pemotongan terdengar kasar. Pada keadaan yang lebih berbahaya, benda kerja dapat bergeser dari alat cekam. Karena itu, pengecaman bukan sekadar tahap persiapan, tetapi bagian dari prinsip kerja mesin bubut itu sendiri. Pemilihan alat cekam mengikuti bentuk dan ukuran benda kerja. Chuck tiga rahang lazim digunakan untuk benda berbentuk silindris karena rahangnya bergerak serempak dan memusatkan benda kerja dengan cepat. Chuck independent empat rahang lebih cocok untuk benda kerja yang memerlukan penyetelan khusus atau bentuk yang tidak sepenuhnya simetris. Collet berguna untuk benda kecil dengan tuntutan konsentrisitas yang baik. Untuk benda kerja panjang, dukungan dua senter sering lebih aman karena dapat mengurangi lendutan.

Tabel 3. Hubungan Prinsip Kerja Dan Risiko Kesalahan Pada Mesin Bubut

Kondisi proses	Kemungkinan penyebab	Dampak yang tampak
Permukaan kasar	Gerak makan terlalu besar atau pahat tumpul	Hasil finishing kurang baik
Benda kerja bergetar	Pencekaman kurang kaku atau benda terlalu panjang	Diameter tidak stabil dan muncul pola getaran
Pahat cepat aus	Kecepatan potong terlalu tinggi atau pendinginan kurang	Ukuran berubah dan kualitas permukaan menurun
Diameter tidak sesuai	Kedalaman potong salah atau pengukuran terlambat	Komponen sulit dirakit
Geram tidak terkendali	Geometri pahat kurang sesuai	Risiko goresan dan gangguan keselamatan meningkat

Tabel 3 memperlihatkan bahwa gejala di mesin sering dapat dibaca melalui prinsip dasar proses bubut. Permukaan kasar tidak selalu berarti mesin rusak. Bisa jadi gerak makan terlalu besar, pahat mulai tumpul, atau sudut pahat tidak sesuai material. Getaran juga tidak selalu disebabkan oleh putaran tinggi saja. Kadang masalahnya justru pada benda kerja yang terlalu panjang tanpa penyangga atau alat cekam yang kurang kuat. Dalam pembubutan, pahat yang digunakan umumnya berupa single point cutting tool. Artinya, pemotongan utama dilakukan oleh satu mata potong. Ciri ini membuat proses bubut relatif mudah diamati, tetapi tetap menuntut ketelitian tinggi. Satu mata potong itu harus menanggung gaya, panas, dan gesekan secara langsung. Jika geometri pahat keliru, hasil yang muncul bisa berupa panas berlebih, geram menempel, permukaan kasar, atau keausan cepat.

Geometri pahat mempengaruhi bagaimana pahat masuk ke material. Sudut geram membantu geram mengalir keluar dari bidang potong. Sudut bebas mencegah pahat menggesek permukaan benda kerja secara berlebihan. Radius ujung pahat

membantu menghasilkan permukaan yang lebih halus, terutama pada proses finishing. Namun, radius yang terlalu besar pada benda kerja kurang kaku bisa memicu getaran. Di sinilah pembubutan tidak sepenuhnya dapat dibaca sebagai rumus, karena kondisi nyata mesin tetap ikut berbicara. Trinh (2024) menjelaskan bahwa prediksi kekasaran permukaan pada proses finishing machining perlu mempertimbangkan parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pandangan ini selaras dengan praktik bubut. Permukaan yang halus tidak hanya dihasilkan oleh putaran tinggi, tetapi juga oleh gerak makan yang tepat, pahat yang sesuai, radius ujung yang baik, dan benda kerja yang stabil. Jika salah satu unsur tidak mendukung, hasil akhir dapat menyimpang dari rencana.

Prinsip kerja mesin bubut juga berkaitan dengan energi. Setiap penyayatan membutuhkan tenaga untuk memutar benda kerja, menggerakkan pahat, dan mengatasi tahanan material. Wang et al. (2023) menempatkan pemesinan berkelanjutan sebagai integrasi antara peralatan, proses, dan strategi, termasuk pemilihan alat potong, cairan pendingin, dan pengendalian proses. Dalam konteks bubut dasar, gagasan ini dapat diterjemahkan secara sederhana: parameter yang baik bukan hanya menghasilkan ukuran benar, tetapi juga mengurangi pemborosan energi, waktu, dan pahat. Pawanr dan Gupta (2024) juga menekankan bahwa efisiensi energi dalam pemesinan dapat ditingkatkan melalui pemilihan mesin yang lebih hemat, pemodelan konsumsi energi, optimasi parameter, dan pemanfaatan kecerdasan buatan. Meskipun pembahasan ini terdengar modern, dasar praktisnya tetap dekat dengan mesin bubut konvensional. Putaran yang terlalu tinggi, kedalaman potong yang tidak sesuai, atau lintasan kerja yang tidak efisien dapat membuat proses lebih boros. Jadi, prinsip kerja bubut tidak hanya membahas bagaimana material terpotong, tetapi juga bagaimana proses dijalankan secara masuk akal.

Pada pekerjaan bengkel, operator sering memulai dari pertanyaan yang sangat praktis: benda apa yang akan dibuat, materialnya apa, diameternya berapa, dan pahat apa yang tersedia. Dari pertanyaan itu, keputusan teknis mulai disusun. Putaran spindel dipilih berdasarkan kecepatan potong yang aman. Gerak makan dipilih sesuai tahap kerja, apakah masih pengasaran atau sudah penyelesaian akhir. Kedalaman potong dipilih dengan mempertimbangkan kekuatan mesin, kekakuan benda kerja, dan batas ukuran akhir. Urutan berpikir seperti itu penting karena

mesin bubut tidak bekerja dalam ruang kosong. Material aluminium, baja karbon, baja tahan karat, besi tuang, dan titanium memiliki respons pemotongan yang berbeda. Aluminium relatif mudah dipotong, tetapi dapat menempel pada pahat jika kondisi tidak tepat. Baja tahan karat sering menuntut perhatian lebih pada panas dan pengerasan permukaan. Besi tuang menghasilkan geram yang lebih rapuh, tetapi tetap membutuhkan pengendalian debu dan keselamatan kerja.

Keselamatan kerja menjadi bagian yang tidak dapat dilepaskan dari prinsip kerja mesin bubut. Benda kerja berputar, geram dapat panas dan tajam, pahat memiliki sisi potong, sementara chuck berputar dengan energi yang cukup besar. Kunci chuck yang tertinggal, pakaian longgar, rambut tidak terikat, atau tangan yang terlalu dekat dengan benda berputar dapat menimbulkan kecelakaan serius. Karena itu, memahami prinsip mesin bubut juga berarti memahami batas aman interaksi manusia dengan mesin. Sebelum proses dimulai, benda kerja perlu diperiksa posisinya. Apakah sudah tercekam kuat, apakah sumbunya cukup sentris, apakah panjang yang menonjol dari chuck masih aman, dan apakah pahat sudah berada pada tinggi senter. Pahat yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat mengubah sudut kerja nyata saat menyayat. Pada beberapa pekerjaan, kesalahan kecil pada tinggi pahat dapat membuat permukaan tidak rata atau meninggalkan tonjolan di pusat benda kerja saat pembubutan muka.

Selama proses berlangsung, suara dan bentuk geram dapat menjadi petunjuk awal. Suara pemotongan yang stabil biasanya menunjukkan proses berjalan cukup baik. Suara berdecit, getaran berulang, atau geram yang berubah warna terlalu gelap dapat menjadi tanda panas berlebih atau parameter yang kurang tepat. Tentu saja, tanda semacam ini tidak menggantikan pengukuran. Namun, bagi operator yang terlatih, pengamatan seperti ini membantu mengambil keputusan sebelum kesalahan menjadi terlalu besar. Pengukuran tetap menjadi pengendali utama hasil bubut. Diameter tidak dapat hanya diperkirakan dari posisi eretan. Jangka sorong, mikrometer, dial indikator, dan alat ukur lain digunakan untuk memastikan benda kerja masih berada dalam toleransi. Pengukuran antara sering diperlukan, terutama ketika ukuran akhir sudah mendekat. Sikap hati-hati ini bukan tanda kurang percaya pada mesin, melainkan bagian dari kerja presisi.

Dalam pembubutan manual, keterampilan operator sangat terasa. Operator mengatur tuas, memilih putaran, menggerakkan eretan, membaca skala, memeriksa suara pemotongan, dan mengukur hasil. Pada mesin bubut CNC, sebagian gerak dilakukan melalui program, tetapi prinsip dasarnya tidak berubah. Benda kerja tetap berputar, pahat tetap menyayat, parameter tetap menentukan panas, gaya, keausan, dan permukaan. Otomasi hanya mengubah cara perintah diberikan, bukan menghapus logika pemotongan. Mesin bubut dapat dianggap sebagai mesin yang sederhana dari luar, tetapi tidak sesederhana itu ketika prosesnya dibaca lebih dekat. Ada hubungan antara diameter dan rpm, antara gerak makan dan kekasaran, antara kedalaman potong dan beban pahat, antara pencekaman dan getaran, serta antara geometri pahat dan bentuk geram. Hubungan-hubungan ini membuat pembubutan menjadi proses yang membutuhkan perhitungan sekaligus kepekaan praktik.

B. Jenis-Jenis Pahat Bubut

Pahat bubut merupakan bagian yang langsung berhadapan dengan benda kerja. Di titik kecil antara mata pahat dan permukaan benda kerja, terjadi penyayatan, gesekan, panas, gaya potong, dan pembentukan geram. Karena itu, pembahasan tentang jenis pahat tidak bisa dianggap sebagai pengenalan nama alat saja. Setiap jenis pahat membawa fungsi, arah kerja, bentuk ujung, dan karakter pemotongan yang berbeda. Pada mesin bubut, pahat umumnya bekerja sebagai alat potong bermata tunggal atau single point cutting tool. Satu mata potong utama menyayat benda kerja yang berputar, sementara gerak makan pahat mengarahkan proses pembentukan permukaan. Karakter ini membedakan pahat bubut dari pisau frais yang memiliki banyak mata potong. Ivanov, Evtuhov, Dehtiarov, dan Trojanowska (2025) menjelaskan bahwa proses turning pada dasarnya menghasilkan permukaan benda putar dengan alat potong satu mata, baik untuk pembubutan memanjang, pembubutan bentuk, pengaluran, pemotongan, maupun pembuatan ulir.

Jenis pahat bubut perlu dipilih berdasarkan tujuan pekerjaan. Pekerjaan pengasaran membutuhkan pahat yang kuat menahan beban potong besar. Pekerjaan penyelesaian akhir membutuhkan pahat yang mampu menghasilkan permukaan lebih halus. Pembuatan alur, pemotongan benda kerja, ulir, profil radius, dan pembesaran lubang memerlukan bentuk pahat yang lebih khusus.

Jadi, perbedaan pahat muncul karena kebutuhan proses, bukan sekadar karena variasi bentuk alat. Dalam praktik bengkel, pemilihan pahat sering dimulai dari bentuk benda kerja yang akan dibuat. Jika benda kerja berupa poros lurus dengan diameter yang perlu dikurangi, pahat rata digunakan. Jika permukaan akhir harus lebih halus, pahat penghalusan dipilih. Jika benda kerja harus dipisahkan dari batang utama, pahat potong dipakai. Jika akan dibuat ulir luar, pahat ulir digunakan. Urutan berpikir seperti ini membuat operator tidak hanya mengambil pahat yang tersedia, tetapi memilih alat sesuai fungsi pemesinan.

Pahat rata kiri untuk pengasaran atau rough left hand tool digunakan ketika arah penyayatan bergerak dari kiri ke kanan. Pahat ini lazim dipakai untuk mengurangi diameter benda kerja pada tahap awal, terutama saat material yang harus dibuang masih cukup banyak. Bentuknya dibuat agar sisi potong mampu menerima beban relatif besar. Pada tahap ini, hasil permukaan belum menjadi tujuan utama, karena perhatian operator lebih banyak diarahkan pada pengurangan material secara cepat dan aman. Pahat rata kanan untuk pengasaran atau rough right hand tool memiliki fungsi yang serupa, tetapi arah penyayatannya berlawanan. Pahat ini digunakan untuk proses pengasaran bubut rata dari kanan ke kiri. Dalam pekerjaan tertentu, arah pemakanan tidak bisa dipilih bebas karena dipengaruhi posisi bahu benda kerja, bentuk cekaman, jarak terhadap kepala tetap, atau kebutuhan menjaga bagian tertentu agar tidak tersentuh pahat. Di sinilah pahat rata kanan menjadi pilihan yang lebih masuk akal.

Perbedaan antara pahat rata kiri dan pahat rata kanan sering tampak sederhana. Namun, bagi operator, arah kerja pahat menentukan kenyamanan, keamanan, dan ketelitian. Misalnya, ketika membubut poros bertingkat dekat bahu, arah pemakanan yang salah dapat membuat pahat menabrak bidang tegak atau meninggalkan bekas yang tidak diinginkan. Pahat yang benar membantu penyayatan berhenti pada posisi yang lebih terkendali.

Pahat rata untuk penghalusan atau round nose finishing tool digunakan pada tahap penyelesaian akhir. Ujung pahatnya relatif membulat, sehingga bekas penyayatan pada permukaan benda kerja menjadi lebih halus. Jenis pahat ini tidak dirancang untuk membuang material terlalu banyak dalam satu lintasan. Fungsinya lebih dekat pada memperbaiki ukuran akhir, mengurangi bekas kasar dari proses sebelumnya, dan memberi kualitas permukaan

yang lebih baik. Kualitas permukaan hasil bubut tidak hanya dipengaruhi oleh ketajaman pahat. Gerak makan, kecepatan potong, kedalaman potong, radius ujung pahat, material benda kerja, dan kekakuan sistem juga ikut menentukan. Trinh (2024) menekankan bahwa prediksi kekasaran permukaan dalam proses finishing machining perlu memperhatikan parameter pemotongan, sifat alat potong, serta sifat benda kerja. Pernyataan ini membantu menjelaskan mengapa pahat penghalusan tetap harus digunakan bersama parameter yang tepat.

Pahat potong atau pahat alur rata dikenal sebagai parting off tool. Pahat ini digunakan untuk menyayat benda kerja pada arah melintang sampai benda terpisah dari batang utama. Bentuknya lebih ramping dibanding pahat rata biasa karena harus masuk ke celah sempit. Selain untuk memotong, pahat ini juga dapat dipakai membuat alur rata pada permukaan silindris. Pekerjaan parting off membutuhkan perhatian khusus. Karena pahat masuk cukup dalam pada arah radial, celah potong dapat menjepit pahat jika geram tidak keluar dengan baik. Pahat yang terlalu panjang menonjol dariudukan juga dapat bergetar. Karena itu, pemasangan pahat potong sebaiknya dibuat sekaku mungkin, ujung pahat tepat pada tinggi senter, dan pemakanan dilakukan secara stabil. Kesalahan kecil pada proses ini sering langsung terasa melalui suara bergetar atau permukaan potong yang kasar. Pahat bentuk atau form tool digunakan untuk membuat profil tertentu pada benda kerja. Profil yang dimaksud dapat berupa radius, lengkungan, bentuk cekung, bentuk cembung, atau kontur khusus lain yang sulit dibuat hanya dengan gerak pahat biasa. Dalam penggunaannya, bentuk ujung pahat menjadi penentu bentuk permukaan benda kerja. Semakin presisi bentuk pahat, semakin baik pula peluang profil benda kerja mengikuti rancangan.

Pahat bentuk sering tampak praktis karena satu kali penyayatan dapat menghasilkan kontur tertentu. Meski begitu, beban potongnya bisa lebih besar dibanding pahat biasa, terutama jika bidang kontak pahat dengan benda kerja cukup lebar. Pada material keras atau benda kerja yang menonjol panjang, pahat bentuk mudah memicu getaran. Karena itu, pahat bentuk perlu dipakai dengan kedalaman potong yang wajar, pencekaman kuat, dan kecepatan yang tidak berlebihan. Pahat ulir atau thread cutting tool digunakan untuk membuat ulir pada benda kerja. Bentuk ujung pahat disesuaikan dengan profil ulir yang akan dibuat,

misalnya ulir segitiga. Pada proses ini, pahat tidak hanya menyayat permukaan, tetapi membentuk alur heliks dengan jarak tertentu. Gerak makan harus sinkron dengan putaran spindel agar jarak puncak ulir atau pitch sesuai dengan standar yang ditentukan.

Pembuatan ulir termasuk pekerjaan yang menuntut ketelitian tinggi. Kesalahan kecil pada sudut pahat, tinggi pahat, atau sinkronisasi gerak makan dapat membuat ulir tidak masuk dengan pasangan mur atau komponen lain. Pahat ulir juga tidak boleh diperlakukan seperti pahat pengasaran biasa. Penyayatan biasanya dilakukan bertahap, karena kedalaman ulir tidak baik dibentuk sekaligus dalam satu lintasan. Pahat peluasan lubang sering disebut pahat boring, meskipun dalam sebagian bahan ajar kadang disebut sebagai alat untuk meluaskan lubang setelah proses drilling. Fungsinya adalah memperbesar, merapikan, atau memperbaiki ketelitian diameter dalam benda kerja. Pahat ini bekerja di bagian dalam lubang, sehingga kekakuan batang pahat menjadi sangat penting. Semakin panjang batang pahat menonjol, semakin besar risiko lentur dan getaran.

Pekerjaan boring sering dilakukan setelah lubang awal dibuat dengan mata bor. Mata bor menghasilkan lubang awal, sedangkan pahat boring memperbaiki ukuran dan kualitas permukaan dalam. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa pembubutan lubang atau boring dapat dilakukan pada mesin bubut dengan benda kerja berputar dan pahat bergerak memberi pemakanan. Proses ini berguna ketika diameter dalam harus lebih akurat daripada hasil pengeboran biasa. Pemilihan pahat juga berkaitan dengan tahap pemesinan. Dalam banyak pekerjaan, proses tidak langsung dilakukan dengan satu pahat sampai selesai. Benda kerja dapat diawali dengan pahat pengasaran, lalu dilanjutkan dengan pahat penghalusan. Jika komponen memiliki alur, pahat alur digunakan setelah diameter utama mendekati ukuran. Jika ada ulir, pahat ulir dipakai pada tahap tersendiri. Urutan ini membantu menjaga pahat bekerja sesuai tugasnya.

Pahat pengasaran tidak selalu cocok untuk penyelesaian akhir. Pahat penghalusan tidak efisien untuk membuang material dalam jumlah besar. Pahat potong tidak tepat digunakan untuk membubut memanjang. Pahat ulir tidak boleh dipakai untuk menyayat profil bebas. Pembagian fungsi ini membuat proses bubut lebih aman, lebih rapi, dan lebih mudah dikendalikan. Selain bentuk, bahan pahat juga perlu diperhatikan. Pahat high speed steel

masih banyak digunakan dalam latihan bengkel karena mudah diasah dan cukup fleksibel untuk berbagai pekerjaan ringan. Pahat karbida memiliki ketahanan panas dan kekerasan lebih tinggi, sehingga dapat digunakan pada kecepatan potong lebih besar. Namun, karbida lebih getas dibanding high speed steel, sehingga pemasangan dan kondisi pemotongan harus lebih stabil.

Perbedaan bahan pahat berpengaruh langsung terhadap pemilihan parameter. Pada material yang relatif lunak, kecepatan potong dapat dinaikkan selama pahat dan mesin mendukung. Pada material lebih keras, kecepatan perlu dikendalikan agar pahat tidak cepat aus atau rusak. Das et al. (2022) menunjukkan bahwa dalam hard turning, kecepatan potong, gerak makan, dan kedalaman potong mempengaruhi kekasaran permukaan, gaya potong, serta keausan pahat. Hubungan ini memperlihatkan bahwa jenis pahat tidak pernah berdiri sendiri dari parameter pemotongan. Pahat juga perlu dilihat dari sisi geometri. Walaupun subbab geometri dibahas lebih rinci setelah bagian ini, pengenalan awal tetap diperlukan. Sudut geram membantu aliran geram keluar dari zona potong. Sudut bebas mencegah pahat menggesek permukaan benda kerja secara berlebihan. Radius ujung pahat mempengaruhi kehalusan permukaan. Sementara itu, posisi mata potong menentukan arah gaya dan kestabilan pemotongan.

Pada pahat pengasaran, kekuatan mata potong menjadi perhatian utama. Pahat harus mampu menyayat material dengan beban cukup besar. Pada pahat penghalusan, geometri ujung dan ketajaman lebih menentukan kualitas akhir. Pada pahat potong, kekakuan dan lebar pahat perlu dipilih hati-hati agar tidak mudah patah. Pada pahat boring, panjang batang pahat harus dibuat seminimal mungkin agar tidak lentur. Dalam pekerjaan nyata, gejala kesalahan pahat sering muncul sebelum benda kerja benar-benar gagal. Pahat yang tumpul membuat suara pemotongan lebih berat, geram berubah, dan permukaan menjadi kusam. Pahat yang terlalu tinggi dari senter dapat membuat penyayatan tidak bersih, terutama saat facing. Pahat yang terlalu rendah juga dapat menimbulkan gesekan dan bentuk permukaan yang tidak sesuai. Operator yang peka biasanya segera memeriksa pemasangan sebelum melanjutkan pemotongan.

Kondisi benda kerja ikut menentukan pilihan pahat. Aluminium cenderung mudah dipotong, tetapi dapat menempel pada mata pahat jika pahat kurang tajam atau pendinginan tidak

tepat. Baja karbon memerlukan kombinasi pahat dan parameter yang lebih hati-hati. Baja tahan karat sering menghasilkan panas lebih tinggi dan dapat mempercepat keausan pahat. Besi tuang menghasilkan geram yang lebih rapuh, tetapi debu dan serpihannya tetap perlu dikendalikan. Wagri et al. (2023) menjelaskan bahwa kemampuan pemesinan suatu material dipengaruhi oleh kekerasan material, dan hal itu berdampak pada konsumsi daya, umur pahat, serta kualitas permukaan. Pernyataan ini relevan untuk memahami mengapa pahat yang sama tidak selalu memberi hasil yang sama pada dua material berbeda. Pahat yang terasa ringan saat membubut aluminium bisa bekerja jauh lebih berat ketika digunakan pada baja paduan.

Pemilihan pahat juga berkaitan dengan keselamatan. Pahat potong yang terlalu tipis atau terlalu panjang menonjol dapat patah ketika menerima gaya radial besar. Pahat boring yang terlalu panjang dapat bergetar dan merusak lubang. Pahat ulir yang tidak sejajar dapat menghasilkan ulir rusak dan membuat operator mengulang pekerjaan. Di bengkel, kegagalan pahat bukan hanya masalah biaya, tetapi juga risiko serpihan tajam dan benda kerja cacat.

Cairan pendingin atau cutting fluid dapat membantu proses tertentu, terutama ketika panas perlu dikendalikan dan geram perlu dibersihkan dari zona potong. Namun, tidak semua pekerjaan harus memakai pendingin dengan cara yang sama. Ada material dan jenis pahat yang dapat bekerja kering dalam kondisi tertentu. Wang et al. (2023) membahas bahwa pemesinan berkelanjutan melibatkan pemilihan alat, material, cairan pemotongan, strategi proses, dan efisiensi kerja. Dalam konteks pahat bubut, gagasan ini berarti pemilihan pahat sebaiknya mempertimbangkan hasil, umur alat, keselamatan, dan efisiensi. Jenis pahat juga menentukan bentuk geram. Pahat pengasaran biasanya menghasilkan geram lebih tebal karena kedalaman potong dan gerak makan lebih besar. Pahat penghalusan menghasilkan geram lebih tipis. Pahat potong menghasilkan geram sempit dari celah radial. Pahat ulir menghasilkan geram mengikuti profil alur ulir. Bentuk geram yang terlalu panjang dan sulit putus dapat mengganggu pandangan, menggores permukaan, atau membahayakan operator.

Pada mesin bubut manual, pergantian pahat menjadi bagian dari strategi kerja. Operator tidak hanya mengganti pahat karena bentuknya berbeda, tetapi karena tahap pekerjaannya berubah.

Setelah pengasaran selesai, pahat penghalusan dipasang. Setelah diameter utama sesuai, pahat alur atau pahat ulir dapat digunakan. Pada komponen yang memiliki lubang presisi, pekerjaan luar dan dalam sering diatur agar urutan pemesinan tidak mengganggu pencekaman. Dalam mesin bubut modern, terutama CNC, jenis pahat disusun dalam sistem perkakas yang lebih terencana. Setiap pahat memiliki nomor, posisi koreksi, dan data geometri. Meski lebih otomatis, logika dasarnya tetap sama. Pahat pengasaran, pahat penghalusan, pahat alur, pahat ulir, dan pahat boring tetap dipilih sesuai fungsi. Teknologi hanya membantu pengulangan dan ketepatan gerak, bukan mengganti kebutuhan memahami fungsi pahat.

Pengenalan jenis pahat bubut sebaiknya tidak dilepaskan dari kualitas hasil. Produk yang tampak sederhana, seperti poros kecil, tetap membutuhkan pahat yang tepat. Permukaan dudukan bantalan memerlukan hasil lebih halus daripada bagian yang hanya menjadi area bebas. Ulir harus sesuai pasangan. Alur harus berada pada posisi yang tepat. Lubang dalam harus cukup sentris. Semua itu memperlihatkan bahwa jenis pahat berhubungan langsung dengan fungsi komponen. Pada pekerjaan pendidikan, mahasiswa atau peserta praktik sering diminta mengenali pahat dari bentuk fisiknya. Langkah ini berguna, tetapi belum cukup. Yang lebih penting adalah memahami mengapa pahat tersebut dibentuk demikian. Pahat potong dibuat ramping karena harus masuk ke celah. Pahat penghalusan dibuat dengan ujung membulat agar bekas pemakanan lebih lembut. Pahat ulir dibuat mengikuti sudut profil ulir. Pahat boring dibuat memanjang karena harus bekerja di dalam lubang.

Kesalahan pemilihan pahat sering membuat proses menjadi lebih sulit dari yang seharusnya. Pahat penghalusan yang dipaksa untuk pengasaran akan cepat terbebani. Pahat pengasaran yang dipakai untuk penyelesaian akhir bisa meninggalkan permukaan kasar. Pahat potong yang tidak cukup kaku akan bergetar. Pahat ulir yang tidak sesuai profil akan menghasilkan sambungan yang buruk. Kesalahan seperti ini biasanya tidak dapat diperbaiki hanya dengan menaikkan atau menurunkan rpm. Karena itu, pemilihan pahat perlu dilakukan bersamaan dengan pembacaan gambar kerja. Gambar kerja memberi petunjuk tentang diameter, panjang, alur, ulir, radius, toleransi, dan kekasaran permukaan. Dari informasi tersebut, operator dapat menyusun kebutuhan pahat. Komponen

yang memiliki poros bertingkat, alur pengunci, ulir luar, dan lubang dalam tentu membutuhkan beberapa jenis pahat, bukan satu pahat untuk semua pekerjaan. Pembahasan jenis pahat bubut menjadi jembatan menuju geometri pahat. Setelah mengetahui nama dan fungsi pahat, kita perlu memahami bagian pahat seperti mata potong, bidang geram, radius ujung, tangkai pahat, sudut potong, dan sudut bebas. Tanpa pemahaman geometri, jenis pahat hanya berhenti sebagai klasifikasi. Dengan pemahaman geometri, kita dapat menilai mengapa pahat tertentu lebih cocok untuk material, arah pemakanan, atau kualitas permukaan tertentu.

Jenis pahat juga menjadi dasar untuk memahami parameter pemotongan. Pahat karbida pada pekerjaan pengasaran tidak diperlakukan sama dengan pahat high speed steel pada pekerjaan ulir. Pahat potong membutuhkan pendekatan berbeda dari pahat rata. Pahat boring membutuhkan perhatian terhadap getaran. Setiap jenis pahat memiliki batas aman dan cara kerja yang perlu dihormati agar proses tidak hanya cepat, tetapi juga terkendali. Dalam pekerjaan bubut yang baik, pemilihan pahat bukan keputusan kecil di awal proses. Ia menjadi bagian dari perencanaan keseluruhan. Pahat menentukan cara material dibuang, bentuk geram, beban mesin, kualitas permukaan, ketelitian ukuran, dan risiko kerja. Mesin bubut mungkin menyediakan putaran dan gerak makan, tetapi pahatlah yang benar benar menyentuh benda kerja dan membentuknya menjadi komponen.

C. Terminologi dan Geometri Pahat Bubut

Dalam mesin bubut, pahat merupakan bagian yang langsung bertemu dengan benda kerja. Mesin memberi putaran, eretan memberi gerak makan, dan operator menentukan arah kerja. Namun, penyayatan yang benar benar membentuk permukaan terjadi pada ujung pahat. Di titik kecil itu material ditekan, digeser, dipanaskan, lalu terpisah menjadi geram. Karena itu, memahami terminologi dan geometri pahat bukan urusan nama bagian saja. Ini dasar untuk membaca mengapa pembubutan bisa halus, kasar, stabil, atau justru penuh getaran. Pahat bubut termasuk alat potong bermata tunggal atau single point cutting tool. Artinya, hanya satu mata potong utama yang bekerja dominan pada saat proses penyayatan berlangsung. Berbeda dari pisau frais yang memiliki banyak mata potong, pahat bubut bekerja melalui satu titik kontak utama dengan benda kerja yang berputar. Kondisi ini membuat prinsipnya tampak sederhana, tetapi geometri pahat tetap harus

dibaca dengan cermat karena setiap sudut kecil dapat mengubah gaya potong, aliran geram, temperatur, dan kualitas permukaan.

Terminologi pahat bubut membantu operator memahami bagian mana yang menyayat, bagian mana yang mengarahkan geram, dan bagian mana yang memberi ruang bebas agar pahat tidak menggesek benda kerja. Dalam praktik bengkel, istilah seperti cutting edge, face, nose radius, dan relief angle tidak cukup dihafal. Istilah tersebut perlu dihubungkan dengan gejala nyata. Misalnya, geram yang sulit keluar sering berkaitan dengan bidang geram dan sudut geram. Permukaan yang kasar dapat berkaitan dengan radius ujung, ketajaman mata potong, atau gerak makan. Bagian pertama yang perlu dikenali adalah cutting edge atau mata potong. Mata potong merupakan tepi tajam pahat yang memisahkan lapisan material dari benda kerja. Pada pembubutan memanjang, mata potong utama menerima beban paling besar karena ia bekerja sepanjang permukaan luar benda kerja. Bila mata potong tumpul, pahat tidak lagi menyayat dengan bersih. Ia lebih banyak menekan dan menggesek. Akibatnya, gaya potong meningkat, permukaan menjadi buruk, dan pahat lebih cepat panas.

Mata potong tidak boleh dibayangkan sebagai garis tajam yang berdiri sendiri. Ia bekerja bersama bidang geram, bidang bebas, radius ujung, dan sudut potong. Ketika pahat menyayat baja karbon, misalnya, geram akan naik melewati bidang geram. Ketika pahat menyayat aluminium, geram bisa menempel pada ujung pahat bila geometri dan pelumasan kurang sesuai. Pada besi tuang, geram cenderung pendek dan rapuh. Setiap material memberi respons berbeda terhadap geometri yang sama. Bagian berikutnya adalah face atau bidang geram. Bidang ini menjadi jalur mengalirnya geram setelah material terpotong. Bidang geram yang sesuai membantu geram keluar lebih lancar dari daerah pemotongan. Jika aliran geram terganggu, geram dapat menumpuk, menggores permukaan, atau bahkan tersangkut pada pahat. Pada pekerjaan bubut ulir dan bubut alur, masalah geram yang tidak terkendali terasa lebih jelas karena ruang keluarnya lebih sempit.

Bidang geram berkaitan erat dengan sudut geram atau rake angle. Sudut ini menentukan seberapa mudah pahat masuk ke material dan bagaimana geram mengalir keluar. Sudut geram yang lebih positif biasanya membuat pahat terasa lebih tajam dan gaya potong lebih ringan, tetapi ujung pahat dapat menjadi lebih lemah. Sudut geram yang lebih kecil atau negatif memberi kekuatan lebih

pada ujung pahat, tetapi gaya potong dapat meningkat. Di sinilah pilihan geometri menjadi kompromi, bukan rumus kaku. Pada material lunak seperti aluminium, sudut geram positif sering membantu penyayatan terasa lebih ringan dan mengurangi kecenderungan material menempel. Pada material keras atau proses dengan beban tinggi, pahat sering membutuhkan ujung yang lebih kuat, sehingga sudut geram tidak selalu dibuat besar. Das et al. (2022) menunjukkan bahwa dalam hard turning, parameter pemotongan berkaitan dengan respons seperti kekasaran permukaan, gaya potong, dan keausan pahat. Geometri pahat ikut membentuk respons tersebut karena ia menentukan cara kontak awal antara pahat dan material.

Nose radius atau radius pojok adalah bagian membulat pada ujung pahat. Radius ini sering terlihat kecil, tetapi pengaruhnya cukup terasa pada hasil akhir. Radius yang cukup dapat membantu memperhalus permukaan karena pahat tidak meninggalkan jejak tajam yang terlalu kasar. Pada proses finishing, radius ujung yang tepat dapat membuat permukaan poros lebih rata dan lebih nyaman diperiksa dengan alat ukur. Namun, radius yang terlalu besar juga dapat menaikkan gaya potong dan memicu getaran bila mesin, pahat, atau benda kerja kurang kaku. Radius pojok juga berhubungan dengan kekuatan ujung pahat. Ujung yang terlalu runcing mudah aus atau patah, terutama saat menyayat material yang keras atau saat kedalaman potong cukup besar. Sebaliknya, ujung yang terlalu bulat dapat membuat pahat lebih banyak menekan daripada menyayat pada kondisi tertentu. Operator perlu membaca fungsi pekerjaan. Untuk pengasaran, kekuatan pahat lebih diutamakan. Untuk penyelesaian akhir, kehalusan permukaan menjadi lebih penting.

Shank atau tangkai pahat berfungsi sebagai badan penopang yang dijepit pada rumah pahat. Bagian ini mungkin tidak menyayat langsung, tetapi kekakuannya sangat menentukan kestabilan proses. Tangkai pahat yang terlalu kecil, terlalu panjang menonjol, atau tidak terjepit kuat dapat menimbulkan getaran. Getaran kecil saja dapat meninggalkan pola bergelombang pada permukaan benda kerja. Dalam pekerjaan alur dan parting off, kekakuan tangkai bahkan menjadi urusan keamanan karena pahat yang bergetar mudah terjepit. Panjang pahat yang keluar dari dudukan sebaiknya dibuat sesingkat mungkin selama masih cukup menjangkau area kerja. Prinsip ini sederhana, tetapi sering

dilanggar. Operator kadang membiarkan pahat terlalu panjang karena ingin mencapai bagian tertentu tanpa mengganti setelan. Akibatnya, pahat menjadi seperti batang lentur. Semakin panjang tonjolan pahat, semakin besar kemungkinan muncul getaran. Permukaan menjadi kasar, ukuran sulit dijaga, dan umur pahat menurun.

Setelah bagian utama pahat dikenali, pembahasan bergerak ke sudut sudut pahat. Sudut pahat bukan angka dekoratif pada gambar teknik. Ia menentukan cara pahat menyentuh material. Sudut yang tepat membuat pahat menyayat stabil, geram mengalir wajar, dan permukaan lebih terkendali. Sudut yang salah dapat membuat pahat menggesek, menimbulkan panas berlebih, atau menghasilkan permukaan yang terlihat seperti tercabik. Side cutting edge angle atau sudut potong samping adalah sudut yang berhubungan dengan arah mata potong utama terhadap benda kerja. Sudut ini memengaruhi arah gaya potong dan panjang kontak antara pahat dan material. Pada pembubutan memanjang, sudut potong samping membantu menentukan bagaimana pahat masuk ke permukaan benda kerja. Bila sudutnya kurang sesuai, pahat dapat menghasilkan tekanan radial yang besar sehingga benda kerja ramping mudah melendut.

End cutting edge angle atau sudut potong bantu memberi jarak bebas antara mata potong bantu dan permukaan benda kerja. Sudut ini membantu mencegah bagian depan pahat menggesek permukaan yang sudah terbentuk. Gesekan pada bagian yang seharusnya bebas dapat menaikkan panas dan merusak permukaan. Pada pekerjaan facing, sudut potong bantu terasa penting karena pahat bergerak menuju atau menjauhi pusat benda kerja. Side relief angle atau sudut bebas potong utama memberi ruang antara bidang bebas pahat dan permukaan benda kerja. Fungsi utamanya adalah mencegah pahat mengeruk atau menggesek permukaan setelah material tersayat. Bila sudut bebas terlalu kecil, bidang pahat dapat menempel pada benda kerja. Proses pemotongan berubah menjadi proses gesek. Tanda yang sering muncul adalah permukaan kusam, panas meningkat, dan pahat cepat aus.

End relief angle atau sudut bebas muka bekerja dengan prinsip serupa, tetapi posisinya berada pada sisi depan pahat. Sudut ini memberi jarak antara bidang bantu pahat dan permukaan benda kerja. Pada proses facing atau pembubutan dekat bahu poros, sudut bebas muka yang cukup membantu pahat bergerak tanpa

menggaruk bidang yang sudah selesai. Jika sudut ini salah, permukaan muka dapat terlihat kasar walaupun putaran dan gerak makan sudah dipilih dengan hati hati. Back rake angle atau sudut miring belakang memengaruhi arah aliran geram ke belakang pahat. Sudut ini sering dikaitkan dengan sifat material. Pada material lunak, sudut miring yang lebih positif dapat membantu geram mengalir lebih lancar. Pada material keras, sudut yang terlalu positif dapat melemahkan ujung pahat. Karena itu, pemilihan sudut tidak dapat dilepaskan dari material benda kerja dan bahan pahat, misalnya high speed steel atau karbida.

Dalam proses bubut, geometri pahat bekerja bersama parameter pemotongan. Kecepatan potong, gerak makan, dan kedalaman potong dapat dipilih dengan benar, tetapi hasilnya tetap buruk bila geometri pahat tidak sesuai. Trinh (2024) menekankan bahwa kekasaran permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Artinya, kualitas hasil bukan akibat satu faktor tunggal. Ia lahir dari hubungan beberapa keputusan yang saling memengaruhi. Hubungan antara geometri pahat dan gerak makan sangat jelas pada permukaan hasil finishing. Gerak makan yang besar meninggalkan jejak pemakanan lebih kasar. Namun, jejak itu juga dipengaruhi oleh radius ujung pahat. Dua proses dengan gerak makan sama dapat menghasilkan permukaan berbeda bila radius ujung pahatnya berbeda. Di sinilah operator perlu berhenti melihat angka secara terpisah. Angka pada mesin dan bentuk pahat harus dibaca bersama.

Geometri pahat juga berhubungan dengan gaya potong. Pahat yang lebih tajam dengan sudut geram positif dapat mengurangi gaya potong pada material tertentu. Namun, pahat semacam ini tidak selalu cocok untuk pekerjaan berat karena ujungnya dapat menjadi lebih lemah. Pahat dengan sudut lebih kuat dapat bertahan pada beban besar, tetapi membutuhkan tenaga potong lebih tinggi. Pada mesin kecil atau benda kerja ramping, kenaikan gaya potong dapat langsung terlihat sebagai getaran atau lendutan. Bahan pahat ikut menentukan pilihan geometri. Pahat high speed steel lebih mudah diasah dan sering digunakan pada latihan bengkel, pekerjaan ringan, atau bentuk pahat khusus. Pahat karbida lebih tahan terhadap temperatur dan dapat bekerja pada kecepatan lebih tinggi, tetapi tidak selalu sefleksibel HSS dalam pembentukan manual. Perbedaan bahan pahat ini membuat sudut yang cocok

untuk HSS belum tentu cocok untuk karbida. Wang et al. (2023) membahas bahwa keberlanjutan pemesinan perlu melihat hubungan peralatan, proses, alat potong, material, dan strategi kerja secara terpadu.

Pada pekerjaan pengasaran atau roughing, pahat menerima beban yang lebih besar. Geometri pahat untuk pekerjaan ini perlu memberi kekuatan pada ujung potong dan mampu membuang geram dengan baik. Permukaan hasil pengasaran belum harus sangat halus, tetapi proses harus stabil. Jika pahat terlalu tajam tetapi lemah, ujung pahat dapat cepat rusak. Jika pahat terlalu tumpul, gaya potong meningkat dan mesin bekerja lebih berat. Pada pekerjaan akhir atau finishing, perhatian berpindah ke kualitas permukaan dan ketepatan ukuran. Pahat dengan ujung yang masih tajam, radius yang sesuai, dan sudut bebas yang cukup akan membantu menghasilkan permukaan lebih baik. Akan tetapi, finishing bukan hanya memakai pahat halus. Kedalaman potong harus kecil, gerak makan perlu disesuaikan, dan benda kerja harus tercekam stabil. Geometri pahat hanya satu bagian dari rangkaian proses.

Geometri pahat juga menentukan pembentukan geram. Geram yang keluar terlalu panjang dapat membahayakan operator dan menggores benda kerja. Geram yang terlalu pendek dan pecah pecah tidak selalu buruk, tergantung materialnya. Pada baja liat, pengendalian geram sering menjadi perhatian penting. Pada besi tuang, geram cenderung rapuh. Bidang geram dan sudut geram membantu mengarahkan bentuk geram tersebut, walaupun hasilnya tetap dipengaruhi parameter dan material. Pada pahat ulir, geometri pahat menjadi lebih ketat karena profil pahat harus mengikuti bentuk ulir yang dibuat. Untuk ulir metrik, sudut pahat harus sesuai dengan profil 60 derajat. Jika sudut pahat salah, ulir mungkin tetap terlihat terbentuk, tetapi tidak akan cocok dengan pasangan secara baik. Ini memperlihatkan bahwa geometri pahat bukan hanya memengaruhi permukaan, tetapi juga kemampuan komponen untuk dirakit.

Pada pahat alur dan parting off, geometri yang ramping menimbulkan tantangan tersendiri. Pahat harus cukup tipis agar alur tidak terlalu lebar, tetapi juga cukup kaku agar tidak bergetar. Sudut bebas samping perlu cukup agar sisi pahat tidak bergesekan dengan dinding alur. Jika sisi pahat menggesek, panas naik dan pahat mudah terjepit. Pada operasi ini, kesalahan kecil dalam

geometri atau pemasangan pahat dapat berujung patah pahat. Pada pahat boring, kekakuan tangkai dan sudut bebas menjadi perhatian besar karena pahat bekerja di dalam lubang. Ruang geraknya terbatas, pandangan operator lebih sulit, dan batang pahat mudah bergetar bila terlalu panjang. Geometri pahat harus memberi ruang bebas yang cukup terhadap dinding lubang. Bila tidak, pahat akan menggesek permukaan dalam dan membuat ukuran lubang sulit dikendalikan.

Dalam praktik, pemeriksaan geometri pahat dapat dilakukan secara visual, memakai mal sudut, atau melalui pengasahan yang mengikuti standar bengkel. Pada pahat HSS, operator sering mengasah sendiri sudut pahat sesuai kebutuhan. Ini memberi fleksibilitas, tetapi juga membuka peluang kesalahan. Pahat dapat terlihat tajam, padahal sudut bebasnya kurang. Pahat dapat terlihat simetris, padahal radius ujungnya tidak merata. Pemeriksaan sederhana sebelum proses sering menghindarkan banyak masalah. Pahat sisipan atau insert karbida memberi cara yang berbeda. Geometri sudah dibentuk oleh pabrik, lalu operator memilih tipe sisipan sesuai material dan jenis pekerjaan. Pilihan ini lebih konsisten, tetapi tetap memerlukan pemahaman. Operator harus membaca kode sisipan, bentuk ujung, radius, sudut bebas, dan tipe pemegangnya. Pahat karbida yang dipilih asal dapat menghasilkan masalah yang sama dengan pahat HSS yang diasah asal.

Kausan pahat mengubah geometri secara perlahan. Mata potong yang semula tajam dapat menjadi tumpul. Radius ujung berubah. Bidang bebas aus. Akibatnya, gaya potong naik dan permukaan memburuk. Karena perubahan ini terjadi bertahap, operator kadang tidak langsung menyadarinya. Tanda yang perlu diperhatikan adalah suara pemotongan berubah, warna geram berbeda, ukuran mulai sulit stabil, dan permukaan tampak lebih kasar dari biasanya. Wagri et al. (2023) menunjukkan bahwa performa pahat karbida berlapis pada pembubutan kering baja AISI 4340 berkaitan dengan keausan, gaya potong, dan kondisi permukaan yang dihasilkan. Temuan seperti ini memperkuat gagasan bahwa pahat tidak hanya dipilih berdasarkan kekerasannya, tetapi juga berdasarkan interaksinya dengan material benda kerja dan kondisi pemotongan. Pahat yang baik pada satu material belum tentu memberi hasil sama pada material lain.

Geometri pahat juga berkaitan dengan keselamatan kerja. Pahat yang salah sudut dapat menimbulkan getaran, geram tidak

terkendali, atau pahat patah. Pahat yang dipasang terlalu panjang dapat bergetar kuat. Pahat potong yang tidak tegak dapat terjepit. Dalam bengkel, risiko seperti ini bukan teori. Operator dapat mendengarnya dari suara mesin dan melihatnya dari permukaan benda kerja. Karena itu, memahami geometri pahat juga berarti memahami batas aman proses. Pembelajaran geometri pahat sebaiknya tidak dimulai dari hafalan sudut semata. Lebih baik pembaca diajak melihat hubungan antara bagian pahat dan efeknya. Mata potong menyayat. Bidang geram membawa geram keluar. Sudut geram membantu mengatur gaya dan aliran geram. Sudut bebas mencegah gesekan. Radius ujung memengaruhi permukaan. Tangkai pahat memberi kekakuan. Setelah hubungan ini dipahami, angka sudut pada tabel akan terasa lebih masuk akal.

Pada tahap ini, terminologi dan geometri pahat bubut menjadi jembatan menuju pembahasan sudut pahat dan pemilihan pahat berdasarkan material. Tanpa terminologi, kita hanya melihat pahat sebagai benda tajam. Dengan terminologi, kita mulai memahami mengapa satu pahat menghasilkan permukaan halus, sedangkan pahat lain menimbulkan geram buruk atau getaran. Bahasa teknis membuat proses yang semula tampak kasar menjadi lebih dapat dikendalikan. Dalam pekerjaan nyata, operator yang memahami geometri pahat biasanya lebih cepat menemukan sumber masalah. Permukaan kasar tidak langsung dianggap karena putaran salah. Bisa jadi radius ujung terlalu kecil, pahat tumpul, sudut bebas kurang, atau pahat terlalu panjang. Geram yang buruk tidak selalu karena material jelek. Bisa jadi bidang geram dan sudut geram tidak sesuai. Cara membaca seperti ini membuat penyelesaian masalah lebih terarah.

D. Sudut Pahat dan Pemilihan Pahat Berdasarkan Material Benda Kerja

Sudut pahat menentukan cara pahat “bertemu” dengan benda kerja. Di mesin bubut, pertemuan itu terjadi sangat singkat, berulang, dan penuh tekanan. Benda kerja berputar, pahat masuk ke permukaan, lalu lapisan material berubah menjadi geram. Jika sudut pahat sesuai, penyayatan terasa stabil. Jika sudutnya keliru, mesin bisa berbunyi kasar, permukaan menjadi buruk, geram sulit keluar, atau pahat cepat aus. Pemilihan sudut pahat tidak bisa dilepaskan dari material benda kerja. Aluminium tidak bereaksi sama seperti baja karbon. Baja tahan karat tidak bisa diperlakukan persis seperti besi tuang. Titanium juga punya watak sendiri.

Mungkin sekilas semua sama sama logam, tetapi saat pahat mulai menyayat, perbedaannya langsung terasa pada gaya potong, panas, bentuk geram, dan kualitas permukaan. Karena itu, operator perlu memahami sudut pahat sebagai bagian dari keputusan proses, bukan hanya angka pada tabel.

Pahat bubut umumnya memiliki beberapa sudut penting, antara lain back rake angle, side rake angle, end relief angle, side relief angle, serta side and end cutting edge angle. Setiap sudut memiliki tugas berbeda. Ada sudut yang mengatur aliran geram. Ada yang memberi ruang bebas agar pahat tidak menggesek permukaan benda kerja. Ada pula yang memengaruhi arah gaya potong. Bila semuanya bekerja seimbang, proses bubut menjadi lebih mudah dikendalikan. Back rake angle atau sudut miring belakang berpengaruh terhadap arah geram keluar dari pahat. Pada material yang relatif lunak, sudut ini dapat dibuat lebih positif agar geram mengalir lebih ringan. Pada material yang keras, sudut yang terlalu positif dapat melemahkan ujung pahat. Inilah sebabnya bahan keras sering membutuhkan geometri yang lebih kuat, walaupun gaya potongnya bisa terasa lebih besar.

Side rake angle atau sudut geram samping juga memengaruhi pembentukan geram. Sudut ini membantu menentukan apakah material terpotong dengan ringan atau justru terdorong keras sebelum terpisah. Pada aluminium, sudut geram yang cukup positif membantu mengurangi kecenderungan material menempel pada pahat. Pada baja yang lebih keras, sudut geram biasanya lebih hati-hati agar ujung pahat tidak mudah rusak. Sudut bebas, baik end relief angle maupun side relief angle, berfungsi memberi jarak antara bidang pahat dan permukaan benda kerja. Pahat seharusnya menyayat pada mata potongnya, bukan menggosok dengan seluruh badannya. Bila sudut bebas terlalu kecil, bidang pahat dapat menggesek permukaan hasil potong. Akibatnya, panas naik, permukaan menjadi kusam, dan pahat lebih cepat aus. Bila sudut bebas terlalu besar, ujung pahat bisa menjadi lemah. Jadi, lagi-lagi perlu keseimbangan.

Sudut potong samping dan sudut potong bantu membantu mengatur arah penyayatan serta memberi ruang agar mata potong tidak menekan bagian yang tidak perlu. Pada pembubutan memanjang, sudut potong samping memengaruhi bagaimana gaya potong terbagi antara arah radial dan aksial. Jika benda kerja panjang dan ramping, gaya radial yang terlalu besar dapat

membuat benda kerja melendut. Hasilnya bisa berubah menjadi sedikit tirus, walaupun operator sebenarnya ingin membuat diameter lurus. Pemilihan pahat juga perlu memperhatikan bahan pahat. Dua bahan yang sering dibahas pada tingkat dasar adalah high speed steel dan carbide. Pahat high speed steel relatif mudah diasah, cukup tangguh, dan cocok untuk latihan atau pekerjaan yang membutuhkan bentuk pahat khusus. Pahat carbide lebih tahan panas dan mampu bekerja pada kecepatan potong lebih tinggi, tetapi umumnya lebih rapuh terhadap benturan dibanding HSS.

Dalam praktik bengkel, pahat HSS sering memberi ruang belajar yang baik. Operator dapat mengasah sudut pahat, mengamati hasilnya, lalu memperbaiki bentuknya. Namun, keluwesan ini juga membawa risiko. Jika pengasahan kurang tepat, pahat bisa terlihat tajam tetapi sudut bebasnya salah. Pahat carbide, terutama bentuk sisipan atau insert, biasanya memiliki geometri pabrik yang lebih konsisten. Meski begitu, operator tetap harus memilih tipe sisipan yang sesuai dengan material dan jenis pekerjaan. Material benda kerja menjadi faktor utama dalam pemilihan sudut pahat. Aluminium dan paduan magnesium cenderung mudah disayat, tetapi dapat menempel pada mata pahat bila geometri tidak sesuai. Tembaga dan paduannya dapat menghasilkan geram yang liat. Baja karbon membutuhkan pahat yang kuat dan parameter yang lebih terukur. Baja tahan karat lebih menantang karena panas dan kecenderungan pengerasan kerja. Besi tuang memiliki geram rapuh, tetapi debunya perlu diperhatikan. Titanium dan paduan temperatur tinggi menuntut pengaturan yang lebih hati-hati karena panas dan keausan pahat dapat meningkat cepat.

Pada pahat carbide, nilai sudut untuk aluminium tidak selalu sebesar HSS. Ini terjadi karena pahat carbide memiliki karakter bahan yang berbeda. Ia lebih tahan panas dan lebih keras, tetapi tidak selalu membutuhkan geometri setajam HSS. Pada banyak pekerjaan, kekuatan ujung pahat karbida perlu dijaga agar tidak mudah pecah, terutama bila proses tidak stabil atau benda kerja memiliki permukaan awal yang tidak rata. Untuk baja, tabel menunjukkan kecenderungan yang berbeda. Pada HSS, sudut geram masih cukup positif, sedangkan pada carbide sudut tertentu dapat bernilai negatif. Nilai negatif ini tidak berarti pahat “salah arah”. Justru pada material yang lebih berat disayat, sudut negatif dapat membuat ujung pahat lebih kuat. Beban pemotongan tidak

hanya soal ketajaman. Kadang pahat perlu lebih kokoh agar mampu bertahan pada tekanan dan temperatur yang tinggi.

Baja tahan karat membutuhkan perhatian khusus. Material ini sering terasa lebih “lengket” dan dapat mengalami pengerasan kerja bila proses tidak tepat. Sudut pahat yang kurang sesuai dapat membuat pahat menggosok, bukan menyayat. Ketika itu terjadi, permukaan mengeras, gaya potong naik, lalu pahat makin cepat aus. Situasi seperti ini cukup sering membuat operator pemula bingung karena putaran terlihat normal, tetapi suara dan permukaan hasilnya tidak nyaman dibaca. Paduan temperatur tinggi dan paduan refraktori menuntut pendekatan yang lebih konservatif. Material seperti ini umumnya digunakan pada lingkungan kerja berat, sehingga sifatnya tidak selalu ramah terhadap pahat. Panas dapat menumpuk di daerah potong, sementara geram tidak selalu keluar dengan mudah. Pada kondisi seperti ini, sudut pahat perlu memberi kekuatan pada ujung potong dan membantu mengendalikan aliran geram. Padhan et al. (2023) menunjukkan bahwa integritas permukaan pada proses hard turning dipengaruhi oleh kondisi pemotongan, pahat, dan pelumasan, sehingga pemilihan geometri tidak dapat dipisahkan dari lingkungan pemotongan.

Paduan titanium juga tidak bisa diperlakukan sembarangan. Titanium memiliki konduktivitas panas yang rendah, sehingga panas lebih banyak bertahan di daerah potong. Jika geometri pahat tidak sesuai, pahat akan menerima beban termal yang tinggi. Pada pahat carbide, sudut geram negatif pada tabel memberi petunjuk bahwa kekuatan ujung pahat menjadi perhatian besar. Dengan kata lain, pahat tidak hanya harus tajam, tetapi juga harus mampu bertahan. Besi tuang memiliki karakter yang agak berbeda. Geramnya cenderung pendek dan rapuh, tidak seperti baja liat yang dapat menghasilkan geram panjang. Karena itu, sudut pahat untuk besi tuang tidak selalu mengejar aliran geram panjang yang mulus. Yang lebih penting adalah kestabilan pemotongan, ketahanan ujung pahat, dan pengendalian debu geram. Pada pahat carbide, sudut negatif membantu memperkuat ujung pahat saat menyayat material yang bisa bersifat abrasif.

Untuk termoplastik dan termoset, sudut bebas pada tabel terlihat lebih besar, terutama pada HSS untuk beberapa kondisi. Plastik membutuhkan ruang bebas yang cukup agar pahat tidak menggesek dan memanaskan permukaan. Panas berlebih dapat

membuat permukaan meleleh, menggumpal, atau berubah bentuk. Pada termoset, sifat materialnya berbeda dari termoplastik, sehingga respons terhadap panas dan pemotongan juga tidak sama. Karena itu, pemilihan pahat untuk material nonlogam tetap membutuhkan perhatian. Pemilihan sudut pahat juga harus dikaitkan dengan tujuan proses. Pada pekerjaan pengasaran atau roughing, pahat mengambil material lebih banyak. Bebannya lebih besar. Sudut pahat perlu memberi kekuatan pada ujung potong dan membantu geram keluar tanpa menyumbat daerah potong. Permukaan hasil pengasaran memang belum harus sangat halus, tetapi proses tetap harus stabil agar tidak merusak ukuran dasar.

Pada pekerjaan akhir atau finishing, perhatian bergeser ke kualitas permukaan dan ketepatan ukuran. Pahat harus tajam, radius ujung sesuai, dan sudut bebas cukup agar tidak menggesek permukaan hasil potong. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kekasaran permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pernyataan ini membuat sudut pahat perlu dibaca bersama putaran, gerak makan, kedalaman potong, dan material. Pahat yang terlalu tajam untuk pekerjaan berat bisa cepat rusak. Pahat yang terlalu kuat tetapi kurang tajam bisa membuat gaya potong membesar. Dua-duanya bisa bermasalah. Pada benda kerja pendek dan kaku, gaya potong tinggi mungkin masih bisa diterima. Pada benda kerja panjang dan ramping, gaya potong yang terlalu besar dapat membuat benda kerja melendut. Hasilnya bukan hanya permukaan kasar, tetapi juga bentuk diameter yang menyimpang.

Dalam pemilihan pahat, operator juga perlu membedakan antara pahat HSS yang diasah sendiri dan pahat carbide insert yang dipilih dari katalog. Pada HSS, sudut dapat dibentuk langsung dengan pengasahan. Kelebihannya fleksibel. Kekurangannya, kualitas sudut sangat bergantung pada keterampilan pengasah. Pada pahat sisipan karbida, geometri lebih konsisten, tetapi operator harus memahami kode, radius ujung, tipe pemegang, dan rekomendasi material. Wagri et al. (2023) meneliti performa pahat karbida berlapis saat pembubutan kering baja AISI 4340 dan menunjukkan bahwa kondisi material, pahat, serta proses dapat memengaruhi kualitas permukaan, umur pahat, dan konsumsi daya. Gagasan ini penting untuk pembahasan dasar mesin bubut. Pahat tidak boleh dipilih hanya karena “lebih keras” atau “lebih mahal”.

Pahat harus dipilih karena cocok dengan material, kondisi mesin, dan tujuan pemesinan.

Kecepatan potong ikut memengaruhi pemilihan pahat. Pahat carbide umumnya mampu bekerja pada kecepatan lebih tinggi dibanding HSS. Namun, menaikkan kecepatan tanpa mempertimbangkan pencekaman dan kekakuan mesin dapat memunculkan masalah baru. Mesin kecil, benda kerja panjang, atau pahat yang terlalu menonjol dari kedudukan dapat bergetar meskipun jenis pahatnya baik. Geometri pahat yang benar tetap membutuhkan sistem kerja yang stabil. Gerak makan juga perlu dibaca bersama sudut pahat. Gerak makan besar membuat ketebalan geram meningkat. Jika sudut geram dan radius ujung tidak sesuai, permukaan dapat tampak bergaris kasar. Gerak makan kecil dapat memberi permukaan lebih halus, tetapi bila terlalu kecil pada material tertentu, pahat justru menggosok. Di sinilah pengalaman operator mulai bekerja, tetapi pengalaman itu tetap harus ditopang pemahaman geometri.

Kedalaman potong membawa pengaruh serupa. Pada kedalaman potong besar, pahat menerima gaya lebih tinggi. Sudut pahat yang terlalu lemah dapat membuat ujung cepat aus atau patah. Pada kedalaman potong kecil, terutama saat finishing, ketajaman pahat dan sudut bebas menjadi lebih terasa. Jika pahat tumpul, pemakanan kecil tidak otomatis membuat permukaan halus. Pahat bisa hanya menggosok dan meninggalkan permukaan kusam.

Pemilihan pahat berdasarkan material juga perlu memperhatikan bentuk geram. Aluminium dapat menghasilkan geram panjang dan cenderung lengket. Baja lunak dapat menghasilkan geram kontinu yang tajam. Besi tuang menghasilkan geram pendek dan rapuh. Baja tahan karat dapat memberi geram liat dan panas. Bentuk geram ini memberi petunjuk apakah sudut pahat, kecepatan, gerak makan, dan pendinginan sudah cukup sesuai. Cairan pendingin dan pelumasan tidak menggantikan sudut pahat yang benar, tetapi dapat membantu proses. Pada baja, cairan pemotong dapat mengurangi panas dan gesekan. Pada aluminium, pelumasan membantu mengurangi material menempel pada pahat. Pada besi tuang, pemotongan kering kadang dipilih karena geram rapuh dan debu. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan sebagai integrasi antara peralatan, proses, dan

strategi, termasuk pemilihan alat potong, material, cairan pendingin, serta optimasi proses.

Bila permukaan benda kerja kasar, sumber masalah tidak boleh langsung ditimpakan pada putaran mesin. Bisa saja sudut bebas terlalu kecil, pahat tumpul, radius ujung terlalu kecil, pahat terlalu panjang menonjol, atau bahan pahat tidak cocok. Jika pahat cepat aus, mungkin kecepatan terlalu tinggi, pendinginan kurang, atau sudut pahat terlalu lemah untuk material tersebut. Cara membaca masalah seperti ini membuat operator bekerja lebih sistematis. Pada pembelajaran bengkel, tabel sudut pahat sebaiknya dipakai sebagai alat membaca, bukan sekadar hafalan. Kita dapat membandingkan mengapa aluminium membutuhkan sudut geram lebih positif pada HSS, sedangkan baja dengan pahat carbide dapat memakai sudut negatif. Dari perbandingan itu, muncul pemahaman bahwa setiap material “meminta” cara penyayatan yang berbeda. Pahat yang cocok untuk satu material belum tentu cocok untuk material lain.

Pemilihan sudut pahat juga berhubungan dengan keselamatan kerja. Pahat yang salah geometri dapat menghasilkan geram liar, getaran, dan panas berlebih. Pada pahat alur atau parting off, sudut bebas yang kurang dapat membuat pahat terjepit. Pada pahat ulir, sudut profil yang salah dapat merusak ulir dan membuat pahat menerima beban tidak seimbang. Dalam mesin bubut, kualitas dan keselamatan sering berawal dari pemasangan serta pemilihan pahat. Pemeriksaan pahat sebelum digunakan perlu menjadi kebiasaan. Mata potong dilihat apakah masih tajam. Radius ujung diperiksa apakah sesuai. Sudut bebas diamati agar pahat tidak menggesek. Untuk pahat HSS, hasil pengasahan perlu dicek kembali sebelum menyentuh benda kerja. Untuk pahat insert, kondisi sisi potong perlu diperiksa karena sisipan yang aus kadang masih terlihat layak dari jauh.

Pada benda kerja yang menuntut kualitas tinggi, percobaan pemakanan ringan dapat membantu. Operator dapat menyayat sedikit, melihat geram, mendengar suara mesin, dan memeriksa permukaan. Bila geram keluar wajar dan permukaan cukup baik, proses dapat dilanjutkan. Bila suara kasar atau pahat terasa berat, setelan perlu diperiksa. Cara ini terlihat sederhana, tetapi sangat berguna sebelum pemakanan besar dilakukan. Dalam produksi modern, pemilihan sudut dan bahan pahat sering dibantu katalog pahat, perangkat lunak, data pemotongan, bahkan pemantauan

sensor. Namun, prinsip dasarnya tetap sama. Operator atau teknisi harus memahami material, jenis pahat, kondisi mesin, dan tujuan proses. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa metode pemesinan seperti turning memiliki prinsip, penggunaan, dan kondisi kerja tertentu. Sudut pahat adalah bagian dari kondisi kerja itu.

Das et al. (2022) memperlihatkan bahwa pada hard turning, parameter seperti kecepatan, gerak makan, dan kedalaman potong dapat dimodelkan untuk memprediksi kekasaran permukaan, gaya potong, serta keausan pahat. Walaupun penelitian tersebut bergerak pada pemodelan modern, pembelajaran dasarnya tetap relevan: pahat, material, dan parameter pemotongan selalu bekerja bersama. Tidak ada satu variabel yang berdiri sendirian. Dalam bengkel pendidikan, latihan pemilihan pahat dapat dimulai dari beberapa material umum. Misalnya, aluminium, baja karbon rendah, kuningan, dan besi tuang. Peserta dapat membandingkan bentuk geram, suara mesin, gaya pemakanan, dan permukaan hasil potong. Dari latihan seperti ini, tabel sudut pahat tidak lagi terasa seperti angka mati. Ia berubah menjadi panduan yang dapat diuji pada benda kerja nyata. Sudut pahat dan pemilihan pahat berdasarkan material menjadi jembatan menuju pembahasan parameter pemotongan. Setelah pahat dipilih, operator masih harus menentukan kecepatan potong, putaran spindel, gerak makan, dan kedalaman potong. Pahat yang tepat memberi awal yang baik, tetapi hasil akhir tetap bergantung pada keseluruhan proses. Mesin, pahat, benda kerja, parameter, pendinginan, pencekaman, dan pengukuran harus berjalan dalam satu kesatuan kerja.

E. Parameter Pemotongan

Parameter pemotongan merupakan bagian penting dalam operasi mesin bubut karena menentukan bagaimana pahat menyayat benda kerja, seberapa cepat material dibuang, dan seberapa baik kualitas permukaan yang dihasilkan. Pada tahap awal pembelajaran mesin bubut, bagian ini perlu dipahami sebelum membahas variasi operasi seperti bubut lurus, bubut tirus, ulir, alur, atau parting off. Tanpa pemahaman parameter, proses bubut mudah diperlakukan hanya sebagai gerakan memutar dan menyayat. Padahal, setiap angka yang dipilih pada mesin akan memengaruhi pahat, benda kerja, geram, panas, getaran, waktu kerja, dan ketelitian ukuran. Dalam proses bubut, benda kerja berputar sebagai gerak utama, sedangkan pahat bergerak menyayat mengikuti arah tertentu. Putaran benda kerja tidak boleh dipilih

hanya berdasarkan kebiasaan operator. Diameter benda kerja, jenis material, jenis pahat, kondisi mesin, dan tujuan pengerjaan harus dipertimbangkan bersama. Ivanov, Evtuhov, Dehtiarov, dan Trojanowska (2025) menjelaskan bahwa proses turning termasuk salah satu metode dasar pemrosesan yang bekerja melalui hubungan antara gerak, alat potong, dan kondisi kerja. Artinya, pembubutan bukan sekadar memegang tuas mesin, melainkan mengendalikan interaksi teknis antara pahat dan benda kerja.

Parameter pemotongan pada mesin bubut umumnya mencakup kecepatan potong, putaran spindel, gerak makan, dan kedalaman potong. Keempatnya saling berhubungan, walaupun sering dibahas satu per satu agar lebih mudah dipahami. Kecepatan potong menjelaskan seberapa cepat sisi potong bergerak terhadap permukaan benda kerja. Putaran spindel menunjukkan jumlah putaran benda kerja setiap menit. Gerak makan menunjukkan perpindahan pahat setiap satu putaran benda kerja. Kedalaman potong menunjukkan tebal lapisan material yang diambil oleh pahat dalam satu lintasan. Hubungan antarparameter ini dapat dibayangkan melalui pekerjaan sederhana, misalnya membubut poros baja dari diameter 32 mm menjadi 30 mm. Operator tidak cukup hanya memasang benda kerja pada chuck lalu menyalakan mesin. Ia harus menentukan pahat yang sesuai, memilih kecepatan potong yang aman untuk baja, menghitung putaran spindel, menetapkan gerak makan, dan menentukan kedalaman potong agar pahat tidak menerima beban berlebihan. Jika salah satu keputusan terlalu agresif, hasilnya bisa berupa permukaan kasar, pahat cepat aus, atau diameter akhir meleset dari ukuran rancangan.

Kecepatan potong atau cutting speed adalah jarak tempuh titik potong pada permukaan benda kerja dalam satuan waktu. Pada mesin bubut, satuan yang umum digunakan adalah meter per menit. Secara konseptual, kecepatan potong menggambarkan kecepatan relatif antara mata pahat dan permukaan benda kerja yang sedang berputar. Rumus dasarnya dapat ditulis sebagai $v = \pi \times D \times n / 1000$, dengan v sebagai kecepatan potong dalam meter per menit, D sebagai diameter benda kerja dalam milimeter, dan n sebagai putaran spindel dalam putaran per menit. Pemilihan kecepatan potong perlu disesuaikan dengan material benda kerja dan material pahat. Aluminium dan kuningan umumnya dapat dikerjakan dengan kecepatan potong lebih tinggi dibandingkan baja keras atau baja tahan karat. Pahat karbida juga dapat bekerja

pada kecepatan lebih tinggi dibandingkan pahat high speed steel. Namun, pilihan ini tetap perlu hati hati karena kecepatan yang terlalu tinggi meningkatkan panas di daerah potong. Panas berlebih membuat pahat kehilangan ketajaman, mempercepat keausan, dan dalam beberapa kasus dapat merusak permukaan benda kerja.

Trinh (2024) menegaskan bahwa kekasaran permukaan hasil pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pernyataan ini penting karena hasil permukaan tidak lahir dari satu faktor tunggal. Permukaan poros yang halus tidak hanya ditentukan oleh pahat baru, tetapi juga oleh putaran yang tepat, gerak makan yang wajar, kedalaman potong yang sesuai, dan pencekaman yang stabil. Jika kecepatan potong terlalu rendah, penyayatan bisa terasa berat dan permukaan kurang baik. Jika terlalu tinggi, panas dan keausan meningkat. Putaran spindel atau spindle speed merupakan jumlah putaran benda kerja dalam satu menit. Nilai ini biasanya dinyatakan dalam rpm. Putaran spindel dihitung dari kecepatan potong dan diameter benda kerja dengan rumus $n = 1000 \times v / (\pi \times D)$. Rumus ini menunjukkan bahwa diameter benda kerja sangat menentukan nilai putaran. Pada kecepatan potong yang sama, benda kerja berdiameter kecil membutuhkan putaran lebih tinggi, sedangkan benda kerja berdiameter besar membutuhkan putaran lebih rendah.

Hubungan antara diameter dan putaran spindel sering menjadi sumber kesalahan bagi pemula. Misalnya, baja silinder berdiameter 20 mm dan 80 mm tidak boleh otomatis diputar pada rpm yang sama jika kecepatan potong yang diinginkan sama. Benda kerja 20 mm membutuhkan rpm lebih tinggi karena kelilingnya lebih kecil. Benda kerja 80 mm membutuhkan rpm lebih rendah karena satu putaran sudah menghasilkan jarak tempuh permukaan yang lebih panjang. Inilah alasan tabel kecepatan potong selalu perlu dibaca bersama diameter benda kerja. Gerak makan atau feed adalah jarak perpindahan pahat setiap satu putaran benda kerja. Pada proses bubut, satuan yang umum digunakan adalah milimeter per putaran. Gerak makan dapat terjadi sejajar sumbu benda kerja pada pembubutan memanjang, atau bergerak radial pada proses meratakan permukaan ujung. Nilai gerak makan yang besar mempercepat pembuangan material, tetapi biasanya meninggalkan bekas sayatan lebih kasar. Nilai gerak makan yang kecil membuat permukaan lebih halus, tetapi waktu pemesinan menjadi lebih lama.

Dalam pekerjaan roughing, gerak makan dapat dibuat lebih besar karena tujuan utamanya adalah mengurangi material dengan cepat. Permukaan yang dihasilkan belum harus sangat halus selama masih menyisakan ukuran untuk pekerjaan akhir. Pada pekerjaan finishing, gerak makan dibuat lebih kecil agar bekas sayatan lebih rapat dan permukaan lebih baik. Pasić et al. (2024) menunjukkan bahwa kecepatan potong, gerak makan, kedalaman potong, dan radius sisipan pahat dapat memengaruhi kekasaran permukaan serta gaya potong pada proses bubut.

Tabel 4. Ringkasan Parameter Pemotongan pada Proses Bubut

Parameter	Makna Teknis	Satuan Umum	Pengaruh Utama	Risiko Jika Keliru
Kecepatan potong	Kecepatan relatif mata pahat terhadap permukaan benda kerja	m/menit	Panas, keausan pahat, kualitas sayatan	Pahat cepat aus, permukaan terbakar, penyayatan berat
Putaran spindel	Jumlah putaran benda kerja setiap menit	rpm	Menentukan tercapainya kecepatan potong	Getaran, pencekaman berisiko, hasil tidak stabil
Gerak makan	Perpindahan pahat setiap satu putaran benda kerja	mm/putaran	Kekasaran permukaan dan waktu kerja	Permukaan kasar, pahat terbebani, waktu terlalu lama
Kedalaman potong	Tebal material yang diambil dalam satu lintasan	mm	Laju pembuangan material dan beban pahat	Pahat patah, mesin bergetar, ukuran sulit dikendalikan

Tabel tersebut memperlihatkan bahwa parameter pemotongan tidak dapat dipilih secara terpisah. Kecepatan potong yang tepat tetap dapat menghasilkan permukaan buruk jika gerak makan terlalu besar. Gerak makan kecil pun tidak selalu memberi hasil baik jika pahat tumpul atau benda kerja tidak tercekam kuat. Kedalaman potong yang besar dapat menghemat waktu pada tahap awal, tetapi akan menjadi masalah jika mesin kurang kaku atau benda kerja terlalu panjang. Di bengkel, keputusan terbaik

biasanya bukan angka paling besar, melainkan kombinasi yang paling stabil. Kedalaman potong atau depth of cut menunjukkan seberapa dalam pahat masuk ke benda kerja. Pada pembubutan diameter luar, kedalaman potong dapat dipahami sebagai setengah dari selisih diameter awal dan diameter akhir. Secara sederhana, $a = (D \text{ awal} - D \text{ akhir}) / 2$. Jika poros dibubut dari diameter 32 mm menjadi 30 mm dalam satu lintasan, maka kedalaman potongnya adalah 1 mm. Angka ini tampak kecil, tetapi beban yang diterima pahat dapat cukup besar, terutama pada baja keras.

Kedalaman potong biasanya lebih besar pada tahap roughing dan lebih kecil pada tahap finishing. Pada roughing, pahat mengambil material lebih banyak agar bentuk mendekati ukuran rancangan. Pada finishing, pahat hanya mengambil lapisan tipis untuk mencapai ukuran akhir dan memperbaiki permukaan. Pola ini juga membantu mengurangi risiko kesalahan. Jika seluruh material diambil langsung sampai ukuran akhir, operator tidak memiliki ruang koreksi ketika terjadi getaran, pahat aus, atau hasil pengukuran menyimpang. Das et al. (2022) dalam kajian hard turning AISI D6 menunjukkan bahwa kecepatan, gerak makan, dan kedalaman potong berhubungan dengan kekasaran permukaan, gaya potong, dan keausan pahat. Temuan tersebut memperkuat pemahaman bahwa parameter pemotongan tidak hanya memengaruhi bentuk benda kerja, tetapi juga kondisi pahat. Ketika gerak makan dan kedalaman potong dinaikkan, gaya potong cenderung meningkat. Jika mesin, pahat, dan pencekaman tidak mampu menahan beban tersebut, proses menjadi tidak stabil.

Bentuk geram dapat menjadi petunjuk awal mengenai kesesuaian parameter. Pada baja lunak, geram dapat berbentuk memanjang dan menggulung. Pada besi tuang, geram cenderung pendek dan rapuh. Geram yang berubah warna menjadi kebiruan sering menunjukkan temperatur tinggi. Geram yang terlalu panjang dapat berbahaya karena mudah melilit benda kerja atau pahat. Dalam kondisi seperti itu, operator perlu meninjau kembali kecepatan potong, gerak makan, geometri pahat, atau penggunaan coolant. Media pendingin atau coolant tidak boleh dipahami hanya sebagai cairan tambahan. Fungsinya membantu menurunkan temperatur, mengurangi gesekan, membawa geram keluar dari daerah potong, dan memperpanjang umur pahat. Namun, penggunaannya tetap bergantung pada material, jenis pahat, dan kondisi proses. Pada beberapa pekerjaan modern, pemesinan

kering juga digunakan dengan pertimbangan lingkungan dan efisiensi. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan melalui hubungan antara mesin, alat potong, material, cairan pemotongan, strategi proses, dan optimasi.

Parameter pemotongan juga berpengaruh terhadap energi pemesinan. Kecepatan, gerak makan, dan kedalaman potong menentukan besarnya daya yang diperlukan untuk membuang material. Pawanr dan Gupta (2024) menjelaskan bahwa optimasi parameter pemotongan menjadi salah satu strategi praktis untuk meningkatkan efisiensi energi pada proses pemesinan. Hal ini relevan untuk bengkel modern karena proses yang cepat belum tentu paling efisien. Bila pahat cepat rusak, benda kerja sering gagal, atau mesin bekerja terlalu berat, biaya produksi justru meningkat. Dalam pekerjaan nyata, material benda kerja menjadi faktor yang sangat menentukan. Baja karbon, aluminium, kuningan, baja tahan karat, dan besi tuang memiliki respons pemotongan yang berbeda. Material lunak biasanya dapat dikerjakan dengan kecepatan lebih tinggi, tetapi beberapa material dapat menempel pada pahat jika kondisi kurang tepat. Material keras membutuhkan pahat lebih kuat dan parameter lebih terkendali. Wagri, Kalita, dan Murugesan (2023) menunjukkan bahwa kekerasan material memengaruhi kemampuan mesin dalam memotong, konsumsi daya, umur pahat, dan kualitas permukaan.

Jenis pahat juga memengaruhi pilihan parameter. Pahat high speed steel lebih mudah diasah dan cocok untuk banyak pekerjaan bengkel, tetapi tidak tahan pada kecepatan setinggi pahat karbida. Pahat karbida mampu bekerja lebih cepat dan lebih tahan panas, tetapi lebih rapuh terhadap benturan. Pada benda kerja yang pencekamannya kurang stabil, pahat yang terlalu rapuh dapat mudah pecah. Karena itu, pemilihan pahat dan parameter perlu dilihat sebagai satu keputusan, bukan dua keputusan yang terpisah. Geometri pahat turut menentukan kelancaran penyayatan. Sudut geram, sudut bebas, radius ujung, dan sudut potong memengaruhi pembentukan geram, gaya potong, dan kualitas permukaan. Radius ujung yang lebih besar dapat membantu menghasilkan permukaan lebih halus, tetapi juga dapat meningkatkan gaya radial jika parameter tidak sesuai. Sudut bebas yang kurang memadai membuat pahat menggesek permukaan benda kerja. Gesekan ini menambah panas dan memperburuk permukaan. Maka, parameter yang baik tetap membutuhkan geometri pahat yang benar.

Pencekaman benda kerja juga perlu dibaca bersama parameter pemotongan. Benda kerja pendek dapat dicekam dengan chuck tiga rahang jika bentuknya silindris dan ukurannya sesuai. Benda kerja panjang membutuhkan dukungan senter agar tidak melendut. Benda kerja kecil yang memerlukan ketelitian penjepitan dapat menggunakan collet. Bila benda kerja tidak beraturan, face plate dan klem dapat digunakan. Parameter yang terlalu besar pada pencekaman yang lemah akan menimbulkan getaran dan penyimpangan ukuran.

Getaran atau chatter adalah salah satu tanda bahwa kombinasi parameter, pahat, mesin, dan pencekaman belum stabil. Getaran dapat muncul karena pahat terlalu panjang menjulur, benda kerja terlalu jauh keluar dari chuck, kedalaman potong terlalu besar, atau gerak makan tidak sesuai. Permukaan hasil bubut biasanya menunjukkan pola bergelombang jika getaran terjadi. Dalam kondisi seperti ini, operator dapat mengurangi kedalaman potong, menurunkan gerak makan, memperbaiki pencekaman, mengganti pahat, atau mengatur ulang putaran. Pengaturan parameter juga harus memperhatikan tujuan proses. Untuk membuat poros kasar yang masih akan diproses lagi, permukaan tidak harus langsung sangat halus. Waktu pengerjaan dapat dipercepat dengan kedalaman potong dan gerak makan yang lebih besar selama mesin masih stabil. Untuk poros yang menjadiudukan bantalan, permukaan dan ukuran harus lebih ketat. Pada bagian seperti itu, finishing memerlukan gerak makan lebih kecil, kedalaman potong tipis, pahat tajam, dan pengukuran yang lebih sering.

Pengukuran menjadi bagian dari pengendalian parameter karena hasil bubut tidak cukup dinilai dari tampilan permukaan. Diameter harus diperiksa dengan jangka sorong atau mikrometer sesuai tingkat ketelitian yang dibutuhkan. Panjang benda kerja diperiksa agar sesuai gambar kerja. Jika ukuran mendekati batas akhir, pemakanan perlu dibuat lebih ringan. Operator yang berpengalaman biasanya tidak menunggu sampai seluruh proses selesai untuk mengukur. Pemeriksaan antara membantu mencegah kesalahan kecil berubah menjadi benda kerja gagal. Pada pembelajaran mesin bubut, contoh perhitungan sederhana dapat membantu memperjelas hubungan parameter. Misalnya, sebuah benda kerja baja berdiameter 40 mm akan dibubut dengan kecepatan potong 25 m/menit. Putaran spindel dapat dihitung

dengan $n = 1000 \times 25 / (\pi \times 40)$, sehingga hasilnya sekitar 199 rpm. Dalam praktik, operator memilih putaran terdekat yang tersedia pada mesin, misalnya 200 rpm. Setelah itu, gerak makan dan kedalaman potong ditentukan sesuai tujuan, apakah untuk roughing atau finishing.

Jika pekerjaan tersebut masih tahap roughing, operator dapat memilih gerak makan sedang dan kedalaman potong lebih besar, misalnya 1 mm atau sesuai kemampuan mesin. Jika pekerjaan sudah masuk finishing, kedalaman potong dapat dibuat lebih kecil, misalnya 0,2 mm sampai 0,5 mm, dengan gerak makan lebih halus. Angka ini bukan aturan mutlak karena setiap bengkel memiliki kondisi mesin, pahat, dan material yang berbeda. Yang perlu dipegang adalah logikanya: pekerjaan kasar mengejar pengurangan material, sedangkan pekerjaan akhir mengejar ukuran dan permukaan. Kesalahan umum dalam memilih parameter sering terjadi karena operator hanya mengejar waktu cepat. Putaran dinaikkan, gerak makan diperbesar, dan kedalaman potong dibuat dalam tanpa melihat kemampuan pahat dan mesin. Pada awalnya, material memang berkurang lebih cepat. Namun, beberapa menit kemudian pahat mulai aus, suara mesin berubah, permukaan menjadi kasar, dan ukuran sulit dijaga. Keadaan seperti ini menunjukkan bahwa produktivitas tidak dapat dipahami hanya dari banyaknya material yang dibuang per menit.

Sebaliknya, parameter yang terlalu ringan juga tidak selalu baik. Putaran terlalu rendah, gerak makan terlalu kecil, dan kedalaman potong terlalu tipis dapat membuat waktu produksi terlalu lama. Pahat dapat menggesek lebih banyak daripada menyayat, terutama jika ketajamannya kurang baik. Pada produksi banyak, waktu yang tampak sedikit pada satu benda kerja akan menjadi besar ketika dikalikan puluhan atau ratusan komponen. Karena itu, parameter pemotongan perlu mencari titik seimbang antara kecepatan kerja, kualitas hasil, umur pahat, dan keamanan proses. Perkembangan teknologi pemesinan membuat pemilihan parameter semakin banyak dibantu data. Pada mesin CNC, parameter dapat dimasukkan ke program dan dikombinasikan dengan rekomendasi perangkat lunak. Model prediksi juga mulai digunakan untuk memperkirakan kekasaran permukaan, gaya potong, keausan pahat, dan konsumsi energi. Meski begitu, dasar pemahamannya tetap sama. Operator atau perencana proses harus mengerti mengapa kecepatan potong memengaruhi panas,

mengapa gerak makan memengaruhi bekas sayatan, dan mengapa kedalaman potong memengaruhi beban mesin.

Dalam konteks pendidikan vokasi dan teknik mesin, parameter pemotongan sebaiknya diajarkan melalui gabungan rumus, tabel, contoh benda kerja, dan pengamatan langsung. Rumus membantu menentukan nilai awal yang rasional. Tabel membantu memilih rentang yang wajar berdasarkan material dan pahat. Pengamatan langsung membantu membaca suara mesin, bentuk geram, getaran, dan kualitas permukaan. Ketiga pendekatan ini saling melengkapi. Rumus tanpa praktik terasa kering, sedangkan praktik tanpa rumus mudah berubah menjadi kebiasaan yang sulit dipertanggungjawabkan.

Parameter pemotongan juga membentuk sikap kerja presisi. Operator yang memahami parameter akan lebih berhati-hati sebelum menaikkan rpm, memperbesar gerak makan, atau mengambil kedalaman potong besar. Ia tidak hanya bertanya apakah mesin mampu menyayat, tetapi juga apakah hasilnya stabil, apakah pahat masih aman, apakah benda kerja tercekam kuat, dan apakah ukuran masih dapat dikendalikan. Sikap seperti ini penting karena mesin bubut bekerja dengan benda berputar, sisi potong tajam, dan gaya pemotongan yang tidak kecil. Pemahaman parameter pemotongan membuat proses bubut terlihat lebih utuh. Kecepatan potong menjelaskan hubungan antara material, pahat, diameter, dan panas. Putaran spindel menerjemahkan kecepatan potong menjadi angka yang dapat diatur pada mesin. Gerak makan menentukan jejak sayatan dan waktu pengerjaan. Kedalaman potong menentukan beban pemotongan dan banyaknya material yang dibuang. Ketika keempatnya dipilih secara seimbang, proses bubut menjadi lebih aman, lebih terukur, dan lebih dekat dengan tuntutan gambar kerja.

F. Hubungan Diameter Benda Kerja dengan Putaran Spindel

Pada mesin bubut, diameter benda kerja dan putaran spindel tidak bisa dipilih secara terpisah. Keduanya selalu bertemu dalam satu konsep penting, yaitu kecepatan potong atau cutting speed. Benda kerja yang berdiameter besar memiliki keliling permukaan lebih panjang. Bila diputar pada jumlah putaran yang sama dengan benda kerja kecil, titik pada permukaan benda kerja besar akan menempuh jarak lebih jauh dalam satu menit. Di sinilah hubungan diameter dan putaran mulai terasa. Putaran spindel atau spindle speed menunjukkan banyaknya putaran benda kerja dalam satu

menit. Satuannya biasa ditulis rpm, dari revolutions per minute. Angka rpm sering terlihat langsung pada tuas, panel mesin, atau layar mesin bubut. Namun, angka rpm belum menceritakan seluruh kondisi pemotongan. Dua benda kerja dapat sama-sama diputar 500 rpm, tetapi jika diameternya berbeda, kecepatan permukaan yang diterima pahat juga berbeda.

Kecepatan potong menunjukkan jarak tempuh relatif antara pahat dan permukaan benda kerja dalam satuan waktu. Pada proses bubut, benda kerja berputar sebagai gerak utama, sedangkan pahat menyayat permukaan yang bergerak melewati mata potong. Karena permukaan benda kerja berbentuk lingkaran, jarak tempuh satu putaran bergantung pada keliling benda kerja. Keliling itu ditentukan oleh diameter. Semakin besar diameter, semakin panjang lintasan yang ditempuh dalam satu putaran. Hubungan dasar antara kecepatan potong, diameter, dan putaran spindel dapat ditulis sebagai $v = \pi \times D \times n \div 1000$. Dalam rumus ini, v adalah kecepatan potong dalam meter per menit, D adalah diameter benda kerja dalam milimeter, dan n adalah putaran spindel dalam rpm. Faktor 1000 digunakan karena diameter dinyatakan dalam milimeter, sedangkan kecepatan potong dinyatakan dalam meter per menit. Rumus ini sederhana, tetapi sangat penting untuk mencegah pemilihan putaran yang asal.

Jika yang ingin dicari adalah putaran spindel, rumus tersebut dapat diubah menjadi $n = 1000 \times v \div \pi \times D$. Dari bentuk ini terlihat jelas bahwa putaran spindel berbanding terbalik dengan diameter benda kerja. Bila kecepatan potong tetap, diameter makin besar membuat nilai n makin kecil. Bila diameter makin kecil, nilai n makin besar. Prinsip ini menjadi pegangan awal saat operator memilih putaran pada mesin bubut. Coba bayangkan tiga batang baja dengan diameter berbeda: 25 mm, 63 mm, dan 127 mm. Ketiganya akan dibubut dengan kecepatan potong yang sama, misalnya 27 m per menit. Benda kerja 127 mm tidak boleh diputar secepat benda kerja 25 mm karena permukaan luarnya sudah menempuh lintasan jauh dalam satu putaran. Sebaliknya, benda kerja 25 mm perlu putaran jauh lebih tinggi agar kecepatan potongnya mencapai nilai yang sama.

Prinsip tersebut tampak mudah setelah dihitung, tetapi di bengkel sering terlupakan. Operator pemula kadang memilih putaran berdasarkan kebiasaan, misalnya “pakai 500 rpm saja” untuk semua diameter. Cara seperti ini berisiko. Pada diameter

kecil, putaran 500 rpm mungkin masih terlalu rendah. Pada diameter besar, angka yang sama dapat membuat kecepatan potong terlalu tinggi. Hasilnya bisa berbeda: pahat cepat panas, permukaan buruk, getaran muncul, atau benda kerja terasa tidak aman diputar. Sebaliknya, benda kerja besar tidak boleh langsung diputar tinggi hanya karena operator ingin mempercepat pekerjaan. Diameter besar membawa keliling besar. Pada rpm tinggi, kecepatan permukaan dapat naik terlalu jauh. Kondisi ini meningkatkan panas di daerah potong, mempercepat keausan pahat, dan dapat membuat proses terasa tidak stabil. Pada benda kerja berat, putaran tinggi juga perlu dibaca dari sisi keselamatan karena gaya akibat putaran menjadi lebih serius. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa proses turning merupakan metode pemrosesan yang membentuk permukaan melalui putaran benda kerja dan gerak alat potong. Dalam pembubutan, hubungan antara putaran dan diameter menjadi dasar untuk menentukan kondisi pemotongan yang sesuai. Kecepatan potong tidak hanya muncul dari motor mesin, tetapi dari kecepatan relatif antara pahat dan permukaan benda kerja.

Pemilihan kecepatan potong sendiri tidak bisa asal. Material benda kerja dan bahan pahat menjadi pertimbangan utama. Aluminium biasanya dapat dibubut dengan kecepatan lebih tinggi daripada baja karbon. Baja tahan karat sering membutuhkan pemilihan kecepatan yang lebih hati-hati karena panas dan kecenderungan pengerasan kerja. Pahat carbide umumnya mampu bekerja pada kecepatan lebih tinggi dibanding pahat high speed steel, tetapi tetap membutuhkan pencekaman dan kondisi mesin yang stabil. Dalam pekerjaan nyata, operator biasanya mengambil nilai kecepatan potong dari tabel rekomendasi, pengalaman bengkel, atau katalog pahat. Setelah kecepatan potong dipilih, barulah putaran spindel dihitung berdasarkan diameter benda kerja. Urutan berpikir ini penting. Jangan mulai dari rpm, lalu berharap kecepatan potongnya cocok. Lebih aman menentukan material, pahat, dan kecepatan potong terlebih dahulu, kemudian menghitung rpm.

Diameter yang digunakan dalam perhitungan juga perlu diperhatikan. Pada pembubutan memanjang dari diameter awal ke diameter akhir, diameter benda kerja berubah selama proses. Untuk perhitungan sederhana, diameter rata-rata dapat digunakan. Misalnya, benda kerja dibubut dari 50 mm menjadi 46 mm. Diameter rata-ratanya dapat dianggap sekitar 48 mm. Pendekatan

ini cukup membantu untuk pekerjaan manual, meskipun pada pekerjaan sangat presisi pengaturan bisa dibuat lebih rinci. Pada mesin bubut manual, pilihan rpm sering terbatas pada beberapa tingkat putaran. Hasil perhitungan mungkin menunjukkan 343 rpm, tetapi mesin hanya menyediakan 315 rpm dan 400 rpm. Dalam kondisi seperti ini, operator perlu memilih nilai terdekat yang aman. Bila material keras atau pencekaman kurang ideal, pilihan lebih rendah sering lebih masuk akal. Bila material lunak, pahat tajam, dan mesin stabil, nilai yang sedikit lebih tinggi dapat dipertimbangkan.

Pada mesin bubut CNC, pengaturan putaran dapat lebih fleksibel. Beberapa mesin memiliki mode constant surface speed yang memungkinkan mesin menyesuaikan rpm ketika diameter yang dikerjakan berubah. Mode ini sangat berguna pada operasi facing, karena pahat bergerak dari diameter luar menuju pusat. Pada diameter luar, rpm perlu lebih rendah. Saat mendekati pusat, rpm dapat meningkat agar kecepatan permukaan lebih stabil. Namun, batas rpm maksimum tetap harus diatur agar mesin tidak berputar terlalu tinggi di dekat pusat. Operasi facing memberi contoh menarik tentang perubahan diameter efektif. Saat pahat menyayat permukaan muka, titik potong berpindah dari diameter besar menuju diameter kecil. Jika rpm tetap, kecepatan potong terus menurun saat pahat mendekati pusat. Pada mesin manual, kondisi ini diterima sebagai bagian dari proses dan dikendalikan melalui pilihan putaran yang wajar. Pada mesin CNC, sistem dapat menyesuaikan rpm, tetapi tetap mengikuti batas aman mesin.

Trinh (2024) menekankan bahwa kekasaran permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Hubungan diameter dan putaran masuk ke dalam bagian parameter pemotongan karena ia menentukan kecepatan potong. Bila rpm terlalu rendah atau terlalu tinggi terhadap diameter, kualitas permukaan dapat berubah. Jadi, permukaan kasar tidak selalu berasal dari pahat tumpul. Bisa jadi putaran yang dipilih tidak sesuai dengan diameter dan material. Kecepatan potong yang terlalu tinggi biasanya memperbesar panas. Panas ini tidak hanya membuat pahat cepat aus, tetapi juga dapat memengaruhi ukuran benda kerja selama proses. Pada pembubutan presisi, pemuaian termal dapat membuat hasil ukur terasa berubah setelah benda kerja dingin. Efeknya mungkin kecil, tetapi pada

toleransi ketat ia dapat menjadi masalah. Karena itu, memilih rpm bukan hanya soal membuat benda kerja cepat selesai.

Kecepatan potong yang terlalu rendah juga punya masalah sendiri. Pahat dapat tidak masuk dengan baik ke material. Geram yang terbentuk tidak stabil. Permukaan bisa tampak robek, terutama pada material lunak tertentu. Pada beberapa kondisi, pahat malah menggosok dan menekan permukaan. Ini membuat panas tetap muncul, tetapi proses pemotongannya tidak efisien. Agak menjebak memang: terlalu cepat salah, terlalu pelan juga belum tentu benar. Das et al. (2022) menunjukkan pada kajian hard turning bahwa kecepatan, gerak makan, dan kedalaman potong digunakan sebagai parameter penting untuk memprediksi kekasaran permukaan, gaya potong, serta keausan pahat. Ini memperlihatkan bahwa kecepatan potong bukan sekadar angka teoritis. Perubahan kecepatan dapat mengubah respons pemesinan secara nyata, terutama saat material yang dikerjakan lebih keras dan pahat menerima beban besar.

Hubungan diameter dan rpm juga memengaruhi keselamatan kerja. Benda kerja besar yang diputar terlalu cepat dapat menghasilkan getaran dan risiko pencekaman lebih besar. Bila bentuk benda kerja tidak seimbang, risiko ini makin tinggi. Sebelum menaikkan rpm, operator perlu memastikan benda kerja tercekam kuat, rahang chuck menjepit merata, dan tidak ada bagian yang menonjol berbahaya. Kecepatan yang benar selalu harus dibaca bersama keamanan putaran. Pada benda kerja panjang, putaran spindel perlu dipilih lebih hati-hati. Diameter mungkin kecil sehingga rumus menyarankan rpm cukup tinggi. Namun, jika benda kerja menjulur panjang dari chuck, putaran tinggi dapat memicu getaran atau lenturan. Dalam situasi seperti ini, dukungan senter kepala lepas atau penyangga dapat diperlukan. Rumus memberi angka awal, tetapi kondisi benda kerja memberi batas praktis.

Pada benda kerja pendek dan kaku, operator dapat lebih mudah mengikuti hasil perhitungan rpm. Benda kerja tidak mudah melendut, pencekaman lebih stabil, dan getaran lebih kecil. Meski begitu, material dan pahat tetap harus dipertimbangkan. Pahat HSS pada baja tidak boleh diperlakukan sama dengan pahat carbide pada aluminium. Diameter hanya satu bagian dari keputusan. Hubungan diameter dan rpm juga perlu dibaca saat proses mengurangi diameter. Pada lintasan awal, diameter benda kerja

masih besar, sehingga rpm yang aman mungkin lebih rendah. Setelah beberapa lintasan, diameter mengecil. Jika kecepatan potong ingin dipertahankan, rpm seharusnya naik. Pada mesin manual, operator sering memilih satu rpm kompromi untuk beberapa lintasan. Pada mesin CNC, perubahan rpm dapat dikendalikan lebih otomatis.

Pada proses roughing, pilihan rpm tidak selalu dibuat setinggi mungkin. Beban potong besar karena kedalaman potong dan gerak makan biasanya lebih agresif. Kecepatan potong yang terlalu tinggi dapat membuat pahat menerima panas dan gaya secara bersamaan. Pada proses finishing, kedalaman potong lebih kecil dan gerak makan lebih halus, sehingga kecepatan potong bisa dipilih lebih mendekati rekomendasi untuk kualitas permukaan, tentu tetap sesuai material dan pahat. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan sebagai integrasi antara peralatan, proses, dan strategi, termasuk pengendalian energi, pemilihan alat potong, proses pemotongan, serta cairan pendingin. Dalam hubungan diameter dan rpm, gagasan ini dapat dibaca secara praktis: rpm yang benar membantu proses lebih efisien, mengurangi pemborosan pahat, dan menekan risiko pengerjaan ulang akibat permukaan buruk atau ukuran meleset.

Kesalahan memilih rpm sering terlihat dari beberapa tanda. Pahat cepat panas, warna geram berubah tajam, permukaan tampak terbakar atau kasar, suara mesin tidak wajar, dan pahat aus lebih cepat dari biasanya. Pada kondisi rpm terlalu rendah, proses dapat terasa berat, geram tidak terbentuk rapi, dan permukaan tampak seperti tertekan. Tanda-tanda ini harus dibaca bersama diameter benda kerja. Jangan hanya menaikkan atau menurunkan rpm tanpa alasan. Cairan pendingin dapat membantu, tetapi tidak boleh dipakai untuk menutupi kesalahan pemilihan rpm. Bila kecepatan potong terlalu tinggi untuk material dan pahat yang digunakan, cairan pendingin mungkin hanya menunda kerusakan. Bila rpm terlalu rendah dan pahat menggosok, cairan pendingin tidak akan memperbaiki prinsip pemotongan yang keliru. Pendinginan membantu proses yang sudah masuk akal, bukan menggantikan perhitungan dasar.

Pada pembelajaran mesin bubut, latihan menghitung rpm sebaiknya dilakukan dengan benda kerja nyata. Peserta dapat mengukur diameter, memilih kecepatan potong dari tabel, menghitung rpm, lalu membandingkan dengan pilihan putaran

pada mesin. Setelah itu, proses penyayatan ringan dilakukan untuk membaca geram, suara mesin, dan permukaan hasil potong. Dari latihan semacam ini, rumus tidak terasa sebagai hafalan kosong. Contoh latihan sederhana dapat memakai baja karbon rendah diameter 40 mm dengan pahat HSS. Jika kecepatan potong yang dipilih 25 m per menit, maka rpm perkiraan adalah $1000 \times 25 \div \pi \times 40$, yaitu sekitar 199 rpm. Bila mesin menyediakan 180 rpm dan 224 rpm, operator dapat memilih berdasarkan kondisi. Untuk pengasaran pada mesin tua, 180 rpm mungkin lebih aman. Untuk pemotongan ringan dengan pahat tajam, 224 rpm dapat dicoba sambil memantau suara dan geram.

Contoh lain dapat memakai aluminium diameter 20 mm. Karena material ini dapat bekerja pada kecepatan potong lebih tinggi, rpm hasil hitung bisa jauh lebih besar. Di sini peserta biasanya mulai memahami mengapa benda kerja kecil sering diputar cepat. Namun, putaran tinggi tetap memerlukan pengekaman yang baik. Benda kerja yang tidak senter pada rpm tinggi akan menunjukkan getaran dengan cepat. Pada mesin dengan pengatur putaran bertingkat, pemilihan rpm terdekat harus mempertimbangkan sisi aman. Jika ragu, pilih nilai lebih rendah, lakukan penyayatan percobaan, lalu evaluasi. Bila proses terlalu lambat tetapi stabil, rpm dapat dinaikkan bertahap. Bila sejak awal suara kasar dan getaran muncul, menambah rpm bukan langkah bijak. Operator perlu memeriksa pahat, pengekaman, kedalaman potong, dan kondisi benda kerja.

Hubungan diameter dan putaran juga membantu memahami mengapa tabel kondisi pemotongan tidak langsung memberi satu angka rpm universal. Tabel biasanya memberi kecepatan potong berdasarkan material dan pahat. Operator masih harus mengubah nilai itu menjadi rpm sesuai diameter. Dengan cara ini, satu nilai kecepatan potong dapat dipakai untuk berbagai diameter benda kerja. Perhitungannya menyesuaikan ukuran benda kerja yang sedang dikerjakan. Pada benda kerja bertingkat, operator perlu memperhatikan diameter tiap segmen. Bagian diameter besar dan diameter kecil memiliki kebutuhan rpm berbeda bila ingin mempertahankan kecepatan potong sama. Pada mesin manual, satu putaran kompromi dapat dipilih bila selisih diameter tidak terlalu ekstrem. Bila selisih diameter sangat besar, perubahan putaran antar tahap bisa diperlukan. Ini membuat urutan kerja dan rencana pemotongan lebih masuk akal.

Permukaan hasil pembubutan juga memberi petunjuk apakah hubungan diameter dan rpm sudah mendekati tepat. Pada rpm yang terlalu tinggi, permukaan bisa tampak panas, pahat cepat aus, dan geram berubah warna. Pada rpm yang terlalu rendah, bekas sayatan bisa tampak kasar dan tidak bersih. Namun, tanda ini tidak berdiri sendiri. Gerak makan, kedalaman potong, radius pahat, kekakuan mesin, dan material ikut memengaruhi hasil. Dalam produksi modern, pemilihan putaran dapat dibantu katalog pahat, perangkat lunak, dan sensor pemantauan proses. Namun, prinsip dasarnya tetap sama: kecepatan permukaan ditentukan oleh diameter dan rpm. Teknologi hanya membantu menghitung, menyesuaikan, atau memantau. Pemahaman dasarnya tetap perlu dimiliki oleh operator, teknisi, dan perencana proses. Hubungan diameter benda kerja dengan putaran spindel menjadi dasar sebelum masuk ke pembahasan pengecaman. Putaran yang benar tidak akan memberi hasil baik bila benda kerja tidak tercekam kuat. Sebaliknya, pengecaman yang kuat belum tentu cukup jika rpm dipilih tanpa memperhatikan diameter. Keduanya saling mengunci. Mesin bubut bekerja baik ketika putaran, diameter, pahat, material, pengecaman, dan parameter lain dibaca sebagai satu sistem kerja.

G. Pengecaman Benda Kerja pada Mesin Bubut

Pengecaman benda kerja merupakan tahap yang sering terlihat sederhana, tetapi justru menentukan kestabilan seluruh proses pembubutan. Sebelum pahat menyayat, sebelum putaran spindel dipilih, dan sebelum ukuran akhir diperiksa, benda kerja harus lebih dulu duduk dengan benar pada alat cekam. Jika posisi awal ini keliru, proses berikutnya ikut bermasalah. Diameter bisa tidak sentris, permukaan dapat bergelombang, dan ukuran akhir sulit dikendalikan. Pada mesin bubut, benda kerja berputar sebagai gerak utama. Karena itu, pengecaman tidak hanya berfungsi menahan benda kerja agar tidak lepas, tetapi juga menjaga sumbu putarnya tetap sesuai dengan sumbu spindel. Ivanov, Evtuhov, Dehtiarov, dan Trojanowska (2025) menjelaskan bahwa proses turning bekerja melalui hubungan antara benda kerja yang berputar dan alat potong yang bergerak menyayat. Hubungan ini hanya dapat berlangsung baik jika benda kerja terpasang stabil, sepusat, dan cukup kaku terhadap gaya potong.

Kesalahan pengecaman biasanya terlihat dari gejala yang cukup jelas di bengkel. Mesin terdengar kasar, benda kerja tampak berputar tidak rata, pahat menyayat berat pada satu sisi, atau hasil

permukaan menunjukkan bekas getaran. Pada benda kerja panjang, masalahnya bisa lebih terasa karena bagian ujung mudah melendut ketika terkena gaya potong. Pada benda kerja berbentuk tidak beraturan, kesalahan penempatan titik jepit dapat membuat benda kerja tidak seimbang saat berputar. Pencekaman juga berkaitan langsung dengan keselamatan kerja. Benda kerja yang tidak terjepit kuat dapat bergeser, terlempar, atau merusak pahat. Kondisi ini berbahaya karena mesin bubut bekerja dengan putaran yang cukup tinggi dan gaya pemotongan yang besar. Maka, operator tidak boleh menganggap pencekaman sebagai pekerjaan awal yang boleh dilakukan terburu-buru. Bagian ini perlu diperiksa dengan tenang, terutama sebelum spindel dijalankan.

Dalam pembubutan dasar, terdapat beberapa metode pencekaman yang umum digunakan, yaitu pencekaman antara dua senter, pencekaman dengan chuck universal, pencekaman dengan chuck independent, pencekaman dengan collet, dan pencekaman dengan face plate. Masing-masing memiliki karakter kerja sendiri. Tidak ada alat cekam yang paling baik untuk semua keadaan. Pilihan yang tepat bergantung pada bentuk benda kerja, panjang benda kerja, ketelitian yang diminta, jenis operasi, dan risiko getaran yang mungkin muncul. Pencekaman antara dua senter digunakan untuk benda kerja yang relatif panjang atau memerlukan kesesumbuan sepanjang batang. Pada metode ini, benda kerja ditumpu oleh senter pada kepala tetap dan senter pada kepala lepas. Agar benda kerja ikut berputar bersama spindel, digunakan alat bantu berupa lathe dog yang dihubungkan dengan pelat pembawa atau dog plate. Susunan ini membuat benda kerja tidak dijepit seperti pada chuck, melainkan ditumpu pada kedua ujungnya dan diputar melalui pembawa. Keunggulan dua senter terletak pada kestabilan sumbu putar. Ketika poros panjang dikerjakan hanya dengan chuck, ujung bebasnya dapat melentur atau bergetar. Dengan dukungan senter kepala lepas, benda kerja memperoleh tumpuan tambahan sehingga proses pembubutan memanjang menjadi lebih stabil. Cara ini sangat berguna untuk membuat poros, batang silindris panjang, atau komponen yang memerlukan kesesumbuan dari ujung ke ujung. Meski begitu, metode dua senter memerlukan persiapan yang lebih teliti. Ujung benda kerja harus memiliki lubang senter yang baik agar tumpuan tidak bergeser. Jika lubang senter tidak tepat di tengah, hasil pembubutan dapat menyimpang. Senter juga perlu diberi pelumasan bila

menggunakan dead center, karena gesekan dapat menimbulkan panas pada titik kontak. Pada live center, gesekan lebih kecil karena senter ikut berputar melalui bantalan.

Pencekaman dengan chuck universal lebih sering dijumpai dalam pekerjaan bubut umum. Chuck ini dikenal praktis karena rahangnya bergerak serempak ketika kunci chuck diputar. Pada chuck universal tiga rahang, benda kerja silindris dapat langsung memusat secara relatif cepat. Inilah alasan chuck universal sering dipilih untuk pekerjaan poros pendek, batang bulat, pipa, atau benda kerja yang bentuknya sudah simetris. Kemudahan chuck universal membuatnya sangat berguna untuk pekerjaan rutin di bengkel. Misalnya, operator ingin meratakan ujung batang baja berdiameter 25 mm. Benda kerja cukup dimasukkan ke rahang chuck, dikencangkan secara merata, lalu diperiksa panjang benda kerja yang keluar dari rahang. Selama benda kerja tidak terlalu panjang dan permintaan ketelitian masih wajar, metode ini dapat memberi hasil yang cepat dan cukup stabil. Keterbatasan chuck universal terletak pada kemampuan penyetelan pusat. Karena semua rahang bergerak bersama, operator tidak dapat mengatur satu rahang secara bebas untuk mengoreksi penyimpangan tertentu. Jika benda kerja sedikit tidak bulat atau permukaannya tidak seragam, hasil pemusatan bisa kurang baik. Pada pekerjaan yang menuntut kesentrisan lebih tinggi, operator biasanya memerlukan pemeriksaan tambahan atau memilih metode cekam lain yang lebih fleksibel. Chuck independent, umumnya empat rahang, memberikan keleluasaan yang tidak dimiliki chuck universal. Setiap rahang dapat digerakkan sendiri sendiri, sehingga posisi benda kerja dapat disetel dengan lebih teliti. Pada awalnya, cara ini terasa lebih lambat karena operator harus mengatur tiap rahang satu per satu. Namun, untuk pekerjaan tertentu, kelambatan ini justru menjadi harga yang wajar demi mendapatkan posisi benda kerja yang benar.

Salah satu penggunaan penting chuck independent adalah pembuatan benda kerja eksentris. Pada pekerjaan eksentris, sumbu putar sengaja dibuat tidak sama dengan sumbu geometris benda kerja. Misalnya pada pembuatan poros nok sederhana atau komponen yang memiliki bagian melenceng dari pusat. Dengan rahang yang dapat disetel bebas, operator dapat menggeser posisi benda kerja sesuai jarak eksentris yang dibutuhkan. Selain untuk eksentris, chuck independent juga berguna untuk benda kerja

berbentuk segi empat, benda tuangan, atau benda yang permukaan awalnya tidak bulat sempurna. Pada benda kerja seperti ini, chuck universal tidak selalu mampu memusatkan dengan baik. Operator dapat menggunakan dial indicator untuk membaca posisi permukaan, lalu mengencangkan atau mengendurkan rahang tertentu sampai penyimpangan putar berada dalam batas yang dapat diterima. Penyetelan chuck independent membutuhkan kesabaran. Rahang yang terlalu kuat pada satu sisi dapat mendorong benda kerja keluar dari posisi yang sudah benar. Rahang yang terlalu lemah dapat membuat benda kerja bergeser saat pahat mulai menyayat. Karena itu, pengencangan perlu dilakukan bertahap dan saling berhadapan. Setelah posisi dianggap benar, putaran rendah dapat digunakan untuk memeriksa keseimbangan awal sebelum pemotongan dilakukan.

Pencekaman dengan collet lebih dekat dengan pekerjaan yang menuntut konsentrisitas dan pengulangan. Collet berbentuk seperti bushing berlubang dengan celah memanjang pada bagian tertentu. Ketika mekanisme pengunci bekerja, celah tersebut menyempit dan menjepit benda kerja secara merata di kelilingnya. Karena kontak jepitnya lebih menyebar, collet dapat menahan benda kerja kecil dengan lebih halus dibandingkan rahang chuck biasa. Keunggulan collet terasa pada pekerjaan benda kerja kecil, batang presisi, atau produksi berulang dengan ukuran yang sama. Misalnya, bengkel harus membubut puluhan pin kecil dari batang baja diameter 8 mm. Dengan collet yang sesuai, pemasangan dapat dilakukan lebih cepat, posisi relatif konsisten, dan risiko bekas rahang pada permukaan benda kerja lebih kecil. Hal ini membuat collet banyak digunakan pada pekerjaan presisi dan produksi berulang.

Keterbatasan collet adalah rentang diameternya tidak seluas chuck. Satu collet hanya cocok untuk ukuran tertentu atau rentang yang sangat terbatas. Jika benda kerja terlalu kecil, jepitan tidak kuat. Jika terlalu besar, benda kerja tidak masuk atau collet dapat rusak. Maka, operator perlu memilih ukuran collet yang benar, bukan memaksakan satu collet untuk semua diameter. Penelitian tentang sistem penjepitan otomatis berbasis collet menunjukkan bahwa pengembangan alat cekam tidak hanya mengejar kekuatan jepit, tetapi juga waktu pemasangan, umur pakai, dan efisiensi proses. Ismartaya, Sulaeman, dan Sarifudin (2024) membahas rancangan sistem automatic collet clamping untuk pekerjaan pada

mesin bubut CNC, dengan perhatian pada pengurangan waktu pemasangan dan peningkatan kepraktisan proses. Walaupun konteksnya CNC, prinsip dasarnya tetap sama, yaitu benda kerja harus terpegang cepat, aman, dan konsisten.

Face plate atau pelat pembawa digunakan ketika benda kerja tidak dapat dicekam dengan baik oleh chuck maupun collet. Bentuk benda kerja bisa terlalu tidak beraturan, terlalu pipih, terlalu besar, atau memiliki bidang yang perlu diposisikan secara khusus. Pada metode ini, benda kerja dipasang pada pelat menggunakan klem, baut, ganjal, dan penopang tambahan. Fleksibilitasnya tinggi, tetapi persiapannya memerlukan perhatian lebih besar. Penggunaan face plate sering dijumpai pada pekerjaan benda cor, pelat tebal, benda kerja asimetris, atau komponen yang perlu dibubut pada bagian tertentu saja. Misalnya, sebuah pelat tidak beraturan perlu dibuatkan lubang besar yang sepusat terhadap tanda tertentu. Karena bentuknya tidak cocok untuk rahang chuck, benda kerja dapat dipasang pada face plate, lalu posisinya diatur dengan bantuan tanda pusat dan alat ukur. Setelah itu, klem dipasang agar benda kerja tidak bergeser saat dipotong.

Tantangan utama face plate adalah keseimbangan putar. Benda kerja yang tidak simetris dapat membuat putaran menjadi berat sebelah. Jika putaran langsung dinaikkan, getaran dapat muncul dan membahayakan operator. Penyeimbang tambahan kadang diperlukan agar massa pada pelat lebih merata. Operator juga harus memastikan baut dan klem tidak mengganggu lintasan pahat. Kesalahan kecil pada tahap ini dapat menyebabkan pahat menabrak klem. Dalam kajian fixturing untuk pemesinan, Liu, Li, Zhou, Huang, dan Li (2022) menekankan bahwa fixture memiliki peran penting dalam menjamin kemampuan proses dan kualitas hasil, terutama pada benda kerja yang mudah berubah bentuk. Meskipun kajian tersebut banyak membahas komponen ber dinding tipis, gagasannya tetap relevan untuk mesin bubut. Pencekaman yang keliru dapat membuat benda kerja berubah posisi, melendut, atau bergetar, lalu kualitas permukaan ikut menurun.

Hubungan pencekaman dengan kualitas permukaan juga dapat dijelaskan melalui getaran. Sakamoto, Kono, dan Sato (2024) menjelaskan bahwa kekasaran permukaan pada proses turning dipengaruhi oleh geometri pahat, gerak makan, built up edge, dan getaran pada arah kedalaman potong. Getaran tersebut tidak selalu berasal dari parameter pemotongan. Pencekaman yang kurang

kaku, benda kerja terlalu panjang, atau rahang yang tidak menekan merata juga dapat menjadi sumbernya. Diameter benda kerja turut memengaruhi perilaku getaran. Li, Zhao, Ji, Zhang, Liu, Zeng, dan Zhao (2024) menunjukkan bahwa diameter benda kerja berhubungan dengan getaran dan kualitas permukaan pada proses turning. Benda kerja berdiameter kecil cenderung lebih mudah dipengaruhi getaran tertentu, terutama jika panjang bebasnya besar. Ini menjelaskan mengapa benda kerja ramping sering memerlukan senter kepala lepas, penyangga tetap, atau metode cekam yang lebih hati-hati.

Pencekaman juga tidak dapat dilepaskan dari parameter pemotongan. Kedalaman potong besar akan memberi beban lebih tinggi pada benda kerja. Gerak makan besar meningkatkan gaya pemotongan dan dapat memperbesar kecenderungan getaran. Pasić et al. (2024) menunjukkan bahwa kecepatan potong, gerak makan, kedalaman potong, dan radius sisipan pahat memengaruhi kekasaran permukaan serta gaya potong pada proses bubut. Bila alat cekam tidak cukup kuat, perubahan parameter tersebut akan terasa langsung pada stabilitas proses. Dalam praktik bengkel, tanda pencekaman kurang baik dapat dibaca melalui beberapa gejala. Permukaan benda kerja tampak bergaris tidak teratur, diameter berubah sepanjang lintasan, suara pemotongan bergetar, atau geram keluar tidak stabil. Pada benda kerja yang terjepit terlalu pendek, bagian yang menonjol dari chuck dapat bergetar. Pada benda kerja yang terjepit terlalu kuat, terutama material lunak atau pipa tipis, bentuknya dapat berubah sehingga diameter akhir tidak bulat sempurna.

Kekuatan jepit perlu cukup, tetapi tidak boleh berlebihan. Benda kerja harus tertahan terhadap gaya potong, namun tekanan rahang yang terlalu besar dapat meninggalkan bekas atau menyebabkan deformasi. Pada aluminium, kuningan, pipa tipis, atau benda kerja yang sudah memiliki permukaan jadi, pelindung rahang dapat digunakan. Pada benda kerja berdinding tipis, pemakaian penopang dalam kadang diperlukan agar bentuk tidak gepeng saat dicekam. Kesentrisan menjadi syarat penting pada banyak pekerjaan bubut. Bila benda kerja tidak sepusat dengan sumbu spindel, pahat akan memotong lebih banyak pada satu sisi. Pada lintasan berikutnya, ukuran mungkin terlihat benar di satu titik, tetapi tidak stabil di titik lain. Pemeriksaan dengan dial indicator membantu memastikan benda kerja berputar dalam batas

runout yang diizinkan. Untuk pekerjaan kasar, toleransi penyimpangan bisa lebih longgar. Untuk pekerjaan presisi, penyetelan harus lebih halus.

Pencekaman yang baik juga mendukung efisiensi produksi. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan sebagai hubungan antara peralatan, proses, strategi, dan optimasi. Dari sudut pandang tersebut, alat cekam tidak hanya berurusan dengan keamanan, tetapi juga waktu pemasangan, pengurangan produk gagal, umur pahat, dan kestabilan kualitas. Pekerjaan yang sering harus disetel ulang akan menghabiskan waktu dan meningkatkan biaya, meskipun mesin yang digunakan sebenarnya cukup baik. Pada produksi berulang, pemilihan alat cekam dapat menentukan kecepatan kerja. Collet memberi keuntungan ketika benda kerja kecil dan ukurannya seragam. Chuck universal memberi keuntungan ketika pekerjaan umum membutuhkan pemasangan cepat. Chuck independent lebih lambat, tetapi mampu menangani benda kerja yang membutuhkan penyetelan khusus. Face plate paling fleksibel untuk bentuk tidak beraturan, namun membutuhkan waktu persiapan lebih panjang. Pilihan ini menunjukkan adanya pertukaran antara kecepatan, fleksibilitas, dan ketelitian. Aspek keselamatan perlu selalu muncul dalam pembahasan pencekaman. Kunci chuck harus segera dilepas setelah rahang dikencangkan. Benda kerja tidak boleh terlalu panjang keluar dari rahang tanpa dukungan. Putaran awal sebaiknya rendah untuk memastikan tidak ada oleng berlebihan. Klem pada face plate perlu dikencangkan ulang setelah posisi akhir diperiksa. Operator juga harus menjaga tangan, kain lap, dan pakaian longgar dari bagian yang berputar.

Pencekaman tidak berdiri sendiri, melainkan berhubungan dengan urutan proses. Jika benda kerja harus dibalik, permukaan acuan perlu dipikirkan sejak awal. Jika salah satu sisi sudah selesai dibubut, sisi tersebut sebaiknya tidak dijepit sembarangan agar tidak rusak. Bila benda kerja membutuhkan beberapa operasi, operator perlu memilih metode cekam yang menjaga acuan tetap konsisten. Kesalahan memilih acuan dapat membuat lubang, alur, atau diameter bertingkat tidak sejajar. Pada pekerjaan pendidikan, pencekaman menjadi bagian yang baik untuk melatih nalar teknis. Mahasiswa atau peserta praktik tidak hanya diminta memasang benda kerja, tetapi juga menjelaskan alasan memilih alat cekam tertentu. Mengapa poros panjang perlu dua senter. Mengapa benda

kerja kotak lebih sesuai dengan chuck independent. Mengapa pin kecil lebih baik memakai collet. Pertanyaan seperti ini membantu membentuk kebiasaan berpikir sebelum mesin dijalankan.

Pencekaman yang benar membuat parameter pemotongan dapat bekerja sebagaimana mestinya. Kecepatan potong yang dihitung dengan baik akan percuma jika benda kerja tidak sentris. Gerak makan yang dipilih untuk menghasilkan permukaan halus tidak akan banyak membantu jika benda kerja bergetar. Kedalaman potong yang aman dapat menjadi berbahaya bila rahang tidak mencengkeram cukup kuat. Maka, pencekaman adalah dasar mekanis yang menopang seluruh keputusan pemesinan. Dalam proses bubut, pahat, geometri, parameter pemotongan, dan pencekaman membentuk satu kesatuan. Pahat menyayat, parameter mengatur beban proses, sedangkan alat cekam menjaga benda kerja tetap berada pada posisi yang benar. Jika salah satu unsur lemah, hasil pembubutan ikut terganggu. Pemahaman ini penting sebelum pembahasan bergerak ke operasi bubut lurus, tirus, ulir, alur, parting off, dan kartel.

Pencekaman benda kerja dapat dipahami sebagai seni menahan benda yang akan dipotong tanpa merusak bentuknya. Kadang benda kerja harus ditahan sangat kuat. Kadang justru harus ditahan secukupnya agar tidak berubah bentuk. Ada pekerjaan yang menuntut pemasangan cepat, ada pula pekerjaan yang memerlukan penyetelan perlahan dengan indikator. Di sinilah pengalaman bengkel bertemu dengan teori pemesinan. Penguasaan pencekaman membuat operator lebih peka terhadap kondisi mesin. Ia dapat membedakan getaran akibat pahat tumpul, akibat parameter terlalu besar, atau akibat benda kerja tidak tercekam kaku. Kepekaan seperti ini tidak muncul hanya dari membaca tabel, tetapi juga dari latihan memasang benda kerja, mengamati putaran, mendengar suara mesin, dan memeriksa hasil sayatan. Karena itu, pencekaman perlu ditempatkan sebagai keterampilan dasar yang sama pentingnya dengan memilih pahat dan menghitung putaran.

BAB 3

MESIN BUBUT II: BUBUT LURUT, TIRUS, ULIR, ALUR, PARTING OFF, DAN KARTEL

A. Klasifikasi Hasil Proses Bubut: Silindris, Konis, dan Eksentris

Proses bubut dapat dipahami dari satu pertanyaan sederhana: bentuk apa yang ingin dihasilkan dari benda kerja yang berputar? Pertanyaan ini tampak kecil, tetapi justru menjadi pintu masuk untuk membaca hampir semua operasi pada mesin bubut. Saat benda kerja dijepit pada spindel dan diputar, pahat bermata tunggal atau single point cutting tool bergerak menyayat material secara terarah. Dari hubungan antara putaran benda kerja, posisi pahat, dan lintasan gerak makan itulah profil benda kerja mulai terbentuk. Dalam pembubutan, bentuk akhir tidak muncul secara acak. Operator mengatur arah gerak pahat, kedalaman potong, cara pencekaman, dan urutan penyayatan agar benda kerja menghasilkan profil tertentu. Ada benda kerja yang tetap memiliki diameter sama sepanjang sumbunya. Ada pula benda kerja yang diameternya berubah secara bertahap dari satu ujung ke ujung lain. Pada kondisi tertentu, sumbu putarnya bahkan sengaja dibuat tidak berimpit dengan sumbu geometri utama benda kerja.

Klasifikasi hasil proses bubut biasanya dimulai dari tiga bentuk dasar, yaitu silindris, konis, dan eksentris. Tiga bentuk ini tidak hanya berbeda secara rupa, tetapi juga berbeda dalam cara membaca gambar kerja, menentukan cara pencekaman, memilih lintasan pahat, dan memeriksa hasil akhir. Poros biasa, poros bertingkat, dudukan bantalan, batang penghubung, pin tirus, dan poros engkol sederhana dapat dibaca melalui tiga kategori ini. Jadi, klasifikasi ini bukan sekadar istilah. Ia membantu operator memilih tindakan pemesinan yang masuk akal. Bentuk silindris merupakan bentuk yang paling mudah dikenali pada proses bubut. Benda kerja disebut silindris apabila diameter sepanjang bagian yang dibubut tetap sama dari satu ujung ke ujung lainnya. Contohnya dapat ditemukan pada poros motor listrik, batang penuntun, pin lurus, atau pipa yang permukaan luarnya diratakan. Walaupun terlihat sederhana, bentuk silindris tetap membutuhkan pengaturan yang teliti karena sedikit kesalahan pada putaran, gerak makan, atau pencekaman dapat membuat permukaan menjadi tirus tipis tanpa disadari.

Pada pembubutan silindris, pahat bergerak memanjang sejajar terhadap sumbu putar benda kerja. Gerakan ini sering disebut pembubutan lurus atau pembubutan memanjang. Benda kerja berputar sebagai gerak utama, sedangkan pahat bergerak secara translasi untuk menyayat permukaan luar. Prinsip ini sejalan dengan uraian Ivanov et al. (2025) bahwa pada turning, permukaan putar dibentuk melalui rotasi benda kerja, sementara alat potong bergerak sesuai arah pemakanan yang dibutuhkan. Bentuk silindris sering menjadi dasar sebelum operasi lain dilakukan. Sebelum dibuat ulir, alur, bahu poros, atau diameter bertingkat, benda kerja biasanya diratakan terlebih dahulu hingga mencapai diameter acuan. Di bengkel, tahap ini sering dianggap pekerjaan rutin. Padahal, diameter dasar yang kurang tepat akan membawa masalah ke operasi berikutnya. Ulir bisa terlalu kecil, alur bisa tidak sesuai posisi, dan komponen pasangan bisa longgar atau terlalu sesak saat dirakit.

Pembubutan silindris tidak selalu berarti satu diameter saja. Dalam banyak komponen, silindris dapat hadir sebagai beberapa diameter berbeda yang tersusun bertingkat. Setiap tingkat tetap berbentuk silindris, tetapi ukurannya tidak sama. Misalnya, sebuah poros memiliki diameter 30 mm pada bagian dudukan bantalan, 25 mm pada bagian tengah, dan 20 mm pada ujung yang akan diberi ulir. Secara klasifikasi, tiap bagian masih masuk kategori silindris karena masing-masing memiliki diameter tetap sepanjang segmen tertentu. Kualitas bentuk silindris sangat bergantung pada keselarasan antara sumbu benda kerja dan sumbu spindel. Jika benda kerja dijepit terlalu panjang tanpa penyangga, bagian ujung dapat melendut saat disayat. Jika rahang chuck tidak menjepit merata, benda kerja bisa berputar dengan simpangan kecil. Kadang simpangan ini tidak langsung terlihat oleh mata, tetapi akan tampak saat diameter diperiksa dengan mikrometer atau saat benda kerja dipasang pada komponen pasangannya.

Bentuk konis, atau sering disebut tirus, memiliki karakter yang berbeda. Pada profil konis, diameter benda kerja berubah secara bertahap sepanjang arah sumbu. Salah satu ujung memiliki diameter lebih besar, sedangkan ujung lainnya lebih kecil. Perubahan ini tidak berbentuk loncatan seperti poros bertingkat, melainkan membentuk permukaan miring yang halus. Contohnya dapat dijumpai pada senter mesin bubut, tangkai bor tirus, pin pengunci tirus, dan beberapa dudukan sambungan yang

membutuhkan penguncian melalui bidang miring. Pembubutan konis menuntut pembacaan geometri yang lebih hati-hati dibanding pembubutan silindris lurus. Operator tidak hanya mengejar satu nilai diameter, tetapi harus memperhatikan diameter besar, diameter kecil, panjang tirus, dan sudut kemiringan. Kalau salah satu nilai meleset, fungsi pasangan bisa terganggu. Tirus yang terlalu curam dapat sulit masuk ke dudukannya. Tirus yang terlalu landai bisa tidak mengunci dengan baik. Di sinilah geometri menjadi sangat praktis, bukan sekadar gambar di kertas.

Pada mesin bubut, profil konis dapat dibuat dengan beberapa cara. Cara yang umum meliputi memiringkan eretan atas, menggeser kepala lepas, menggunakan pahat bentuk, atau memakai perlengkapan khusus seperti taper turning attachment. Setiap cara memiliki wilayah penggunaan masing-masing. Eretan atas cocok untuk tirus pendek. Pergeseran kepala lepas lebih sesuai untuk tirus panjang dengan sudut kecil. Pahat bentuk dapat bekerja cepat untuk profil pendek, tetapi beban potongnya bisa lebih besar. Pemilihan metode pembubutan tirus tidak sebaiknya dilakukan hanya berdasarkan kebiasaan. Panjang benda kerja, besar sudut, ketelitian yang diminta, jumlah produk, serta jenis material perlu ikut dipertimbangkan. Untuk satu komponen latihan, memiringkan eretan atas mungkin cukup. Untuk pekerjaan berulang dengan ketelitian lebih konsisten, perlengkapan tirus khusus akan lebih masuk akal. Wang et al. (2023) menekankan bahwa proses pemesinan perlu dilihat sebagai hubungan antara peralatan, proses, dan strategi kerja, terutama saat efisiensi dan keberlanjutan produksi menjadi perhatian.

Bentuk eksentris membawa persoalan yang sedikit lebih menarik. Pada benda kerja eksentris, terdapat lebih dari satu sumbu. Bagian tertentu dari benda kerja tidak berputar terhadap sumbu utama, melainkan terhadap sumbu lain yang sengaja digeser. Bentuk seperti ini dapat ditemukan pada poros engkol sederhana, nok, eksentrik penggerak, atau komponen mekanisme yang mengubah gerak putar menjadi gerak bolak-balik. Di sini, ketidaksenteran bukan kesalahan. Justru itulah bentuk yang dicari.

Pembubutan eksentris membutuhkan cara pencekaman yang berbeda dari pembubutan silindris biasa. Operator perlu menggeser posisi benda kerja agar sumbu bagian yang akan dibubut berimpit dengan sumbu putar spindel. Pengaturan ini dapat dilakukan dengan chuck independen empat rahang, face plate, atau bantuan

tanda senter eksentris pada kedua ujung benda kerja. Pekerjaan ini terasa lebih lambat karena penyetelan awalnya membutuhkan kesabaran. Namun, tanpa penyetelan yang benar, profil eksentris akan kehilangan fungsi mekanisnya. Tabel berikut menyajikan perbandingan ringkas antara bentuk silindris, konis, dan eksentris. Tabel ini tidak dimaksudkan sebagai pengganti penjelasan proses, tetapi sebagai pegangan cepat saat membaca gambar kerja. Dalam praktik, operator sering lebih dulu mengenali bentuk akhir, baru kemudian memilih pahat, cara cekam, dan lintasan pemakanan.

Tabel 5. Perbandingan Ringkas Antara Bentuk Silindris, Konis, dan Eksentris

Bentuk hasil bubut	Ciri geometri utama	Contoh komponen	Cara pencekaman yang sering dipakai	Titik perhatian saat pemeriksaan
Silindris	Diameter tetap pada satu segmen sumbu	Poros lurus, pin, pipa, batang penuntun	Chuck, collet, dua senter	Diameter, kebulatan, kelurusan, kekasaran permukaan
Konis	Diameter berubah bertahap sepanjang panjang tirus	Senter tirus, pin tirus, tangkai bor tirus	Dua senter, chuck, eretan atas, kepala lepas bergeser	Diameter besar, diameter kecil, panjang tirus, sudut tirus
Eksentris	Memiliki lebih dari satu sumbu putar atau sumbu geometri	Poros engkol sederhana, nok, eksentrik penggerak	Chuck independen, face plate, dua senter dengan titik eksentris	Jarak eksentrisitas, posisi sumbu, kebulatan bagian eksentris

Dari tabel tersebut, terlihat bahwa bentuk benda kerja menentukan cara berpikir operator sejak awal. Untuk profil silindris, perhatian utama berada pada kesamaan diameter dan kestabilan pemakanan memanjang. Untuk profil konis, perhatian berpindah pada perubahan diameter dan sudut. Untuk profil eksentris, titik paling kritis bukan hanya diameter, melainkan posisi sumbu. Perbedaan kecil dalam posisi sumbu dapat mengubah langkah mekanisme secara nyata. Klasifikasi ini juga

membantu membedakan kesalahan bentuk dari bentuk yang memang disengaja. Benda kerja silindris yang tanpa sengaja menjadi sedikit tirus adalah kesalahan. Benda kerja tirus yang sudutnya sesuai gambar adalah hasil yang benar. Benda kerja yang berputar tidak senter saat seharusnya silindris adalah masalah. Namun, pada pembubutan eksentris, pergeseran sumbu justru menjadi bagian dari rancangan. Kita perlu menangkap perbedaan ini sejak awal agar tidak salah membaca hasil proses.

Hubungan antara klasifikasi bentuk dan parameter pemotongan juga cukup kuat. Kecepatan potong, gerak makan, dan kedalaman potong memengaruhi kualitas permukaan serta kestabilan penyayatan. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kekasaran permukaan pada proses pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Artinya, bentuk silindris, konis, maupun eksentris tidak cukup dikejar melalui lintasan pahat saja. Parameter kerja tetap perlu dipilih secara rasional. Pada pembubutan silindris, gerak makan yang terlalu besar dapat meninggalkan jejak alur yang kasar pada permukaan. Kedalaman potong yang terlalu agresif dapat memunculkan getaran, terutama pada benda kerja panjang. Pada pembubutan konis, pemakanan yang tidak stabil dapat membuat permukaan tirus tampak bergelombang. Pada pembubutan eksentris, beban potong dapat berubah ubah karena massa benda kerja tidak selalu seimbang terhadap sumbu putar. Jadi, setiap bentuk memiliki risiko proses yang berbeda.

Material benda kerja ikut memberi pengaruh. Aluminium relatif mudah disayat, tetapi kadang meninggalkan material yang menempel pada ujung pahat jika kondisi pemotongan kurang tepat. Baja karbon membutuhkan pengaturan yang lebih hati hati agar pahat tidak cepat aus. Baja yang dikeraskan dapat meningkatkan gaya potong dan memengaruhi kualitas permukaan. Das et al. (2022) menunjukkan dalam kajian hard turning bahwa variasi feed dan depth of cut dapat memengaruhi gaya potong, kerusakan permukaan, dan keausan pahat. Pahat juga tidak dapat dipisahkan dari bentuk yang akan dibuat. Pahat rata kanan atau kiri dapat digunakan untuk membubut silindris memanjang. Pahat dengan ujung tertentu dapat membantu pembentukan bahu atau profil pendek. Pahat bentuk dapat membuat tirus pendek atau profil khusus, walaupun gaya potongnya cenderung lebih besar karena bidang kontak pahat dengan benda kerja lebih luas. Untuk hasil

yang lebih halus, radius ujung pahat dan kondisi ketajaman perlu diperhatikan.

Pada pembubutan konis, sudut pahat dan posisi eretan memiliki peran yang terasa langsung. Jika eretan atas tidak dikunci dengan baik setelah dimiringkan, sudut tirus dapat berubah selama pemakanan. Jika kepala lepas digeser tanpa pengukuran ulang, tirus yang dihasilkan bisa meleset dari nilai yang diinginkan. Ini bukan sekadar soal rumus. Di bengkel, kesalahan kecil pada penyetelan sering baru terlihat setelah benda kerja dilepas dan diperiksa. Pembubutan eksentris membutuhkan kesadaran tambahan terhadap keseimbangan putaran. Karena massa benda kerja tidak selalu simetris terhadap sumbu putar, putaran spindel sebaiknya dipilih lebih hati-hati. Putaran yang terlalu tinggi dapat menimbulkan getaran, suara tidak normal, atau gaya sentrifugal yang membebani pencekaman. Pada pekerjaan seperti ini, operator berpengalaman biasanya lebih sabar pada tahap penyetelan daripada memaksakan proses berjalan cepat.

Pemeriksaan hasil silindris biasanya dilakukan dengan mengukur diameter pada beberapa posisi sepanjang benda kerja. Jika diameter depan, tengah, dan belakang berbeda tanpa disengaja, ada kemungkinan terjadi ketidaksejajaran mesin, kesalahan pencekaman, lendutan benda kerja, atau pahat yang tidak berada pada tinggi senter. Pemeriksaan seperti ini terlihat sederhana, tetapi sangat berguna. Ia memberi petunjuk apakah masalah berasal dari proses, alat cekam, atau kondisi mesin. Pemeriksaan profil konis tidak cukup hanya melihat permukaan yang tampak miring. Operator perlu mengukur diameter besar, diameter kecil, dan panjang tirus. Bila komponen harus berpasangan dengan lubang tirus, pemeriksaan kontak juga dapat dilakukan dengan pewarna atau metode pemasangan coba. Permukaan tirus yang benar bukan hanya halus, tetapi juga mampu bertemu dengan pasangan secara merata. Padhan et al. (2023) menegaskan bahwa kualitas permukaan dalam hard turning berkaitan dengan parameter potong, geometri pahat, dan integritas permukaan yang dihasilkan.

Pada profil eksentris, pemeriksaan harus menjawab dua hal sekaligus. Pertama, apakah diameter bagian yang dibubut sudah benar. Kedua, apakah jarak sumbu eksentris sudah sesuai gambar. Jarak sumbu ini dapat diperiksa dengan bantuan dial indicator, pengukuran antar pusat, atau perlengkapan ukur lain sesuai bentuk

benda kerja. Jika diameter benar tetapi posisi sumbu salah, komponen tetap tidak dapat bekerja sebagaimana mestinya. Klasifikasi hasil bubut juga membantu menyusun urutan kerja. Untuk benda kerja yang memuat beberapa bentuk sekaligus, bagian silindris biasanya dibuat lebih dahulu sebagai acuan. Setelah itu, bagian tirus dapat dikerjakan berdasarkan ukuran referensi yang sudah stabil. Jika ada bagian eksentris, penyetelan ulang perlu direncanakan agar tidak merusak permukaan yang sudah selesai. Urutan seperti ini membuat pekerjaan lebih terkendali dan mengurangi risiko melepas pasang benda kerja terlalu sering.

Dalam produksi satuan, operator mungkin masih dapat melakukan beberapa penyesuaian manual selama proses. Namun, pada produksi berulang, klasifikasi bentuk harus diterjemahkan ke dalam prosedur kerja yang konsisten. Diameter acuan, posisi sumbu, jenis pahat, nilai feed, kedalaman potong, dan alat ukur perlu ditentukan sejak awal. Pemesinan modern bahkan semakin banyak memakai data dan model prediksi untuk menjaga kualitas proses, tetapi prinsip dasarnya tetap sama: bentuk akhir harus dibaca dari hubungan antara geometri benda kerja dan lintasan pahat. Klasifikasi silindris, konis, dan eksentris memberi dasar untuk memahami operasi bubut yang lebih khusus. Bubut lurus, facing, bubut tirus, bubut ulir, bubut alur, parting off, dan kartel tidak berdiri sebagai hafalan terpisah. Semuanya dapat ditelusuri kembali pada bentuk yang ingin dicapai, arah gerak pahat, dan fungsi permukaan benda kerja. Cara membaca seperti ini membuat proses bubut terasa lebih utuh.

Pada pembelajaran praktik, kita sebaiknya tidak hanya mengamati mesin sedang berputar. Perhatikan juga apa yang berubah pada benda kerja setelah setiap lintasan pahat. Apakah diameternya tetap, mengecil bertahap, atau berpindah sumbu? Pertanyaan sederhana ini melatih cara melihat proses pemesinan dari sisi geometri. Dari sanalah keputusan teknis menjadi lebih jelas. Pemahaman tentang klasifikasi bentuk juga membantu mencegah salah komunikasi antara perancang, operator, dan pemeriksa kualitas. Gambar kerja mungkin hanya menunjukkan garis, diameter, dan sumbu. Namun, operator harus menerjemahkan tanda tersebut menjadi cara cekam dan cara pemakanan. Pemeriksa kualitas kemudian memastikan apakah bentuk yang dikerjakan sudah memenuhi maksud gambar. Bila

ketiganya memahami klasifikasi bentuk dengan cara yang sama, risiko salah tafsir bisa ditekan.

B. Bubut Lurus atau Memanjang

Bubut lurus atau bubut memanjang merupakan operasi dasar yang sangat sering dijumpai pada mesin bubut. Hampir setiap pekerjaan poros, pin, batang penumpu, atau komponen berbentuk silinder berawal dari operasi ini. Bentuknya terlihat sederhana. Benda kerja berputar, pahat bergerak sepanjang sumbu, lalu diameter benda kerja berkurang sesuai ukuran yang diinginkan. Kesederhanaan itu kadang menipu. Dalam praktik bengkel, bubut lurus bukan hanya soal membuat benda kerja menjadi lebih kecil. Operator perlu menjaga agar diameter sepanjang benda kerja tetap seragam, permukaan tidak bergelombang, pahat tidak cepat aus, dan ukuran akhir tetap masuk dalam batas toleransi. Sedikit saja pencekaman kurang baik, pahat terlalu rendah, atau gerak makan terlalu kasar, hasilnya dapat menyimpang dari bentuk silindris yang direncanakan.

Pada operasi ini, benda kerja dicekam pada chuck atau ditumpu di antara dua senter, lalu diputar oleh spindle. Pahat bubut bergerak lurus sejajar dengan sumbu putar benda kerja. Gerak inilah yang disebut gerak makan memanjang. Karena lintasan pahat mengikuti arah aksial, permukaan yang terbentuk adalah permukaan silindris. Ivanov et al. (2024) menjelaskan bahwa proses turning membentuk permukaan putar dengan alat potong bermata tunggal, dan salah satu contohnya adalah pembubutan memanjang pada permukaan silinder. Istilah bubut lurus sering dipakai karena arah penyayatannya lurus mengikuti panjang benda kerja. Istilah bubut memanjang dipakai karena pahat bergerak sepanjang benda kerja, bukan melintang ke arah pusat seperti pada facing. Dua istilah ini merujuk pada operasi yang sama dalam konteks pembentukan diameter luar. Dalam literatur berbahasa Inggris, operasi ini sering disebut straight turning atau longitudinal turning.

Tujuan utama bubut lurus adalah mengurangi diameter benda kerja dari ukuran awal menjadi ukuran akhir. Jika diameter awal diberi simbol D_1 dan diameter akhir diberi simbol D_2 , maka proses bubut lurus bekerja dengan membuang lapisan material di antara kedua diameter tersebut. Panjang bagian yang disayat dapat diberi simbol L . Pada poros sederhana, L bisa mencakup hampir seluruh

panjang benda kerja. Pada poros bertingkat, L hanya berlaku pada bagian tertentu yang perlu dikurangi diameternya.

Jika diperhatikan dari sisi gerak, proses bubut lurus memiliki dua gerakan penting. Gerak pertama adalah putaran benda kerja. Gerak kedua adalah gerak makan pahat sepanjang sumbu benda kerja. Putaran benda kerja menghasilkan kecepatan potong, sedangkan gerak makan membuat pahat menyayat permukaan secara bertahap dari satu posisi ke posisi berikutnya. Kedua gerakan ini tidak dapat dipisahkan karena permukaan silindris hanya terbentuk bila putaran dan gerak makan berlangsung stabil. Kecepatan potong atau cutting speed menunjukkan kecepatan relatif antara pahat dan permukaan benda kerja. Dalam proses bubut lurus, nilai ini dipengaruhi oleh diameter benda kerja dan putaran spindle. Rumus yang sering digunakan adalah $v = \pi \times D \times n \div 1000$, dengan v sebagai kecepatan potong dalam meter per menit, D sebagai diameter benda kerja dalam milimeter, dan n sebagai putaran spindle dalam putaran per menit. Rumus ini tampak sederhana, tetapi cukup membantu untuk mencegah pemilihan putaran yang asal.

Diameter benda kerja memberi pengaruh langsung terhadap putaran yang dipilih. Untuk kecepatan potong yang sama, benda kerja berdiameter kecil membutuhkan putaran lebih tinggi dibanding benda kerja berdiameter besar. Sebaliknya, benda kerja besar tidak boleh langsung diputar terlalu cepat karena kecepatan permukaan dapat menjadi berlebihan. Pada tahap ini, operator perlu berhenti sebentar dan bertanya, apakah putaran yang dipilih sudah sesuai dengan diameter, material, dan jenis pahat yang digunakan. Gerak makan atau feed pada bubut lurus menunjukkan jarak perpindahan pahat setiap satu putaran benda kerja. Jika feed terlalu besar, permukaan benda kerja dapat terlihat kasar karena jejak pahat menjadi lebih nyata. Jika terlalu kecil, permukaan memang dapat lebih halus, tetapi waktu pengerjaan menjadi lebih lama. Trinh (2024) menekankan bahwa kekasaran permukaan pada proses pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pernyataan ini sangat terasa pada bubut lurus karena permukaan silindris yang panjang mudah memperlihatkan bekas pemakanan.

Kedalaman potong atau depth of cut menunjukkan tebal lapisan material yang dibuang dalam satu lintasan. Pada bubut lurus, kedalaman potong menentukan seberapa jauh pahat masuk

ke arah radial benda kerja. Bila diameter awal 30 mm ingin dikurangi menjadi 28 mm, selisih diameter total adalah 2 mm. Karena penyayatan terjadi pada dua sisi diameter secara geometri, kedalaman potong radialnya adalah 1 mm. Detail kecil ini sering menjadi sumber kesalahan pemula karena mereka menyamakan pengurangan diameter dengan kedalaman potong. Pembubutan lurus biasanya dibagi menjadi pekerjaan kasar dan pekerjaan akhir. Pada pekerjaan kasar atau roughing, pahat mengambil material lebih banyak agar diameter cepat mendekati ukuran target. Pada pekerjaan akhir atau finishing, kedalaman potong dibuat lebih kecil untuk memperbaiki ukuran dan permukaan. Pilihan ini bukan aturan mati. Mesin yang kurang kaku, benda kerja yang panjang, atau pahat yang mulai aus dapat membuat kedalaman potong perlu dikurangi walaupun tahapnya masih pekerjaan kasar.

Pemilihan pahat ikut menentukan keberhasilan bubut lurus. Untuk pekerjaan pengasaran, pahat rata kanan atau pahat rata kiri dapat digunakan sesuai arah penyayatan. Pahat rata kanan umum dipakai saat pemotongan berlangsung dari kanan ke kiri, sedangkan pahat rata kiri dipakai pada arah sebaliknya. Untuk pekerjaan akhir, pahat dengan radius ujung yang lebih halus dapat membantu menghasilkan permukaan yang lebih baik. Namun, radius yang terlalu besar pada mesin kurang kaku juga dapat memicu getaran. Sudut pahat perlu disesuaikan dengan material benda kerja. Material lunak seperti aluminium umumnya membutuhkan sudut geram yang lebih positif agar geram mudah mengalir. Baja karbon membutuhkan pahat yang lebih kuat dan pengaturan parameter yang lebih hati-hati. Besi tuang menghasilkan geram pendek dan rapuh, tetapi debunya dapat mengganggu kebersihan mesin. Pemahaman material seperti ini membuat operator tidak hanya menghafal jenis pahat, tetapi memahami alasan di balik pemilihannya.

Pada pekerjaan poros panjang, pencekaman menjadi persoalan yang sangat penting. Jika benda kerja hanya dicekam pada chuck dan menjulur terlalu panjang, tekanan pahat dapat membuat ujung benda kerja melendut. Hasilnya sering berupa diameter yang tidak seragam atau permukaan yang bergetar. Untuk kondisi seperti ini, penggunaan senter kepala lepas atau tailstock center dapat membantu menahan ujung benda kerja agar tetap stabil selama penyayatan. Kadang benda kerja juga memerlukan penyangga tambahan seperti steady rest atau follow rest.

Perlengkapan ini dipakai ketika benda kerja terlalu panjang dan mudah bergetar. Pada pekerjaan ringan, getaran mungkin hanya membuat permukaan tampak bergaris. Pada pekerjaan yang lebih berat, getaran dapat merusak pahat, mengubah ukuran, bahkan membuat benda kerja lepas dari pencekaman. Di sini, keselamatan dan kualitas bertemu dalam satu keputusan teknis.

Sebelum bubut lurus dimulai, permukaan ujung benda kerja sering diratakan terlebih dahulu melalui operasi facing. Permukaan ujung yang rata membuat pengukuran panjang lebih mudah dan memberi acuan yang lebih jelas untuk operasi berikutnya. Setelah itu, operator dapat menandai panjang L , mengatur kedalaman potong, lalu melakukan pemakanan memanjang. Urutan ini terasa kecil, tetapi sangat membantu ketika benda kerja memiliki beberapa diameter bertingkat. Pada bubut lurus bertingkat, operator tidak hanya mengejar satu diameter. Setiap segmen memiliki panjang dan diameter masing-masing. Misalnya, sebuah poros memiliki bagian diameter 25 mm sepanjang 40 mm, lalu diameter 20 mm sepanjang 30 mm untuk dudukan ulir. Dalam situasi seperti ini, pembacaan gambar kerja harus cermat. Salah menentukan batas panjang pemesian dapat membuat bahu poros bergeser, dan komponen pasangan mungkin tidak dapat terpasang dengan benar.

Bahu poros atau pertemuan antara dua diameter perlu dikerjakan dengan hati-hati. Sudut pertemuan yang terlalu tajam dapat menjadi titik konsentrasi tegangan, sedangkan radius yang terlalu besar dapat mengganggu pemasangan komponen seperti bantalan atau roda gigi. Untuk beberapa pekerjaan, gambar kerja menentukan radius atau alur pelepas. Bila tidak tertulis, operator tetap perlu menyesuaikan bentuk bahu dengan fungsi komponen. Pengukuran diameter pada bubut lurus sebaiknya dilakukan lebih dari satu kali. Mengukur hanya di ujung benda kerja dapat menipu, karena bagian tengah atau bagian dekat chuck bisa saja memiliki ukuran berbeda. Mikrometer lebih tepat digunakan untuk pemeriksaan diameter presisi, sedangkan jangka sorong dapat dipakai untuk pemeriksaan awal. Bila diameter depan dan belakang berbeda, kemungkinan terjadi tirus yang tidak disengaja.

Tirus yang tidak disengaja pada bubut lurus dapat muncul karena beberapa sebab. Benda kerja mungkin tidak sejajar dengan sumbu spindle. Kepala lepas bisa tidak tepat satu garis dengan kepala tetap. Pahat dapat mengalami tekanan berlebihan sehingga benda kerja melendut. Bisa juga mesin sudah mengalami keausan

pada bagian tertentu. Masalah seperti ini tidak selalu langsung terlihat, tetapi pengukuran pada beberapa titik biasanya akan memberi petunjuk. Kualitas permukaan juga perlu diperhatikan. Permukaan yang baik tidak selalu berarti mengilap. Dalam pemesinan, kualitas permukaan harus dilihat dari fungsi komponen. Poros yang akan menjadi dudukan bantalan membutuhkan kekasaran tertentu agar kontakannya sesuai. Permukaan yang terlalu kasar dapat mempercepat keausan pasangan. Permukaan yang terlalu licin pada fungsi tertentu juga belum tentu ideal. Trinh (2024) menempatkan surface roughness sebagai hasil dari kombinasi parameter, pahat, dan sifat benda kerja.

Kajian pemesinan modern memberi penguatan bahwa parameter dasar tetap relevan. Das et al. (2022) menggunakan kecepatan, feed, dan depth of cut sebagai masukan dalam pemodelan hard turning untuk memprediksi kekasaran permukaan, gaya potong, dan keausan pahat. Artinya, nilai yang diatur operator pada mesin konvensional masih menjadi dasar analisis pada penelitian modern. Bedanya, penelitian memakai data dan model prediksi, sedangkan bengkel manual lebih banyak mengandalkan pengukuran, suara mesin, bentuk geram, dan pengalaman operator. Geram yang keluar selama bubut lurus juga dapat dibaca sebagai tanda kondisi pemotongan. Geram yang terlalu panjang dan tidak terkendali dapat membahayakan operator. Geram yang berubah warna menjadi sangat gelap dapat menunjukkan panas berlebih. Geram yang terputus tidak selalu buruk, terutama pada material tertentu, tetapi bila disertai bunyi kasar dan permukaan buruk, operator perlu memeriksa pahat atau parameter. Membaca geram memang tidak seakurat alat ukur, tetapi cukup berguna sebagai tanda awal.

Pendinginan dan pelumasan juga memengaruhi proses. Pada material tertentu, cairan pendingin membantu menurunkan panas dan memperpanjang umur pahat. Pada beberapa kondisi, pemotongan kering dapat dipilih karena alasan kebersihan, material, atau jenis pahat. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan dari hubungan peralatan, proses, dan strategi, termasuk isu cairan pendingin, penghematan energi, dan optimasi proses. Dalam konteks bubut lurus, gagasan ini mengingatkan bahwa proses yang baik bukan hanya menghasilkan ukuran benar, tetapi juga menggunakan sumber daya secara masuk akal.

Keamanan kerja tidak boleh dipisahkan dari pembahasan bubut lurus. Benda kerja berputar, pahat menyayat, dan geram dapat keluar dalam kondisi panas. Kunci chuck harus dilepas sebelum mesin dijalankan. Lengan baju, kain lap, atau rambut tidak boleh mendekati benda kerja yang berputar. Pengukuran diameter juga tidak dilakukan saat benda kerja masih berputar. Aturan ini terdengar sangat dasar, tetapi justru pelanggaran kecil pada bagian dasar sering menimbulkan kecelakaan.

Untuk memperoleh hasil yang stabil, operator biasanya memulai dengan penyayatan ringan sebagai uji awal. Lintasan pertama membantu memeriksa apakah pahat menyayat dengan baik, apakah benda kerja berputar senter, dan apakah suara pemotongan masih wajar. Setelah itu, kedalaman potong dapat ditambah sesuai kebutuhan. Cara kerja seperti ini lebih aman daripada langsung mengambil pemakanan besar tanpa membaca respons mesin. Pada mesin bubut manual, keterampilan tangan masih sangat terasa. Operator mengatur eretan, membaca skala, mendengarkan suara, melihat geram, lalu mengukur hasilnya. Namun, keterampilan ini tidak boleh berdiri sendirian. Rumus kecepatan potong, pemahaman feed, kedalaman potong, dan sifat material tetap diperlukan agar keputusan tidak hanya bergantung pada kebiasaan. Di bengkel, pengalaman memang berharga, tetapi pengalaman yang baik biasanya lahir dari kebiasaan memeriksa.

Pada mesin bubut CNC, prinsip bubut lurus tetap sama. Perbedaannya berada pada cara mengendalikan gerak. Lintasan pahat diprogram melalui koordinat, putaran spindle dan feed diatur melalui perintah, lalu mesin menjalankan siklus secara otomatis. Walaupun begitu, operator tetap harus menentukan diameter awal, diameter akhir, kedalaman potong, jenis pahat, dan strategi pemakanan. Program yang rapi tidak akan menyelamatkan proses jika konsep pemotongannya keliru. Bubut lurus juga berhubungan erat dengan waktu produksi. Mengambil kedalaman potong terlalu kecil sejak awal membuat waktu kerja terlalu lama. Mengambil terlalu besar dapat membuat pahat cepat rusak dan ukuran sulit dikendalikan. Pilihan yang masuk akal biasanya berada di antara keduanya. Operator perlu mempertimbangkan material, tenaga mesin, kekakuan benda kerja, kondisi pahat, dan kualitas akhir yang diminta. Kesalahan umum pada bubut lurus meliputi diameter kurang dari ukuran, diameter masih terlalu besar, permukaan kasar, benda kerja tirus, bahu poros tidak siku, dan getaran selama

pemakanan. Setiap kesalahan memiliki kemungkinan sebab yang berbeda. Diameter kurang dari ukuran sering terjadi karena pembacaan skala yang salah atau kompensasi kedalaman potong yang berlebihan. Permukaan kasar dapat muncul karena pahat tumpul, feed terlalu besar, atau putaran tidak sesuai. Getaran bisa berasal dari pencekaman, panjang benda kerja, atau kondisi pahat.

Kontrol kualitas sebaiknya dilakukan selama proses, bukan hanya setelah benda kerja selesai. Setelah satu atau dua lintasan, operator dapat menghentikan mesin dan mengukur diameter. Bila ukuran masih jauh, proses dapat dilanjutkan dengan pemakanan kasar. Saat mendekati ukuran akhir, pemakanan dibuat lebih kecil. Cara ini memberi ruang koreksi. Jika pengukuran hanya dilakukan setelah pemotongan selesai, kesalahan ukuran sering tidak dapat diperbaiki. Dalam pembelajaran mesin bubut, bubut lurus dapat dijadikan latihan untuk memahami hubungan antara teori dan praktik. Kita dapat mulai dari benda kerja silinder sederhana, menentukan diameter akhir, menghitung putaran, memilih feed, lalu membandingkan hasil permukaan dari beberapa variasi parameter. Latihan seperti ini membuat konsep cutting speed, feed, dan depth of cut terasa nyata, bukan hanya angka pada rumus. Bubut lurus menjadi dasar bagi operasi bubut lainnya. Sebelum membuat ulir, diameter luar biasanya perlu dibubut lurus sampai ukuran mayor ulir. Sebelum membuat alur, bagian poros sering diratakan dahulu agar posisi alur jelas. Sebelum proses parting off, diameter dan panjang benda kerja perlu dikendalikan. Bahkan sebelum membuat tirus, bagian acuan sering dikerjakan secara lurus lebih dulu agar penyetelan berikutnya lebih mudah.

C. Bubut Penampang atau Facing

Bubut penampang atau facing merupakan operasi pembubutan yang bertujuan meratakan permukaan ujung benda kerja. Jika bubut lurus bekerja sepanjang sumbu benda kerja untuk membentuk diameter silindris, maka facing bekerja pada bidang muka benda kerja. Perbedaannya tampak kecil, tetapi dampaknya besar. Dari proses inilah panjang benda kerja, kesikuan ujung, dan bidang acuan awal banyak ditentukan.

Pada proses facing, benda kerja tetap berputar sebagai gerak utama. Pahat bergerak ke arah radial, yaitu dari sisi luar menuju pusat benda kerja atau sebaliknya, tergantung strategi pemakanan yang dipilih. Gerak radial ini membentuk bidang datar pada ujung benda kerja. Permukaan yang sebelumnya kasar akibat

pemotongan gergaji, bekas cor, atau bekas potongan awal dapat diratakan sampai menjadi acuan yang lebih layak untuk pengukuran.

Secara sederhana, facing dapat dibayangkan seperti merapikan ujung batang logam sebelum pekerjaan utama dimulai. Sebatang baja bulat yang baru dipotong biasanya memiliki ujung tidak rata. Ada bekas gergaji, sudut miring tipis, atau permukaan yang tampak bergelombang. Bila benda kerja langsung dikerjakan tanpa meratakan ujungnya, pengukuran panjang menjadi kurang pasti. Operator mungkin merasa sudah mengukur dari ujung, padahal ujung itu sendiri belum menjadi bidang acuan yang benar.

Dalam operasi ini, pahat tidak bergerak memanjang seperti pada bubut lurus. Pahat digerakkan oleh eretan melintang menuju garis tengah penampang benda kerja. Kedalaman potong justru diatur melalui pergeseran pahat pada arah aksial, yaitu sejajar sumbu benda kerja. Pola ini perlu dipahami sejak awal karena banyak pemula keliru membaca arah gerak pahat. Pada bubut lurus, gerak makan berada pada arah aksial. Pada facing, gerak makan berada pada arah radial.

Tujuan utama facing tidak hanya membuat permukaan terlihat rapi. Operasi ini juga menciptakan bidang referensi. Dalam pemesinan, bidang referensi sangat penting karena ukuran panjang, posisi alur, jarak bahu poros, atau lokasi ulir sering dihitung dari permukaan ujung. Jika permukaan ujung tidak rata, seluruh ukuran berikutnya dapat ikut bergeser. Kesalahan kecil di awal bisa merembet jauh.

Permukaan hasil facing idealnya tegak lurus terhadap sumbu putar benda kerja. Tegak lurus ini bukan sekadar tampak siku saat dilihat mata. Dalam pekerjaan presisi, kesikuan dapat memengaruhi cara komponen menempel pada pasangan. Misalnya, spacer pada poros harus memiliki permukaan muka yang rata dan sejajar agar tekanan terdistribusi merata. Begitu juga ring, bushing, atauudukan roda gigi. Bila bidang muka miring, komponen bisa menekan tidak rata saat dirakit.

Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa kualitas produk manufaktur berkaitan dengan ketelitian ukuran, bentuk, posisi, dan kualitas permukaan. Gagasan ini terasa sangat dekat dengan facing. Permukaan ujung yang rata bukan hanya persoalan bentuk datar, tetapi juga hubungan posisi terhadap sumbu benda kerja. Di

bengkel, hal seperti ini sering baru terasa ketika komponen gagal duduk rapat atau menyisakan celah tipis saat dipasang.

Arah pemakanan pada facing dapat dilakukan dari luar menuju pusat atau dari pusat menuju luar. Dalam banyak latihan dasar, pahat digerakkan dari bagian luar menuju titik pusat benda kerja. Cara ini mudah diamati karena pahat mulai menyayat dari diameter terbesar. Namun, pada kondisi tertentu, operator dapat memilih arah sebaliknya. Pilihan arah ini mempertimbangkan bentuk benda kerja, jenis pahat, kekakuan pencekaman, dan kualitas permukaan yang diinginkan.

Ada hal menarik pada facing: kecepatan potong berubah sepanjang lintasan pahat. Pada diameter luar, kecepatan permukaan lebih tinggi. Saat pahat bergerak mendekati pusat, diameter efektif semakin kecil, sehingga kecepatan potong juga menurun. Jika putaran spindel tetap, bagian dekat pusat mengalami kondisi pemotongan yang berbeda dari bagian luar. Inilah salah satu alasan mengapa permukaan hasil facing kadang tampak berbeda antara daerah tepi dan daerah pusat.

Perubahan kecepatan potong ini tidak selalu menjadi masalah besar pada pekerjaan manual sederhana. Namun, untuk hasil yang halus dan konsisten, operator perlu menyadarinya. Pada mesin CNC, mode constant surface speed dapat membantu menjaga kecepatan permukaan lebih stabil dengan menyesuaikan putaran spindel terhadap posisi pahat. Pada mesin manual, pengendalian dilakukan melalui pilihan putaran yang aman, gerak makan yang wajar, dan pahat yang tajam.

Parameter utama dalam facing tetap sama dengan proses bubut lainnya, yaitu kecepatan potong, gerak makan, dan kedalaman potong. Kecepatan potong berkaitan dengan putaran benda kerja dan diameter aktif. Gerak makan berkaitan dengan perpindahan pahat pada arah radial. Kedalaman potong berkaitan dengan tebal material yang dibuang pada arah aksial. Tiga unsur ini bekerja bersama, meskipun arah penerapannya berbeda dari bubut memanjang.

Pada proses facing, pahat harus berada pada tinggi senter yang tepat. Jika pahat terlalu tinggi atau terlalu rendah, bagian pusat benda kerja dapat menyisakan tonjolan kecil. Tonjolan ini sering disebut sisa pusat atau kecilnya “mata” di tengah permukaan. Kelihatannya sepele. Namun, bila permukaan tersebut

akan menjadi bidang kontak, tonjolan kecil itu dapat mengganggu pemasangan komponen.

Pahat yang digunakan untuk facing perlu memiliki sudut bebas yang cukup agar tidak menggesek permukaan yang baru terbentuk. Sudut potong yang salah dapat membuat pahat menggaruk bidang muka, bukan menyayat dengan bersih. Pada material lunak seperti aluminium, pahat yang kurang tajam dapat membuat permukaan tampak tercabik atau ditemplei material. Pada baja, pahat tumpul sering menghasilkan suara kasar dan permukaan buram.

Pemilihan radius ujung pahat juga memengaruhi hasil. Radius kecil dapat membantu menjangkau area dekat bahu atau sudut, tetapi permukaan bisa lebih mudah memperlihatkan bekas pemakanan. Radius lebih besar dapat memperhalus permukaan, tetapi membutuhkan mesin dan pencekaman yang lebih kaku. Jika kekakuan kurang, radius besar justru dapat memicu getaran. Jadi, pilihan pahat perlu melihat kondisi nyata mesin, bukan hanya bentuk ideal di gambar.

Gerak makan yang terlalu besar biasanya meninggalkan pola spiral kasar pada permukaan ujung. Pola ini muncul karena pahat menyapu bidang muka sambil benda kerja berputar. Untuk pekerjaan kasar, pola tersebut masih dapat diterima selama ukuran belum mendekati batas akhir. Untuk pekerjaan akhir, gerak makan perlu diperkecil agar permukaan lebih halus. Trinh (2024) menyatakan bahwa kekasaran permukaan dalam proses pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, karakter alat potong, dan sifat benda kerja.

Kedalaman potong pada facing sebaiknya ditentukan dengan memperhatikan jumlah material yang perlu dibuang dari ujung benda kerja. Bila ujung benda kerja masih sangat miring akibat pemotongan awal, satu lintasan ringan mungkin belum cukup untuk membuat seluruh permukaan rata. Operator dapat mengambil beberapa lintasan sampai seluruh bidang tersayat merata. Setelah itu, lintasan akhir dibuat lebih ringan untuk memperbaiki kualitas permukaan dan panjang akhir.

Pada benda kerja pendek yang dijepit kuat di chuck, proses facing biasanya cukup stabil. Masalah mulai muncul ketika benda kerja menjulur terlalu panjang atau pencekaman kurang dalam. Tekanan pahat pada ujung benda kerja dapat menimbulkan getaran. Bahkan, bila pencekaman buruk, benda kerja bisa bergeser. Karena

itu, panjang benda kerja yang keluar dari chuck perlu dibuat seperlunya saja, terutama saat meratakan ujung.

Benda kerja berdiameter besar membutuhkan perhatian berbeda. Karena diameter luar memiliki kecepatan permukaan lebih tinggi, panas dan gaya potong di area tepi dapat terasa lebih besar. Putaran spindel perlu dipilih dengan hati-hati. Jika terlalu tinggi, pahat cepat panas dan permukaan bisa rusak. Jika terlalu rendah, penyayatan dapat terasa berat dan tidak stabil. Pada material keras, pemilihan putaran yang terlalu berani sering berakhir pada pahat aus lebih cepat.

Pemeriksaan hasil facing dapat dilakukan dengan melihat kerataan permukaan, mengukur panjang benda kerja, dan memeriksa kesikuan bidang muka terhadap sumbu. Untuk pekerjaan umum, jangka sorong dapat dipakai mengukur panjang. Untuk pekerjaan presisi, mikrometer luar, dial indikator, atau alat bantu pemeriksaan kesikuan dapat digunakan. Pemeriksaan sederhana pun tetap berguna, terutama setelah lintasan awal, agar operator tahu apakah permukaan sudah tersayat penuh.

Dalam pekerjaan poros bertingkat, facing sering menjadi langkah awal sebelum pembubutan memanjang. Ujung benda kerja diratakan terlebih dahulu, lalu dari bidang itu operator mengukur panjang segmen yang akan dibubut. Misalnya, poros membutuhkan bahu pada jarak 35 mm dari ujung. Bila ujung belum rata, ukuran 35 mm tidak memiliki acuan yang dapat dipercaya. Setelah facing, pengukuran menjadi lebih jelas.

Pada proses produksi, facing juga membantu menyeragamkan panjang benda kerja. Potongan bahan awal sering memiliki toleransi panjang yang cukup longgar. Melalui facing, setiap benda kerja dapat disiapkan dengan panjang yang lebih konsisten sebelum proses lanjutan. Hal ini penting bila komponen akan dirakit secara berulang, seperti spacer, ring penekan, bushing, atau batang penghubung pendek.

Hubungan facing dengan operasi pengeboran juga cukup dekat. Sebelum lubang dibuat di pusat benda kerja, permukaan ujung sebaiknya diratakan terlebih dahulu. Permukaan yang miring dapat membuat mata bor awal cenderung meleset atau berjalan tidak stabil saat menyentuh benda kerja. Dengan permukaan muka yang rata, penentuan titik pusat dan proses center drilling menjadi lebih aman.

Dalam konteks kualitas permukaan, facing tidak boleh hanya dinilai dari kilap visual. Permukaan yang mengilap belum tentu datar atau siku. Sebaliknya, permukaan yang tidak terlalu mengilap masih dapat memenuhi fungsi bila kerataan, kesikuan, dan ukurannya sesuai. Padhan et al. (2023) menunjukkan bahwa integritas permukaan dalam hard turning berkaitan dengan kondisi pemotongan, pahat, pelumasan, dan respons material. Artinya, kualitas permukaan selalu lahir dari kombinasi beberapa faktor.

Penggunaan cairan pendingin dapat membantu pada beberapa material dan kondisi pemotongan. Cairan pendingin menurunkan panas, membantu membawa geram keluar dari area potong, dan mengurangi gesekan. Namun, tidak semua pekerjaan harus menggunakan cairan dalam jumlah besar. Pada beberapa pahat karbida dan kondisi pemotongan tertentu, pemesinan kering atau pelumasan minimum dapat dipilih. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan sebagai integrasi antara peralatan, proses, dan strategi, termasuk pengendalian cairan pendingin serta efisiensi proses.

Geram pada proses facing biasanya terbentuk mengikuti lintasan radial pahat. Bentuk geram dapat memberi tanda awal tentang kondisi pemotongan. Geram yang sangat panjang dan melilit perlu diwaspadai karena dapat tersangkut di benda kerja atau pahat. Geram yang berubah warna tajam dapat menunjukkan panas berlebih. Geram yang putus pendek pada material tertentu bisa normal, tetapi bila disertai bunyi keras dan permukaan buruk, operator perlu memeriksa pahat dan parameter.

Kesalahan umum pada facing meliputi permukaan tidak rata, sisa tonjolan di pusat, panjang benda kerja terlalu pendek, permukaan kasar, dan bidang muka tidak siku terhadap sumbu. Setiap kesalahan memiliki kemungkinan penyebab yang berbeda. Sisa tonjolan di pusat sering berkaitan dengan tinggi pahat. Permukaan kasar dapat disebabkan oleh gerak makan terlalu besar, pahat tumpul, atau putaran kurang sesuai. Panjang terlalu pendek biasanya terjadi karena kedalaman potong atau pembacaan skala tidak dikendalikan dengan baik.

Keamanan kerja tetap menjadi bagian yang tidak dapat ditawar. Benda kerja berputar tepat di depan operator, sementara pahat menyayat pada bidang muka yang terbuka. Geram dapat keluar ke arah samping atau depan. Kunci chuck harus dilepas sebelum mesin hidup. Pengukuran panjang tidak dilakukan saat

benda kerja masih berputar. Tangan tidak boleh digunakan untuk menarik geram. Kedisiplinan kecil seperti ini membuat proses latihan maupun produksi jauh lebih aman.

Pada mesin bubut manual, facing melatih kepekaan operator terhadap gerak eretan melintang. Operator perlu menggerakkan pahat dengan halus agar bekas pemakanan tidak terlalu kasar. Saat mendekati pusat, gaya potong dapat terasa berubah karena kecepatan permukaan menurun. Ini momen kecil yang sering terasa di tangan. Bukan mistis, tentu saja. Itu hanya tanda bahwa kondisi pemotongan berubah sepanjang lintasan.

Pada mesin bubut CNC, facing dijalankan melalui lintasan program. Mesin dapat mengatur pahat bergerak radial dengan jarak dan feed rate tertentu. Walaupun gerakannya otomatis, prinsipnya tetap sama. Programmer harus menentukan titik awal, batas akhir, kedalaman potong, kecepatan spindel, dan strategi lintasan. Kesalahan konsep pada tahap program dapat menghasilkan bidang muka yang tidak sesuai, bahkan pada mesin yang sangat presisi.

Das et al. (2022) menunjukkan bahwa parameter seperti kecepatan potong, gerak makan, dan kedalaman potong tetap menjadi variabel penting dalam pemodelan proses hard turning untuk memprediksi kekasaran permukaan dan karakteristik pemesinan lain. Hal ini memberi pengingat bahwa pembahasan dasar seperti facing tetap relevan dengan perkembangan riset modern. Mesin boleh makin canggih, tetapi kualitas permukaan masih dipengaruhi oleh keputusan pemotongan yang sangat mendasar.

Dalam latihan bengkel, facing sebaiknya dilakukan sebelum peserta belajar operasi yang lebih rumit. Latihan ini memperkenalkan hubungan antara pahat, benda kerja berputar, gerak radial, dan pengurangan panjang. Peserta dapat melihat langsung bagaimana permukaan kasar berubah menjadi rata. Mereka juga dapat memahami mengapa posisi pahat terhadap senter sangat menentukan hasil di bagian tengah.

Setelah permukaan ujung rata, pekerjaan dapat berlanjut ke pembubutan diameter, pembuatan alur, pengeboran senter, pembuatan ulir, atau pemotongan benda kerja. Karena itu, facing sering menjadi operasi pembuka sekaligus operasi penyelesai. Ia membuka proses dengan membuat acuan, lalu bisa menutup proses dengan merapikan panjang akhir. Dalam banyak komponen,

bidang muka yang baik menjadi tanda bahwa pekerjaan dikerjakan dengan tertib.

Bubut penampang atau facing memperlihatkan bahwa operasi sederhana tidak selalu berarti kurang penting. Geraknya hanya radial, tetapi ia menentukan panjang, bidang acuan, kesikuan, dan kesiapan benda kerja untuk proses berikutnya. Bila bubut memanjang membentuk permukaan silindris sepanjang sumbu, maka facing membentuk muka benda kerja yang menjadi dasar pembacaan ukuran. Dari bidang kecil di ujung benda kerja itu, banyak keputusan pemesinan berikutnya dimulai.

D. Bubut Tirus

Bubut tirus merupakan operasi pembubutan untuk menghasilkan benda kerja berbentuk konis, yaitu benda kerja yang memiliki diameter berbeda pada kedua ujungnya. Salah satu ujung berdiameter lebih besar, sedangkan ujung lainnya lebih kecil. Perubahan diameter itu berlangsung bertahap sepanjang arah sumbu benda kerja. Bentuknya tampak sederhana, tetapi cara membuatnya membutuhkan pemahaman geometri yang cukup hati-hati.

Dalam pekerjaan mesin, bentuk tirus tidak dibuat hanya karena alasan tampilan. Banyak komponen memakai tirus karena bentuk ini mampu memberi efek pemusatan, penguncian, atau penyambungan yang kuat. Contoh yang mudah dibayangkan adalah senter mesin bubut, tangkai bor tirus, pin tirus, dan dudukan tertentu pada komponen mesin. Ketika dua permukaan tirus bertemu dengan sudut yang tepat, keduanya dapat saling mengunci dengan kontak yang relatif merata.

Pada proses bubut lurus, pahat bergerak sejajar sumbu benda kerja sehingga diameter yang dihasilkan tetap sama. Pada bubut tirus, lintasan pahat dibuat miring terhadap sumbu benda kerja. Akibatnya, diameter benda kerja berubah dari besar ke kecil sepanjang panjang tirus. Di sinilah letak perbedaan mendasarnya. Bukan putaran benda kerja yang berubah, melainkan arah relatif gerak pahat terhadap sumbu benda kerja.

Hubungan geometri pada tirus biasanya dihitung melalui persamaan $\tan \alpha = (D - d) \div 2L$. Nilai α menunjukkan sudut setengah tirus terhadap sumbu benda kerja, bukan sudut total antara dua sisi tirus. Detail ini sering membuat bingung pada tahap awal. Bila diameter besar 40 mm, diameter kecil 24 mm, dan panjang tirus 40 mm, maka selisih diameter adalah 16 mm. Karena

penyusutan terjadi pada dua sisi secara geometri, nilai yang dipakai terhadap sumbu adalah 8 mm dibanding 40 mm. Dari situ sudut α dapat dihitung sekitar 11,3 derajat.

Perhitungan sudut bukan sekadar latihan angka. Sudut inilah yang menentukan apakah eretan atas perlu dimiringkan berapa derajat, apakah penggeseran kepala lepas masih masuk akal, atau apakah pahat profil harus dibuat dengan bentuk tertentu. Kalau sudut salah, permukaan tirus mungkin tetap terbentuk, tetapi tidak akan cocok dengan pasangan yang seharusnya. Benda kerja bisa terlalu longgar, terlalu sesak, atau hanya kontak di bagian ujung.

Secara umum, bubut tirus dapat dikerjakan dengan empat metode. Metode pertama adalah memiringkan eretan atas. Metode kedua adalah menggeser kepala lepas. Metode ketiga memakai pahat profil yang bentuknya sudah mengikuti sudut tirus. Metode keempat memakai alat bantu tirus atau taper turning attachment. Keempatnya sama-sama menghasilkan permukaan konis, tetapi kondisi pemakaian dan batas kemampuannya tidak sama.

Pemilihan metode tidak sebaiknya dilakukan secara asal. Operator perlu melihat panjang tirus, besar sudut, jenis tirus luar atau dalam, jumlah benda kerja, tuntutan ketelitian, dan perlengkapan mesin yang tersedia. Pada pekerjaan pendek, eretan atas atau pahat profil sering cukup praktis. Pada pekerjaan panjang dengan sudut kecil, kepala lepas yang digeser dapat menjadi pilihan. Untuk pekerjaan tirus luar yang panjang dan membutuhkan keselarasan lebih baik, taper turning attachment memberi keuntungan tersendiri.

Metode memiringkan eretan atas dilakukan dengan memutar posisi eretan atas sebesar sudut tirus yang dikehendaki. Eretan atas yang semula sejajar dengan sumbu mesin diputar mengikuti nilai α . Setelah sudut diatur, pahat digerakkan menggunakan tuas eretan atas secara manual. Karena gerak pahat mengikuti arah eretan atas yang sudah miring, permukaan benda kerja tersayat membentuk tirus.

Kelebihan metode eretan atas terletak pada fleksibilitasnya. Cara ini dapat dipakai untuk tirus luar maupun tirus dalam, selama pahat dan ruang geraknya memungkinkan. Pembuatan lubang tirus pendek, ujung poros tirus, atau dudukan tirus kecil dapat dilakukan dengan metode ini. Operator juga dapat mengatur sudut relatif cepat tanpa perlu mengubah posisi kepala lepas.

Namun, ada batas yang cukup jelas. Panjang tirus yang dapat dikerjakan bergantung pada panjang langkah eretan atas. Jika tirus terlalu panjang, eretan atas tidak mampu menjangkau seluruh panjang pemesian dalam satu lintasan. Selain itu, gerak makan pada metode ini umumnya dilakukan manual, sehingga kehalusan permukaan sangat bergantung pada kestabilan tangan operator. Pada operator yang belum terbiasa, bekas pemakanan dapat tampak tidak merata.

Metode kedua adalah menggeser kepala lepas. Cara ini menggunakan benda kerja yang dipasang di antara dua senter, yaitu senter pada kepala tetap dan senter pada kepala lepas. Kepala lepas kemudian digeser sedikit ke arah melintang, sehingga sumbu benda kerja tidak lagi sejajar sempurna dengan sumbu mesin. Ketika pahat bergerak memanjang sejajar alas mesin, benda kerja yang sudah miring terhadap lintasan pahat akan tersayat menjadi tirus.

Metode kepala lepas cocok untuk membuat tirus panjang dengan sudut kecil. Dalam praktik, metode ini kurang nyaman untuk sudut besar karena pergeseran kepala lepas akan terlalu jauh. Jika selisih senter terlalu besar, benda kerja sulit dipasang dengan baik dan kontak senter menjadi kurang ideal. Karena itu, metode ini biasanya dipakai untuk tirus ringan, bukan tirus pendek dengan sudut tajam.

Besarnya pergeseran kepala lepas dapat dihitung dengan memperhatikan panjang benda kerja di antara dua senter dan panjang bagian tirus. Jika sudut α sudah diketahui, pendekatan yang sering dipakai adalah $h = L_s \times \sin \alpha$, dengan h sebagai jarak pergeseran kepala lepas dan L_s sebagai jarak antara dua senter. Jika perhitungan memakai diameter besar D , diameter kecil d , panjang tirus L_t , dan jarak antar senter L_s , hubungan umumnya dapat ditulis $h = L_s \times (D - d) \div 2L_t$. Penamaan L perlu dibuat jelas agar tidak tertukar antara panjang tirus dan jarak antar senter.

Metode ketiga memakai pahat profil. Pada metode ini, pahat dibuat atau dipilih dengan bentuk sesuai sudut tirus yang diinginkan. Pahat kemudian ditekan menyayat permukaan benda kerja sehingga bentuk tirus terbentuk sesuai geometri mata potong. Cara ini dapat terasa sangat cepat, terutama untuk tirus pendek atau chamfer yang lebarnya tidak terlalu besar.

Kelebihan pahat profil adalah kecepatannya. Operator tidak perlu memiringkan eretan atas atau menggeser kepala lepas untuk

profil tirus yang sangat pendek. Misalnya, pada pembuatan chamfer di ujung poros, pahat profil dapat menyelesaikan pekerjaan dengan cepat. Namun, metode ini kurang cocok untuk tirus panjang karena lebar pahat menjadi batas utama. Semakin lebar bidang kontak, semakin besar gaya potong yang harus ditahan mesin dan benda kerja.

Getaran menjadi risiko yang cukup sering muncul pada penggunaan pahat profil. Karena pahat menyentuh permukaan lebih lebar, beban pemotongan tidak sekecil pada pahat bermata sempit. Jika benda kerja kecil, pencekaman kurang kuat, atau pahat menonjol terlalu panjang dari rumah pahat, permukaan dapat bergetar. Hasilnya bukan tirus halus, tetapi permukaan bergaris dan kasar. Agak menyebalkan, tetapi sangat umum terjadi.

Metode keempat memakai alat bantu tirus atau taper turning attachment. Alat ini dipasang pada bagian apron atau eretan mesin bubut, lalu bekerja sebagai pemandu gerak pahat. Pemandu dapat diatur sesuai sudut tirus yang diinginkan. Saat apron bergerak sepanjang alas mesin, mekanisme pemandu menggeser pahat secara terkendali sehingga lintasan pahat membentuk sudut terhadap sumbu benda kerja.

Kelebihan utama taper turning attachment adalah keselarasan proses. Benda kerja dapat tetap dipasang di antara dua senter yang segaris, sementara pahat mengikuti sudut tirus melalui alat bantu. Ini berbeda dari metode kepala lepas yang sengaja menggeser senter kepala lepas. Pada pekerjaan tertentu, menjaga senter tetap selaras dapat membantu mengurangi masalah pada kontak senter dan kestabilan benda kerja.

Walaupun begitu, alat bantu tirus tidak selalu tersedia pada semua mesin bubut. Mesin latihan dasar atau mesin bengkel kecil kadang tidak dilengkapi perangkat ini. Penyetelannya juga membutuhkan waktu. Karena itu, metode ini lebih terasa manfaatnya ketika pekerjaan tirus dilakukan berulang, membutuhkan panjang tirus yang cukup besar, atau menuntut keseragaman hasil yang lebih baik.

Dalam semua metode bubut tirus, parameter pemotongan tetap memegang peran penting. Kecepatan potong, gerak makan, dan kedalaman potong memengaruhi panas, gaya potong, keausan pahat, dan kekasaran permukaan. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kekasaran permukaan pada pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pada tirus, hal

ini terasa jelas karena permukaan miring biasanya menjadi bidang kontak dengan komponen pasangan.

Kedalaman potong pada bubut tirus perlu diatur bertahap. Mengambil pemakanan terlalu besar dapat membuat pahat terdorong, sudut hasil berubah, atau permukaan menjadi kasar. Pada bahan lunak, masalahnya bisa berupa permukaan yang tampak tercabik atau material menempel pada pahat. Pada baja yang lebih keras, pahat bisa cepat aus atau muncul getaran. Das et al. (2022) menunjukkan bahwa pada hard turning, kecepatan, gerak makan, dan kedalaman potong berkaitan dengan kekasaran permukaan, gaya potong, serta keausan pahat.

Pahat yang digunakan harus sesuai dengan material dan arah penyayatan. Untuk tirus luar, pahat bubut rata dapat digunakan dengan pengaturan sudut yang benar. Untuk tirus dalam, pahat bubut dalam atau boring tool diperlukan agar dapat menjangkau lubang. Sudut bebas pahat harus cukup agar sisi pahat tidak menggesek permukaan tirus yang baru terbentuk. Gesekan kecil saja dapat merusak kualitas permukaan.

Pemeriksaan hasil bubut tirus tidak cukup hanya mengukur salah satu diameter. Operator perlu memeriksa diameter besar, diameter kecil, panjang tirus, dan sudutnya. Pada tirus yang berfungsi sebagai pasangan, pemeriksaan kontak juga dapat dilakukan. Misalnya, permukaan tirus diberi pewarna tipis, lalu dipasangkan dengan komponen lawannya. Bekas kontak dapat memberi gambaran apakah permukaan bertemu secara merata atau hanya menyentuh di satu bagian.

Ketelitian sudut sering menjadi tantangan utama. Selisih kecil pada sudut mungkin tidak terlihat jelas saat benda kerja berdiri sendiri, tetapi akan terasa saat dipasang. Tirus yang terlalu curam bisa hanya kontak di pangkal. Tirus yang terlalu landai bisa hanya kontak di ujung. Pada sambungan yang mengandalkan bidang tirus sebagai pengunci, distribusi kontak seperti ini dapat memengaruhi kekuatan dan kestabilan sambungan.

Permukaan tirus juga perlu dilihat dari sisi integritas permukaan. Padhan et al. (2023) menunjukkan bahwa integritas permukaan pada hard turning berkaitan dengan kondisi pemotongan, jenis pahat, pelumasan, dan respons material. Artinya, tirus yang baik bukan sekadar memiliki sudut benar. Permukaannya juga harus cukup halus, tidak terbakar, tidak

bergetar, dan tidak mengalami kerusakan lapisan permukaan yang mengganggu fungsi.

Cairan pendingin dapat membantu menjaga suhu pemotongan, terutama saat menyayat baja atau material yang mudah menimbulkan panas. Namun, pemilihan pendinginan perlu disesuaikan dengan jenis pahat dan kondisi proses. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan melalui hubungan antara peralatan, proses, dan strategi, termasuk pengaturan cairan pendingin, pemotongan kering, dan pelumasan minimum. Pada bubut tirus, gagasan ini dapat diterapkan dengan memilih strategi pendinginan yang cukup, bukan sekadar membanjiri area potong tanpa pertimbangan.

Kesalahan umum pada bubut tirus biasanya muncul dari penyetelan. Pada metode eretan atas, sudut eretan dapat salah baca. Pada metode kepala lepas, jarak geser h dapat keliru karena panjang tirus dan jarak antar senter tertukar. Pada pahat profil, bentuk pahat mungkin tidak sesuai sudut. Pada taper turning attachment, pemandu bisa kurang terkunci atau sudutnya tidak dikalibrasi. Semua kesalahan itu dapat menghasilkan tirus yang tampak benar secara visual, tetapi meleset saat diukur.

Ada pula kesalahan yang berasal dari pencekaman. Benda kerja yang tidak terpasang kuat dapat bergeser saat pemotongan. Benda kerja panjang dapat melendut. Tekanan senter yang terlalu kuat dapat menimbulkan panas dan bekas pada lubang senter. Tekanan yang terlalu lemah membuat benda kerja tidak stabil. Operator perlu menemukan titik yang pas, dan ini memang sering membutuhkan pengalaman.

Pada pembelajaran praktik, bubut tirus sebaiknya dilatih setelah peserta memahami bubut lurus dan facing. Alasannya sederhana. Tirus membutuhkan acuan diameter dan bidang muka yang sudah rapi. Jika diameter dasar belum benar, perhitungan tirus ikut terganggu. Jika permukaan ujung belum rata, pengukuran panjang tirus juga kurang pasti. Urutan belajar seperti ini membuat pembahasan terasa lebih bertahap.

Latihan awal dapat dimulai dengan tirus pendek menggunakan eretan atas. Peserta menghitung sudut α dari D , d , dan L , lalu memiringkan eretan atas sesuai hasil perhitungan. Setelah beberapa lintasan, diameter besar dan kecil diperiksa. Dari sini peserta dapat melihat langsung hubungan antara angka pada

rumus dan bentuk yang muncul di benda kerja. Bagian ini biasanya membuat konsep tirus lebih mudah dipahami.

Setelah itu, latihan dapat dilanjutkan dengan metode kepala lepas. Peserta akan menyadari bahwa pahat bergerak memanjang seperti bubut lurus, tetapi hasilnya tirus karena sumbu benda kerja sudah dimiringkan. Latihan ini bagus untuk memahami hubungan antara sumbu mesin, sumbu benda kerja, dan lintasan pahat. Rasanya agak membingungkan pada awalnya, tetapi justru di situlah nilai belajarnya.

Metode pahat profil dapat dikenalkan sebagai cara cepat untuk profil pendek. Namun, peserta perlu diberi pemahaman bahwa cepat tidak selalu berarti paling tepat. Pahat profil yang terlalu lebar dapat menimbulkan gaya potong besar. Jika mesin kecil atau pencekaman kurang kuat, hasilnya bisa buruk. Dari sini kita belajar bahwa pemilihan metode selalu terkait dengan kondisi kerja nyata.

Penggunaan taper turning attachment dapat diperkenalkan sebagai metode yang lebih sistematis untuk tirus luar panjang. Walaupun tidak semua bengkel memiliki alat ini, pemahamannya tetap berguna. Kita dapat melihat bahwa mesin bubut konvensional dapat ditambah perlengkapan bantu untuk memperluas kemampuan proses. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa metode pemesinan seperti turning memiliki prinsip, aplikasi, dan kondisi kerja tertentu, sehingga pemilihan perlengkapan bantu menjadi bagian dari perencanaan proses.

Dalam produksi berulang, bubut tirus menuntut pengendalian yang lebih konsisten. Sudut harus sama, diameter harus sama, dan panjang tirus tidak boleh berubah ubah. Pada kondisi ini, metode manual yang mengandalkan tangan operator mungkin kurang ideal. Perlengkapan bantu, pembatas langkah, prosedur ukur, dan pemeriksaan berkala akan membantu menjaga hasil. Mesin CNC tentu dapat membuat tirus melalui lintasan program, tetapi prinsip geometrinya tetap sama.

Pada mesin CNC, pembuatan tirus dilakukan dengan mengatur perpindahan pahat pada dua sumbu secara bersamaan. Perubahan posisi arah X dan Z menghasilkan lintasan miring. Walaupun prosesnya dikendalikan program, operator tetap harus memahami D, d, L, dan sudut tirus. Program yang benar lahir dari geometri yang benar. Jika input diameter atau panjang salah, mesin akan membuat kesalahan itu dengan sangat rapi.

Bubut tirus memperlihatkan bahwa operasi mesin bubut tidak hanya membentuk benda kerja yang berdiameter tetap. Mesin bubut juga mampu membentuk perubahan diameter yang terukur dan fungsional. Empat metode yang dibahas memberi pilihan sesuai kebutuhan, mulai dari tirus pendek, tirus panjang sudut kecil, profil cepat, sampai tirus luar yang lebih stabil dengan alat bantu. Setelah memahami tirus, pembahasan dapat bergerak ke operasi ulir, karena keduanya sama-sama menuntut hubungan yang cermat antara gerak mesin, geometri benda kerja, dan tujuan pemakaian komponen.

E. Bubut Ulir

Bubut ulir merupakan operasi pembubutan untuk membuat profil heliks pada permukaan benda kerja. Profil ini dapat berada di bagian luar, seperti pada baut dan ujung poros berulir, atau di bagian dalam, seperti pada mur, rumah sambungan, dan komponen berlubang yang membutuhkan pasangan ulir. Sekilas bentuknya hanya seperti alur yang berputar mengelilingi benda kerja. Namun, di balik bentuk itu terdapat hubungan yang cukup ketat antara geometri, standar, gerak mesin, dan fungsi sambungan. Pada mesin bubut, ulir dibuat dengan mengatur gerak pahat agar bergerak sejajar sumbu benda kerja sambil benda kerja berputar. Bedanya dengan bubut lurus, gerak makan pada bubut ulir harus sinkron dengan putaran spindel. Setiap satu putaran benda kerja, pahat harus maju sejauh langkah tertentu. Jika gerak pahat tidak sesuai, profil ulir tidak akan terbentuk dengan benar. Ulir bisa terlalu rapat, terlalu renggang, atau bahkan rusak karena pahat tidak kembali pada jalur yang sama.

Ulir memiliki fungsi yang sangat luas. Pada baut dan mur, ulir dipakai sebagai pengikat. Pada batang ulir penggerak, ulir dipakai untuk mengubah gerak putar menjadi gerak lurus. Pada tutup botol logam, sambungan pipa, dan alat penjepit, ulir memberi kemampuan bongkar pasang yang relatif mudah. Dalam dunia mesin perkakas, ulir juga ditemukan pada spindel, eretan, baut pengikat pahat, dan berbagai mekanisme pengatur posisi. Hal penting dari ulir adalah kemampuan untuk saling dipertukarkan. Sebuah baut M10 dari satu pabrik harus dapat masuk ke mur M10 dari pabrik lain selama keduanya mengikuti standar yang sama. Di sinilah standar ulir menjadi penting. Tanpa standar, setiap bengkel dapat membuat bentuk ulir sendiri, dan komponen dari satu tempat belum tentu cocok dengan komponen dari tempat lain. Mungkin

bisa dipaksa masuk, tetapi hasilnya tidak aman dan tidak layak untuk pekerjaan teknik.

Standar ulir membantu mengatur bentuk profil, diameter, jarak antar puncak ulir, toleransi, dan cara penandaan. Untuk sistem metrik, standar ISO banyak digunakan di negara Eropa dan Asia. Untuk sistem inci, keluarga standar *Unified* banyak digunakan di Amerika Serikat, Kanada, dan beberapa lingkungan industri yang masih memakai satuan inci. ISO 68-1:2023 menjelaskan profil dasar dan profil desain untuk ulir metrik ISO, sedangkan ASME B1.1-2024 mengatur bentuk, seri, kelas, toleransi, dan penandaan ulir inci *Unified*. Jenis profil ulir dapat dibedakan berdasarkan bentuk penampangnya. Profil segitiga paling umum digunakan untuk sambungan baut dan mur. Profil segi empat, trapesium, dan *buttriss* lebih sering dikaitkan dengan ulir daya atau *power screw*, yaitu ulir yang bekerja untuk meneruskan gaya dan gerak. Contohnya dapat ditemukan pada ragam, dongkrak ulir, mekanisme penekan, atau eretan mesin. Bentuk profil dipilih bukan hanya karena mudah dibuat, tetapi karena berkaitan dengan arah gaya, efisiensi, kekuatan, dan kemudahan pemeriksaan.

Terminologi geometri ulir perlu dipahami sebelum masuk ke langkah penguliran. Istilah pertama adalah diameter mayor, yaitu diameter terbesar pada ulir luar atau diameter terbesar yang berkaitan dengan puncak ulir. Istilah kedua adalah diameter minor, yaitu diameter terkecil pada dasar ulir. Istilah ketiga adalah diameter *pitch*, yaitu diameter imajiner tempat tebal gigi ulir dan ruang antar ulir berada dalam keadaan seimbang menurut definisi geometrinya. Ketiga diameter ini sangat penting dalam pemeriksaan ulir. Selain diameter, istilah *pitch* dan *lead* sering menimbulkan kebingungan. *Pitch* adalah jarak antara dua puncak ulir yang berdekatan, diukur sejajar sumbu ulir. *Lead* adalah jarak maju aksial yang ditempuh baut atau mur ketika berputar satu putaran penuh. Pada ulir *single start*, nilai *lead* sama dengan *pitch*. Pada ulir *double start*, nilai *lead* sama dengan dua kali *pitch*. Pada ulir *triple start*, nilai *lead* sama dengan tiga kali *pitch*.

Ulir *single*, *double*, dan *triple* dibedakan berdasarkan jumlah jalur heliks yang dimulai pada benda kerja. Pada ulir *single*, hanya ada satu jalur ulir yang melingkar sepanjang benda kerja. Pada ulir *double*, terdapat dua jalur ulir yang saling berselang. Pada ulir *triple*, terdapat tiga jalur ulir. Dari luar, perbedaannya kadang tidak

langsung terasa jika tidak dilihat dari ujung benda kerja. Namun, fungsi mekanisnya berbeda cukup jauh. Ulir *single* banyak dipakai untuk sambungan pengikat karena gerak majunya tidak terlalu besar setiap satu putaran. Sambungan menjadi lebih mudah dikontrol dan cenderung lebih kuat menahan pelepasan akibat getaran. Ulir *double* dan *triple* dipakai ketika gerak aksial yang lebih cepat dibutuhkan. Misalnya, pada tutup yang perlu cepat dibuka, mekanisme pengatur yang membutuhkan langkah besar, atau komponen yang harus bergerak jauh hanya dengan sedikit putaran. Namun, ulir banyak awal biasanya membutuhkan perhatian lebih pada pembuatan dan pemeriksaan.

Pada standar ISO metrik, ulir biasanya ditulis dengan huruf M diikuti diameter nominal dan *pitch*. Contohnya M10 × 1,5 berarti ulir metrik dengan diameter nominal 10 mm dan *pitch* 1,5 mm. Untuk ulir kasar standar, nilai *pitch* sering tidak selalu ditulis dalam praktik umum, tetapi dalam pembelajaran pemesinan lebih baik tetap ditampilkan agar kita memahami hubungan antara penandaan dan penyetelan mesin. Pada mesin bubut manual, angka *pitch* inilah yang akan diatur pada tuas atau tabel roda gigi pengulir. Untuk standar inci *Unified*, ukuran ulir sering dibaca melalui diameter dan jumlah ulir per inci atau *thread per inch*. Contohnya 1/4 20 UNC berarti diameter nominal seperempat inci dengan 20 ulir per inci pada seri kasar *Unified National Coarse*. Contoh lain, 1/4 28 UNF berarti diameter nominal sama, tetapi jumlah ulir per inci lebih banyak sehingga *pitch* lebih halus. Dalam sistem ini, operator tidak menyetel *pitch* dalam milimeter, melainkan menyetel jumlah ulir per inci sesuai tabel mesin.

Perbedaan ISO metrik dan *UNS* tidak hanya soal satuan. Cara membacanya juga berbeda. ISO metrik memakai jarak antar ulir dalam milimeter. Sistem *Unified* memakai jumlah ulir dalam satu inci. Bila operator terbiasa dengan satu sistem, sistem lain dapat terasa kurang alami pada awalnya. Karena itu, membaca gambar kerja dengan teliti menjadi bagian penting sebelum mesin dihidupkan. Dalam praktik pemesinan, salah membaca standar ulir bisa membuat komponen gagal total. Baut M10 × 1,5 tidak sama dengan M10 × 1,25. Diameter luarnya tampak mirip, tetapi jarak ulirnya berbeda. Pada sistem inci, 1/4 20 UNC tidak sama dengan 1/4 28 UNF. Bila dipaksa, ulir akan seret, rusak, atau hanya masuk beberapa putaran. Ini bukan kesalahan kecil. Pada sambungan yang menahan beban, kesalahan ulir dapat menjadi risiko keselamatan.

Pembuatan ulir pada mesin bubut menggunakan pahat ulir yang bentuk ujungnya sesuai profil ulir. Untuk ulir metrik segitiga, sudut pahat biasanya 60 derajat. Sudut ini perlu diperiksa memakai mal ulir atau *thread gauge* sebelum proses dimulai. Pahat yang sudutnya tidak benar akan membuat profil ulir salah, meskipun *pitch* mesin sudah disetel dengan tepat. Jadi, penguliran bukan hanya soal pengaturan roda gigi atau tuas *feed*. Geometri pahat ikut menentukan. Setelah sudut pahat benar, posisi pahat terhadap benda kerja harus disetel. Ujung pahat perlu berada setinggi senter. Jika terlalu tinggi atau terlalu rendah, profil ulir dapat berubah dan pahat cenderung menggesek. Posisi pahat juga harus tegak lurus terhadap sumbu benda kerja. Untuk memeriksa hal ini, mal ulir ditempelkan pada permukaan benda kerja, lalu pahat disesuaikan sampai kedua sisi pahat sejajar dengan sisi mal. Kelihatannya sederhana, tetapi tahap ini sering menentukan rapi tidaknya hasil ulir.

Sebelum penguliran dimulai, diameter luar benda kerja perlu disiapkan. Untuk ulir luar, diameter benda kerja biasanya dibubut mendekati diameter mayor yang sesuai. Permukaan harus cukup halus dan lurus. Bila diameter terlalu besar, pahat ulir harus bekerja lebih berat dan risiko puncak ulir terlalu penuh meningkat. Bila diameter terlalu kecil, tinggi profil ulir dapat berkurang dan sambungan menjadi longgar. Kadang operator memberi sedikit pengurangan kecil dari diameter nominal agar mur dapat masuk lebih halus, tentu tetap dalam batas toleransi yang sesuai. Pada ujung awal ulir, *chamfer* kecil sering dibuat untuk membantu mur masuk dengan mudah. Pada ujung akhir ulir, alur pelepas dapat dibuat agar pahat memiliki ruang berhenti. Tanpa alur pelepas, operator harus menghentikan pemakanan pada titik yang sangat tepat. Pada mesin bubut manual, hal ini cukup menegangkan, terutama untuk ulir yang dekat dengan bahu poros. Alur pelepas memberi ruang aman agar pahat tidak menabrak bahu.

Langkah penguliran dimulai dengan menempatkan pahat pada diameter luar ulir. Eretan atas atau skala pemakanan disetel pada posisi nol sebagai acuan. Setelah itu, pahat ditarik keluar dari benda kerja dan digeser ke posisi awal, biasanya dengan jarak bebas yang cukup dari ujung benda kerja. Pengaturan *pitch* dilakukan melalui tabel pada mesin bubut, baik dengan tuas pengatur maupun susunan roda gigi pengganti, tergantung jenis mesin. Setelah pengaturan *pitch* selesai, tuas pengunci ulir atau

half nut diaktifkan sesuai prosedur mesin. Pada mesin bubut manual, *half nut* menghubungkan eretan dengan poros pembawa ulir atau *lead screw*. Hubungan ini membuat eretan bergerak dengan kecepatan aksial yang sesuai terhadap putaran spindel. Pada titik ini, sinkronisasi gerak menjadi inti proses. Jika *half nut* dilepas dan dipasang kembali pada posisi yang salah, pahat dapat masuk ke jalur ulir yang berbeda dan merusak profil.

Pemakanan pertama biasanya dibuat sangat ringan, misalnya sekitar 0,1 mm, untuk membuat goresan awal. Goresan ini belum dimaksudkan sebagai ulir penuh. Fungsinya lebih seperti pemeriksaan jalur. Setelah satu lintasan, mesin dihentikan, pahat ditarik keluar, dan benda kerja diperiksa. Operator dapat memakai mal ulir atau pengukur *pitch* untuk memastikan jarak ulir sudah sesuai. Jika goresan awal salah, kerusakan masih relatif kecil dan benda kerja mungkin masih bisa diselamatkan. Kedalaman potong dalam penguliran tidak sebaiknya langsung besar. Profil ulir memiliki sisi miring yang membuat beban pahat meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Jika pemakanan terlalu agresif, pahat dapat bergetar, ujung pahat patah, atau permukaan ulir menjadi kasar. Pada beberapa metode, eretan atas dimiringkan sekitar 29 sampai 30 derajat untuk ulir 60 derajat, sehingga pemakanan lebih banyak dibebankan pada salah satu sisi pahat. Cara ini dapat membantu geram keluar lebih terarah, meskipun tetap membutuhkan pengaturan yang cermat.

Kecepatan potong pada bubut ulir umumnya dipilih lebih rendah daripada bubut lurus biasa, terutama pada mesin manual dan pahat HSS. Alasannya cukup masuk akal. Operator perlu waktu untuk menghentikan mesin, menarik pahat, dan menjaga agar pahat tidak menabrak bahu atau ujung ulir. Selain itu, profil pahat ulir memiliki ujung yang relatif tajam dan rentan terhadap panas serta beban kejut. Nilai kecepatan potong perlu disesuaikan dengan material benda kerja, bahan pahat, dan kemampuan mesin. Pemeriksaan *pitch* dilakukan setelah goresan awal dan dapat diulang saat ulir hampir selesai. Mal ulir ditempelkan pada profil ulir untuk melihat apakah jarak antar puncak sesuai. Untuk pemeriksaan pasangan, mur standar dapat dicoba secara hati-hati pada ulir luar. Namun, mencoba mur terlalu cepat juga tidak selalu baik karena profil ulir yang belum selesai dapat rusak atau membuat pembacaan terasa menipu. Pada pekerjaan presisi,

pemeriksaan diameter *pitch* menggunakan mikrometer ulir atau metode tiga kawat dapat memberi hasil lebih baik.

Kualitas ulir tidak hanya dilihat dari bisa atau tidaknya mur masuk. Ulir yang baik memiliki profil yang utuh, puncak tidak pecah, dasar tidak kasar berlebihan, dan sisi ulir tidak bergelombang. Krawczyk et al. (2022) menunjukkan bahwa topografi permukaan ulir luar yang dibuat dengan proses *turning* dapat dipengaruhi oleh kecepatan potong, arah pembubutan, dan jenis profil ulir. Temuan ini memperkuat pengalaman bengkel bahwa ulir yang tampak “jadi” secara visual tetap perlu dibaca dari sisi kualitas permukaannya. Parameter pemotongan tetap berperan besar dalam bubut ulir. Kecepatan yang terlalu tinggi dapat mempercepat keausan pahat dan membuat operator sulit mengontrol akhir lintasan. Kedalaman potong yang terlalu besar dapat membuat profil kasar atau pahat patah. Pahat yang tidak tajam dapat menghasilkan ulir berbulu, terutama pada material lunak. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kekasaran permukaan pada pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pada ulir, pengaruh ini sering terlihat langsung pada sisi profil.

Material benda kerja juga memberi tantangan berbeda. Baja karbon rendah relatif mudah dikerjakan, tetapi masih membutuhkan pelumasan agar permukaan ulir bersih. Baja tahan karat cenderung lebih sulit karena panas dan kecenderungan pengerasan kerja. Aluminium mudah disayat, tetapi dapat menempel pada ujung pahat bila pahat kurang tajam atau pelumasan tidak sesuai. Besi tuang menghasilkan geram rapuh, namun debunya perlu diperhatikan karena dapat mengotori bidang geser mesin. Cairan pemotong dalam penguliran sering membantu menghasilkan profil yang lebih bersih. Pada baja, cairan pemotong dapat mengurangi gesekan dan panas. Pada aluminium, pelumasan membantu mencegah material menempel pada ujung pahat. Meski begitu, pemilihan cairan tidak boleh asal. Wang et al. (2023) membahas bahwa pemesinan berkelanjutan perlu mempertimbangkan hubungan peralatan, proses, strategi, penggunaan cairan pendingin, dan efisiensi energi. Untuk penguliran, ide ini dapat dibaca sederhana saja: gunakan pendinginan secukupnya, sesuai material dan tujuan proses.

Bubut ulir dalam memiliki tantangan tambahan. Pahat harus masuk ke dalam lubang, sehingga ruang pandang lebih terbatas.

Batang pahat atau *boring bar* harus cukup kaku agar tidak bergetar. Lubang awal harus dibuat sesuai diameter minor yang benar. Jika diameter lubang terlalu kecil, pahat ulir dalam bekerja terlalu berat. Jika terlalu besar, profil ulir akan dangkal dan pasangan ulir menjadi longgar. Proses ini memerlukan kesabaran lebih dibanding ulir luar. Pada ulir luar, risiko yang sering muncul adalah pahat menabrak bahu poros saat mendekati akhir ulir. Pada ulir dalam, risiko serupa terjadi saat pahat mendekati dasar lubang atau batas ulir. Karena itu, alur pelepas, batas panjang, dan cara menghentikan mesin perlu direncanakan sebelum proses dimulai. Operator tidak boleh baru berpikir ketika pahat sudah hampir menabrak. Pada penguliran manual, beberapa detik terakhir sering paling menentukan.

Kesalahan umum pada bubut ulir meliputi *pitch* salah, sudut profil salah, ulir miring, puncak ulir rusak, ulir terlalu dangkal, ulir terlalu dalam, dan permukaan kasar. *Pitch* salah biasanya berasal dari pengaturan tabel mesin atau roda gigi yang keliru. Sudut profil salah dapat berasal dari pahat yang tidak diperiksa dengan mal. Ulir terlalu dalam sering terjadi karena operator terlalu agresif menambah kedalaman potong. Permukaan kasar dapat disebabkan pahat tumpul, kecepatan tidak sesuai, atau pelumasan kurang tepat. Pada mesin bubut manual, disiplin terhadap tuas *half nut* sangat penting. Untuk beberapa jenis ulir, terutama ulir metrik pada mesin tertentu, operator perlu mengikuti aturan indikator ulir atau bahkan tidak melepas *half nut* selama siklus penguliran. Jika prosedur salah, pahat tidak masuk lagi pada jalur yang sama. Akibatnya fatal: profil ulir yang sudah terbentuk akan tersayat silang. Ini salah satu kesalahan yang sangat mudah dikenali, dan biasanya cukup membuat operator ingat lama.

Pada mesin bubut CNC, prinsip penguliran tetap sama, tetapi sinkronisasi gerak dikendalikan program. Spindel dan gerak sumbu harus terhubung secara akurat agar *lead* sesuai. Operator atau programmer menentukan jenis ulir, panjang ulir, *pitch*, kedalaman, jumlah lintasan, dan jarak aman. Mesin kemudian menjalankan siklus penguliran secara berulang. Walaupun lebih otomatis, kesalahan input tetap dapat menghasilkan ulir yang salah dengan sangat konsisten. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa metode pemesinan seperti *turning* memiliki prinsip kerja, kondisi, dan area penggunaan tertentu. Pembuatan ulir adalah contoh yang bagus untuk melihat hal itu. Mesin bubut tidak hanya membentuk

diameter silindris, tetapi juga mampu mengendalikan hubungan antara putaran dan gerak aksial secara presisi. Dari hubungan itulah profil heliks terbentuk.

Dalam latihan bengkel, penguliran sebaiknya dilakukan setelah peserta memahami bubut lurus, *facing*, dan bubut tirus. Alasannya jelas. Ulir membutuhkan diameter awal yang benar, permukaan ujung yang rapi, pahat yang tepat, serta pemahaman gerak makan. Tanpa dasar itu, penguliran mudah berubah menjadi coba coba. Peserta mungkin berhasil membuat alur spiral, tetapi belum tentu menghasilkan ulir yang sesuai standar. Latihan awal dapat dimulai dari ulir luar metrik sederhana, misalnya $M10 \times 1,5$ pada baja karbon rendah. Benda kerja dibubut sampai diameter luar yang sesuai, ujung diberi chamfer kecil, pahat ulir 60 derajat disetel memakai mal, lalu mesin diatur pada *pitch* 1,5 mm. Lintasan pertama dibuat ringan untuk memeriksa jalur. Setelah itu, kedalaman ditambah bertahap sampai mur penguji dapat masuk dengan halus tanpa longgar berlebihan.

Untuk memperkenalkan ulir *double* dan *triple*, kita perlu memahami bahwa yang berubah bukan hanya bentuk luar, tetapi hubungan antara *pitch* dan *lead*. Pada ulir *double*, dua jalur ulir harus dibuat dengan jarak awal yang berbeda, biasanya bergeser setengah putaran atau 180 derajat. Pada ulir *triple*, tiga jalur dibuat dengan pembagian 120 derajat. Pekerjaan ini lebih rumit dan membutuhkan penyetelan yang lebih cermat. Karena itu, ulir banyak awal biasanya diberikan setelah ulir satu awal benar benar dipahami. Dari sisi fungsi, ulir banyak awal memberi gerak aksial lebih cepat. Satu putaran menghasilkan perpindahan lebih jauh. Namun, keuntungan ini datang bersama konsekuensi. Sudut heliks menjadi lebih besar, pemeriksaan lebih sulit, dan pembuatan pada mesin manual menuntut pengaturan awal yang rapi. Pada komponen pengikat biasa, ulir satu awal sering lebih masuk akal karena lebih sederhana dan lebih aman terhadap pengenduran.

Bubut ulir memperlihatkan hubungan yang sangat dekat antara standar dan praktik. Operator tidak cukup tahu cara menggerakkan pahat. Ia harus membaca penandaan ulir, memahami *pitch* atau *thread per inch*, menyiapkan diameter, menyetel pahat, memilih kecepatan, mengatur kedalaman potong, dan memeriksa hasil. Setiap tahap saling terkait. Kesalahan kecil pada awal proses dapat menghasilkan ulir yang tampak rapi tetapi gagal dipasangkan. Setelah bubut ulir dipahami, pembahasan

operasi mesin bubut dapat bergerak menuju bubut alur dan *parting off*. Keduanya masih memakai prinsip pahat bermata tunggal dan benda kerja berputar, tetapi tujuan geometrinya berbeda. Pada ulir, pahat membentuk profil heliks yang mengikuti standar. Pada alur dan *parting off*, pahat bekerja masuk secara radial untuk membuat cekungan atau memisahkan benda kerja. Perbedaan tujuan itulah yang membuat setiap operasi membutuhkan cara baca yang berbeda.

F. Bubut Alur dan Parting Off

Bubut alur atau *grooving* merupakan operasi pembubutan untuk membuat cekungan sempit pada permukaan benda kerja. Cekungan ini dapat berada pada diameter luar, diameter dalam, atau permukaan muka benda kerja. Bentuknya bisa sederhana, hanya berupa alur rata, tetapi dalam pekerjaan tertentu alur dapat berbentuk radius, V, atau profil khusus. Walaupun terlihat seperti pekerjaan kecil, alur sering menentukan apakah komponen dapat dipasang, dikunci, digerinda, atau dilepas dengan benar. Pada poros, alur sering dipakai sebagai tempat cincin pengunci, ruang bebas ujung ulir, batas gerak komponen, atau pelepas tegangan di dekat bahu poros. Pada komponen yang akan digerinda, alur memberi ruang agar batu gerinda tidak menabrak bahu. Pada baut atau poros berulir, alur pelepas membantu pahat ulir berhenti tanpa merusak bagian bahu. Jadi, alur bukan sekadar cekungan. Ia adalah ruang fungsional yang sengaja dibuat.

Operasi *parting off* memiliki hubungan dekat dengan bubut alur. Pahat yang digunakan sama sama berbentuk sempit dan bekerja masuk ke arah radial benda kerja. Perbedaannya terletak pada tujuan akhir. Pada bubut alur, pahat berhenti pada kedalaman tertentu untuk membentuk cekungan. Pada *parting off*, pahat terus bergerak sampai benda kerja terpotong atau terpisah dari bahan induknya. Karena itu, *parting off* sering disebut juga proses pemotongan benda kerja pada mesin bubut. Secara prinsip, benda kerja tetap berputar sebagai gerak utama. Pahat alur bergerak masuk ke arah pusat benda kerja sebagai gerak makan radial. Gerakan ini berbeda dari bubut memanjang yang menyayat sepanjang sumbu benda kerja, dan berbeda pula dari bubut ulir yang menuntut sinkronisasi pahat dengan *lead screw*. Pada alur dan *parting off*, tantangan utamanya muncul dari bentuk pahat yang sempit, kontak pemotongan yang dalam, serta pembuangan geram yang sering tidak mudah.

Bentuk alur rata merupakan bentuk yang paling sering dijumpai. Pahat alur masuk tegak lurus terhadap sumbu benda kerja dan menghasilkan dasar alur yang relatif datar. Bentuk ini banyak digunakan untuk cincin pengunci, batas dudukan komponen, atau ruang bebas sederhana. Jika alur dipakai untuk cincin standar, lebar dan kedalamannya harus mengikuti ukuran cincin tersebut. Kalau terlalu sempit, cincin tidak dapat masuk. Kalau terlalu longgar, cincin bisa bergerak dan kehilangan fungsi penguncinya. Alur radius memiliki dasar atau sudut yang membulat. Bentuk ini dipakai ketika sudut tajam perlu dihindari, misalnya pada poros yang menerima beban berulang. Sudut tajam dapat menjadi titik konsentrasi tegangan. Pada kondisi tertentu, retak dapat mulai muncul dari daerah tersebut. Alur radius membantu mengurangi efek itu karena perubahan bentuk berlangsung lebih halus. Namun, pembuatannya menuntut pahat dengan profil yang sesuai.

Alur V memiliki sisi miring dan sering dipakai untuk kebutuhan khusus, seperti penanda posisi, profil dudukan tertentu, atau bentuk dekoratif yang tetap memiliki fungsi teknis. Alur V tidak selalu menjadi pilihan pertama pada komponen mesin umum, tetapi tetap penting dikenali karena pahat profil dapat membentuknya dengan cepat. Tantangannya terletak pada ketepatan sudut pahat dan posisi pahat terhadap benda kerja. Pada alur muka, pahat bekerja pada permukaan penampang benda kerja. Gerak makan tetap dapat bersifat radial atau kombinasi, tergantung bentuk alur yang diinginkan. Alur muka banyak ditemukan pada dudukan seal, permukaan sambungan, atau komponen yang membutuhkan ruang melingkar pada bidang muka. Walaupun masih termasuk pekerjaan bubut, cara melihatnya sedikit berbeda karena bidang yang dikerjakan bukan diameter luar, melainkan permukaan ujung.

Pahat alur memiliki bentuk yang lebih ramping dibanding pahat bubut rata. Lebar pahat menentukan lebar alur yang terbentuk. Jika alur harus lebih lebar daripada lebar pahat, operator dapat membuat beberapa lintasan bersebelahan, lalu merapikan sisi dan dasar alur. Namun, cara ini perlu dilakukan hati-hati agar ukuran lebar tidak berlebihan. Pada alur presisi, pemakanan samping yang terlalu agresif dapat membuat pahat terjepit atau meninggalkan sisi alur yang tidak rata. Pahat parting off juga berbentuk tipis agar material yang terbuang tidak terlalu banyak.

Semakin lebar pahat potong, semakin besar gaya pemotongan dan semakin banyak material menjadi geram. Namun, pahat yang terlalu tipis juga mudah bergetar atau melengkung. Di sini operator perlu memilih ukuran pahat yang cukup kaku, tetapi tidak terlalu boros material. Pilihan ini kadang terasa seperti kompromi kecil, tetapi efeknya besar pada keamanan proses.

Satu hal yang membuat parting off terasa lebih menegangkan dibanding alur biasa adalah ruang geram yang makin sempit. Ketika pahat masuk makin dalam, geram harus keluar melalui celah sempit di kiri dan kanan pahat. Jika geram tidak keluar lancar, pahat dapat terjepit. Suara mesin berubah, permukaan potong menjadi kasar, dan pada kondisi buruk pahat bisa patah. Inilah alasan mengapa geometri pahat, cairan pendingin, dan gerak makan perlu dikendalikan lebih hati-hati. Posisi pahat harus setinggi sumbu benda kerja. Bila pahat terlalu tinggi, pahat dapat menggesek dan sulit masuk ke material. Bila terlalu rendah, pahat cenderung menarik benda kerja dan dapat meninggalkan tonjolan di pusat saat pemotongan hampir selesai. Pada diameter kecil, selisih tinggi yang tampak kecil saja bisa terasa besar. Pengaturan tinggi pahat sebaiknya tidak hanya mengandalkan mata, tetapi diperiksa terhadap senter atau acuan yang sesuai. Tabel berikut memperlihatkan perbandingan antara bubut alur dan parting off.

Tabel 6. Perbandingan antara Bubut Alur dan Parting Off

Aspek proses	Bubut alur atau grooving	Parting off	Catatan teknis
Tujuan utama	Membuat cekungan pada benda kerja	Memisahkan benda kerja dari bahan induk	Keduanya memakai pahat sempit yang masuk radial
Hasil akhir	Alur rata, alur radius, alur V, atau alur pelepas	Benda kerja terpotong	Pada parting off, pahat bergerak sampai mendekati pusat
Ukuran kritis	Lebar alur, kedalaman alur, diameter dasar, posisi alur	Lebar potong, posisi potong, permukaan potong akhir	Posisi pahat harus dikontrol dari bidang acuan
Risiko utama	Sisi alur kasar, ukuran melebar, pahat menggesek	Pahat terjepit, benda kerja lepas, getaran, patah	Kekakuan pahat dan pencekaman sangat menentukan

		pahat	
Pemeriksaan	Jangka sorong, mikrometer, mal radius, atau alat ukur alur	Panjang benda kerja, sisa tonjolan, kerataan muka potong	Pemeriksaan dilakukan setelah mesin berhenti total

Dari tabel tersebut terlihat bahwa grooving lebih menekankan bentuk dan ukuran cekungan, sedangkan parting off lebih menekankan pemisahan benda kerja secara aman. Keduanya tidak boleh diperlakukan seperti bubut rata biasa. Pahat lebih sempit, bidang gesek lebih sensitif, dan celah pembuangan geram lebih terbatas. Karena itu, parameter yang aman untuk bubut lurus belum tentu aman untuk alur dan pemotongan. Kecepatan potong pada alur dan parting off sebaiknya lebih rendah dibanding bubut rata. Dalam praktik dasar, kecepatan potong dapat dikurangi sekitar setengah dari kecepatan bubut lurus. Pengurangan ini membantu menurunkan panas dan memberi proses yang lebih terkendali. Pahat alur bekerja dalam celah sempit, sehingga panas lebih sulit keluar dibanding penyayatan terbuka pada bubut memanjang.

Gerak makan juga perlu dikurangi. Sebagai pegangan awal, gerak makan dapat dibuat jauh lebih kecil daripada bubut rata, bahkan sekitar seperlima dari nilai bubut rata pada latihan dasar. Nilai ini bukan angka mutlak untuk semua mesin, tetapi memberi gambaran bahwa parting off tidak cocok dipaksa dengan pemakanan agresif. Mubarok et al. (2023) menunjukkan pada pembubutan baja ST 42 bahwa parameter pemesinan seperti putaran spindel dan kedalaman potong berpengaruh terhadap kekasaran permukaan serta keausan pahat. Hubungan ini terasa makin penting pada alur, karena pahat bekerja lebih rentan terhadap gesekan sisi. Cairan pendingin atau coolant sangat dianjurkan pada proses alur dan parting off. Fungsinya bukan hanya mendinginkan pahat, tetapi juga membantu geram keluar dari celah potong. Pada baja, cairan pendingin dapat mengurangi panas dan memperpanjang umur pahat. Pada aluminium, pelumasan membantu mengurangi material yang menempel pada ujung pahat. Namun, aliran cairan harus benar benar mencapai area potong. Jika hanya membasahi bagian luar, manfaatnya tidak banyak.

Panjang pahat yang menonjol dari pemegang harus dibuat sependek mungkin. Ini aturan sederhana, tetapi sering dilanggar

karena operator ingin pahat menjangkau posisi tertentu. Semakin panjang pahat menonjol, semakin mudah pahat bergetar. Pada bubut alur, getaran dapat membuat dinding alur bergelombang. Pada parting off, getaran bisa berubah menjadi patah pahat. Lebih aman memakai pemegang pahat yang kaku dan posisi pahat yang rapat. Batang pahat sebaiknya dipilih sebesar mungkin sesuai ruang kerja. Pahat yang lebih kaku membantu menahan gaya potong radial. Namun, ukuran pahat juga harus sesuai dengan lebar alur yang diminta. Tidak masuk akal memakai pahat terlalu lebar untuk alur kecil, karena alur akan langsung melebar. Di bengkel, pemilihan pahat sering dimulai dari gambar kerja: berapa lebar alur, berapa kedalaman, dan seberapa jauh pahat harus masuk.

Pada alur luar, pengukuran posisi alur biasanya dimulai dari bidang muka benda kerja atau bahu poros. Jika alur dipakai untuk cincin pengunci, posisinya harus tepat agar komponen yang dikunci tidak bergeser. Jika alur dipakai sebagai pelepas ulir, posisinya harus memberi ruang cukup bagi pahat ulir berhenti. Kesalahan posisi alur dapat membuat fungsi komponen terganggu walaupun bentuk alurnya sendiri tampak rapi. Pada alur dalam, tantangan bertambah karena pahat bekerja di dalam lubang. Ruang pandang terbatas, pembuangan geram lebih sulit, dan batang pahat lebih mudah bergetar. Diameter lubang harus cukup untuk memberi ruang bagi pahat. Bila lubang terlalu kecil, pahat tidak dapat masuk dengan sudut bebas yang baik. Alur dalam sering membutuhkan pahat khusus dengan bentuk tangkai yang ramping tetapi tetap kaku.

Pada parting off, benda kerja sebaiknya tidak menjulur terlalu panjang dari chuck. Jika bagian yang akan dipotong terlalu jauh dari rahang pencekam, getaran akan meningkat. Tekanan pahat dapat membuat benda kerja melentur. Hasilnya bisa berupa bidang potong miring, bunyi kasar, atau pahat terjepit. Untuk benda kerja panjang, urutan pemotongan perlu direncanakan agar sisa panjang yang keluar dari chuck tetap aman. Benda kerja yang akan terpotong juga perlu dipikirkan. Saat potongan hampir lepas, bagian tersebut tidak lagi tertahan kuat. Jika panjang dan massanya cukup besar, potongan dapat jatuh atau tersangkut. Pada pekerjaan tertentu, bagian yang dipotong perlu ditahan dengan tangan memakai alat bantu yang aman, bukan menyentuh benda kerja berputar secara langsung. Untuk komponen kecil, cukup beri ruang

agar potongan jatuh ke tempat yang aman setelah mesin berhenti atau saat proses selesai.

Sebelum parting off, operator sering membuat alur awal sebagai jalur masuk pahat. Pahat dimasukkan perlahan sampai terbentuk celah yang stabil. Setelah itu, pemakanan dilanjutkan menuju pusat. Bila material menghasilkan geram panjang, pahat dapat ditarik sesaat untuk memutus geram dan memberi kesempatan cairan pendingin masuk ke celah potong. Gerakan ini harus dilakukan hati-hati agar pahat tidak kehilangan jalur atau menghantam sisi alur. Pada beberapa material, strategi pemotongan perlu disesuaikan. Baja karbon rendah biasanya masih relatif mudah dipotong, tetapi geram dapat panjang dan tajam. Baja tahan karat cenderung menimbulkan panas dan dapat mengeras pada permukaan jika pemakanan terlalu lemah. Aluminium mudah disayat, tetapi geram dapat lengket. Besi tuang menghasilkan geram pendek, tetapi debunya dapat mengotori mesin. Trinh (2024) menekankan bahwa kekasaran permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pada alur, ketiga faktor ini muncul sekaligus.

Permukaan dasar alur perlu diperhatikan. Jika alur akan menjadi tempat cincin, dasar alur harus cukup rata dan lebarnya sesuai. Jika alur berfungsi sebagai pelepas, sudut dan radiusnya perlu disesuaikan agar tidak menjadi titik lemah. Jika alur hanya menjadi batas visual, tuntutannya mungkin lebih ringan. Fungsi alur menentukan seberapa ketat ukuran dan kualitas permukaan yang diperlukan. Demirpolat et al. (2023) membahas bahwa pada pemesinan baja paduan yang dikeraskan, kondisi pemotongan dan lingkungan pendinginan dapat memengaruhi kekasaran permukaan, gaya potong, keausan pahat, serta konsumsi energi. Walaupun penelitian tersebut tidak khusus membahas alur saja, prinsipnya relevan: ketika pahat bekerja dalam kondisi berat, keputusan parameter dan pendinginan akan memengaruhi kualitas serta efisiensi. Pada parting off, beban semacam ini sering terasa lebih jelas karena pahat masuk semakin dalam.

Dalam proses alur aksial, penyayatan pertama sebaiknya dimulai dari diameter terbesar agar pembuangan geram tidak terhenti. Geram yang terjebak dapat menggores sisi alur dan menambah panas. Pada alur yang lebar, operator dapat membuat beberapa jalur potong, lalu menyelesaikan sisi alur dengan lintasan ringan. Cara ini lebih aman dibanding langsung menekan pahat

lebar dengan kedalaman besar. Bentuk geram dapat memberi tanda kondisi proses. Geram yang keluar lancar menunjukkan pahat dan parameter masih cukup baik. Geram yang menggulung padat di celah alur perlu diwaspadai. Geram yang berubah warna tajam dapat menunjukkan panas berlebih. Jika suara mulai berdenyut atau terdengar seperti pahat memukul benda kerja, operator sebaiknya menghentikan pemakanan dan memeriksa pahat. Jangan menunggu sampai patah. Biasanya sudah terlambat.

Kesalahan umum pada bubut alur meliputi lebar alur terlalu besar, dasar alur tidak rata, sisi alur miring, permukaan kasar, dan pahat meninggalkan bekas getaran. Lebar alur terlalu besar sering terjadi karena pahat bergeser atau pemakanan samping tidak terkendali. Sisi alur miring dapat muncul karena pahat tidak 90 derajat terhadap sumbu benda kerja. Dasar alur kasar biasanya berkaitan dengan pahat tumpul, gerak makan tidak sesuai, atau geram yang terjepit. Kesalahan umum pada parting off sedikit lebih berbahaya. Pahat bisa terjepit, patah, atau mendorong benda kerja keluar dari pencekaman. Bidang potong dapat miring jika pahat tidak tegak. Sisa tonjolan di pusat dapat muncul bila tinggi pahat tidak tepat. Potongan benda kerja juga dapat jatuh secara tidak terkendali. Karena itu, parting off harus diperlakukan sebagai operasi yang memerlukan persiapan, bukan sekadar tahap terakhir yang dikerjakan cepat cepat.

Pemeriksaan alur dilakukan setelah mesin berhenti total. Lebar alur dapat diperiksa dengan jangka sorong, mikrometer khusus, atau mal sesuai kebutuhan. Kedalaman alur dapat dihitung dari diameter luar dan diameter dasar alur. Posisi alur diperiksa dari bidang acuan. Untuk alur yang menjadi dudukan cincin pengunci, pemeriksaan fungsi dapat dilakukan dengan mencoba cincin standar, tentu setelah tepi alur dibersihkan dari geram dan burr. Pada parting off, pemeriksaan dilakukan pada panjang benda kerja dan kualitas permukaan potong. Sering kali bidang hasil potong masih perlu diratakan ulang dengan operasi facing. Ini wajar. Parting off memisahkan benda kerja, sedangkan facing memberi bidang muka akhir yang lebih rata dan terukur. Jika panjang akhir sangat penting, operator perlu memberi sedikit tambahan panjang sebelum pemotongan, lalu meratakan sampai ukuran final.

Tepi alur dan hasil potong biasanya memiliki burr. Burr adalah sisa tajam tipis yang muncul di tepi hasil pemesinan. Burr

harus dibersihkan karena dapat mengganggu pemasangan komponen dan membahayakan tangan. Pada alur cincin, burr dapat membuat cincin tidak duduk sempurna. Pada hasil parting off, burr dapat mengganggu pengukuran panjang. Pembersihan dapat dilakukan dengan kikir halus, alat deburring, atau proses ringan yang sesuai. Keamanan kerja pada alur dan parting off perlu mendapat perhatian lebih. Pahat sempit yang masuk dalam dapat patah secara tiba-tiba jika terjepit. Geram yang keluar sering tajam. Benda kerja yang terpotong dapat jatuh. Operator tidak boleh menarik geram dengan tangan, tidak boleh mengukur saat benda kerja masih berputar, dan tidak boleh berdiri terlalu dekat dengan jalur potongan yang mungkin lepas. Kacamata pelindung bukan aksesoris. Itu kebutuhan.

Pada mesin bubut manual, rasa tangan operator berperan besar. Pemakanan harus stabil, tidak terlalu ragu, tetapi juga tidak memaksa. Pemakanan yang terlalu lemah pada material tertentu dapat membuat pahat menggosok, bukan menyayat. Pemakanan yang terlalu besar dapat menjepit pahat. Agak sulit memang, karena operator harus membaca suara, geram, dan getaran sekaligus. Di sinilah latihan berulang membuat perbedaan. Pada mesin bubut CNC, operasi alur dan parting off diatur melalui program. Mesin dapat menjalankan siklus alur dengan kedalaman dan lebar tertentu, bahkan dapat memakai strategi masuk bertahap untuk mengurangi beban. Namun, program tidak menggantikan pemahaman dasar. Programmer tetap harus menentukan lebar pahat, kompensasi pahat, kecepatan potong, gerak makan, posisi aman, dan jarak bebas dari chuck. Jika konsepnya salah, mesin hanya membuat kesalahan dengan sangat konsisten.

Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan sebagai integrasi antara peralatan, proses, dan strategi. Pada alur dan parting off, gagasan ini dapat diterjemahkan secara praktis: pilih pahat yang tepat, kurangi pemborosan material, kendalikan pendinginan, dan hindari patah pahat yang membuat pekerjaan harus diulang. Pawanr dan Gupta (2024) juga meninjau bahwa efisiensi energi dalam pemesinan berkaitan dengan pemodelan konsumsi energi, optimasi parameter, dan pemanfaatan pendekatan cerdas. Untuk operasi potong, parameter yang terlalu agresif bukan hanya berisiko teknis, tetapi juga dapat meningkatkan pemborosan pahat dan energi. Urutan kerja yang baik dapat mengurangi risiko. Pada benda kerja yang memiliki alur, ulir, dan potong akhir,

operator biasanya membuat bidang acuan lebih dulu, membubut diameter, membuat alur atau ulir, lalu melakukan parting off setelah semua fitur utama selesai. Namun, urutan ini bisa berubah bila bentuk benda kerja menuntut pengecaman lain. Prinsipnya, jangan memotong benda kerja terlalu cepat sebelum fitur yang membutuhkan pengecaman kuat selesai dikerjakan.

Bubut alur dan parting off memperluas pemahaman tentang variasi operasi mesin bubut. Setelah bubut lurus membentuk diameter, facing membentuk muka, tirus membentuk permukaan konis, dan ulir membentuk profil heliks, alur menghadirkan cekungan fungsional pada benda kerja. Parting off lalu menjadi operasi yang memisahkan komponen dari bahan induknya. Keduanya tampak sederhana, tetapi membutuhkan pahat yang tepat, posisi yang presisi, parameter lebih hati-hati, dan perhatian serius terhadap pembuangan geram. Dari sisi pembelajaran, subbab ini penting karena memperlihatkan bahwa operasi kecil di mesin bubut sering membawa risiko besar. Pahat alur yang tipis, celah potong yang sempit, dan kedalaman radial yang bertambah membuat proses ini tidak bisa dianggap sama dengan bubut biasa. Operator yang baik tidak hanya mampu membuat alur, tetapi juga tahu kapan harus mengurangi putaran, kapan menambah cairan pendingin, kapan menarik pahat untuk membuang geram, dan kapan menghentikan proses sebelum masalah menjadi kerusakan.

G. Kartel atau Knurling

Kartel atau knurling merupakan operasi pada mesin bubut yang bertujuan membentuk tekstur kasar dan teratur pada permukaan benda kerja. Berbeda dari bubut lurus, bubut tirus, bubut ulir, alur, atau parting off, proses kartel tidak selalu bekerja dengan cara menyayat material sampai terbuang menjadi geram. Pada banyak pekerjaan, kartel bekerja dengan menekan rol berpola ke permukaan benda kerja sehingga material terdorong dan membentuk tonjolan tekstur. Karena itu, kartel lebih dekat dengan proses pembentukan permukaan dibanding pemotongan biasa. Fungsi kartel sangat praktis. Permukaan yang licin sering sulit digenggam, apalagi jika tangan operator terkena oli, cairan pendingin, atau keringat. Pegangan kunci, kepala baut pengatur, knop alat ukur, gagang perkakas, roda pemutar kecil, dan pegangan instrumen sering diberi kartel agar lebih mudah diputar atau ditahan. Tanpa tekstur, jari mudah tergelincir. Dengan kartel yang

baik, gaya genggam dapat berpindah ke benda kerja secara lebih mantap.

Walaupun sering dianggap sebagai tahap akhir, kartel tidak boleh diperlakukan sebagai hiasan tambahan semata. Pola kartel dapat memengaruhi rasa genggam, kemampuan anti selip, kenyamanan tangan, dan tampilan komponen. Pada komponen yang sering disentuh manusia, seperti knop mikrometer atau pegangan alat, tekstur menjadi bagian dari fungsi ergonomis. Song et al. (2023) menjelaskan bahwa tekstur permukaan dapat dirancang untuk meningkatkan sifat fisik, kimia, dan biologis suatu permukaan, serta hubungan antara geometri tekstur dan performa menjadi perhatian penting dalam pengembangan teknologi permukaan. Dalam konteks mesin bubut, kartel biasanya dibuat pada benda kerja berbentuk silindris. Benda kerja berputar pada spindle, sedangkan pahat kartel ditekan ke permukaan luar. Rol kartel memiliki pola tertentu pada kelilingnya. Ketika rol menyentuh benda kerja dengan tekanan yang cukup, pola pada rol berpindah ke permukaan benda kerja. Pola tersebut dapat berupa garis lurus, garis miring, silang menyilang, atau bentuk berlian.

Bentuk kartel yang paling mudah dikenali adalah kartel lurus. Polanya berupa garis sejajar sepanjang arah sumbu benda kerja. Kartel jenis ini sering disebut kartel tunggal karena biasanya dihasilkan oleh satu arah pola. Bentuk ini cocok untuk permukaan yang membutuhkan pegangan ringan atau penanda visual. Pada knop kecil, kartel lurus dapat memberi sensasi genggam tanpa membuat permukaan terlalu agresif terhadap kulit. Kartel berlian atau kartel silang memiliki pola saling berpotongan sehingga membentuk bidang kecil menyerupai belah ketupat. Pola ini sering disebut kartel ganda. Cengkeramannya biasanya lebih kuat dibanding kartel lurus karena jari memperoleh tahanan dari dua arah. Pada gagang alat yang sering diputar dengan tangan, pola berlian terasa lebih aman. Namun, bila terlalu tajam, kartel jenis ini dapat membuat genggamannya kurang nyaman.

Ada juga kartel miring kanan dan miring kiri. Pola ini tidak membentuk garis sejajar sumbu, melainkan garis heliks ringan pada permukaan benda kerja. Dalam praktik, kartel miring dapat dipakai untuk kebutuhan tampilan, arah genggam tertentu, atau sebagai bagian dari pola silang. Pemilihan pola tidak berdiri sendiri. Operator perlu melihat fungsi komponen, diameter benda kerja, material, panjang area kartel, dan tingkat kekasaran yang

diminta. Pahat kartel berbeda dari pahat bubut biasa. Pahat bubut rata memiliki mata potong untuk menyayat material, sedangkan pahat kartel memakai rol keras berpola. Rol tersebut berputar karena kontak dengan benda kerja. Kalau rol macet, proses tidak lagi membentuk tekstur dengan baik. Permukaan bisa tergores, pola menjadi rusak, dan tekanan pada mesin meningkat. Karena itu, sebelum bekerja, operator perlu memastikan rol dapat berputar bebas.

Ketinggian pahat kartel harus berada pada sumbu benda kerja. Ini penting. Jika pahat terlalu tinggi atau terlalu rendah, tekanan rol tidak merata. Pola dapat lebih tajam pada salah satu sisi, benda kerja terdorong keluar dari sumbu, atau muncul getaran. Pada diameter kecil, kesalahan tinggi sedikit saja dapat membuat pola tampak miring atau tidak bertemu dengan rapi. Pengaturan ini sebaiknya dilakukan dengan tenang, bukan sambil terburu-buru. Permukaan rol kartel juga harus sejajar dengan permukaan benda kerja. Bila rol tidak paralel, salah satu ujung rol akan menekan lebih kuat daripada ujung lainnya. Hasilnya mudah ditebak: pola kartel menjadi tidak seragam. Bagian awal mungkin tampak tajam, bagian akhir tampak dangkal, atau sebaliknya. Pada komponen yang menuntut tampilan rapi, cacat seperti ini langsung terlihat.

Putaran spindel untuk proses kartel umumnya dipilih rendah. Pada latihan dasar, putaran sekitar 60 sampai 80 rpm dapat dipakai sebagai acuan awal, terutama untuk mesin bubut manual. Kecepatan rendah memberi waktu bagi rol untuk membentuk pola tanpa slip berlebihan. Bila putaran terlalu tinggi, rol dapat memantul, panas meningkat, pelumasan tidak bekerja baik, dan pola menjadi buram. Kartel bukan proses yang perlu dipacu seperti mengejar waktu kasar. Ia butuh tekanan stabil. Gerak makan pada kartel biasanya berada pada tingkat sedang. Nilai sekitar 0,2 sampai 0,4 mm per putaran dapat dipakai sebagai pegangan awal untuk pembelajaran, lalu disesuaikan dengan jenis pola dan material. Gerak makan terlalu kecil dapat membuat rol mengulang jalur terlalu rapat dan merusak tekstur. Gerak makan terlalu besar dapat membuat pola tidak terbentuk penuh. Di sinilah kartel terasa agak berbeda dari bubut biasa, karena operator membaca bukan hanya ukuran, tetapi juga kualitas jejak pola.

Pelumasan sangat membantu pada proses kartel. Karena kartel melibatkan tekanan besar antara rol dan benda kerja, gesekan dapat meningkat cepat. Pelumas membantu rol bergerak lebih

halus, menurunkan panas, dan mengurangi risiko permukaan robek. Pada baja karbon, pelumas membuat pembentukan pola lebih bersih. Pada aluminium, pelumas membantu mengurangi material yang menempel pada rol. Wang et al. (2023) menempatkan pemilihan strategi proses, cairan pendingin, dan optimasi kerja sebagai bagian dari pendekatan pemesinan yang lebih berkelanjutan. Sebelum kartel dimulai, lokasi dan panjang area kartel harus ditentukan. Area ini biasanya diukur dari bidang acuan, misalnya ujung benda kerja atau bahu poros. Bila kartel dibuat pada knop, panjang kartel harus sesuai dengan daerah yang akan digenggam. Bila terlalu pendek, fungsi genggam kurang terasa. Bila terlalu panjang, tampilan bisa berlebihan dan waktu proses bertambah. Pada komponen rakitan, kartel juga tidak boleh mengganggu bagian yang harus masuk ke lubang pasangan.

Ujung benda kerja sebaiknya diberi chamfer sebelum proses kartel. Chamfer membuat rol masuk ke permukaan benda kerja secara lebih lembut. Tanpa chamfer, tekanan awal dapat terasa mendadak dan pola pertama mudah rusak. Bagian tepi juga dapat membentuk burr yang tajam. Dengan chamfer, awal pola menjadi lebih rapi dan rol tidak menghantam tepi benda kerja secara kasar. Kartel dapat meningkatkan diameter luar benda kerja karena material terdorong naik membentuk tonjolan. Ini sering terlupakan. Jika benda kerja harus memiliki diameter akhir tertentu setelah dikartel, diameter awal perlu disiapkan sedikit lebih kecil. Besarnya pengurangan bergantung pada jenis pola, kedalaman kartel, dan sifat material. Pada pekerjaan presisi, operator sebaiknya membuat percobaan kecil atau menggunakan data pengalaman bengkel agar diameter akhir tidak terlalu besar.

Material benda kerja sangat memengaruhi hasil kartel. Aluminium relatif mudah dibentuk, tetapi pola dapat cepat rusak jika tekanan terlalu besar atau pelumasan kurang baik. Baja karbon membutuhkan tekanan lebih tinggi, tetapi hasilnya dapat tajam dan kuat. Kuningan biasanya memberi pola bersih, walaupun tetap perlu pengaturan yang tepat. Baja tahan karat lebih sulit karena cenderung keras dan dapat menimbulkan tekanan besar pada rol. Tidak semua material nyaman dikartel dengan parameter yang sama. Dalam proses kartel bentuk tekan, gaya radial yang diterima benda kerja cukup besar. Pada benda kerja panjang dan kecil, gaya ini dapat menyebabkan lendutan. Jika benda kerja hanya dijepit pada chuck dan menjulur terlalu panjang, pola mudah tidak rata.

Penggunaan senter kepala lepas atau penyangga dapat membantu. Prinsipnya mirip dengan bubut lurus pada poros panjang: benda kerja harus cukup kaku agar proses tetap stabil.

Pahat kartel tipe satu sisi menekan benda kerja dari satu arah. Desain ini sederhana, tetapi gaya radialnya langsung diterima oleh benda kerja dan spindel. Pada benda kerja ramping, tekanan ini dapat mendorong benda kerja menjauh dari rol. Pahat kartel tipe penjepit memberi tekanan dari dua sisi sehingga gaya lebih seimbang. Untuk pekerjaan yang lebih rapi atau benda kerja lebih kecil, tipe penjepit sering terasa lebih aman. Tekanan awal pada kartel perlu diberikan dengan cukup tegas. Jika tekanan terlalu ringan, rol dapat meluncur tanpa membentuk pola penuh. Pola menjadi ganda, kabur, atau tampak seperti bayangan. Jika tekanan terlalu besar, permukaan dapat rusak, diameter naik berlebihan, dan beban pada mesin meningkat. Agak paradoks memang. Terlalu lembut salah, terlalu keras juga salah. Operator perlu menemukan tekanan yang membuat pola langsung “menggigit” permukaan tanpa merusaknya.

Pola ganda atau double tracking merupakan cacat yang sering terjadi pada kartel. Cacat ini muncul ketika rol tidak mengikuti jalur pola yang sama, sehingga terbentuk dua set jejak yang saling mengganggu. Penyebabnya bisa berasal dari diameter benda kerja yang kurang sesuai dengan pitch rol, tekanan awal yang terlalu ringan, rol aus, atau pahat tidak sejajar. Bila cacat ini sudah muncul cukup dalam, biasanya sulit diperbaiki tanpa membubut ulang permukaan. Permukaan awal sebelum kartel sebaiknya tidak terlalu kasar. Memang benar kartel akan membuat permukaan menjadi bertekstur, tetapi permukaan awal yang bergelombang dapat membuat pola tidak seragam. Diameter perlu dibubut lurus terlebih dahulu, lalu area kartel diberi batas yang jelas. Jika ada bahu atau alur di dekat area kartel, posisinya harus direncanakan agar rol tidak menabrak bagian tersebut.

Pada beberapa pekerjaan, alur kecil dibuat di ujung area kartel sebagai batas visual atau ruang berhenti. Ini membuat ujung pola tampak lebih rapi. Tanpa batas, kartel bisa berhenti dengan tepi yang kurang bersih. Batas seperti ini tidak selalu wajib, tetapi berguna untuk komponen yang menuntut tampilan halus, misalnya knop instrumen, pegangan alat ukur, atau komponen demonstrasi di bengkel pendidikan. Costa et al. (2022) menjelaskan bahwa tekstur permukaan berskala mikro memiliki potensi besar untuk

meningkatkan performa gesekan pada sistem tribologi. Walaupun kajian tersebut membahas tekstur permukaan secara luas, gagasannya relevan untuk memahami kartel: bentuk kecil di permukaan dapat mengubah cara permukaan berinteraksi dengan tangan, alat, atau komponen pasangan. Pada kartel, perubahan itu terasa sebagai peningkatan cengkeraman.

Kualitas kartel dapat diperiksa secara visual dan fungsional. Pemeriksaan visual melihat keseragaman pola, ketajaman puncak, batas awal dan akhir, serta ada tidaknya pola ganda. Pemeriksaan fungsional lebih sederhana: apakah permukaan nyaman dan tidak licin saat digenggam. Untuk pekerjaan tertentu, diameter akhir setelah kartel juga perlu diukur. Pengukuran ini sebaiknya dilakukan hati-hati karena puncak kartel dapat membuat pembacaan jangka sorong kurang stabil. Alat ukur yang menyentuh puncak kartel perlu digunakan dengan tekanan wajar. Jika terlalu ditekan, puncak tekstur dapat sedikit tertekan atau pembacaan menjadi tidak konsisten. Mikrometer dengan permukaan ukur datar dapat memberi gambaran diameter luar puncak kartel, tetapi tetap perlu kehati-hatian. Pada fungsi tertentu, diameter puncak lebih penting daripada diameter dasar. Pada fungsi lain, yang penting justru rasa genggam dan keseragaman visual.

Trinh (2024) menegaskan bahwa kekasaran permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pada kartel, istilah kekasaran perlu dibaca dengan sedikit berbeda. Permukaan memang sengaja dibuat kasar, tetapi kasarnya harus teratur. Kartel yang baik bukan permukaan rusak. Kartel yang baik adalah tekstur terkendali dengan pola yang konsisten. Keamanan kerja tetap penting. Kartel menghasilkan tekanan besar dan sering membuat geram kecil, serpihan, atau burr di tepi pola. Operator tidak boleh menyentuh permukaan yang sedang berputar untuk “merasakan” hasil kartel. Pemeriksaan dengan tangan hanya dilakukan setelah mesin berhenti. Rol kartel juga harus dijaga dari serpihan yang tersangkut. Serpihan kecil pada rol dapat meninggalkan cacat berulang pada permukaan benda kerja.

Pada mesin bubut manual, proses kartel melatih kepekaan operator terhadap tekanan dan suara. Ketika rol mulai masuk dengan benar, suara biasanya stabil dan pola muncul merata. Jika terdengar getaran, bunyi tidak rata, atau rol tampak melompat, proses perlu dihentikan dan diperiksa. Sering kali penyebabnya

sederhana: pahat kurang tinggi, rol kurang bebas, tekanan kurang, atau pelumasan tidak mencapai titik kontak. Pada mesin bubut CNC, kartel dapat dilakukan dengan alat khusus dan parameter yang lebih konsisten. Namun, prinsipnya tetap sama. Posisi alat, tekanan, putaran spindel, gerak makan, dan pelumasan tetap harus direncanakan. Mesin otomatis tidak menghapus kebutuhan memahami pola kartel. Justru pada produksi berulang, kesalahan kecil pada pengaturan dapat menghasilkan cacat yang sama pada banyak benda kerja. Kartel juga dapat dilihat sebagai bagian dari pengendalian pengalaman pengguna. Sebuah knop dengan kartel terlalu halus mungkin terlihat bersih, tetapi sulit diputar saat tangan berminyak. Kartel terlalu kasar memberi genggaman kuat, tetapi dapat mengganggu kenyamanan. Pada alat yang dipakai berulang setiap hari, keseimbangan seperti ini terasa nyata. Tidak semua keputusan teknik bisa dibaca hanya dari angka ukuran. Kadang tangan manusia menjadi alat uji pertama.

Dalam kegiatan produksi, kartel perlu ditempatkan pada urutan kerja yang tepat. Biasanya diameter dasar dibubut lebih dulu, bidang acuan dirapikan, area kartel ditentukan, lalu kartel dibuat setelah bentuk utama selesai. Jika setelah kartel masih dilakukan pembubutan di dekat area tersebut, pahat lain dapat merusak pola. Jika kartel dibuat terlalu awal, permukaan bertekstur dapat menyulitkan pencekaman ulang. Urutan kerja harus dipikirkan sejak awal. Kesalahan umum pada proses kartel meliputi pola tidak penuh, pola ganda, tekstur miring, diameter akhir terlalu besar, permukaan robek, dan tepi kartel tajam. Pola tidak penuh biasanya disebabkan tekanan kurang atau rol tidak tajam. Pola ganda dapat muncul karena tekanan awal tidak cukup atau hubungan diameter dan pitch kurang sesuai. Diameter terlalu besar terjadi karena material terdorong naik lebih banyak dari perkiraan. Tepi tajam biasanya perlu dirapikan dengan deburring ringan.

Mubarok et al. (2023) menunjukkan pada proses pembubutan baja ST 42 bahwa parameter pemesinan berpengaruh terhadap kekasaran permukaan dan keausan pahat. Pada kartel, relasinya sedikit berbeda karena rol membentuk tekstur, tetapi pesan dasarnya tetap berguna: parameter tidak dapat dipilih sembarangan. Putaran, gerak makan, tekanan, pelumasan, dan kondisi alat akan terlihat langsung pada permukaan hasil. Pemilihan rol kartel perlu disesuaikan dengan pola yang diinginkan. Rol kartel lurus

menghasilkan garis sejajar. Kombinasi rol kiri dan kanan menghasilkan pola silang atau berlian. Rol yang aus akan membuat puncak tekstur kurang tajam. Rol yang kotor dapat meninggalkan bekas tidak teratur. Karena itu, perawatan rol menjadi bagian dari kualitas proses. Alat kecil, efeknya besar.

Pada benda kerja lunak, operator perlu berhati-hati agar pola tidak terlalu dalam. Tekstur yang terlalu dalam dapat merusak dimensi dan membuat permukaan tampak sobek. Pada benda kerja keras, tekanan yang kurang membuat pola tidak terbentuk penuh. Jika tekanan dinaikkan terlalu banyak, beban pada mesin dan pahat meningkat. Pemilihan material, pola, dan tekanan harus dibaca sebagai satu paket keputusan. Kartel sering dipakai setelah operasi bubut utama selesai, tetapi sebelum benda kerja dipotong lepas. Misalnya, sebuah knop dibuat dari batang silinder. Operator meratakan muka, membubut diameter, membuat alur bila diperlukan, melakukan kartel pada bagian pegangan, lalu melakukan parting off. Setelah terpisah, sisi potong dapat dirapikan dengan facing. Urutan seperti ini menjaga benda kerja tetap kuat dicekam selama kartel berlangsung.

Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa metode pemesinan memiliki prinsip, penggunaan, serta kondisi kerja yang berbeda. Kartel memberi contoh menarik karena ia berlangsung di mesin bubut, tetapi karakternya tidak sama dengan penyayatan biasa. Ia memanfaatkan putaran benda kerja, posisi alat, dan gerak makan mesin bubut, namun hasilnya berupa tekstur permukaan yang dibentuk oleh tekanan rol. Pada pembelajaran bengkel, kartel sebaiknya diperkenalkan setelah peserta memahami bubut lurus, facing, ulir, alur, dan parting off. Alasannya cukup masuk akal. Peserta perlu lebih dulu memahami sumbu benda kerja, tinggi pahat, pencekaman, putaran rendah, gerak makan, dan pemeriksaan permukaan. Setelah dasar itu ada, kartel menjadi latihan yang bagus untuk membaca kualitas permukaan dari sisi fungsi, bukan hanya dari sisi kehalusan.

Latihan kartel dapat dimulai dari benda kerja aluminium atau baja karbon rendah berdiameter sedang. Area kartel ditentukan sepanjang beberapa puluh milimeter, ujung diberi chamfer, rol diberi pelumas, lalu pahat ditekan sampai pola mulai terbentuk. Setelah satu lintasan, hasil diamati. Bila pola belum penuh, tekanan dapat disesuaikan. Bila pola ganda muncul, proses dihentikan dan penyebabnya dicari sebelum melanjutkan. Bagian yang menarik

dari kartel adalah perubahan cara menilai permukaan. Pada operasi sebelumnya, permukaan kasar sering dianggap masalah. Pada kartel, permukaan kasar justru menjadi tujuan. Namun, kasar yang dimaksud bukan kasar acak. Polanya harus teratur, cukup tajam, nyaman digenggam, dan sesuai fungsi benda kerja. Pemahaman ini membantu kita melihat bahwa kualitas permukaan tidak selalu berarti semakin halus semakin baik. Kartel atau knurling memperkaya variasi operasi mesin bubut karena menghadirkan fungsi sentuh pada permukaan benda kerja. Setelah benda kerja dibentuk lurus, diratakan, dibuat tirus, diberi ulir, dialur, atau dipotong, kartel memberi karakter penggunaan yang langsung terasa oleh tangan. Tekstur kecil pada permukaan dapat membuat komponen lebih mudah diputar, lebih aman digenggam, dan lebih jelas identitas fungsinya. Dalam pekerjaan mesin, detail seperti ini sering tampak kecil, tetapi justru membuat komponen terasa selesai.

H. Kesalahan Umum dan Kontrol Kualitas pada Operasi Bubut Khusus

Operasi bubut khusus tidak berhenti pada kemampuan membentuk benda kerja. Hasil bubut lurus harus benar diameternya. Permukaan facing harus rata dan siku. Tirus harus memiliki sudut yang sesuai. Ulir harus cocok dengan pasangannya. Alur harus tepat posisi dan ukurannya. Parting off harus memotong dengan aman. Kartel harus membentuk tekstur yang teratur. Semua itu menunjukkan satu hal: pemesinan bukan hanya proses membuat bentuk, tetapi juga proses menjaga agar bentuk tersebut dapat dipakai. Kesalahan pada mesin bubut sering tampak kecil saat proses berlangsung. Diameter meleset sedikit. Permukaan agak kasar. Pahat bergetar sebentar. Ulir terasa sedikit seret. Namun, dalam perakitan, kesalahan kecil dapat berubah menjadi masalah besar. Poros tidak masuk ke bantalan, mur tidak bisa dipasang, cincin pengunci longgar, atau knop terasa tidak nyaman digenggam. Kontrol kualitas diperlukan agar masalah seperti itu tidak baru ditemukan saat komponen sudah selesai seluruhnya.

Kontrol kualitas pada operasi bubut khusus dimulai sebelum mesin menyala. Gambar kerja perlu dibaca dengan cermat. Diameter, panjang, sudut tirus, *pitch* ulir, lebar alur, posisi alur, daerah kartel, dan toleransi harus dipahami lebih dulu. Operator yang langsung memasang benda kerja tanpa membaca fungsi tiap permukaan sering bekerja seperti menebak arah. Bisa berhasil,

tetapi terlalu banyak bergantung pada kebetulan. Pada pekerjaan bubut lurus, kesalahan yang sering muncul adalah diameter tidak seragam sepanjang benda kerja. Bagian dekat chuck mungkin lebih besar daripada bagian ujung, atau sebaliknya. Gejala ini dapat muncul karena benda kerja melendut, pahat tidak setinggi senter, pencekaman kurang baik, atau mesin memiliki ketidaksejajaran. Kesalahan semacam ini sering tidak terlihat jelas oleh mata, tetapi akan terbaca ketika diameter diukur pada beberapa titik.

Permukaan hasil bubut lurus yang kasar juga menjadi masalah umum. Penyebabnya bisa berasal dari pahat tumpul, gerak makan terlalu besar, putaran tidak sesuai, atau getaran. Kadang operator hanya mengganti putaran, padahal sumber masalahnya ada pada pahat yang sudah aus. Trinh (2024) menegaskan bahwa kekasaran permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, karakter alat potong, dan sifat benda kerja. Jadi, mencari penyebab permukaan kasar tidak cukup dengan menebak satu faktor saja. Pada operasi facing, kesalahan yang sering terjadi adalah permukaan muka tidak rata atau tidak siku terhadap sumbu benda kerja. Jika pahat tidak berada pada tinggi senter, bagian pusat bisa menyisakan tonjolan kecil. Jika pencekaman kurang baik, bidang muka dapat tampak rata tetapi sebenarnya miring. Masalah ini sangat penting karena permukaan hasil facing sering menjadi bidang acuan untuk pengukuran panjang dan posisi operasi berikutnya.

Kesalahan pada bubut tirus biasanya lebih rumit karena melibatkan geometri. Sudut tirus dapat meleset karena eretan atas salah disetel, kepala lepas terlalu jauh digeser, pahat profil tidak sesuai, atau taper turning attachment kurang terkunci. Permukaan tirus mungkin tampak benar secara visual, tetapi saat dipasangkan dengan lubang tirus, kontakannya hanya terjadi di ujung atau pangkal. Ini tanda bahwa sudut atau kualitas permukaan belum sesuai. Bubut ulir memiliki kelompok kesalahan sendiri. *Pitch* bisa salah karena pengaturan tuas atau roda gigi keliru. Profil ulir bisa salah karena sudut pahat tidak diperiksa dengan mal. Ulir bisa terlalu dalam, terlalu dangkal, kasar, atau tidak masuk ke pasangan. Pada mesin manual, kesalahan penggunaan half nut juga dapat membuat pahat masuk ke jalur ulir yang berbeda dan merusak profil yang sudah terbentuk. Sekali jalur ulir rusak, perbaikannya sering sulit.

Pada bubut alur, kesalahan umum meliputi alur terlalu lebar, dasar alur tidak rata, sisi alur miring, dan posisi alur bergeser dari ukuran gambar. Penyebabnya bisa berasal dari pahat yang tidak tegak 90 derajat terhadap sumbu benda kerja, pahat terlalu panjang menonjol, atau pemakanan samping tidak terkendali. Jika alur berfungsi sebagai tempat cincin pengunci, kesalahan lebar atau kedalaman dapat langsung mengganggu fungsi penguncian. Pada parting off, kesalahan sering berhubungan dengan keamanan proses. Pahat dapat terjepit, patah, atau membuat benda kerja terdorong keluar dari cekaman. Penyebabnya biasanya tidak tunggal. Putaran terlalu tinggi, pahat tidak setinggi senter, pahat terlalu panjang, geram tidak keluar, atau cairan pendingin tidak mencapai area potong. Operasi ini perlu dipantau lebih hati-hati karena pahat masuk semakin dalam dan celah pembuangan geram makin sempit.

Pada kartel atau knurling, kesalahan yang sering terlihat adalah pola tidak penuh, pola ganda, tekstur miring, diameter akhir terlalu besar, dan tepi kartel tajam. Kartel memang sengaja membuat permukaan kasar, tetapi kasar yang diinginkan harus teratur. Tekstur acak bukan kartel yang baik. Song et al. (2023) menjelaskan bahwa desain tekstur permukaan berkaitan dengan hubungan antara geometri tekstur, proses pembuatan, dan aplikasi permukaan. Dalam kartel, gagasan ini terasa langsung karena kualitas pola menentukan fungsi genggam. Pengukuran antara sangat penting. Pada bubut lurus, diameter dapat diperiksa sebelum mencapai ukuran akhir. Pada tirus, diameter besar dan kecil dapat dicek setelah beberapa lintasan. Pada ulir, goresan awal dapat diperiksa dengan mal ulir sebelum kedalaman ditambah. Pada alur, posisi dan lebar dapat dicek sebelum alur diperdalam. Cara ini memberi kesempatan untuk mengoreksi proses sebelum kesalahan menjadi permanen.

Alat ukur harus dipilih sesuai jenis kesalahan yang ingin dikendalikan. Jangka sorong dapat digunakan untuk pemeriksaan cepat, tetapi mikrometer lebih tepat untuk diameter presisi. Mal ulir dipakai untuk mengecek *pitch* dan profil ulir. Dial indicator membantu memeriksa kebulatan, eksentrisitas, atau keselarasan. Untuk kekasaran permukaan, alat ukur kekasaran seperti surface roughness tester dapat digunakan bila tersedia. Tanpa alat yang sesuai, pemeriksaan sering berubah menjadi perkiraan. Ivanov et al. (2025) menempatkan kualitas produk manufaktur dalam

hubungan dengan ukuran, bentuk, posisi, kekasaran, dan kesesuaian terhadap persyaratan teknis. Cara pandang ini cocok untuk operasi bubut khusus. Sebuah komponen tidak cukup disebut benar hanya karena bentuknya mirip. Diameter harus sesuai, tirus harus pas, ulir harus dapat berpasangan, alur harus berada pada posisi yang benar, dan permukaan kartel harus memenuhi fungsi genggam.

Kondisi pahat menjadi sumber kesalahan yang sangat sering. Pahat tumpul meningkatkan gaya potong, panas, getaran, dan kekasaran permukaan. Pada ulir, pahat yang tidak tajam dapat membuat sisi profil berbulu. Pada alur, pahat yang aus dapat membuat dinding alur kasar. Pada parting off, pahat tumpul bisa terjepit lebih mudah. Pada kartel, rol aus membuat pola tidak tajam. Liu et al. (2025) menunjukkan bahwa pemantauan kekasaran permukaan dan keausan alat penting untuk mendukung manufaktur cerdas menuju kondisi cacat rendah. Getaran atau chatter juga sering muncul pada operasi bubut khusus. Suaranya khas, permukaan hasilnya bergelombang, dan pahat terasa seperti memukul benda kerja. Penyebabnya dapat berasal dari pahat terlalu panjang, benda kerja menjulur terlalu jauh, putaran tidak sesuai, atau pencekaman kurang kaku. Mengurangi putaran kadang membantu, tetapi tidak selalu cukup. Kadang sumber masalah justru ada pada kekakuan sistem mesin, alat, dan benda kerja.

Pencekaman perlu diperiksa sebelum proses dan selama pekerjaan tertentu. Benda kerja yang tercekam kurang kuat dapat bergeser saat bubut alur, parting off, atau kartel karena gaya radial cukup besar. Benda kerja panjang membutuhkan dukungan senter atau penyangga. Benda kerja tidak beraturan mungkin membutuhkan face plate dan klem. Kontrol kualitas tidak dapat dilepaskan dari pencekaman karena ukuran yang benar tidak mungkin muncul dari benda kerja yang bergerak. Parameter pemotongan perlu dipilih dari kondisi nyata, bukan sekadar dari kebiasaan. Kecepatan potong terlalu tinggi dapat mempercepat aus pahat. Gerak makan terlalu besar dapat membuat permukaan kasar. Kedalaman potong terlalu besar dapat memicu getaran dan perubahan ukuran. Mubarok et al. (2023) menunjukkan bahwa parameter pemesinan pada pembubutan baja ST 42 berpengaruh terhadap kekasaran permukaan dan keausan pahat. Temuan seperti ini menguatkan pengalaman bengkel bahwa angka pada mesin selalu meninggalkan jejak pada benda kerja.

Material benda kerja juga perlu dibaca sebagai bagian dari kontrol kualitas. Aluminium mudah disayat, tetapi dapat menempel pada pahat atau rol kartel. Baja karbon relatif umum dikerjakan, tetapi tetap membutuhkan pahat dan pendinginan yang sesuai. Baja tahan karat dapat memunculkan panas dan pengerasan kerja. Besi tuang menghasilkan geram rapuh, tetapi debunya dapat mengganggu kebersihan mesin. Perbedaan sifat material membuat satu set parameter tidak selalu cocok untuk semua pekerjaan. Kontrol kualitas pada ulir memiliki ciri yang lebih fungsional. Ulir tidak hanya diukur, tetapi juga diuji kesesuaiannya dengan pasangan. Mur standar dapat digunakan untuk pemeriksaan sederhana pada ulir luar, sedangkan mal ulir membantu memastikan *pitch*. Untuk pekerjaan lebih presisi, diameter *pitch* perlu diperiksa dengan alat yang sesuai. Ulir yang terlihat rapi tetapi tidak masuk ke pasangan tetap dianggap gagal.

Pada tirus, pemeriksaan kontak menjadi penting bila tirus bekerja sebagai sambungan. Pewarna tipis dapat digunakan untuk melihat distribusi kontak antara dua permukaan tirus. Jika bekas kontak hanya berada di ujung kecil atau ujung besar, sudut tirus belum sesuai. Pemeriksaan diameter saja kadang belum cukup karena kesalahan kecil pada sudut dapat memengaruhi pasangan sepanjang permukaan tirus. Pada alur dan parting off, burr perlu diperhatikan. Burr adalah sisa tajam yang muncul di tepi hasil pemotongan. Pada alur cincin, burr dapat membuat cincin tidak duduk sempurna. Pada hasil parting off, burr dapat mengganggu pengukuran panjang dan membahayakan tangan. Pembersihan burr sebaiknya menjadi bagian dari proses, bukan pekerjaan tambahan yang dilakukan bila sempat.

Pada kartel, kontrol kualitas tidak hanya memakai ukuran. Pemeriksaan visual dan sentuhan setelah mesin berhenti juga penting. Pola harus penuh, seragam, tidak ganda, dan tidak terlalu tajam. Diameter setelah kartel perlu diukur bila komponen akan masuk ke ruang tertentu. Permukaan yang terlalu kasar dapat melukai tangan, sedangkan terlalu halus tidak memberi cengkeraman cukup. Kualitas kartel berada di antara fungsi dan kenyamanan. Kontrol kualitas yang baik juga membutuhkan urutan kerja yang rapi. Benda kerja sebaiknya tidak sering dilepas pasang tanpa alasan, karena setiap pencekaman ulang membuka kemungkinan perubahan posisi. Bila beberapa operasi harus dilakukan dalam satu pencekaman, urutannya perlu dirancang sejak

awal. Misalnya, bidang muka diratakan, diameter dibubut, ulir dibuat, alur pelepas diselesaikan, kartel dikerjakan, lalu benda kerja dipotong. Urutan dapat berubah sesuai bentuk komponen, tetapi alasan teknisnya harus jelas.

Catatan proses membantu mengurangi kesalahan berulang. Operator dapat mencatat material, diameter awal, jenis pahat, putaran, gerak makan, kedalaman potong, penggunaan pendingin, dan hasil pengukuran. Pada produksi satuan, catatan ini mungkin terasa berlebihan. Namun, ketika kesalahan muncul lagi pada pekerjaan serupa, catatan kecil dapat menghemat banyak waktu. Wang et al. (2023) melihat pemesinan berkelanjutan sebagai hubungan antara peralatan, proses, dan strategi kerja. Pencatatan proses termasuk strategi sederhana yang membuat pekerjaan lebih terkendali. Dalam bengkel pendidikan, kontrol kualitas juga berfungsi sebagai alat belajar. Peserta tidak hanya diminta membuat benda kerja, tetapi juga menjelaskan mengapa hasilnya meleset. Diameter tirus salah karena sudut eretan atau karena pengukuran panjang? Ulir rusak karena *pitch* salah atau karena pahat tidak tegak? Alur melebar karena pahat miring atau karena gerak samping terlalu besar? Pertanyaan seperti ini melatih nalar teknis.

Keselamatan kerja menjadi bagian dari kualitas proses. Benda kerja yang lepas, pahat patah, geram panjang, dan pengukuran saat mesin berputar bukan hanya membahayakan operator, tetapi juga merusak hasil. Proses yang aman biasanya lebih terkendali. Proses yang terkendali lebih mudah menghasilkan ukuran benar. Jadi, keselamatan bukan urusan terpisah dari mutu kerja. Pemeriksaan akhir sebaiknya dilakukan setelah benda kerja dibersihkan dari geram, cairan pendingin, dan burr. Permukaan yang kotor dapat membuat pengukuran tidak akurat. Geram kecil yang menempel pada alur dapat membuat lebar terbaca salah. Burr pada ujung ulir dapat membuat mur terasa seret. Minyak berlebih pada kartel dapat menyembunyikan pola ganda. Membersihkan benda kerja sebelum pemeriksaan adalah langkah kecil yang sering menyelamatkan pembacaan.

Pada mesin CNC, kontrol kualitas tetap diperlukan walaupun proses berjalan otomatis. Program yang benar harus tetap diverifikasi melalui benda kerja pertama. Kompensasi pahat perlu diperbarui jika pahat aus. Sensor dan pemantauan modern dapat membantu, tetapi tidak menggantikan pemahaman proses. Steckel

et al. (2024) menunjukkan bahwa prediksi keausan pahat pada operasi CNC turning dapat dibantu oleh sinyal akustik ultrasonik dan model pembelajaran mendalam. Meski teknologinya maju, masalah dasarnya tetap sama: pahat yang aus akan memengaruhi kualitas benda kerja. Kualitas permukaan juga perlu dibaca sesuai fungsi. Permukaanudukan bantalan membutuhkan kehalusan dan diameter yang terkendali. Permukaan kartel justru membutuhkan tekstur teratur. Permukaan ulir harus memiliki profil yang cocok dengan pasangan. Permukaan alur harus cukup bersih agar cincin atau komponen lain duduk benar. Tidak semua permukaan harus sehalus mungkin. Yang lebih penting adalah sesuai fungsi. Kesalahan umum pada operasi bubut khusus jarang muncul sendirian. Pahat tumpul dapat memicu panas, panas memengaruhi ukuran, ukuran meleset membuat operator menambah pemakanan, dan pemakanan berlebih memicu getaran. Rantai seperti ini sering terjadi. Karena itu, saat masalah muncul, operator perlu melihat sistem secara utuh: mesin, pahat, benda kerja, cekaman, parameter, pendinginan, dan cara ukur.

Sikap terbaik dalam kontrol kualitas adalah memeriksa lebih awal dan memperbaiki lebih cepat. Jangan menunggu benda kerja selesai untuk mengetahui diameter salah. Jangan menunggu ulir penuh untuk memeriksa *pitch*. Jangan menunggu pahat parting off patah untuk menyadari geram terjepit. Pemeriksaan kecil selama proses jauh lebih murah daripada membuat ulang benda kerja dari awal. Operasi bubut khusus menuntut keseimbangan antara keterampilan tangan, pemahaman geometri, pemilihan parameter, dan disiplin ukur. Mesin bubut memberi gerak putar dan gerak makan, tetapi manusia yang menentukan apakah proses berjalan aman dan hasilnya layak. Dari bubut lurus sampai kartel, kualitas selalu lahir dari keputusan kecil yang saling terhubung. Kadang keputusan itu tampak sederhana, seperti menurunkan putaran atau memeriksa tinggi pahat. Justru di sana letak ketelitian kerja bengkel.

BAB 4

MESIN FRAIS: PRINSIP KERJA, KLASIFIKASI, PARAMETER, PEMOTONGAN, DAN PENCEKAMAN

A. Pengertian dan Prinsip Kerja Mesin Frais

Mesin frais merupakan salah satu mesin perkakas yang digunakan untuk membentuk permukaan benda kerja melalui proses penyayatan material dengan alat potong yang berputar. Dalam praktik bengkel, proses ini dikenal sebagai proses frais atau milling. Ciri yang paling mudah dikenali dari proses frais adalah penggunaan pisau frais atau cutter yang memiliki lebih dari satu mata potong. Karena itulah, mesin frais sering dijelaskan sebagai proses pemesian dengan alat potong bermata jamak atau multi point cutting tool. Berbeda dengan mesin bubut yang gerak utamanya berasal dari putaran benda kerja, mesin frais bekerja dengan gerak utama pada alat potong. Pisau frais berputar pada poros mesin, lalu benda kerja digerakkan secara terarah terhadap pisau tersebut. Sepintas, perbedaannya tampak sederhana. Namun, dari sisi proses pemesian, perbedaan itu sangat menentukan bentuk permukaan yang dapat dibuat, arah gaya pemotongan, cara pencekaman, dan kemungkinan variasi pekerjaan yang dapat dilakukan.

Pada mesin bubut, benda kerja umumnya berputar dan pahat bergerak menyayat dalam arah tertentu. Proses ini sangat sesuai untuk menghasilkan bentuk silindris, tirus, ulir, atau permukaan yang berhubungan dengan sumbu putar. Mesin frais memiliki watak yang agak berbeda. Benda kerja biasanya dijepit pada meja mesin atau ragum, sedangkan alat potong berputar dan menyayat permukaan benda kerja melalui pergerakan meja pada beberapa arah. Karena itu, mesin frais lebih lentur untuk membuat bidang datar, alur, bidang bertingkat, permukaan menyudut, roda gigi, serta profil tertentu. Dalam pengertian yang lebih luas, mesin frais tidak hanya dipahami sebagai mesin pembuat bidang rata. Mesin ini merupakan sistem pemesian yang menggabungkan putaran alat potong, gerak makan benda kerja, kedalaman potong, kekakuan mesin, bentuk pisau, serta cara pencekaman. Semua unsur tersebut bekerja bersama. Bila salah satu unsur diabaikan, hasil pemesian dapat menyimpang, baik dari sisi ukuran, bentuk, kehalusan permukaan, maupun keamanan kerja.

Prinsip dasar mesin frais adalah membuang sebagian material benda kerja melalui kontak berulang antara gigi pisau frais dan permukaan benda kerja. Setiap gigi pada cutter masuk ke daerah pemotongan, mengambil sebagian kecil material, lalu keluar dari daerah potong sebelum gigi berikutnya bekerja. Pola ini membuat proses frais memiliki karakter pemotongan yang terputus-putus. Geram tidak terbentuk secara terus menerus seperti pada beberapa kondisi pembubutan, melainkan terbentuk secara periodik sesuai jumlah gigi dan kecepatan putaran pisau. Sifat pemotongan terputus ini membuat proses frais mempunyai kelebihan sekaligus tantangan. Kelebihannya, panas pemotongan dapat terbagi pada beberapa mata potong, sehingga satu mata potong tidak selalu menerima beban sepanjang waktu. Namun, pola masuk-keluar gigi juga dapat menimbulkan getaran, perubahan gaya secara periodik, dan suara pemotongan yang lebih terasa. Di bengkel, kondisi ini sering tampak dari bunyi mesin yang berubah ketika gerak makan terlalu besar, benda kerja kurang kuat dijepit, atau pisau frais mulai aus.

Secara konseptual, mesin frais bekerja melalui tiga gerakan utama yang saling berkaitan, yaitu putaran pisau frais, gerak makan benda kerja, dan pengaturan kedalaman potong. Putaran pisau frais menghasilkan kecepatan potong atau cutting speed. Gerak makan atau feeding menentukan seberapa cepat benda kerja bergerak terhadap pisau. Kedalaman potong atau depth of cut menentukan tebal lapisan material yang dibuang dalam satu lintasan. Ketiganya bukan angka yang berdiri sendiri, karena perubahan salah satu parameter hampir selalu memengaruhi gaya potong, panas, kualitas permukaan, dan umur alat potong. Pembahasan mesin frais perlu ditempatkan dalam konteks teknologi mesin perkakas secara umum. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa manufaktur berkaitan dengan transformasi bahan dan komponen menjadi produk melalui berbagai metode dan operasi teknologi. Dalam proses pemesinan, transformasi itu terjadi dengan cara mengurangi material secara terkendali. Mesin frais menjadi salah satu contoh penting karena mampu menghubungkan kebutuhan gambar teknik dengan benda nyata melalui pengendalian gerak, pahat, material, dan parameter pemotongan.

Kemampuan mesin frais sering terlihat pada pekerjaan yang membutuhkan bidang referensi. Misalnya, sebuah blok baja yang akan digunakan sebagaiudukan komponen perlu memiliki bidang

bawah yang rata, bidang samping yang siku, dan alur tertentu untuk pemasangan baut. Pekerjaan seperti ini sulit dikerjakan secara efisien dengan mesin bubut, karena bentuknya tidak berpusat pada sumbu putar. Mesin frais lebih sesuai karena meja mesin dapat menggerakkan benda kerja terhadap pisau frais pada arah memanjang, melintang, dan vertikal. Salah satu ciri penting mesin frais adalah sistem sumbu operasinya. Pada mesin frais konvensional, pergerakan meja dapat dipahami melalui sumbu X, Y, dan Z. Sumbu X menunjukkan pergerakan meja ke arah kanan dan kiri operator. Sumbu Y menunjukkan pergerakan meja ke arah mendekati atau menjauhi operator. Sumbu Z menunjukkan pergerakan naik turun yang biasanya berkaitan dengan pengaturan kedalaman potong. Inilah yang membuat mesin frais lebih fleksibel dibanding proses yang hanya dominan bekerja pada dua arah gerak utama.

Pergerakan tiga sumbu tersebut tidak selalu digunakan sekaligus dalam satu pekerjaan sederhana. Untuk membuat bidang datar, operator mungkin hanya menggunakan satu arah gerak makan dengan kedalaman potong tertentu. Untuk membuat alur, gerakan meja dapat dikombinasikan dengan posisi pisau dan kedalaman tertentu. Untuk pekerjaan yang lebih kompleks, seperti permukaan bertingkat atau kontur sederhana, operator perlu mengatur beberapa sumbu secara berurutan. Di sinilah mesin frais mulai menunjukkan karakternya sebagai mesin yang lebih kaya kemungkinan, sekaligus lebih menuntut ketelitian operator. Prinsip kerja mesin frais dapat diringkas melalui hubungan antara bagian mesin, jenis gerak, dan akibatnya terhadap proses. Tabel berikut menyajikan hubungan tersebut agar pembahasan tidak hanya berhenti pada definisi. Tabel ini juga membantu kita melihat bahwa setiap gerak pada mesin frais memiliki fungsi teknis tertentu, bukan sekadar arah pergeseran meja.

Tabel 7. Hubungan unsur kerja mesin frais dengan fungsi teknisnya

Unsur kerja mesin frais	Makna dalam proses	Contoh penerapan	Pengaruh terhadap hasil
Putaran pisau frais	Gerak utama pemotongan	Pisau end mill berputar untuk membuat alur	Menentukan kecepatan potong, panas, dan kemampuan penyayatan

Gerak meja sumbu X	Gerak memanjang benda kerja	Membuat bidang datar sepanjang benda kerja	Mempengaruhi panjang lintasan dan keseragaman bidang
Gerak meja sumbu Y	Gerak melintang benda kerja	Menggeser posisi benda kerja untuk membuat alur sejajar	Mempengaruhi posisi pemotongan dan lebar bidang kerja
Gerak sumbu Z	Pengaturan naik turun meja atau kepala mesin	Menentukan depth of cut	Mempengaruhi beban pahat, gaya potong, dan risiko getaran
Ragum atau alat cekam	Menahan benda kerja selama penyayatan	Menjepit blok baja di tengah mulut ragum	Mempengaruhi keselamatan, kesikuan, dan ketelitian ukuran
Pisau frais	Alat potong bermata jamak	Face mill, slab cutter, end mill	Menentukan jenis permukaan, bentuk geram, dan kualitas hasil

Dari tabel tersebut tampak bahwa mesin frais bekerja sebagai satu sistem. Putaran pisau tanpa gerak meja hanya membuat alat potong berputar di tempat. Gerak meja tanpa kedalaman potong tidak menghasilkan penyayatan berarti. Kedalaman potong yang besar tanpa pencekaman yang kuat dapat membuat benda kerja bergeser atau bergetar. Sederhana saja, tetapi rupanya benda logam juga punya cara sendiri untuk memperlakukan operator yang terlalu percaya diri. Dalam proses frais, pisau frais tidak hanya menyayat material, tetapi juga membentuk pola permukaan. Jumlah gigi, diameter pisau, sudut potong, bahan pisau, dan kondisi ketajaman akan memengaruhi hasil akhir. Pisau frais dengan banyak gigi dapat menghasilkan permukaan yang lebih rapat bekas sayatannya, tetapi membutuhkan ruang geram yang cukup agar material yang terpotong tidak menumpuk. Pisau yang terlalu tumpul akan menekan material lebih besar daripada menyayatnya, sehingga panas, gaya, dan kekasaran permukaan meningkat.

Kualitas permukaan dalam proses frais tidak muncul secara kebetulan. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kekasaran permukaan pada proses pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pernyataan ini penting karena dalam pekerjaan nyata, permukaan yang halus bukan hanya

hasil dari mesin yang baik. Ia lahir dari kombinasi putaran yang tepat, gerak makan yang sesuai, pisau yang masih layak pakai, material yang dipahami sifatnya, dan pencekaman yang tidak asal kencang. Mesin frais juga dapat dipahami melalui jenis pekerjaan yang sering dilakukan. Pada pekerjaan face milling, pisau frais digunakan untuk meratakan permukaan benda kerja. Pada pekerjaan end milling, pisau ujung dapat digunakan untuk membuat alur, bahu, atau kontur sederhana. Pada pekerjaan slab milling, pisau frais silindris digunakan pada mesin frais horizontal untuk menyayat permukaan datar. Pada pekerjaan gear milling, pisau khusus dapat digunakan untuk membentuk gigi roda gigi dengan bantuan pengaturan pembagian sudut.

Klasifikasi awal mesin frais biasanya dibedakan menjadi frais horizontal dan frais vertikal. Pada frais horizontal, arbor pemegang pisau berada pada posisi mendatar. Susunan ini cocok untuk pekerjaan seperti slab milling, slitting, straddle milling, atau pembuatan alur tertentu. Pada frais vertikal, poros pemegang alat potong berada pada posisi tegak. Susunan ini banyak digunakan untuk face milling, end milling, pembuatan alur T, atau pekerjaan permukaan bertingkat. Perbedaan horizontal dan vertikal bukan hanya perbedaan posisi poros. Ia juga memengaruhi cara gaya potong bekerja, jenis pisau yang digunakan, cara benda kerja dijepit, dan ruang kerja yang tersedia. Pada frais horizontal, penggunaan arbor panjang sering membutuhkan penopang tambahan agar putaran tetap stabil. Pada frais vertikal, operator sering lebih mudah mengamati posisi pisau terhadap benda kerja, terutama untuk pekerjaan alur atau bidang kecil. Masing masing memiliki wilayah kerja yang khas, sehingga tidak ada gunanya memaksakan satu jenis mesin untuk semua bentuk pekerjaan.

Prinsip kerja mesin frais juga berkaitan erat dengan pembentukan geram. Ketika gigi pisau frais masuk ke benda kerja, material mengalami deformasi plastis lokal sebelum akhirnya terpisah menjadi geram. Proses ini menghasilkan panas dan gaya potong. Jika panas terlalu tinggi, umur pisau menurun dan permukaan benda kerja dapat memburuk. Jika gaya potong terlalu besar, mesin dapat bergetar, benda kerja dapat bergeser, atau pisau mengalami keausan lebih cepat. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa keausan alat potong pada proses frais dapat diperkirakan melalui analisis sinyal multi sensor dan algoritma machine learning. Temuan seperti ini menunjukkan bahwa proses frais

modern tidak lagi hanya dibaca dari bekas sayatan atau suara mesin. Getaran, gaya, dan sinyal proses dapat digunakan untuk memahami kondisi alat potong. Namun, kemampuan digital seperti itu tetap berdiri di atas prinsip lama yang sama: pisau berputar, material disayat, gaya muncul, panas terbentuk, dan alat potong perlahan aus. Teknologi baru hanya membuat gejala itu lebih mudah dibaca, bukan menghapus hukumnya.

Dalam pekerjaan manual, operator sering menggunakan pengalaman untuk menilai apakah proses frais berjalan stabil. Suara pemotongan yang terlalu kasar, getaran pada meja, permukaan yang bergelombang, atau geram yang berubah warna dapat menjadi tanda bahwa kondisi pemotongan kurang sesuai. Meski begitu, pengalaman tidak boleh berdiri sendiri tanpa dasar teknis. Pengalaman yang baik perlu diterjemahkan menjadi keputusan tentang putaran, gerak makan, kedalaman potong, pilihan pisau, pendinginan, dan pencekaman. Parameter pemotongan pada mesin frais menjadi bagian penting dari prinsip kerja karena menentukan bagaimana energi mesin berubah menjadi aksi penyayatan. Kecepatan potong berkaitan dengan keliling pisau frais dan putaran spindle. Gerak makan dapat dihitung berdasarkan gerak makan per gigi, jumlah gigi, dan putaran pisau. Kedalaman potong menentukan seberapa besar material dibuang dalam satu lintasan. Pada pekerjaan kasar atau roughing, operator dapat memilih kedalaman potong lebih besar untuk mempercepat pembuangan material. Pada pekerjaan akhir atau finishing, kedalaman potong dan gerak makan biasanya dibuat lebih kecil agar permukaan lebih halus dan ukuran lebih terkendali.

Hubungan antara parameter pemotongan dan kualitas hasil menjadi perhatian besar dalam penelitian pemesinan. Hata et al. (2023) menunjukkan bahwa parameter pada proses CNC wet milling baja tahan karat austenitik berkaitan dengan optimasi kekasaran permukaan. Kajian seperti ini memperlihatkan bahwa pemilihan parameter tidak sebaiknya dilakukan secara asal. Dalam produksi, kesalahan parameter dapat berarti permukaan lebih kasar, waktu pengerjaan lebih panjang, konsumsi energi lebih tinggi, atau pahat lebih cepat diganti. Proses frais juga perlu dipahami dari sisi keberlanjutan dan efisiensi. Wang et al. (2023) menekankan bahwa pemesinan berkelanjutan perlu dilihat dari integrasi peralatan, proses, dan strategi, termasuk alat potong, cairan pemotongan, penghematan energi, simulasi, dan optimasi proses. Artinya,

prinsip kerja mesin frais tidak cukup dibahas sebagai urusan membentuk benda kerja saja. Dalam industri modern, proses yang baik juga perlu mempertimbangkan energi, umur alat, cairan pendingin, limbah, waktu produksi, dan konsistensi hasil.

Pada tingkat dasar, arah putaran pisau terhadap arah gerak makan menghasilkan dua metode penting, yaitu frais naik atau up milling dan frais turun atau down milling. Pada up milling, arah putaran pisau berlawanan dengan arah gerak benda kerja. Tebal geram dimulai dari sangat kecil lalu bertambah sampai maksimum. Metode ini sering dianggap lebih aman pada mesin konvensional karena gaya potong cenderung tidak menarik meja secara tiba-tiba, meskipun gaya pemotongan dapat mengangkat benda kerja jika pencekaman kurang baik. Pada down milling, arah putaran pisau searah dengan gerak benda kerja. Tebal geram dimulai dari maksimum lalu berkurang hingga akhir penyayatan. Metode ini dapat menghasilkan permukaan lebih halus dan mengurangi gesekan pada beberapa kondisi, tetapi membutuhkan mesin yang lebih kaku dan sistem bebas celah balik yang baik. Bila digunakan pada mesin konvensional dengan backlash besar, metode ini dapat menarik meja secara tidak terkendali. Jadi, pilihan metode bukan sekadar soal mana yang lebih halus, tetapi mana yang aman dan sesuai dengan kondisi mesin.

Pencekaman benda kerja menjadi bagian yang tidak dapat dipisahkan dari prinsip kerja mesin frais. Benda kerja biasanya dijepit pada ragum, dipasang pada meja dengan klem, atau ditahan menggunakan perlengkapan bantu lain sesuai bentuknya. Pada benda kerja berbentuk balok, ragum sering menjadi pilihan paling praktis. Posisi benda kerja sebaiknya berada di tengah mulut ragum agar gaya jepit tersebar lebih merata. Bila bagian benda kerja terlalu tinggi menonjol dari ragum, risiko getaran dan perubahan posisi akan meningkat saat pisau menyayat.

Penggunaan paralel blok juga penting untuk menjaga posisi benda kerja tetap rata. Paralel blok membantu menopang benda kerja sehingga permukaan bawahnya memiliki acuan yang stabil. Tanpa dukungan yang baik, benda kerja dapat miring meskipun ragum terasa sudah kencang. Kesalahan seperti ini sering tidak tampak pada awal penyayatan, tetapi muncul ketika hasil pengukuran menunjukkan bidang tidak siku, kedalaman alur tidak merata, atau permukaan akhir bergelombang. Logam memang diam, tetapi diamnya sering menunggu kesempatan membuat

ukuran melenceng. Selain pencekaman, kekakuan sistem juga menjadi syarat penting. Kekakuan ini mencakup kekakuan mesin, arbor, pisau frais, ragum, benda kerja, dan meja mesin. Bila salah satu bagian terlalu lentur, gaya potong dapat menimbulkan defleksi. Defleksi kecil saja dapat mengubah ukuran akhir, terutama pada pekerjaan presisi. Dalam proses frais, getaran atau vibration sering menjadi gejala bahwa kombinasi parameter, panjang pahat, pencekaman, dan kondisi mesin belum sesuai.

Mesin frais juga memiliki nilai pendidikan yang kuat karena menunjukkan hubungan langsung antara teori dan praktik. Rumus putaran spindle mungkin terlihat sederhana di papan tulis, tetapi di bengkel rumus itu harus bertemu dengan jenis material, diameter pisau, jumlah gigi, jenis pendinginan, dan kondisi mesin. Gerak makan yang secara teori dapat dihitung perlu disesuaikan dengan suara pemotongan dan kualitas permukaan. Kedalaman potong yang tampak wajar dalam tabel bisa menjadi terlalu agresif bila benda kerja kecil, panjang, atau kurang kuat dicekam. Dalam konteks pembelajaran teknologi mesin perkakas, pengertian mesin frais sebaiknya tidak berhenti pada kalimat bahwa mesin ini digunakan untuk membuat bidang datar. Pengertian seperti itu terlalu sempit. Mesin frais lebih tepat dipahami sebagai mesin pemesinan yang membentuk benda kerja melalui kombinasi putaran pisau bermata jamak dan gerak translasi benda kerja pada beberapa sumbu. Dengan pengertian ini, kita dapat memahami mengapa mesin frais mampu menghasilkan bidang, alur, profil, permukaan bertingkat, dan bentuk lain yang tidak selalu dapat diselesaikan secara efektif dengan mesin bubut.

Prinsip kerja mesin frais juga mengajarkan bahwa hasil pemesinan selalu merupakan hasil kompromi. Kecepatan produksi perlu diseimbangkan dengan umur pahat. Kedalaman potong perlu diseimbangkan dengan kekakuan mesin. Gerak makan perlu diseimbangkan dengan kekasaran permukaan. Pendinginan perlu dipilih agar panas terkendali tanpa menimbulkan masalah lain pada material atau lingkungan kerja. Tidak semua keputusan memiliki jawaban tunggal, tetapi keputusan yang baik selalu memiliki alasan teknis. Pada mesin frais modern, terutama mesin CNC milling, prinsip dasar yang sama diterapkan melalui kendali numerik. Gerakan meja, lintasan pahat, dan kedalaman potong dapat dikendalikan oleh program. Namun, program hanya menjalankan instruksi yang dibuat manusia. Jika pemilihan pisau salah,

parameter terlalu agresif, atau pencekaman lemah, mesin CNC tetap dapat menghasilkan kerusakan dengan cara yang lebih cepat dan lebih mahal. Ini salah satu bukti bahwa otomasi tidak menggantikan pemahaman dasar, hanya mempercepat akibat dari keputusan yang benar maupun keliru.

Pemahaman tentang prinsip kerja mesin frais juga membantu operator membaca keterbatasan proses. Mesin frais dapat mengerjakan banyak bentuk, tetapi tidak semua bentuk harus dikerjakan dengan frais. Lubang dalam yang presisi mungkin memerlukan gurdi, reaming, atau boring. Bentuk silindris panjang lebih masuk akal dikerjakan dengan mesin bubut. Permukaan sangat halus mungkin memerlukan penggerindaan setelah frais. Dalam perencanaan proses, kemampuan memilih urutan kerja sering sama pentingnya dengan kemampuan mengoperasikan mesin. Sebagai proses pemesinan, frais memegang peran penting dalam pembuatan komponen industri. Dudukan motor, rumah bantalan, cetakan sederhana, pelat mesin, alur pasak, roda gigi, dan komponen perkakas sering melibatkan proses frais. Di bidang manufaktur modern, prinsip yang sama berkembang ke pusat pemesinan vertikal, pusat pemesinan horizontal, pemesinan lima sumbu, bahkan pemesinan berbasis robot. Bentuk teknologinya berubah, tetapi dasar pemotongannya tetap mudah dikenali: alat potong berputar, benda kerja diarahkan, material disayat, dan kualitas hasil dikendalikan.

B. Sistem Sumbu X, Y, dan Z pada Mesin Frais

Sistem sumbu pada mesin frais merupakan dasar penting untuk memahami bagaimana benda kerja diarahkan terhadap alat potong. Mesin frais tidak hanya bekerja dengan satu arah penyayatan. Ia memungkinkan benda kerja bergerak pada beberapa arah melalui meja mesin, sementara pisau frais atau cutter berputar sebagai gerak utama. Dari hubungan sederhana ini, terbentuk kemampuan mesin frais untuk membuat bidang datar, alur, permukaan bertingkat, dan bentuk prismatic yang lebih kompleks dibandingkan beberapa pekerjaan dasar pada mesin bubut. Pada mesin frais, sistem sumbu yang umum digunakan adalah sumbu X, sumbu Y, dan sumbu Z. Ketiga sumbu ini menjadi bahasa gerak bagi operator untuk menentukan posisi benda kerja terhadap pisau frais. Sumbu X biasanya menunjukkan gerak meja ke kiri dan kanan. Sumbu Y menunjukkan gerak meja ke arah depan dan belakang, atau mendekati serta menjauhi operator. Sumbu Z

menunjukkan gerak naik turun yang berhubungan langsung dengan pengaturan kedalaman potong atau depth of cut. Tanpa pemahaman tiga sumbu ini, operasi frais mudah berubah menjadi kegiatan menebak arah, dan bengkel bukan tempat yang ramah bagi tebakan.

Perbedaan sistem sumbu inilah yang membuat mesin frais memiliki karakter yang berbeda dari mesin bubut. Pada mesin bubut, benda kerja berputar dan pahat bergerak dalam arah yang terutama berkaitan dengan sumbu memanjang dan melintang. Pada mesin frais, benda kerja dijepit di atas meja, lalu meja tersebut dapat digerakkan dalam tiga arah operasi. Gerak ini memberi ruang kerja yang lebih luas, terutama ketika benda kerja tidak berbentuk silindris atau tidak berpusat pada satu sumbu putar. Sumbu X dapat dipahami sebagai arah gerak memanjang meja mesin. Dalam posisi operator berdiri menghadap mesin, gerak ini biasanya terlihat sebagai pergeseran meja ke kanan dan ke kiri. Pada pekerjaan meratakan permukaan balok, misalnya, sumbu X sering digunakan sebagai arah lintasan utama. Pisau frais berputar di tempatnya, benda kerja bergerak melewati daerah potong, lalu lapisan material pada permukaan benda kerja tersayat secara bertahap.

Sumbu Y bekerja pada arah melintang meja. Arah ini digunakan untuk mengatur posisi benda kerja terhadap pisau frais dari sisi depan dan belakang. Dalam pekerjaan membuat alur sejajar, sumbu Y dapat digunakan untuk menentukan letak alur terhadap tepi benda kerja. Jika alur harus berada tepat 20 mm dari sisi kiri benda kerja, operator perlu mengatur posisi meja pada sumbu Y atau mengombinasikannya dengan pembacaan skala meja. Kesalahan kecil pada pengaturan ini dapat membuat alur bergeser, dan hasilnya tentu tidak akan memedulikan niat baik operator. Sumbu Z berfungsi untuk mengatur gerakan naik turun, baik melalui meja mesin maupun kepala mesin, tergantung konstruksi mesin frais yang digunakan. Dalam pekerjaan manual, sumbu Z sangat berkaitan dengan kedalaman pemakanan. Ketika operator menaikkan meja atau menurunkan posisi alat potong, jarak antara pisau frais dan permukaan benda kerja berubah. Jarak itulah yang menentukan seberapa tebal material yang akan dibuang dalam satu lintasan.

Ketiga sumbu tersebut tidak boleh dipahami sebagai arah gerak yang terpisah secara kaku. Dalam praktik pemesinan, sumbu X, Y, dan Z saling berhubungan. Sumbu X dapat digunakan

sebagai arah pemakanan utama, sumbu Y untuk menentukan posisi lintasan berikutnya, dan sumbu Z untuk menentukan kedalaman potong. Pada pekerjaan sederhana seperti meratakan permukaan, kombinasi ini mungkin terlihat mudah. Pada pekerjaan yang lebih rumit, seperti membuat kantong atau pocket, ketiga sumbu dapat dipakai secara bertahap untuk menghasilkan bentuk yang sesuai gambar kerja. Ivanov et al. (2024) menjelaskan bahwa metode pemesinan seperti turning, drilling, milling, grinding, dan pembuatan roda gigi memiliki prinsip, aplikasi, serta kondisi kerja yang berbeda. Dalam konteks mesin frais, perbedaan paling mendasar terletak pada cara alat potong dan benda kerja bergerak relatif satu sama lain. Pemahaman terhadap sistem sumbu membantu kita melihat bahwa proses frais bukan sekadar memutar pisau dan menggeser meja, melainkan mengendalikan hubungan geometris antara alat potong, benda kerja, dan bidang yang ingin dibentuk.

Pisau frais berputar pada spindle sebagai gerak utama. Benda kerja dijepit pada ragum di atas meja mesin. Meja bergerak ke kanan dan kiri sebagai sumbu X, bergerak maju dan mundur sebagai sumbu Y, serta bergerak naik dan turun sebagai sumbu Z. Sumbu Z digunakan untuk mengatur kedalaman potong. Alur gerakannya dapat dibaca sebagai berikut: sumbu X mengatur lintasan memanjang, sumbu Y mengatur posisi melintang, dan sumbu Z mengatur kedalaman penyayatan. Sumbu X sering menjadi arah kerja yang paling mudah diamati pada mesin frais horizontal maupun vertikal. Pada saat operator melakukan face milling pada permukaan blok baja, meja mesin dapat digerakkan sepanjang sumbu X agar seluruh permukaan benda kerja melewati pisau frais. Bila gerak X terlalu cepat, beban pada setiap gigi pisau meningkat dan permukaan dapat menjadi kasar. Bila gerakannya terlalu lambat, waktu pengerjaan menjadi lebih lama dan gesekan dapat membuat pisau cepat panas.

Sumbu Y memiliki peran penting dalam penentuan posisi potong. Misalnya, ketika sebuah pelat memerlukan dua alur sejajar, operator tidak cukup hanya menjalankan meja pada sumbu X. Setelah alur pertama selesai, meja perlu digeser pada sumbu Y sesuai jarak antaralur yang ditentukan dalam gambar kerja. Pergeseran ini harus dilakukan dengan hati-hati, karena kesalahan posisi pada sumbu Y akan langsung mengubah jarak geometris antarfitur benda kerja. Sumbu Z menuntut perhatian lebih besar

karena berkaitan dengan kedalaman potong dan beban pemotongan. Kedalaman potong yang terlalu besar dapat membuat gaya potong meningkat, memicu getaran, mempercepat keausan pisau, atau bahkan menyebabkan benda kerja bergeser dari ragum. Sebaliknya, kedalaman potong yang terlalu kecil memang lebih aman, tetapi waktu pemesinan menjadi lebih panjang. Dalam produksi nyata, pilihan ini selalu menjadi kompromi antara produktivitas, kualitas permukaan, umur alat, dan kemampuan mesin.

Trinh (2024) menegaskan bahwa kekasaran permukaan dalam proses pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Hubungan ini sangat terasa pada mesin frais. Gerak pada sumbu X dan Y menentukan lintasan serta gerak makan, sedangkan sumbu Z menentukan kedalaman potong. Ketika ketiganya tidak diatur dengan baik, hasil permukaan dapat menjadi bergelombang, kasar, atau tidak rata. Jadi, kualitas permukaan bukan hadiah dari semesta, melainkan hasil dari pengaturan teknis yang konsisten. Tabel berikut memperlihatkan hubungan antara setiap sumbu operasi pada mesin frais, arah gerakannya, fungsi teknisnya, serta contoh penerapannya dalam pekerjaan pemesinan.

Tabel 8. Hubungan sumbu operasi mesin frais dengan fungsi teknisnya

Sumbu operasi	Arah gerak	Fungsi teknis	Contoh penerapan	Risiko jika salah pengaturan
X	Kanan dan kiri meja mesin	Mengatur lintasan pemakanan memanjang	Meratakan permukaan balok sepanjang benda kerja	Permukaan tidak merata atau panjang bidang tidak sesuai
Y	Depan dan belakang meja mesin	Mengatur posisi melintang benda kerja	Menentukan jarak alur dari tepi benda kerja	Alur bergeser dari posisi gambar kerja
Z	Naik dan turun meja atau kepala mesin	Mengatur kedalaman potong	Menentukan tebal material yang disayat	Gaya potong berlebih, getaran, atau ukuran kedalaman

				salah
Kombinasi X dan Y	Gerak bidang horizontal	Membentuk bidang, alur, dan posisi fitur	Membuat beberapa alur sejajar pada pelat	Kesalahan jarak, kesalahan kesikuan, atau bentuk tidak simetris
Kombinasi X, Y, dan Z	Gerak ruang tiga dimensi	Membentuk permukaan bertingkat atau kantong	Membuat pocket dangkal pada blok aluminium	Kedalaman dan posisi fitur tidak konsisten

Tabel tersebut menunjukkan bahwa sistem sumbu pada mesin frais bukan sekadar penamaan arah. Setiap sumbu mempunyai akibat langsung terhadap bentuk benda kerja. Sumbu X dan Y menentukan posisi bidang kerja, sedangkan sumbu Z menentukan seberapa dalam alat potong masuk ke material. Bila pengaturan ketiganya tidak selaras, benda kerja mungkin tetap tampak selesai, tetapi tidak memenuhi ukuran dan bentuk yang diminta. Pada mesin frais manual, pengaturan sumbu dilakukan melalui roda tangan, tuas, skala, atau sistem penggerak otomatis meja. Operator membaca skala pada mesin, mengatur posisi benda kerja, lalu menjalankan pemakanan sesuai kebutuhan. Di sinilah keterampilan tangan dan pemahaman teori bertemu. Operator yang hanya mengandalkan rasa dapat bekerja cepat, tetapi berisiko kehilangan ketelitian. Operator yang hanya membaca teori tanpa memahami respons mesin juga mudah bingung ketika suara pemotongan berubah atau benda kerja mulai bergetar.

Dalam mesin frais modern berbasis computer numerical control atau CNC, sistem sumbu X, Y, dan Z dikendalikan oleh program. Setiap gerakan alat potong atau meja diterjemahkan ke dalam koordinat numerik. Program menentukan posisi awal, lintasan pemotongan, kedalaman, kecepatan makan, dan urutan operasi. Meski terlihat lebih otomatis, prinsip dasarnya tetap sama. Mesin tetap harus memahami arah X, Y, dan Z, hanya saja manusia kini memberi instruksi melalui kode dan perangkat lunak, bukan melalui roda tangan secara langsung. Penggunaan koordinat pada mesin CNC milling memperlihatkan pentingnya sistem acuan. Sebelum pemotongan dimulai, operator perlu menetapkan titik nol benda kerja atau work zero. Titik ini menjadi acuan bagi

seluruh gerakan mesin. Bila titik nol salah ditentukan, seluruh lintasan pahat akan bergeser. Kesalahan ini dapat merusak benda kerja, mematahkan alat potong, atau menghasilkan komponen yang tidak dapat dipakai. Mesin tidak punya intuisi untuk merasa kasihan, ia hanya patuh pada koordinat yang diberikan.

Sistem sumbu juga berkaitan dengan urutan pengerjaan. Ketika sebuah blok logam perlu dibuat permukaan atas rata, kemudian dibuat alur, lalu dibuat lubang, operator harus memikirkan urutan gerakan dan acuan bidangnya. Permukaan yang lebih dahulu diratakan dapat menjadi referensi untuk operasi berikutnya. Setelah itu, posisi alur dapat ditentukan melalui sumbu X dan Y, sementara kedalamannya ditentukan melalui sumbu Z. Urutan yang keliru dapat membuat acuan hilang atau menyulitkan pencekaman berikutnya. Dalam pekerjaan frais vertikal, sumbu Z sering terlihat melalui gerakan naik turun meja atau gerakan kepala mesin. Pada saat menggunakan pisau end mill, operator menurunkan alat potong atau menaikkan meja sampai pisau menyentuh permukaan benda kerja. Setelah titik sentuh diketahui, kedalaman potong dapat ditentukan secara bertahap. Cara ini perlu dilakukan dengan hati-hati, terutama pada benda kerja yang permukaannya belum rata atau materialnya keras.

Pada frais horizontal, pemahaman sumbu juga tetap diperlukan meskipun posisi pisau frais berbeda. Pisau frais dipasang pada arbor yang mendatar, sementara benda kerja tetap digerakkan melalui meja mesin. Sumbu X dapat digunakan untuk menjalankan pemakanan memanjang, sumbu Y untuk mengatur posisi melintang terhadap pisau, dan sumbu Z untuk menentukan kedalaman pemotongan. Perbedaan terletak pada orientasi alat potong dan jenis operasi yang lebih sering dilakukan, seperti slab milling atau pemotongan alur tertentu. Sistem sumbu X, Y, dan Z juga membantu menjelaskan mengapa mesin frais dapat menghasilkan bentuk prisma. Bentuk prisma adalah bentuk yang tersusun dari bidang-bidang datar, alur, bahu, kantong, atau permukaan bertingkat. Contohnya dapat ditemukan padaudukan bantalan, blok penjepit, rumah komponen kecil, atau pelat dasar mesin. Semua bentuk tersebut membutuhkan pengaturan posisi dan kedalaman yang tidak cukup dijelaskan oleh satu sumbu saja.

Dalam praktik bengkel, kesalahan umum pada pemahaman sumbu sering terjadi ketika operator pemula belum membedakan arah meja dari arah pahat. Karena pisau frais tampak diam pada

posisinya, sementara meja bergerak membawa benda kerja, arah pemakanan kadang terasa berlawanan dari intuisi awal. Misalnya, ketika meja digerakkan ke kanan, benda kerja ikut bergerak ke kanan terhadap pisau. Efek pemotongan yang terlihat pada benda kerja perlu dibaca dari gerak relatif, bukan hanya dari arah putaran roda tangan. Gerak relatif menjadi konsep penting dalam sistem sumbu mesin frais. Pemotongan terjadi bukan karena benda kerja bergerak sendirian atau pisau berputar sendirian, melainkan karena ada perbedaan gerak antara keduanya. Pisau frais berputar, benda kerja bergerak translasi, lalu mata potong masuk dan keluar dari material. Hubungan relatif ini menentukan arah geram, gaya potong, dan bekas permukaan yang terbentuk.

Karabacak (2024) menunjukkan bahwa proses frais modern dapat dianalisis melalui sinyal multi sensor untuk memperkirakan keausan pahat pada berbagai kondisi operasi. Walaupun kajian semacam ini sudah memasuki wilayah pemantauan berbasis data, dasar mekanisnya tetap terkait dengan sistem gerak mesin. Perubahan gaya, getaran, dan suara pemotongan sering muncul karena hubungan antara lintasan sumbu, parameter pemotongan, dan kondisi alat potong. Sensor hanya membaca gejala yang sudah terjadi dalam proses fisik. Gerak sumbu X dan Y juga berhubungan dengan gerak makan atau feed motion. Pada mesin frais, gerak makan dapat dinyatakan sebagai gerak meja per satuan waktu atau gerak makan per gigi pisau. Semakin besar gerak makan, semakin tebal geram yang diambil oleh setiap mata potong. Jika gerak makan terlalu besar, gaya potong meningkat dan permukaan dapat menjadi kasar. Jika terlalu kecil, proses menjadi lambat dan gesekan dapat lebih dominan daripada penyayatan bersih.

Sumbu Z memiliki hubungan langsung dengan gaya pemotongan karena kedalaman potong menentukan luas penampang geram. Dalam proses pengasaran atau roughing, kedalaman potong dapat dibuat lebih besar agar material cepat terbuang. Pada proses akhir atau finishing, kedalaman potong biasanya dibuat lebih kecil agar ukuran dan permukaan lebih terkendali. Hata et al. (2023) menunjukkan bahwa parameter pemotongan pada proses CNC wet milling baja tahan karat berpengaruh terhadap kekasaran permukaan, termasuk peran kedalaman potong dalam optimasi hasil pemesinan. Pengaturan sumbu juga tidak dapat dipisahkan dari pencekaman benda kerja. Ketika meja bergerak pada sumbu X atau Y, benda kerja ikut

menerima gaya akibat kontak dengan pisau frais. Bila ragam tidak mengikat benda kerja dengan kuat, benda kerja dapat bergeser. Bila posisi benda kerja terlalu tinggi di atas ragam, gaya potong dapat memicu getaran. Sumbu yang sudah diatur dengan teliti menjadi tidak berarti jika benda kerja berpindah saat disayat. Logika sederhana, tetapi entah mengapa masih sering menjadi sumber benda kerja gagal.

Selain pencekaman, kondisi mesin juga memengaruhi ketelitian gerak sumbu. Meja yang aus, celah balik atau backlash pada ulir penggerak, serta kelonggaran pada sistem pengarah dapat membuat posisi aktual berbeda dari bacaan skala. Pada mesin konvensional, operator harus memahami adanya celah balik ini ketika mengubah arah gerak. Pada mesin CNC, kompensasi dapat dilakukan melalui sistem kontrol, tetapi pemeriksaan mekanis tetap diperlukan agar gerak mesin tidak menyimpang. Sistem sumbu X, Y, dan Z juga menjadi dasar untuk memahami operasi frais naik atau up milling dan frais turun atau down milling. Kedua metode tersebut tidak hanya bergantung pada arah putaran pisau, tetapi juga pada arah gerak meja terhadap titik kontak mata potong. Jika operator tidak memahami arah sumbu dan gerak relatif, ia akan sulit membedakan apakah proses yang sedang dilakukan termasuk up milling atau down milling. Padahal pilihan metode ini memengaruhi gaya potong, kecenderungan benda kerja terangkat, dan kualitas permukaan.

Dalam konteks efisiensi produksi, sistem sumbu membantu operator merencanakan lintasan pemesinan secara lebih masuk akal. Gerakan yang terlalu banyak tanpa tujuan akan menambah waktu kosong. Gerakan yang terlalu pendek tetapi berulang ulang dapat memperpanjang waktu kerja. Pada produksi massal atau semi massal, urutan lintasan pada sumbu X, Y, dan Z perlu dirancang agar material terbuang efisien tanpa mengorbankan ketelitian. Wang et al. (2023) menjelaskan bahwa pemesinan berkelanjutan perlu melihat integrasi peralatan, proses, dan strategi, termasuk optimasi proses dan pengendalian energi. Pada pembelajaran dasar, sistem sumbu sebaiknya dilatih melalui contoh benda kerja sederhana. Sebuah balok aluminium dapat dijepit pada ragam, lalu permukaan atasnya diratakan dengan gerak X. Setelah itu, meja digeser pada sumbu Y untuk membuat lintasan berikutnya. Kedalaman potong diatur melalui sumbu Z. Dari latihan sederhana

ini, kita dapat melihat bagaimana bidang datar terbentuk melalui pengulangan lintasan yang teratur.

Contoh lain dapat diberikan pada pembuatan alur lurus. Mula mula benda kerja diposisikan terhadap pisau menggunakan sumbu X dan Y. Setelah posisi alur sesuai dengan gambar kerja, sumbu Z digunakan untuk menurunkan pisau atau menaikkan meja sampai kedalaman tertentu. Kemudian pemakanan dijalankan sepanjang sumbu X. Jika alur perlu diperlebar, operator dapat menggeser meja sedikit pada sumbu Y dan mengulang lintasan. Langkah seperti ini menunjukkan bahwa bentuk sederhana pun sering lahir dari kombinasi sumbu yang terencana. Dalam mesin frais CNC, kombinasi sumbu dapat berkembang menjadi lintasan yang jauh lebih kompleks. Mesin dapat menjalankan interpolasi linier atau melengkung dengan menggerakkan dua atau tiga sumbu secara bersamaan. Walaupun pembahasan ini belum masuk pada pemrograman CNC, pemahaman dasarnya sudah mulai terlihat pada mesin frais konvensional. Setiap bentuk yang tampak rumit pada dasarnya tersusun dari pengendalian posisi, arah gerak, dan kedalaman.

Sistem sumbu juga penting untuk pemeriksaan hasil. Ketika ukuran benda kerja menyimpang, operator perlu menelusuri pada sumbu mana kesalahan terjadi. Jika panjang bidang salah, kemungkinan masalah berada pada pengaturan lintasan X. Jika posisi alur meleset dari tepi benda kerja, kesalahan mungkin terjadi pada sumbu Y. Jika kedalaman alur tidak sesuai, sumber masalah lebih dekat pada pengaturan sumbu Z. Cara berpikir seperti ini membuat proses koreksi lebih sistematis, bukan sekadar menyalahkan mesin sambil berharap benda kerja berikutnya lebih sopan. Ketelitian sumbu pada mesin frais perlu dikaitkan dengan alat ukur. Skala mesin membantu mengatur posisi, tetapi hasil tetap harus diperiksa dengan jangka sorong, mikrometer, dial indikator, atau alat ukur lain sesuai kebutuhan. Untuk pekerjaan yang menuntut kesikuan, dial indikator dapat digunakan untuk memeriksa kesejajaran ragum terhadap arah gerak meja. Jika ragum tidak sejajar dengan sumbu X, gerak pemakanan yang benar sekalipun dapat menghasilkan bidang atau alur yang miring.

Pembacaan gambar kerja juga menjadi bagian dari pemahaman sumbu. Gambar kerja biasanya menyajikan ukuran panjang, lebar, tinggi, jarak lubang, posisi alur, dan kedalaman fitur. Semua ukuran ini perlu diterjemahkan ke dalam gerakan X,

Y, dan Z. Panjang benda kerja sering berkaitan dengan arah X, lebar atau posisi melintang berkaitan dengan Y, dan tinggi atau kedalaman berkaitan dengan Z. Hubungan ini tidak selalu mutlak, karena orientasi benda kerja dapat berubah sesuai cara pengecaman, tetapi pola dasarnya tetap membantu. Ketika benda kerja diputar atau dicekam ulang, acuan sumbu dapat berubah. Inilah alasan mengapa proses frais perlu direncanakan sebelum penyayatan dimulai. Operator harus menentukan bidang mana yang menjadi referensi, sisi mana yang dijadikan nol, dan urutan mana yang paling aman untuk menjaga ketelitian. Jika benda kerja sering dilepas dan dipasang ulang tanpa acuan yang jelas, peluang kesalahan posisi akan meningkat. Mesin boleh presisi, tetapi prosedur yang berantakan tetap bisa menghasilkan benda kerja yang mengecewakan.

Sistem sumbu X, Y, dan Z pada mesin frais juga memberi dasar bagi pembahasan klasifikasi mesin frais horizontal dan vertikal. Pada mesin frais horizontal, orientasi spindle dan arbor berbeda dari mesin frais vertikal, tetapi sistem gerak meja tetap dapat dibaca melalui sumbu X, Y, dan Z. Pada mesin frais vertikal, arah Z sering lebih mudah dikaitkan dengan gerakan alat potong terhadap permukaan benda kerja. Perbedaan ini akan lebih mudah dipahami jika kita sudah memiliki gambaran tentang fungsi setiap sumbu. Dari sisi keselamatan, pemahaman sumbu membantu operator menghindari tabrakan alat potong dengan benda kerja, ragum, atau meja mesin. Kesalahan pengaturan sumbu Z dapat membuat pisau masuk terlalu dalam. Kesalahan sumbu X atau Y dapat membawa benda kerja menabrak sisi pisau atau perlengkapan cekam. Pada mesin CNC, kesalahan koordinat bahkan dapat terjadi sangat cepat karena mesin bergerak otomatis sesuai program. Karena itu, uji lintasan kosong atau pemeriksaan posisi awal sering menjadi langkah yang penting. Sistem sumbu pada mesin frais bukan sekadar konsep geometris. Ia adalah dasar pengendalian proses. Melalui sumbu X, operator menentukan arah lintasan memanjang. Melalui sumbu Y, operator mengatur posisi melintang. Melalui sumbu Z, operator menentukan kedalaman potong. Ketiga sumbu ini membentuk kerangka kerja yang membuat mesin frais mampu menghasilkan bidang, alur, kantong, dan permukaan bertingkat secara terukur.

C. Perbedaan Proses Frais Horizontal dan Frais Vertikal

Perbedaan proses frais horizontal dan frais vertikal perlu dipahami sebagai bagian dari cara membaca orientasi kerja mesin frais. Keduanya sama-sama termasuk proses pemesinan dengan alat potong bermata jamak atau *multi point cutting tool*. Pada kedua proses ini, *cutter* berputar sebagai gerak utama, sementara benda kerja bergerak mengikuti meja mesin melalui sumbu X, Y, dan Z. Perbedaan terletak pada posisi poros pemegang alat potong, jenis operasi yang paling sesuai, arah gaya pemotongan, cara pemasangan *cutter*, serta kebutuhan penopang dan pencekaman. Mesin frais horizontal dan mesin frais vertikal tidak boleh dipahami hanya sebagai dua bentuk mesin yang berbeda tampilan. Orientasi *spindle* memengaruhi cara pisau frais menyentuh benda kerja. Pada frais horizontal, sumbu putar *cutter* berada mendatar. Pada frais vertikal, sumbu putar *cutter* berada tegak. Perbedaan arah ini membuat bidang kerja, jenis pisau, arah pembebanan, dan kenyamanan pengamatan proses menjadi tidak sama. Kalau semua pekerjaan dipaksa memakai satu jenis mesin, hasilnya mungkin tetap ada, tetapi jalannya bisa berputar-putar seperti keputusan teknis yang kehilangan akal sehat.

Frais horizontal ditandai oleh posisi arbor atau poros pemegang *cutter* yang sejajar dengan meja mesin. Pada susunan ini, pisau frais biasanya dipasang pada arbor yang memanjang secara horizontal. Arbor tersebut berputar dan membawa pisau frais menyayat benda kerja yang dijepit pada meja. Karena posisi arbor mendatar, proses ini sangat sesuai untuk pekerjaan yang membutuhkan penyayatan sepanjang permukaan mendatar, pemotongan alur, pemotongan celah, pembuatan permukaan lebar dengan *slab cutter*, serta pekerjaan yang memerlukan beberapa pisau pada satu arbor. Frais vertikal memiliki posisi *spindle* atau pemegang *cutter* yang tegak terhadap meja mesin. Alat potong bergerak berputar pada arah vertikal, sedangkan benda kerja dapat digerakkan melalui meja ke arah X dan Y. Sumbu Z digunakan untuk mengatur kedalaman pemotongan. Susunan ini memudahkan pekerjaan seperti *face milling*, *end milling*, pembuatan alur T, pembuatan kantong, pembentukan permukaan bertingkat, serta pekerjaan kontur sederhana. Pada banyak bengkel pendidikan, frais vertikal sering terasa lebih mudah diamati karena operator dapat melihat posisi ujung *cutter* terhadap permukaan benda kerja dengan lebih langsung.

Dari sisi gerak dasar, kedua proses tetap mengikuti prinsip yang sama. Gerak utama berasal dari putaran *cutter*. Gerak makan berasal dari gerakan meja yang membawa benda kerja melewati alat potong. Kedalaman potong diatur melalui sumbu Z. Perbedaannya terletak pada bagaimana gerak tersebut diterapkan terhadap orientasi alat potong. Pada frais horizontal, bidang kontak sering terjadi pada sisi keliling pisau. Pada frais vertikal, kontak dapat terjadi pada muka bawah, sisi samping, atau kombinasi keduanya, tergantung jenis *cutter* yang digunakan. Perbedaan orientasi *spindle* membuat pola gaya pemotongan ikut berubah. Pada frais horizontal, gaya potong dapat bekerja kuat pada arah melintang atau menekan benda kerja terhadap meja, bergantung pada jenis operasi dan arah pemakanan. Karena arbor dapat cukup panjang, kekakuan arbor menjadi perhatian penting. Pada frais vertikal, gaya potong sering bekerja lebih langsung ke arah meja melalui sumbu vertikal, terutama pada pekerjaan *face milling*. Namun pada *end milling*, gaya samping juga tetap muncul dan dapat menyebabkan lenturan pahat jika *cutter* terlalu panjang keluar dari pemegangnya.

Pada frais horizontal, benda kerja biasanya dipasang pada ragam, klem, atau perlengkapan cekam di atas meja mesin. Pisau frais yang berputar pada arbor mendatar akan menyayat benda kerja sesuai arah gerak meja. Proses ini cocok untuk pekerjaan yang membutuhkan bidang panjang, alur sejajar, atau pemotongan dengan pisau berbentuk cakram. Misalnya, ketika sebuah blok baja perlu dibuat alur lurus memanjang, *side milling cutter* atau *slitting cutter* pada mesin frais horizontal dapat menjadi pilihan yang rasional. Mesin tidak perlu dipaksa menjadi serba bisa hanya karena operator malas mengganti strategi. Pada frais vertikal, benda kerja juga dijepit pada meja, tetapi posisi *cutter* yang tegak memberi keluwesan untuk pekerjaan permukaan atas, alur, kantong, dan kontur. *End mill* dapat masuk ke material dari arah atas, lalu digerakkan mengikuti lintasan X dan Y. Hal ini membuat frais vertikal sangat berguna untuk pekerjaan yang membutuhkan posisi fitur lebih bervariasi. Pelat yang memerlukan lubang awal, alur pendek, kantong dangkal, atau permukaan bertingkat biasanya lebih mudah dikerjakan pada mesin frais vertikal.

Operasi frais horizontal banyak digunakan pada pekerjaan *grooving*, *slitting*, *slab milling*, *angle milling*, *form milling*, *straddle milling*, dan *gear milling*. Nama nama operasi ini

menunjukkan bahwa frais horizontal memiliki keunggulan pada pekerjaan yang memanfaatkan sisi keliling pisau frais dan kestabilan arbor. Pada pekerjaan tertentu, beberapa pisau dapat dipasang pada satu arbor untuk menghasilkan dua bidang atau lebih dalam satu kali penyayatan. Ini membuat frais horizontal menarik untuk pekerjaan berulang yang bentuknya sesuai. Pada *slab milling*, pisau frais silindris menyayat permukaan benda kerja menggunakan sisi kelilingnya. Operasi ini biasanya dilakukan pada mesin frais horizontal. Benda kerja bergerak melewati pisau, sementara gigi gigi pisau secara bergantian membuang material dari permukaan. Proses seperti ini cocok untuk meratakan bidang datar yang cukup panjang. Permukaan akhir dipengaruhi oleh kecepatan potong, gerak makan, kedalaman potong, jumlah gigi pisau, serta kekakuan pencekaman.

Operasi *grooving* pada frais horizontal digunakan untuk membuat alur pada permukaan atau sisi benda kerja. Pisau frais yang dipakai dapat berupa pisau alur dengan lebar tertentu. Ketepatan lebar alur sangat bergantung pada lebar pisau, posisi meja, dan kestabilan proses. Bila benda kerja bergeser sedikit saja, alur dapat berubah posisi. Kalau alur itu nantinya dipakai sebagai kedudukan pasak atau jalur komponen lain, kesalahan kecil dapat berubah menjadi masalah perakitan yang cukup menyebalkan. Operasi *slitting* menggunakan pisau tipis berbentuk cakram untuk memotong atau membelah benda kerja. Proses ini lebih dekat dengan pekerjaan pemisahan material daripada sekadar meratakan permukaan. Karena pisau yang digunakan relatif tipis, kestabilan arbor dan pengaturan pemakanan menjadi penting. Pemakanan terlalu besar dapat membuat pisau melentur atau patah. Pemakanan terlalu kecil dapat memperpanjang waktu pengerjaan dan meningkatkan gesekan.

Pada *straddle milling*, dua pisau frais dipasang pada satu arbor dengan jarak tertentu untuk menyayat dua sisi benda kerja secara bersamaan. Operasi ini menjadi salah satu contoh keunggulan frais horizontal. Dengan pengaturan yang benar, dua bidang sejajar dapat dikerjakan dalam satu lintasan. Cara ini berguna pada pekerjaan seperti pembentukan sisi pada batang atau blok tertentu. Namun, pengaturannya tidak boleh asal. Jarak antar pisau harus sesuai ukuran yang diminta, dan pencekaman benda kerja harus cukup kuat untuk menahan gaya dari dua sisi. Frais horizontal juga sering digunakan untuk *gear milling* dengan

bantuan kepala pembagi. Pada pekerjaan ini, pisau khusus digunakan untuk membentuk profil gigi roda gigi. Benda kerja diputar secara bertahap menggunakan mekanisme pembagi, lalu setiap celah gigi dikerjakan dengan lintasan frais. Proses ini menuntut kesesuaian antara modul roda gigi, bentuk pisau, jumlah gigi, dan pembagian sudut. Satu kesalahan pembagian saja cukup untuk membuat roda gigi menjadi karya seni abstrak, bukan komponen transmisi.

Frais vertikal memiliki variasi operasi yang berbeda. Beberapa operasi yang umum dijumpai adalah *face milling*, *T slot milling*, *ball nose milling*, dan *end milling*. Operasi tersebut memanfaatkan posisi *spindle* yang tegak sehingga alat potong dapat menyayat permukaan dari atas atau dari sisi. Kelebihan frais vertikal terletak pada fleksibilitas lintasan, kemudahan pengamatan, dan kesesuaian untuk pekerjaan permukaan atas, kantong, alur pendek, serta kontur sederhana. Pada *face milling*, pisau frais muka digunakan untuk meratakan permukaan atas benda kerja. Diameter pisau biasanya lebih besar daripada lebar permukaan yang akan dikerjakan, atau setidaknya cukup untuk menyapu bidang secara efisien. Gigi pisau menyayat permukaan secara bergantian, sehingga hasil bidang dapat relatif rata jika parameter dipilih dengan baik. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kualitas permukaan hasil pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Prinsip ini terasa langsung pada *face milling*, karena bekas lintasan pisau mudah terlihat pada permukaan akhir.

Pada *end milling*, alat potong berbentuk *end mill* dapat menyayat menggunakan ujung dan sisi sampingnya. Operasi ini banyak dipakai untuk membuat alur, bahu, kontur luar, kantong, dan permukaan bertingkat. Keunggulan *end milling* terletak pada keluwesan lintasannya. Dengan mengatur gerak X dan Y, operator dapat membuat bentuk yang lebih bervariasi daripada sekadar bidang lurus. Pada mesin CNC, keunggulan ini menjadi semakin besar karena lintasan *end mill* dapat diprogram mengikuti koordinat yang kompleks. Operasi *T slot milling* digunakan untuk membuat alur berbentuk T. Biasanya proses dimulai dengan membuat alur lurus terlebih dahulu, kemudian dilanjutkan dengan pisau T untuk memperlebar bagian bawah alur. Proses ini lebih mudah dilakukan pada frais vertikal karena pahat dapat diarahkan dari atas ke benda kerja. Namun, pemakanan tetap harus hati-hati.

Bagian kepala pisau T bekerja di dalam alur, sehingga ruang gerak terbatas dan risiko gesekan lebih besar.

Pada *ball nose milling*, ujung *cutter* berbentuk radius atau setengah bola. Pisau ini digunakan untuk membuat permukaan lengkung, kontur halus, atau bentuk tiga dimensi tertentu. Dalam praktik modern, *ball nose end mill* banyak digunakan pada pekerjaan cetakan, dies, komponen aerodinamis, dan permukaan kontur. Karena bentuk ujungnya membulat, kualitas permukaan sangat dipengaruhi oleh jarak lintasan, gerak makan, kedalaman potong, dan kekakuan alat. Kalau lintasan terlalu renggang, permukaan akan menunjukkan bekas jalur yang jelas, seperti peta topografi yang tidak diminta. Dari sisi gaya potong, frais horizontal sering memberi keuntungan pada pekerjaan berat karena arbor dan pisau dapat disusun untuk penyayatan lebar. Namun, arbor panjang dapat mengalami lenturan jika tidak ditopang dengan benar. Karena itu, pemasangan *arbor support* menjadi penting. Tanpa penopang, putaran arbor dapat tidak seimbang, getaran meningkat, dan permukaan benda kerja memburuk. Pada titik ini, mesin tidak sedang rewel. Ia hanya menunjukkan bahwa batang panjang yang berputar memang butuh dukungan.

Pada frais horizontal, penggunaan *arbor support* membantu menjaga kestabilan putaran pisau. Penopang ini mengurangi kemungkinan lenturan dan ketidakseimbangan saat arbor membawa *cutter*. Kebutuhan ini lebih terasa ketika pisau dipasang jauh dari kolom mesin atau ketika beberapa pisau dipasang sekaligus. Jika arbor tidak stabil, gaya potong dapat berubah ubah, suara pemesian menjadi kasar, dan bekas potong tampak tidak rata. Dalam pekerjaan presisi, kondisi seperti itu tidak dapat dibiarkan. Pada frais vertikal, perhatian utama sering berpindah ke kekakuan *tool holder*, panjang penjururan *cutter*, dan kestabilan gerak sumbu Z. *End mill* yang terlalu panjang keluar dari pemegangnya mudah melentur saat menerima gaya samping. Lenturan ini dapat menyebabkan ukuran alur melebar, permukaan bergelombang, atau pahat aus lebih cepat. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa keausan pahat pada proses frais dapat diperkirakan melalui analisis sinyal multi sensor dan algoritma *machine learning*. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa gaya, getaran, dan kondisi pemotongan pada frais tidak hanya menjadi masalah praktis, tetapi juga dapat dibaca sebagai data proses.

Kekakuan mesin menjadi faktor pembeda yang sering muncul dalam pemilihan proses. Frais horizontal umumnya kuat untuk pekerjaan bidang panjang dan penyayat yang relatif berat, terutama bila arbor ditopang dengan baik. Frais vertikal lebih fleksibel untuk pekerjaan bentuk, tetapi alat potong yang kecil atau panjang dapat lebih mudah melentur. Pemilihan mesin perlu mempertimbangkan ukuran benda kerja, arah pemakanan, jenis pahat, kedalaman potong, serta kualitas permukaan yang diminta. Sederhananya, mesin yang tepat membuat proses lebih tenang. Mesin yang salah membuat bengkel terdengar seperti sedang menguji kesabaran logam. Pencekaman benda kerja juga perlu dibaca berbeda pada kedua proses. Pada frais horizontal, gaya potong dapat mendorong benda kerja dalam arah yang cukup kuat terhadap ragam atau klem. Benda kerja harus diletakkan rendah, ditopang dengan paralel bila diperlukan, dan dijepit sedekat mungkin dengan area pemotongan. Pada frais vertikal, benda kerja juga harus stabil, tetapi pengaturan sering lebih menekankan akses alat potong dari arah atas. Jika benda kerja terlalu tinggi keluar dari ragam, getaran akan lebih mudah muncul.

Pemilihan *cutter* menjadi penentu penting. Frais horizontal memakai pisau yang sering bekerja melalui kelilingnya, seperti *slab cutter*, *side cutter*, dan *slitting cutter*. Frais vertikal memakai alat seperti *face mill* dan *end mill* yang dapat menyayat melalui muka dan sisi. Bentuk pisau menentukan arah geram keluar, arah gaya, kualitas permukaan, dan batas gerak makan yang aman. Pisau yang salah tidak hanya memperlambat pekerjaan, tetapi juga dapat merusak benda kerja atau memperpendek umur pahat. Parameter pemotongan tetap menjadi dasar pada kedua proses. Kecepatan potong, putaran *spindle*, gerak makan per gigi, kedalaman potong, dan waktu pemesinan harus ditentukan sesuai material benda kerja dan jenis *cutter*. Pada frais, gerak makan per gigi menjadi penting karena setiap gigi pisau menerima beban potong secara bergantian. Jika gerak makan terlalu besar, beban tiap gigi meningkat. Jika terlalu kecil, proses lambat dan pahat dapat lebih banyak bergesekan daripada menyayat.

Kecepatan potong pada frais dihitung berdasarkan diameter *cutter*, bukan diameter benda kerja seperti pada proses bubut. Hal ini menunjukkan perbedaan prinsip gerak utama. Pada bubut, benda kerja berputar. Pada frais, alat potong yang berputar. Diameter *cutter* memengaruhi jarak tempuh titik potong dalam satu

putaran. Karena itu, diameter pisau dan putaran *spindle* perlu dipilih bersama. Ivanov et al. (2025) menempatkan metode pemesinan sebagai proses yang harus dipahami melalui karakter gerak, penggunaan alat potong, dan kondisi kerja yang berbeda. Gerak makan pada frais horizontal dan vertikal sama-sama memengaruhi kualitas permukaan. Pada *slab milling*, gerak makan menentukan jarak bekas potongan pada bidang datar. Pada *face milling*, gerak makan menentukan pola bekas sapuan pisau pada permukaan atas. Pada *end milling*, gerak makan ikut menentukan kualitas dinding alur dan ukuran kontur. Trinh (2024) menjelaskan bahwa pemilihan parameter pemotongan dapat membantu memperoleh kekasaran permukaan yang diinginkan dan mengurangi biaya proses. Artinya, gerak makan bukan angka pelengkap. Ia adalah bagian dari kualitas.

Pengaruh kualitas permukaan pada frais horizontal dan vertikal dapat berbeda karena bentuk kontak alat potong juga berbeda. Pada frais horizontal dengan *slab cutter*, permukaan dibentuk oleh gigi-gigi pada keliling pisau. Pada frais vertikal dengan *face mill*, permukaan atas dibentuk oleh kombinasi gigi muka dan sisi alat potong. Pada *end mill*, dinding dan dasar alur dapat terbentuk dalam satu proses. Bila pahat aus, gaya meningkat, panas bertambah, dan permukaan mulai memburuk. Masalahnya sering tampak kecil di awal, lalu tiba-tiba ukuran benda kerja sudah tidak mau bernegosiasi. Keselamatan kerja perlu ditempatkan sebagai bagian dari pembeda proses, bukan bagian tambahan di akhir pekerjaan. Pada frais horizontal, arbor yang berputar mendatar dan pisau cakram dapat menjadi bahaya serius jika pelindung mesin tidak digunakan atau tangan terlalu dekat dengan area potong. Pada frais vertikal, *cutter* yang berputar dari atas juga berbahaya, terutama ketika operator membersihkan geram saat mesin masih bergerak. Geram frais sering tajam dan panas. Mengambilnya dengan tangan kosong adalah keputusan yang hanya tampak berani bagi orang yang belum kenal luka sayat.

Mesin frais horizontal lebih cocok untuk pekerjaan yang panjang, lurus, dan membutuhkan dukungan arbor. Contohnya adalah meratakan permukaan panjang dengan *slab cutter*, memotong celah menggunakan *slitting cutter*, membentuk dua sisi sejajar dengan *straddle milling*, atau membuat roda gigi dengan bantuan kepala pembagi. Mesin ini juga berguna ketika beberapa pisau perlu dipasang pada satu arbor. Dalam kondisi seperti itu,

frais horizontal dapat memberi efisiensi proses yang baik. Mesin frais vertikal lebih cocok untuk pekerjaan yang membutuhkan fleksibilitas lintasan dan pengamatan langsung. Contohnya adalah meratakan permukaan atas blok dengan *face mill*, membuat alur dengan *end mill*, membuat kantong dangkal, membuat alur T, atau membentuk kontur menggunakan *ball nose end mill*. Pada mesin CNC vertikal, fleksibilitas ini menjadi lebih luas karena lintasan alat potong dapat diprogram mengikuti bentuk yang lebih kompleks. Tetap saja, program yang baik tidak akan menyelamatkan pengeleman yang buruk. Komputer juga punya batas kesabaran, meski tidak mengeluh.

Dalam pendidikan mesin perkakas, perbedaan frais horizontal dan frais vertikal sebaiknya dijelaskan melalui hubungan antara bentuk benda kerja dan cara alat potong menyentuh material. Kita tidak cukup hanya menghafal bahwa horizontal berarti mendatar dan vertikal berarti tegak. Yang lebih penting adalah memahami mengapa orientasi itu memengaruhi operasi, pengeleman, gaya potong, dan kualitas hasil. Dengan pemahaman ini, pemilihan mesin menjadi lebih rasional. Dalam praktik industri modern, batas antara frais horizontal dan vertikal dapat menjadi lebih cair karena hadirnya mesin CNC multi sumbu, *machining center*, dan alat bantu pengeleman yang lebih fleksibel. Namun, prinsip dasar orientasi *spindle* tetap relevan. Mesin *horizontal machining center* sering dipilih untuk produksi komponen tertentu karena evakuasi geram lebih baik dan pengeleman dapat dirancang untuk beberapa sisi. Mesin *vertical machining center* banyak digunakan karena akses visual baik, pengaturan relatif mudah, dan cocok untuk banyak pekerjaan umum.

Perbedaan tersebut juga berkaitan dengan efisiensi proses. Wang et al. (2023) menekankan bahwa pemesinan berkelanjutan perlu dilihat melalui integrasi peralatan, proses, dan strategi. Dalam konteks ini, memilih frais horizontal atau vertikal bukan hanya memilih mesin yang tersedia. Keputusan itu berkaitan dengan waktu proses, umur pahat, kebutuhan energi, risiko pengerjaan ulang, dan kualitas permukaan. Proses yang paling efisien bukan selalu yang paling cepat, tetapi yang paling stabil dan menghasilkan komponen sesuai fungsi. Contoh sederhana dapat dilihat pada pembuatan blok baja dengan satu bidang atas rata dan dua alur sejajar. Bidang atas dapat dikerjakan dengan frais vertikal

menggunakan *face mill*. Dua alur sejajar dapat dikerjakan dengan *end mill* pada mesin yang sama, terutama jika jumlah benda kerja sedikit. Namun, bila alur panjang dan jumlah benda kerja banyak, frais horizontal dengan pisau alur atau susunan pisau tertentu dapat lebih efisien. Keputusan teknis seperti ini bergantung pada jumlah produksi, toleransi, alat yang tersedia, dan waktu penyetalan.

Contoh lain muncul pada pembuatan roda gigi sederhana. Frais horizontal dengan kepala pembagi sering lebih sesuai karena pisau roda gigi dapat dipasang pada arbor mendatar, sementara benda kerja diputar bertahap sesuai pembagian jumlah gigi. Jika pekerjaan yang dilakukan adalah membuat kantong dangkal pada pelat, frais vertikal lebih mudah digunakan karena *end mill* dapat bergerak mengikuti lintasan X dan Y serta kedalaman diatur melalui sumbu Z. Dua contoh ini menunjukkan bahwa pilihan horizontal atau vertikal selalu terkait dengan geometri benda kerja. Perbedaan frais horizontal dan frais vertikal bukan hubungan mana yang lebih unggul secara mutlak. Keduanya memiliki kekuatan dan batas kerja. Frais horizontal kuat pada operasi dengan arbor mendatar, bidang panjang, alur sejajar, dan penggunaan pisau cakram atau pisau jamak pada satu arbor. Frais vertikal unggul pada pekerjaan permukaan atas, alur, kantong, kontur, dan operasi yang membutuhkan pengamatan lebih mudah. Memilih salah satu berarti membaca kebutuhan pekerjaan, bukan memenangkan kontes orientasi mesin yang bahkan tidak pernah diminta.

D. Variasi Operasi Frais Horizontal

Variasi operasi frais horizontal menunjukkan bagaimana satu prinsip dasar mesin frais dapat menghasilkan bentuk benda kerja yang berbeda. Pada frais horizontal, arbor sebagai pemegang *cutter* berada pada posisi mendatar. Pisau frais dipasang pada arbor tersebut, kemudian berputar sebagai gerak utama. Benda kerja dijepit pada meja atau ragum, lalu digerakkan secara translasi melewati pisau frais. Dari susunan ini, muncul berbagai operasi seperti frais alur, frais potong, frais mantel, frais sudut, frais profil, *straddle milling*, dan frais gigi. Frais horizontal tidak hanya berbeda dari frais vertikal karena arah porosnya mendatar. Perbedaan itu memengaruhi jenis pisau, cara benda kerja dicekam, arah gaya potong, kebutuhan penopang arbor, dan jenis permukaan yang lebih mudah dibuat. Pada pekerjaan tertentu, frais horizontal dapat memberi keuntungan karena pisau berbentuk silindris atau cakram dapat bekerja stabil sepanjang arbor. Namun, keunggulan

itu hanya muncul jika pemasangan arbor, pencekaman benda kerja, dan pemilihan parameter dilakukan dengan benar. Mesin tidak otomatis menjadi pintar hanya karena bentuknya kokoh, sebuah kekecewaan kecil bagi umat manusia.

Operasi pertama yang umum dikenal pada frais horizontal adalah frais alur atau *grooving*. Operasi ini digunakan untuk membuat alur lurus pada benda kerja. Pisau yang digunakan biasanya memiliki lebar tertentu sesuai ukuran alur yang dikehendaki. Benda kerja bergerak melewati pisau, sementara pisau menyayat material pada jalur yang sama hingga terbentuk celah atau alur. Pekerjaan ini banyak dijumpai pada pembuatan jalur pasak, alur pengarah, atau celah pemasangan komponen. Pada *grooving*, lebar alur sangat dipengaruhi oleh lebar pisau frais dan kekakuan proses. Jika pisau mengalami getaran atau arbor tidak stabil, alur yang dihasilkan dapat melebar, bergelombang, atau tidak seragam. Kedalaman alur juga harus diatur bertahap, terutama pada material yang keras. Memaksakan kedalaman potong terlalu besar memang terlihat gagah selama beberapa detik, lalu biasanya berubah menjadi suara kasar, pahat aus, atau benda kerja yang diam diam menyimpang dari ukuran.

Frais alur juga menuntut pencekaman yang kuat. Saat pisau mulai menyayat, gaya potong bekerja pada benda kerja dan dapat mendorongnya keluar dari posisi semula jika ragum atau klem tidak cukup kuat. Benda kerja harus diletakkan serendah mungkin pada ragum agar tidak mudah bergetar. Bila benda kerja terlalu tinggi keluar dari mulut ragum, gaya pemotongan dapat menghasilkan momen yang membuat posisi benda kerja tidak stabil. Masalah ini tampak sederhana, tetapi cukup sering menjadi penyebab hasil alur tidak presisi. Operasi kedua adalah frais potong atau *slitting*. Operasi ini menggunakan pisau frais tipis berbentuk cakram untuk memotong atau membelah benda kerja. Berbeda dari *grooving* yang bertujuan membuat alur, *slitting* sering digunakan untuk memisahkan bagian material, membuat celah sempit, atau memotong komponen tipis. Pisau yang digunakan relatif ramping, sehingga pemilihan gerak makan dan kedalaman potong perlu dilakukan lebih hati hati.

Pada *slitting*, ketebalan pisau menjadi faktor utama. Pisau yang tipis lebih mudah melentur dibandingkan pisau yang tebal. Jika gerak makan terlalu besar, pisau dapat mengalami beban samping yang tinggi. Akibatnya, celah potong bisa tidak lurus,

permukaan potong menjadi kasar, atau pisau mengalami kerusakan. Operator perlu menjaga agar benda kerja tidak bergeser dan arah pemakanan tetap terkendali. Dalam pekerjaan seperti ini, keberanian tanpa perhitungan hanyalah cara cepat membeli pisau baru. Operasi ketiga adalah frais mantel atau *slab milling*. Pada operasi ini, pisau frais silindris menyayat permukaan benda kerja menggunakan gigi pada keliling pisau. Proses ini banyak digunakan untuk meratakan bidang datar yang cukup panjang. Benda kerja digerakkan melewati pisau pada meja mesin, sedangkan pisau berputar pada arbor horizontal. Karena bidang kontak berada pada sisi keliling pisau, proses ini dapat menghasilkan permukaan datar dengan lintasan penyayatan yang relatif lebar.

Pada *slab milling*, kualitas permukaan dipengaruhi oleh diameter pisau, jumlah gigi, kecepatan potong, gerak makan, kedalaman potong, dan kekakuan arbor. Gerak makan terlalu besar dapat membuat bekas pemotongan lebih kasar. Gerak makan terlalu kecil membuat waktu pengerjaan lebih lama dan dapat menyebabkan gesekan yang tidak produktif. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kekasaran permukaan dalam pemesian dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Prinsip ini sangat relevan pada *slab milling*, karena permukaan datar yang dihasilkan mudah memperlihatkan jejak pemotongan. Frais mantel sering digunakan untuk pekerjaan awal pada permukaan balok atau pelat yang perlu diratakan. Pada tahap pengasaran, kedalaman potong dapat dibuat lebih besar untuk membuang material lebih cepat. Pada tahap penyelesaian, kedalaman potong dan gerak makan dikurangi agar permukaan menjadi lebih halus. Urutan ini membantu menyeimbangkan waktu pengerjaan dan kualitas hasil. Mengejar permukaan halus sejak awal dengan pemakanan sangat kecil memang mungkin, tetapi waktu bengkel kemudian menguap dengan sangat sopan.

Operasi keempat adalah frais sudut atau *angle milling*. Operasi ini digunakan untuk membentuk bidang miring, sisi bersudut, atau alur dengan sudut tertentu. Pisau frais yang digunakan memiliki sudut potong sesuai bentuk yang diinginkan. Pada variasi tertentu, pekerjaan ini juga mencakup pembuatan alur ekor burung atau *dovetail milling*. Bentuk ekor burung banyak digunakan pada sambungan lurus,udukan komponen, dan mekanisme yang membutuhkan penguncian geometris. Pada

dovetail milling, bentuk alur tidak hanya lurus ke bawah, tetapi melebar atau menyempit sesuai sudut tertentu. Pengerjaan biasanya tidak langsung dilakukan dalam satu langkah penuh. Alur awal dapat dibuat terlebih dahulu menggunakan pisau lurus, kemudian sisi miring dibentuk menggunakan pisau *dovetail*. Tahap ini membutuhkan ketelitian karena kesalahan sudut dapat menyebabkan pasangan komponen terlalu longgar atau tidak dapat masuk sama sekali. Benda kerja mungkin terlihat baik dari jauh, tetapi komponen pasangan tidak akan tertipu.

Frais sudut memerlukan pengaturan posisi meja dan pisau secara hati-hati. Sudut pisau harus sesuai dengan gambar kerja. Kedalaman potong harus dinaikkan bertahap agar gaya tidak berlebihan. Jika bidang miring terlalu dipaksakan dalam satu lintasan berat, gaya samping dapat meningkat dan pisau lebih mudah mengalami getaran. Pada pekerjaan sudut, permukaan yang buruk tidak hanya mengganggu tampilan, tetapi juga dapat mengganggu fungsi sambungan. Operasi kelima adalah frais profil atau *form milling*. Pada operasi ini, bentuk pisau frais mengikuti profil yang ingin dibentuk pada benda kerja. Pisau profil dapat digunakan untuk membuat radius, lengkungan, cekungan, tonjolan, atau bentuk khusus lain. Berbeda dari *slab milling* yang menghasilkan bidang datar, *form milling* menghasilkan kontur berdasarkan bentuk gigi pisau. Artinya, bentuk pahat menjadi semacam cetakan geometris dalam proses penyayatan.

Pada *form milling*, ketelitian bentuk pisau sangat menentukan hasil. Jika pisau profil sudah aus, kontur benda kerja dapat berubah. Radius mungkin tidak sesuai, sudut bisa membulat, atau permukaan menjadi tidak seragam. Karena itu, pisau profil perlu diperiksa sebelum digunakan. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa keausan pahat pada proses frais dapat dipantau melalui analisis sinyal multi sensor dan algoritma *machine learning*. Walaupun pembahasan buku ini berada pada mesin frais konvensional, gagasan tersebut memperlihatkan bahwa keausan pahat tetap menjadi faktor penting dalam kualitas proses frais. Operasi keenam adalah *straddle milling*. Pada proses ini, dua pisau frais dipasang pada satu arbor dengan jarak tertentu. Kedua pisau tersebut menyayat dua sisi benda kerja secara bersamaan. Operasi ini berguna untuk membuat dua bidang sejajar dengan jarak yang terkontrol. Contohnya dapat ditemukan pada pembentukan sisi

batang, komponen penjepit, atau bagian mesin yang membutuhkan dua permukaan paralel.

Keunggulan *straddle milling* terletak pada efisiensi. Dua sisi dapat dikerjakan dalam satu lintasan, sehingga waktu pengerjaan dapat berkurang. Namun, pengaturan awalnya perlu teliti. Jarak antar pisau harus sesuai ukuran akhir yang diinginkan. Spacer pada arbor harus dipilih dengan benar. Bila jarak antar pisau meleset, dua bidang yang terbentuk juga meleset. Mesin akan menjalankan kesalahan itu dengan sangat konsisten, karena begitulah mesin memperlihatkan kepatuhan yang menyebalkan. Pada *straddle milling*, gaya potong bekerja pada dua sisi benda kerja. Hal ini dapat membantu keseimbangan tertentu bila penyetelan baik, tetapi juga dapat meningkatkan beban pada arbor. Arbor harus ditopang dengan benar agar tidak mengalami lenturan. Pemilihan kedalaman potong dan gerak makan juga perlu hati hati karena dua pisau bekerja secara bersamaan. Jika proses terlalu berat, getaran dapat muncul dan permukaan kedua sisi menjadi kurang baik.

Operasi ketujuh adalah frais gigi atau *gear milling*. Operasi ini digunakan untuk membentuk gigi roda gigi dengan bantuan pisau khusus dan kepala pembagi. Pisau yang digunakan harus sesuai dengan modul, bentuk profil gigi, dan jumlah gigi yang dibuat. Benda kerja dipasang pada kepala pembagi, kemudian diputar bertahap sesuai pembagian sudut. Setiap celah gigi dikerjakan dengan lintasan frais sampai seluruh keliling benda kerja terbagi merata. Frais gigi memperlihatkan hubungan erat antara mesin frais horizontal dan alat bantu pembagian. Tanpa kepala pembagi, pembuatan gigi yang teratur akan sulit dilakukan secara manual. Kepala pembagi mengatur putaran benda kerja berdasarkan rasio tertentu sehingga jarak antar gigi dapat dibuat sama. Jika pembagian salah, roda gigi akan memiliki jarak gigi yang tidak seragam. Masalah ini bukan sekadar cacat estetika, tetapi dapat menyebabkan suara bising, getaran, dan kegagalan transmisi.

Pada *gear milling*, proses tidak hanya bergantung pada pisau. Operator harus memahami urutan pembagian, kedalaman pemotongan, posisi pisau terhadap pusat benda kerja, dan jumlah lintasan yang diperlukan. Pisau harus sejajar dengan posisi celah gigi yang akan dibentuk. Bila posisi pisau terlalu tinggi atau terlalu rendah terhadap pusat benda kerja, profil gigi dapat berubah. Kesalahan kecil di awal dapat berulang pada seluruh gigi, seperti

keputusan buruk yang diberi jadwal produksi. Frais horizontal juga dapat digunakan untuk operasi kombinasi. Misalnya, sebuah benda kerja dapat diratakan melalui *slab milling*, kemudian dibuat alur menggunakan *grooving*, lalu dibuat sisi sejajar melalui *straddle milling*. Urutan kerja seperti ini perlu direncanakan agar pencekaman tidak sering berubah. Semakin sering benda kerja dilepas dan dipasang ulang, semakin besar risiko kesalahan posisi. Dalam pemesinan, urutan proses sering sama pentingnya dengan kemampuan mesin itu sendiri.

Pemilihan operasi frais horizontal harus dimulai dari bentuk akhir yang diminta pada gambar kerja. Jika yang dibutuhkan adalah bidang panjang, *slab milling* menjadi pilihan wajar. Jika yang dibutuhkan adalah celah sempit, *slitting* lebih sesuai. Jika yang dibutuhkan adalah alur lurus, *grooving* dapat digunakan. Jika dua sisi harus dibuat sejajar, *straddle milling* memberi keuntungan. Jika benda kerja membutuhkan profil khusus, *form milling* dipertimbangkan. Jika elemen yang dibuat adalah roda gigi, *gear milling* memerlukan kepala pembagi. Setiap variasi operasi juga harus dikaitkan dengan parameter pemotongan. Kecepatan potong ditentukan oleh diameter pisau dan putaran arbor. Gerak makan ditentukan oleh gerak meja, jumlah gigi pisau, dan beban yang mampu diterima tiap gigi. Kedalaman potong ditentukan oleh banyaknya material yang perlu dibuang dan kemampuan mesin. Wang et al. (2023) menjelaskan bahwa pemesinan berkelanjutan perlu melihat integrasi antara peralatan, proses, dan strategi. Dalam frais horizontal, integrasi ini berarti memilih operasi, pisau, pencekaman, dan parameter secara selaras.

Pada operasi berat seperti *slab milling* atau *straddle milling*, kekakuan mesin menjadi perhatian utama. Arbor panjang harus ditopang oleh *arbor support*. Meja mesin harus terkunci pada sumbu yang tidak digunakan. Benda kerja harus dijepit kuat dan ditopang dengan benar. Jika salah satu bagian longgar, getaran akan muncul. Getaran tidak hanya merusak kualitas permukaan, tetapi juga dapat mempercepat keausan pisau dan mengurangi ketelitian ukuran. Pada operasi dengan pisau tipis seperti *slitting*, perhatian utama adalah kestabilan pisau dan arah pemakanan. Pisau yang tipis lebih rentan terhadap lenturan dan kerusakan. Gerak makan harus lebih terkendali, terutama ketika kedalaman potong cukup besar. Pendinginan atau pelumasan dapat membantu mengurangi panas dan gesekan, tergantung material benda kerja.

Jika geram menumpuk pada celah potong, proses dapat menjadi tidak stabil.

Pada operasi profil dan sudut, perhatian utama terletak pada kesesuaian bentuk pisau. Pisau profil harus sesuai dengan kontur yang direncanakan. Pisau sudut harus memiliki sudut yang benar. Pisau *dovetail* harus dipilih sesuai bentuk alur ekor burung yang dibutuhkan. Pengukuran antara menjadi penting karena kesalahan bentuk biasanya sulit diperbaiki jika sudah terlalu jauh. Tidak seperti penghapus pada kertas, logam yang sudah terpotong tidak bisa diminta kembali dengan sopan. Kualitas permukaan pada operasi frais horizontal tidak hanya dipengaruhi oleh tajam atau tidaknya pisau. Jumlah gigi, diameter pisau, gerak makan per gigi, kedalaman potong, arah pemakanan, dan stabilitas arbor ikut menentukan hasil. Bila satu gigi pisau lebih aus daripada gigi lain, permukaan dapat menunjukkan pola tidak seragam. Bila arbor tidak seimbang, bekas getaran dapat terlihat. Bila benda kerja tidak kaku, bidang dapat bergelombang. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa kondisi keausan pahat pada frais dapat dipelajari melalui sinyal proses, menandakan bahwa perubahan kecil pada pemotongan dapat terbaca dari gejala mesin.

Dalam pekerjaan pendidikan, variasi operasi frais horizontal sebaiknya dikenalkan melalui contoh benda kerja sederhana. Misalnya, sebuah balok logam dapat diratakan dengan *slab milling*, kemudian dibuat alur dengan *grooving*. Setelah itu, dua sisi dapat dikerjakan dengan *straddle milling*. Melalui urutan seperti ini, kita melihat bahwa satu mesin dapat melakukan beberapa operasi, tetapi setiap operasi membutuhkan pisau, penyetelan, dan tujuan yang berbeda. Ini jauh lebih berguna daripada menghafal nama operasi tanpa melihat hasil fisiknya. Dalam bengkel perawatan, frais horizontal sering berguna untuk membuat atau memperbaiki bagian mesin. Alur pasak pada poros pendek, celah pada pelat, bidang dudukan, dan roda gigi sederhana dapat dikerjakan dengan peralatan yang sesuai. Walaupun mesin CNC modern lebih banyak digunakan untuk produksi kompleks, mesin frais horizontal konvensional tetap relevan untuk pekerjaan tertentu. Ia kuat, relatif mudah dipahami, dan cocok untuk proses yang memanfaatkan arbor mendatar.

Keselamatan kerja pada variasi frais horizontal harus diperhatikan sejak penyetelan. Arbor berputar dengan pisau yang memiliki banyak gigi tajam. Geram dapat keluar panas dan tajam.

Pisau *slitting* yang tipis dapat patah jika diberi beban berlebihan. Pisau roda gigi atau pisau profil memiliki bentuk khusus yang dapat rusak bila pemasangan salah. Operator tidak boleh membersihkan geram saat mesin masih berputar. Mengambil geram dengan tangan kosong adalah jenis optimisme yang sebaiknya punah. Pemasangan pisau pada arbor perlu dilakukan dengan spacer dan pengunci yang benar. Pisau harus duduk rapat dan tidak miring. Arah gigi harus sesuai arah putaran dan pemakanan. Setelah pisau terpasang, arbor support perlu dipasang bila arbor panjang atau beban pemotongan cukup besar. Pemeriksaan putaran awal dapat dilakukan sebelum benda kerja disentuhkan pada pisau. Jika ada suara tidak wajar atau getaran, proses harus dihentikan dan penyebabnya diperiksa.

Pencekaman benda kerja menjadi syarat dasar sebelum operasi dilakukan. Benda kerja harus dijepit di tengah ragum jika menggunakan ragum, atau diklem kuat bila bentuknya tidak cocok dijepit biasa. Permukaan bawah benda kerja perlu ditopang dengan paralel agar posisinya rata. Benda kerja tidak boleh menonjol terlalu tinggi karena dapat memperbesar getaran. Prinsip ini berlaku untuk hampir semua variasi frais horizontal, dari *grooving* sampai *gear milling*. Variasi operasi frais horizontal memperlihatkan bahwa satu orientasi mesin dapat menghasilkan banyak bentuk pekerjaan. *Grooving* membuat alur. *Slitting* memotong atau membelah. *Slab milling* meratakan bidang panjang. *Angle milling* dan *dovetail milling* membentuk bidang bersudut. *Form milling* menghasilkan profil khusus. *Straddle milling* menyayat dua sisi sejajar. *Gear milling* membentuk roda gigi dengan bantuan pembagian sudut. Semua variasi ini bekerja melalui prinsip yang sama, yaitu pisau frais bermata jamak berputar pada arbor horizontal dan benda kerja digerakkan secara terkendali.

E. Variasi Operasi Frais Vertikal

Variasi operasi frais vertikal menunjukkan kemampuan mesin frais untuk membentuk permukaan benda kerja melalui alat potong yang berputar pada posisi tegak. Pada mesin frais vertikal, *spindle* atau pemegang *cutter* berada pada arah vertikal terhadap meja mesin. Benda kerja dijepit pada ragum atau alat cekam lain, lalu digerakkan melalui sumbu X, Y, dan Z sesuai bentuk yang akan dibuat. Susunan ini membuat frais vertikal sangat berguna untuk pekerjaan permukaan atas, alur, kantong, bidang bertingkat,

kontur, dan bentuk tertentu yang membutuhkan akses alat potong dari arah atas. Proses frais vertikal tetap bekerja dengan prinsip dasar frais, yaitu alat potong bermata jamak atau *multi point cutting tool* berputar sebagai gerak utama. Setiap mata potong pada *cutter* menyayat material secara bergantian. Benda kerja bergerak translasi mengikuti arah gerak meja, sedangkan kedalaman potong diatur melalui sumbu Z. Dibandingkan mesin bubut yang lebih kuat pada bentuk berputar seperti poros atau ulir, mesin frais vertikal lebih fleksibel untuk membentuk benda kerja prismatic. Logam, rupanya, lebih mudah diajak kerja sama jika arah geraknya jelas.

Pada frais vertikal, variasi operasi yang umum dibahas meliputi frais muka atau *face milling*, frais alur T atau *T slot milling*, frais radius ujung atau *ball nose milling*, dan frais ujung atau *end milling*. Keempat operasi ini memperlihatkan cara berbeda dalam memanfaatkan posisi *spindle* vertikal. *Face milling* digunakan untuk meratakan permukaan atas. *T slot milling* digunakan untuk membuat alur berbentuk T. *Ball nose milling* digunakan untuk membentuk permukaan berkontur atau radius. *End milling* digunakan untuk membuat alur, bahu, kantong, dan bentuk yang lebih bervariasi. Frais vertikal sering menjadi pilihan utama di bengkel pendidikan karena kontak antara *cutter* dan benda kerja lebih mudah diamati. Operator dapat melihat posisi ujung alat potong terhadap permukaan benda kerja dari arah atas. Hal ini membantu saat menentukan titik awal pemotongan, mengatur kedalaman, atau memeriksa lintasan. Namun, kemudahan pengamatan bukan alasan untuk bekerja sembarangan. Kesalahan kecil pada sumbu Z tetap dapat membuat kedalaman alur salah, permukaan rusak, atau pahat patah dengan cara yang cukup mahal.

Operasi pertama adalah frais muka atau *face milling*. Operasi ini digunakan untuk meratakan permukaan atas benda kerja. Pisau frais muka biasanya memiliki diameter relatif besar dan beberapa mata potong pada bagian muka serta sisi tepinya. Saat *cutter* berputar, benda kerja digerakkan melewati bidang potong sehingga lapisan material pada permukaan atas tersayat. Hasil yang diharapkan adalah bidang datar dengan kualitas permukaan yang sesuai kebutuhan gambar kerja. Pada *face milling*, arah pemotongan terjadi terutama pada permukaan atas benda kerja. Kedalaman potong diatur melalui sumbu Z, sedangkan gerak

makan diberikan melalui sumbu X atau Y. Bila diameter *cutter* cukup besar, satu lintasan dapat menyapu bidang yang lebar. Jika bidang benda kerja lebih lebar daripada diameter pisau, beberapa lintasan perlu dilakukan dengan jarak antar lintasan yang teratur. Jarak antar lintasan ini ikut memengaruhi bekas permukaan. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kekasaran permukaan hasil pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja.

Kualitas hasil *face milling* sangat bergantung pada kecepatan potong, putaran *spindle*, gerak makan per gigi, kedalaman potong, jumlah mata potong, serta kekakuan pencekaman. Gerak makan terlalu besar dapat meninggalkan bekas sapuan yang kasar. Kedalaman potong terlalu besar dapat meningkatkan gaya potong dan getaran. Sebaliknya, pemakanan terlalu kecil dapat membuat proses terlalu lama dan kadang membuat pahat lebih banyak menggesek daripada menyayat. Mesin frais tidak meminta drama, tetapi manusia sering memberinya parameter yang mengundang masalah. Pada pekerjaan pengasaran, *face milling* dapat dilakukan dengan kedalaman potong lebih besar untuk mempercepat pengurangan material. Permukaan hasilnya belum harus sangat halus, selama masih tersedia sisa material untuk proses penyelesaian. Pada pekerjaan akhir, kedalaman potong dan gerak makan dibuat lebih kecil agar permukaan lebih rapi. Prinsip pembagian antara *roughing* dan *finishing* ini penting karena produktivitas dan kualitas permukaan jarang dapat dimaksimalkan bersamaan tanpa kompromi.

Operasi kedua adalah frais alur T atau *T slot milling*. Operasi ini digunakan untuk membuat alur berbentuk T pada benda kerja. Alur T sering dijumpai pada meja mesin, dudukan perlengkapan, pelat penjepit, atau komponen yang membutuhkan jalur penguncian baut T. Bentuk ini tidak dapat dibuat langsung hanya dengan satu jenis pisau biasa. Biasanya, proses dimulai dengan membuat alur lurus terlebih dahulu menggunakan *end mill*, lalu bagian bawah alur diperlebar menggunakan *T slot cutter*. Urutan kerja pada *T slot milling* perlu diperhatikan dengan cermat. Alur awal harus memiliki lebar dan kedalaman yang cukup agar *T slot cutter* dapat masuk tanpa bergesekan berlebihan. Setelah alur awal terbentuk, *T slot cutter* digunakan untuk menyayat sisi bawah alur sehingga terbentuk ruang melebar. Jika alur awal terlalu sempit atau terlalu dangkal, pisau T dapat terjepit. Kalau pisau sudah

terjepit, biasanya yang muncul bukan solusi elegan, melainkan suara tidak nyaman dan wajah operator yang mulai menyesal.

Pada *T slot milling*, gaya pemotongan bekerja pada area yang relatif tersembunyi di dalam alur. Kondisi ini membuat pengamatan langsung lebih sulit dibandingkan *face milling*. Operator perlu mengandalkan penyetelan awal, pengukuran, suara pemotongan, dan pemahaman proses. Gerak makan harus dipilih hati hati karena bagian kepala *T slot cutter* menerima beban dari sisi kiri dan kanan alur. Jika gerak makan terlalu besar, pahat dapat aus cepat atau bahkan patah. Alur T harus diperiksa dari sisi lebar atas, lebar bawah, kedalaman, dan kesesuaian posisi terhadap gambar kerja. Kesalahan kecil pada kedalaman dapat membuat baut T tidak dapat masuk dengan baik. Kesalahan pada lebar bawah dapat membuat penguncian terlalu longgar atau terlalu sempit. Dalam komponen kerja, alur T bukan hanya bentuk geometris. Ia adalah jalur fungsi mekanis. Karena itu, hasilnya harus diperiksa dengan alat ukur yang sesuai, bukan hanya dilihat sekilas lalu diangap “mirip”.

Operasi ketiga adalah frais radius ujung atau *ball nose milling*. Operasi ini menggunakan *ball nose end mill*, yaitu alat potong dengan ujung berbentuk radius atau setengah bola. Bentuk ujung ini memungkinkan pahat membentuk permukaan lengkung, kontur halus, lekukan, dan bentuk tiga dimensi sederhana. Dalam praktik manufaktur modern, *ball nose milling* banyak digunakan pada pembuatan cetakan, komponen dengan permukaan bebas, *die*, *mold*, dan bagian mekanis yang membutuhkan transisi permukaan tidak tajam. Pada mesin frais vertikal konvensional, penggunaan *ball nose milling* biasanya lebih terbatas dibandingkan pada mesin CNC. Meski begitu, prinsip dasarnya tetap sama. Ujung pahat yang membulat menyayat material secara bertahap, sementara benda kerja digerakkan mengikuti lintasan tertentu. Untuk menghasilkan permukaan halus, jarak antar lintasan perlu dibuat cukup rapat. Jika lintasan terlalu renggang, permukaan akan memperlihatkan bekas jalur pahat yang jelas. Bentuknya mungkin masih mendekati kontur, tetapi permukaannya akan tampak seperti bukit kecil yang diproduksi oleh keputusan teknis kurang sabar.

Karakter *ball nose milling* sangat dipengaruhi oleh radius ujung pahat. Radius yang lebih besar dapat menghasilkan transisi permukaan lebih halus, tetapi gaya pemotongan dapat meningkat karena area kontak lebih besar. Radius kecil memberi kemampuan

masuk ke detail yang lebih sempit, tetapi permukaan membutuhkan lintasan lebih rapat untuk memperoleh hasil halus. Pemilihan radius harus mengikuti bentuk kontur, ukuran benda kerja, material, dan kualitas permukaan yang diminta. Tidak semua kontur membutuhkan pahat besar, dan tidak semua detail bisa diselesaikan dengan pahat kecil tanpa konsekuensi waktu. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa keausan pahat pada proses frais dapat diperkirakan melalui analisis sinyal multi sensor dan algoritma *machine learning*. Temuan ini relevan untuk memahami *ball nose milling*, karena perubahan kondisi pahat dapat sangat memengaruhi kualitas kontur. Ujung pahat yang aus dapat mengubah radius efektif, meningkatkan gaya potong, dan memperburuk permukaan. Pada pekerjaan kontur, keausan kecil saja dapat terlihat pada hasil akhir, terutama bila permukaan tersebut berfungsi sebagai cetakan atau bidang kontak.

Operasi keempat adalah frais ujung atau *end milling*. Operasi ini menggunakan *end mill cutter*, yaitu alat potong yang dapat menyayat dengan ujung maupun sisi sampingnya. Karena kemampuan tersebut, *end milling* menjadi salah satu operasi paling serbaguna pada frais vertikal. Pahat dapat digunakan untuk membuat alur lurus, bahu, kantong atau *pocket*, bidang bertingkat, kontur luar, dan bahkan bentuk yang lebih kompleks bila lintasan meja atau program mesin dapat mengikutinya. Pada *end milling*, kedalaman potong diatur melalui sumbu Z, sedangkan bentuk lintasan dibentuk melalui gerak X dan Y. Jika hanya satu arah gerak meja yang digunakan, pahat dapat membuat alur lurus. Jika X dan Y dikombinasikan, pahat dapat membentuk kontur atau kantong. Pada mesin CNC, kombinasi gerak ini dapat diprogram secara lebih kompleks. Pada mesin konvensional, operator masih dapat membuat bentuk sederhana dengan membaca skala, memutar handel, dan menjaga urutan gerak dengan teliti. Manusia memang gemar membuat pekerjaan manual tampak seperti ujian kesabaran.

End milling memerlukan perhatian pada panjang penjuruan pahat. Semakin panjang pahat keluar dari pemegangnya, semakin mudah pahat melentur ketika menerima gaya samping. Lenturan ini dapat membuat ukuran alur tidak sesuai, dinding alur bergelombang, atau permukaan menjadi kasar. Untuk pekerjaan presisi, pahat sebaiknya dipasang sependek mungkin sesuai kebutuhan akses. Kekakuan pemegang pahat dan kondisi *spindle* juga ikut menentukan kualitas hasil. Pada pembuatan alur dengan

end mill, lebar alur sering mengikuti diameter pahat. Namun, bila pahat mengalami lenturan atau getaran, lebar alur dapat berubah. Jika alur harus sangat presisi, proses dapat dilakukan secara bertahap. Pemakanan awal digunakan untuk membuka alur, lalu pemakanan akhir dilakukan dengan kedalaman dan gerak makan lebih kecil. Pendekatan ini lebih aman daripada langsung memaksa pahat menyayat ukuran penuh dalam satu lintasan berat.

Pada pembuatan kantong atau *pocket milling*, *end mill* harus membuang material dari area tertutup. Geram yang terbentuk perlu keluar dari area pemotongan agar tidak tersayat ulang oleh pahat. Geram yang tertahan dapat meningkatkan panas, memperburuk permukaan, dan mempercepat keausan pahat. Karena itu, strategi lintasan, kedalaman potong bertahap, dan pembersihan geram menjadi penting. Pada pekerjaan aluminium, misalnya, geram dapat menempel pada pahat jika kondisi pemotongan dan pendinginan tidak sesuai. Variasi frais vertikal juga berkaitan dengan pemilihan metode frais naik atau *up milling* dan frais turun atau *down milling*. Pada *end milling* dan *face milling*, arah putaran *cutter* terhadap gerak benda kerja menentukan pembentukan geram dan gaya potong. *Up milling* cenderung dimulai dari tebal geram kecil menuju besar, sedangkan *down milling* dimulai dari tebal geram besar menuju kecil. Perbedaan ini memengaruhi gaya, kualitas permukaan, dan kebutuhan kekakuan mesin. Pembahasan lebih rinci tentang metode tersebut dapat ditempatkan pada subbab berikutnya.

Parameter pemotongan pada frais vertikal tidak boleh dipilih hanya berdasarkan jenis operasi. Material benda kerja, jenis *cutter*, diameter pahat, jumlah mata potong, kedalaman potong, gerak makan per gigi, dan kondisi mesin harus diperhatikan. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa metode pemesinan memiliki prinsip, penerapan, dan kondisi kerja yang berbeda sesuai jenis prosesnya. Pada frais vertikal, perbedaan antara *face milling*, *T slot milling*, *ball nose milling*, dan *end milling* membuat pemilihan parameter perlu disesuaikan dengan beban dan bentuk pemotongan. Pada *face milling*, gerak makan dapat dibuat lebih besar dibandingkan operasi yang menggunakan pahat kecil, selama mesin dan pencekaman cukup kaku. Pada *T slot milling*, gerak makan perlu lebih hati-hati karena pahat bekerja di dalam alur dan risiko terjepit lebih tinggi. Pada *ball nose milling*, lintasan perlu lebih rapat untuk permukaan halus. Pada *end milling*, parameter harus

mempertimbangkan gaya samping dan kemungkinan lenturan pahat. Satu tabel parameter tidak boleh diperlakukan seperti mantra sakti untuk semua keadaan.

Kualitas permukaan menjadi salah satu pertimbangan utama dalam semua variasi frais vertikal. Permukaan hasil *face milling* dinilai dari kerataan dan bekas sapuan pisau. Hasil *T slot milling* dinilai dari bentuk alur, lebar, dan kelancaran fungsi penguncian. Hasil *ball nose milling* dinilai dari kehalusan kontur dan kerapatan lintasan. Hasil *end milling* dinilai dari dimensi alur, dinding, dasar kantong, dan kesesuaian bentuk. Trinh (2024) menekankan bahwa prediksi kekasaran permukaan dapat membantu pemilihan kondisi pemotongan, menekan biaya, dan meningkatkan kualitas pemesinan. Dari sisi efisiensi, variasi frais vertikal perlu dipilih berdasarkan bentuk pekerjaan. Jika hanya perlu meratakan permukaan atas, *face milling* lebih efisien daripada menggunakan *end mill* kecil berkali kali. Jika perlu membuat alur T, penggunaan *T slot cutter* setelah alur awal jauh lebih tepat dibanding memaksa bentuk tersebut dengan pahat biasa. Jika perlu membuat kontur radius, *ball nose end mill* lebih sesuai daripada pahat datar. Jika perlu membuat alur atau kantong, *end mill* menjadi pilihan utama. Wang et al. (2023) menjelaskan bahwa pemesinan berkelanjutan berkaitan dengan integrasi peralatan, proses, dan strategi.

Pencekaman benda kerja pada frais vertikal harus menyesuaikan jenis operasi. Untuk *face milling*, permukaan benda kerja harus ditopang rata agar bidang atas tidak miring. Untuk *T slot milling*, benda kerja harus dicekam kuat karena proses berlangsung dalam beberapa tahap. Untuk *ball nose milling*, kestabilan posisi penting agar kontur tidak bergeser. Untuk *end milling*, terutama saat membuat kantong atau alur dalam, benda kerja harus cukup kaku agar tidak bergetar. Pencekaman yang buruk adalah cara elegan untuk membuat hasil bagus menjadi legenda yang tidak pernah terjadi. Keselamatan kerja pada frais vertikal juga memiliki perhatian khusus. *Cutter* berputar pada kecepatan tinggi dan berada pada posisi terbuka dari arah atas. Geram dapat keluar tajam dan panas. Operator tidak boleh menyentuh benda kerja, pahat, atau geram ketika mesin masih berputar. Kunci ragam, kunci *drawbar*, atau alat bantu lain tidak boleh tertinggal pada mesin. Pada operasi seperti *T slot milling*, area pemotongan kadang tidak terlihat jelas, sehingga suara dan getaran perlu diperhatikan sebagai tanda awal masalah.

Pada penggunaan *face mill*, diameter pahat yang besar dapat menimbulkan gaya pemotongan yang cukup besar. Benda kerja perlu dijepit kuat dan meja harus dikunci pada sumbu yang tidak digunakan. Bila pisau tidak seimbang atau salah satu mata potong rusak, getaran dapat muncul. Getaran tersebut dapat meninggalkan pola pada permukaan dan mempercepat keausan pahat. Pemeriksaan pahat sebelum digunakan menjadi kebiasaan yang seharusnya tidak dianggap berlebihan. Pada penggunaan *T slot cutter*, tahap awal perlu diperiksa dengan teliti sebelum pisau T masuk ke alur. Lebar alur awal, kedalaman, dan posisi harus benar. Jika alur awal meleset, pisau T akan mengikuti kesalahan tersebut. Setelah bagian bawah alur terbentuk, ukuran perlu diperiksa dengan alat yang sesuai. Alur T biasanya berhubungan dengan fungsi penjepitan, sehingga ukuran yang tidak sesuai dapat mengganggu pemasangan baut atau komponen pengunci.

Pada penggunaan *ball nose end mill*, perhatian utama terletak pada lintasan dan jarak antar lintasan. Permukaan kontur tidak hanya ditentukan oleh kedalaman potong, tetapi juga oleh seberapa rapat pahat menyapu bidang. Jika jarak lintasan terlalu besar, permukaan akan menunjukkan bekas gelombang kecil. Jika terlalu kecil, hasil lebih halus tetapi waktu proses bertambah. Pilihan ini menjadi kompromi antara kualitas permukaan dan produktivitas, sebuah kompromi tua yang selalu muncul di hampir semua proses manufaktur. Pada penggunaan *end mill*, perhatian utama adalah gaya samping, panjang pahat, dan strategi masuk ke material. Pahat dapat masuk dari arah atas jika jenisnya mendukung pemotongan pusat, atau dapat masuk dari sisi setelah titik awal dibuat. Jika pahat dipaksa masuk secara tidak sesuai, ujung pahat dapat rusak. Untuk kantong dalam, pemakanan bertahap lebih aman dibanding pemotongan penuh secara langsung. Prinsipnya sederhana: pahat kecil bukan alat untuk membuktikan keberanian manusia.

Dalam konteks pembelajaran, variasi operasi frais vertikal sebaiknya dipahami melalui benda kerja nyata. Sebuah blok aluminium, misalnya, dapat diratakan permukaannya dengan *face milling*. Setelah itu, alur lurus dapat dibuat dengan *end milling*. Jika blok tersebut membutuhkan jalur baut T, proses dilanjutkan dengan *T slot milling*. Bila ada permukaan lengkung atau transisi radius, *ball nose milling* dapat digunakan. Urutan ini membantu kita melihat hubungan antara bentuk komponen dan pilihan

operasi. Pada industri modern, variasi frais vertikal semakin luas melalui mesin CNC vertikal atau *vertical machining center*. Mesin ini memungkinkan lintasan *cutter* diprogram secara otomatis untuk membuat kantong, profil, kontur, lubang, dan permukaan kompleks. Namun, prinsip dasarnya tetap sama. *Cutter* berputar, benda kerja bergerak relatif terhadap alat potong, dan parameter pemotongan harus dipilih sesuai material serta pahat. Program yang canggih tetap tidak akan menyelamatkan pahat tumpul, pencekaman lemah, atau parameter yang tidak masuk akal. Variasi frais vertikal memperlihatkan bahwa satu orientasi *spindle* dapat menghasilkan banyak bentuk kerja. *Face milling* meratakan permukaan, *T slot milling* membentuk alur pengunci, *ball nose milling* menghasilkan kontur radius, dan *end milling* membentuk alur, kantong, serta permukaan bertingkat. Setiap operasi memiliki pahat, lintasan, risiko, dan cara pemeriksaan yang berbeda. Pemilihan operasi harus didasarkan pada bentuk akhir benda kerja, kualitas permukaan, toleransi, serta ketersediaan mesin dan alat potong.

F. Parameter Pemotongan Proses Frais

Parameter pemotongan proses frais merupakan dasar untuk mengatur agar penyayatan berlangsung terkendali, aman, dan menghasilkan benda kerja sesuai gambar kerja. Pada mesin frais, alat potong atau *cutter* berputar sebagai gerak utama, sedangkan benda kerja bergerak mengikuti meja mesin melalui sumbu X, Y, dan Z. Karena alat potong memiliki lebih dari satu mata potong, setiap gigi pisau mengambil bagian material secara bergantian. Keadaan ini membuat parameter frais sedikit berbeda dari proses bubut, meskipun istilah dasarnya masih sama, yaitu kecepatan potong, gerak makan, kedalaman potong, dan waktu pemesinan. Keberhasilan proses frais tidak hanya ditentukan oleh jenis mesin atau bentuk pisau. Mesin yang kuat tetap dapat menghasilkan permukaan buruk jika parameter dipilih secara asal. Kecepatan potong yang terlalu tinggi dapat mempercepat keausan pahat. Gerak makan yang terlalu besar dapat membuat permukaan kasar. Kedalaman potong yang berlebihan dapat menimbulkan getaran. Waktu pemesinan yang tidak dihitung dapat mengacaukan perencanaan produksi. Begitulah pemesinan, sangat patuh pada angka, tidak pada harapan manusia.

Dalam proses frais, parameter utama yang perlu diperhatikan mencakup kecepatan potong, putaran *spindle*, gerak makan per

gigi, kedalaman potong, dan waktu pemesinan. Kecepatan potong menjelaskan seberapa cepat titik pada keliling pisau bergerak terhadap benda kerja. Putaran spindle menunjukkan jumlah putaran pisau dalam satu menit. Gerak makan per gigi menunjukkan tebal pemakanan yang diterima setiap mata potong. Kedalaman potong menunjukkan seberapa dalam pisau masuk ke benda kerja. Waktu pemesinan menunjukkan lama proses yang dibutuhkan untuk menyelesaikan lintasan kerja. Kecepatan potong atau cutting speed adalah jarak yang ditempuh satu titik pada keliling pisau frais dalam satu menit. Pada proses frais, diameter yang digunakan dalam perhitungan adalah diameter cutter, bukan diameter benda kerja. Hal ini berbeda dari proses bubut, karena pada bubut benda kerja yang berputar, sedangkan pada frais alat potong yang berputar. Perbedaan ini tampak sederhana, tetapi sering menjadi sumber kekeliruan bagi pemula yang terbiasa membawa rumus bubut ke semua mesin seolah semua mesin punya kepribadian yang sama.

Rumus umum kecepatan potong pada proses frais dapat ditulis sebagai $v = \pi \times d \times n / 1000$. Simbol v menyatakan kecepatan potong dalam meter per menit. Simbol d menyatakan diameter cutter dalam milimeter. Simbol n menyatakan putaran spindle dalam putaran per menit atau rpm. Angka 1000 digunakan untuk mengubah satuan milimeter menjadi meter. Dari rumus ini terlihat bahwa kecepatan potong naik jika diameter pisau atau putaran spindle dinaikkan. Rumus tersebut juga dapat diubah untuk mencari putaran spindle, yaitu $n = 1000 \times v / (\pi \times d)$. Rumus ini digunakan ketika kecepatan potong yang direkomendasikan sudah diketahui dari tabel berdasarkan material benda kerja dan bahan pisau. Operator kemudian menghitung berapa putaran spindle yang perlu dipilih pada mesin. Jika mesin hanya menyediakan pilihan putaran bertingkat, nilai hasil perhitungan biasanya disesuaikan ke putaran terdekat yang aman.

Pemilihan kecepatan potong dipengaruhi oleh jenis material benda kerja dan jenis alat potong. Material yang lebih lunak seperti aluminium atau kuningan umumnya dapat dikerjakan dengan kecepatan lebih tinggi. Material yang lebih keras seperti baja perkakas atau baja tahan karat biasanya membutuhkan kecepatan lebih rendah. Pahat carbide dapat bekerja pada kecepatan lebih tinggi dibandingkan pahat HSS atau high speed steel, tetapi tetap membutuhkan pencekaman dan mesin yang kaku. Kecepatan tinggi

tanpa kekakuan hanya mengubah mesin menjadi alat pembuat getaran. Kecepatan potong yang terlalu rendah tidak selalu baik. Proses dapat menjadi lambat, waktu produksi bertambah, dan pada kondisi tertentu pahat lebih banyak menggesek daripada menyayat. Kecepatan yang terlalu tinggi juga tidak baik karena panas meningkat, ujung pahat cepat aus, dan kualitas permukaan dapat menurun. Trinh (2024) menjelaskan bahwa pemilihan parameter pemotongan berkaitan dengan kualitas permukaan, biaya, dan kemampuan mencapai kekasaran permukaan yang diinginkan. Artinya, kecepatan potong perlu dipilih sebagai bagian dari strategi proses, bukan hanya angka dari tabel.

Putaran spindle merupakan hasil praktis dari pemilihan kecepatan potong. Pada mesin frais, operator tidak langsung memasukkan nilai v ke mesin konvensional. Yang diatur pada panel atau tuas mesin adalah putaran spindle. Karena itu, perhitungan putaran menjadi jembatan antara teori kecepatan potong dan pengaturan mesin nyata. Jika diameter pisau besar, putaran yang dibutuhkan untuk mencapai kecepatan potong tertentu akan lebih rendah. Jika diameter pisau kecil, putaran yang dibutuhkan akan lebih tinggi. Sebagai contoh, bila pisau frais berdiameter 50 mm digunakan dengan kecepatan potong 30 m per menit, maka putaran spindle dapat dihitung dengan $n = 1000 \times 30 / (\pi \times 50)$. Hasilnya sekitar 191 rpm. Jika mesin hanya memiliki pilihan 180 rpm dan 220 rpm, operator dapat memilih nilai yang lebih aman berdasarkan material, jenis pahat, dan tujuan pengerjaan. Untuk pekerjaan awal pada material keras, pilihan lebih rendah sering lebih aman. Untuk penyelesaian ringan pada material lebih lunak, pilihan lebih tinggi dapat dipertimbangkan.

Gerak makan per gigi atau feed per tooth merupakan parameter khas pada proses frais. Karena pisau frais memiliki beberapa mata potong, gerak makan tidak cukup hanya dinyatakan sebagai gerak meja per menit. Perlu diketahui juga berapa beban pemakanan yang diterima setiap gigi pisau. Gerak makan per gigi biasanya dinyatakan dengan simbol f_z dalam satuan mm per gigi. Nilai ini menentukan tebal geram yang dibentuk oleh setiap mata potong saat menyayat benda kerja. Hubungan antara kecepatan makan, putaran spindle, jumlah gigi pisau, dan gerak makan per gigi dapat ditulis sebagai $v_f = f_z \times z \times n$. Simbol v_f menyatakan kecepatan makan dalam mm per menit. Simbol f_z menyatakan gerak makan per gigi dalam mm per gigi. Simbol z menyatakan

jumlah mata potong pada cutter. Simbol n menyatakan putaran spindle dalam rpm. Rumus ini menunjukkan bahwa kecepatan makan naik jika gerak makan per gigi, jumlah gigi, atau putaran dinaikkan.

Jika nilai vf sudah diketahui dari pengaturan meja, gerak makan per gigi dapat dihitung dengan $fz = vf / (z \times n)$. Hubungan ini penting karena dua pisau dengan diameter sama tetapi jumlah gigi berbeda tidak menerima beban yang sama pada kecepatan makan yang sama. Pisau dengan jumlah gigi lebih banyak akan membagi beban pemakanan ke lebih banyak mata potong. Pisau dengan jumlah gigi lebih sedikit menerima beban lebih besar per gigi jika vf dan n sama. Ini alasan mengapa gerak makan pada frais tidak boleh dibaca terlalu polos. Gerak makan per gigi berpengaruh langsung terhadap tebal geram. Jika fz terlalu kecil, gigi pisau dapat lebih banyak menggosok daripada menyayat. Gesekan ini dapat menaikkan temperatur dan mempercepat keausan pahat, meskipun tampaknya pemakanan kecil terlihat aman. Jika fz terlalu besar, setiap gigi menerima beban berlebih. Akibatnya, permukaan dapat menjadi kasar, pahat dapat mengalami getaran, dan risiko patah meningkat. Titik kerja yang baik berada di antara dua keadaan buruk tersebut.

Pemilihan gerak makan per gigi perlu mempertimbangkan jenis pisau. Pisau HSS biasanya digunakan dengan gerak makan lebih konservatif. Pisau carbide atau keramik dapat menerima kondisi lebih tinggi jika mesin cukup kaku. Pisau berdiameter kecil lebih mudah lentur, sehingga fz perlu dijaga agar tidak membebani pahat secara berlebihan. Pisau berdiameter besar dapat menyapu bidang lebih lebar, tetapi tetap membutuhkan kestabilan spindle dan pencekaman yang kuat. Material benda kerja juga menentukan nilai gerak makan. Aluminium, baja lunak, dan tembaga dapat menerima gerak makan lebih besar dibandingkan material yang lebih keras atau mudah mengalami pengerasan permukaan. Pada material tidak homogen, misalnya benda cor dengan bagian keras dan lunak tidak merata, gerak makan perlu lebih hati-hati. Setiap perubahan kekerasan lokal dapat menyebabkan beban potong berubah. Pada kondisi seperti itu, mesin kadang terdengar seolah sedang mengeluh, padahal ia hanya membaca material dengan cara mekanis.

Kedalaman potong atau depth of cut menunjukkan seberapa besar material yang dibuang pada arah masuknya pisau ke benda

kerja. Pada proses frais, kedalaman potong dapat berbeda makna tergantung jenis operasi. Pada face milling, kedalaman potong biasanya berkaitan dengan arah vertikal terhadap permukaan atas. Pada end milling, selain kedalaman aksial, ada pula lebar pemotongan radial yang memengaruhi beban pahat. Untuk pembahasan dasar, kedalaman potong dapat dipahami sebagai tebal lapisan material yang diambil dalam satu lintasan. Kedalaman potong besar digunakan pada proses pengasaran atau roughing. Tujuannya adalah mengurangi material lebih cepat dan memperpendek waktu pengerjaan. Namun, kedalaman besar menaikkan gaya potong, beban mesin, panas, dan kemungkinan getaran. Pada proses penyelesaian atau finishing, kedalaman potong dibuat lebih kecil agar permukaan lebih halus dan ukuran lebih mudah dikendalikan. Dalam praktik, pekerjaan kasar dan pekerjaan akhir sebaiknya dipisahkan agar produktivitas dan kualitas tidak saling mengganggu.

Kedalaman potong tidak boleh dipilih hanya dari banyaknya material yang ingin dibuang. Kekakuan mesin, panjang penjuruan pahat, bentuk pahat, jenis pencekaman, dan sifat material harus ikut dipertimbangkan. End mill yang panjang tidak boleh diberi kedalaman potong terlalu besar karena rentan lentur. Pisau muka besar membutuhkan daya mesin yang cukup. Benda kerja tipis perlu ditopang agar tidak melendut. Parameter yang terlihat baik di atas kertas bisa menjadi buruk ketika benda kerja tidak cukup kaku. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa keausan pahat pada proses frais dapat diperkirakan melalui analisis sinyal multi sensor dan algoritma machine learning. Temuan ini memberi gambaran bahwa perubahan parameter pemotongan, getaran, dan kondisi pahat dapat dibaca sebagai gejala proses. Dalam konteks dasar mesin frais, hal tersebut mengingatkan bahwa pemilihan kedalaman potong, gerak makan, dan kecepatan bukan hanya memengaruhi ukuran, tetapi juga umur pahat dan kestabilan pemotongan.

Waktu pemesinan atau machining time merupakan lama waktu efektif yang dibutuhkan untuk menyelesaikan lintasan pemotongan. Pada operasi sederhana, waktu pemesinan dapat dihitung dengan $t_c = l_m / v_f$. Simbol t_c menyatakan waktu dalam menit. Simbol l_m menyatakan panjang pemesinan total dalam milimeter. Simbol v_f menyatakan kecepatan makan dalam mm per menit. Panjang pemesinan total biasanya mencakup panjang benda

kerja yang dipotong, panjang awal masuk pahat, dan panjang keluar pahat. Dalam proses frais, panjang pemesinan total tidak selalu sama dengan panjang benda kerja. Pisau perlu masuk sebelum menyayat penuh dan keluar setelah melewati benda kerja. Pada face milling, diameter pisau dapat membuat panjang pendekatan berbeda dari end milling. Pada frais horizontal, arah masuk pisau dan bentuk kontak juga memengaruhi panjang tambahan. Jika pendekatan dan keluar pahat diabaikan, perhitungan waktu menjadi terlalu optimis. Manusia memang hobi membuat jadwal optimis, lalu menyalahkan bengkel saat realitas menolak ikut bermain.

Jika sebuah bidang membutuhkan beberapa lintasan, waktu total perlu memperhitungkan jumlah lintasan. Misalnya, bidang lebar dikerjakan dengan pisau yang tidak cukup menyapu seluruh lebar dalam satu lintasan. Operator perlu melakukan beberapa lintasan sejajar. Waktu total dapat diperkirakan dari jumlah lintasan dikalikan waktu per lintasan, lalu ditambah waktu tidak langsung seperti pengaturan posisi, pengukuran, pembersihan geram, dan penggantian pahat bila diperlukan. Untuk perencanaan produksi, waktu tidak langsung ini sering cukup besar. Waktu pemesinan berhubungan erat dengan biaya produksi. Jika gerak makan terlalu kecil, waktu proses bertambah. Jika parameter terlalu agresif, pahat cepat aus atau benda kerja rusak sehingga waktu pengerjaan ulang meningkat. Wang et al. (2023) menempatkan pemesinan berkelanjutan sebagai integrasi antara peralatan, proses, dan strategi. Dalam konteks frais, strategi yang baik bukan hanya mempercepat pemotongan, tetapi menjaga proses tetap stabil, mengurangi pemborosan energi, memperpanjang umur pahat, dan menekan kegagalan benda kerja.

Hubungan antarparameter dapat dipahami melalui contoh sederhana. Sebuah end mill berdiameter 20 mm dengan empat gigi digunakan pada kecepatan potong 60 m per menit. Putaran spindle dihitung dengan $n = 1000 \times 60 / (\pi \times 20)$, sehingga hasilnya sekitar 955 rpm. Jika gerak makan per gigi dipilih 0,05 mm per gigi, maka kecepatan makan menjadi $v_f = 0,05 \times 4 \times 955$, yaitu sekitar 191 mm per menit. Jika panjang pemesinan total 120 mm, waktu satu lintasan menjadi $t_c = 120 / 191$, yaitu sekitar 0,63 menit. Contoh tersebut memperlihatkan bahwa satu parameter dapat memengaruhi parameter lain. Bila diameter pisau diubah, putaran berubah. Bila jumlah gigi berubah, kecepatan makan berubah. Bila

gerak makan per gigi dinaikkan, waktu pemesinan turun, tetapi beban pahat naik. Bila kedalaman potong dinaikkan, material lebih cepat terbuang, tetapi gaya potong meningkat. Perhitungan ini membantu operator memahami akibat teknis sebelum mesin dijalankan, bukan setelah pahat mengeluarkan suara yang menyedihkan.

Parameter pemotongan juga harus disesuaikan dengan jenis operasi frais. Pada face milling, diameter pisau besar dapat memberi bidang rata lebih cepat, tetapi membutuhkan daya dan kekakuan lebih besar. Pada end milling, gaya samping menjadi perhatian penting karena pahat dapat melentur. Pada T slot milling, gerak makan perlu lebih hati-hati karena pahat bekerja di dalam alur dengan ruang geram terbatas. Pada ball nose milling, jarak lintasan dan gerak makan menentukan kehalusan kontur. Pada frais horizontal, parameter pemotongan perlu mempertimbangkan arbor dan penopangnya. Pisau yang dipasang jauh dari kolom atau pada arbor panjang lebih rentan terhadap lenturan. Kedalaman potong dan gerak makan perlu diturunkan jika tanda getaran muncul. Pada frais vertikal, perhatian berpindah pada kekakuan tool holder, panjang penjururan pahat, dan kestabilan sumbu Z. Perbedaan orientasi mesin tidak mengubah rumus dasar, tetapi mengubah batas praktis penggunaannya.

Pemilihan parameter untuk pengasaran dan penyelesaian memiliki karakter berbeda. Pada pengasaran, tujuan utama adalah membuang material dengan cepat, sehingga kedalaman potong dan gerak makan dapat dibuat lebih besar dalam batas aman. Pada penyelesaian, tujuan utama adalah mencapai ukuran dan kualitas permukaan, sehingga kedalaman potong serta gerak makan dikurangi. Putaran dapat disesuaikan agar proses lebih halus, tetapi tidak boleh sampai menyebabkan panas berlebih atau keausan cepat. Permukaan akhir benda kerja sangat dipengaruhi oleh kombinasi parameter. Gerak makan per gigi menentukan jarak dan tinggi bekas pemotongan. Kecepatan potong memengaruhi panas, pembentukan geram, dan keausan pahat. Kedalaman potong memengaruhi gaya dan getaran. Trinh (2024) menegaskan bahwa prediksi kekasaran permukaan dalam pemesinan akhir dapat membantu memilih kondisi pemotongan dan mengurangi biaya. Dalam pekerjaan frais, permukaan yang baik bukan hasil kebetulan, tetapi hasil dari parameter yang dipilih secara sadar.

Penggunaan coolant atau media pendingin dapat membantu menurunkan temperatur dan mengurangi gesekan pada kondisi tertentu. Pendingin juga dapat membantu membuang geram dari area pemotongan. Namun, penggunaannya perlu disesuaikan dengan material dan jenis operasi. Pada beberapa material, pendingin sangat membantu. Pada kondisi lain, strategi pemotongan kering atau pelumasan minimum dapat dipilih untuk alasan teknis dan lingkungan. Keputusan ini termasuk bagian dari pengendalian proses, bukan sekadar kebiasaan menyiram benda kerja agar terlihat sibuk. Kekakuan mesin menjadi pembatas nyata pada pemilihan parameter. Mesin yang masih baik dan terawat dapat menerima parameter lebih stabil. Mesin yang longgar pada meja, spindle, atau eretan perlu diperlakukan lebih hati-hati. Gerak makan dan kedalaman potong yang terlalu besar pada mesin kurang kaku akan menimbulkan getaran. Getaran memperburuk permukaan, mempercepat keausan pahat, dan dapat merusak ukuran. Tidak semua mesin dapat dipaksa bekerja seperti katalog pabrikan, terutama setelah bertahun-tahun mengalami nasib bengkel.

Pencekaman benda kerja juga ikut menentukan parameter aman. Benda kerja yang pendek dan tercekam kuat dapat menerima pemakanan lebih stabil. Benda kerja tipis, panjang, atau menonjol tinggi dari ragum lebih mudah bergetar. Pada kondisi seperti itu, kedalaman potong dan gerak makan perlu dikurangi. Penopang tambahan, paralel, klem, atau blok bantu dapat digunakan agar benda kerja lebih stabil. Parameter yang baik selalu berpasangan dengan pencekaman yang baik. Pengukuran antara perlu dilakukan setelah beberapa lintasan, terutama pada pekerjaan yang mendekati ukuran akhir. Operator dapat memeriksa dimensi, kerataan, kedalaman alur, atau kualitas permukaan sebelum melanjutkan proses. Jika ukuran mulai menyimpang, parameter atau posisi meja dapat dikoreksi. Pemeriksaan ini mencegah kesalahan berkembang sampai benda kerja gagal. Dalam pemesinan, kesalahan kecil yang cepat ditemukan masih bisa menjadi pelajaran murah. Kesalahan yang ditemukan setelah selesai biasanya menjadi benda kerja baru, alias biaya tambahan.

Dalam pembelajaran, parameter pemotongan sebaiknya tidak diajarkan hanya sebagai rumus. Kita perlu memahami makna fisiknya. Kecepatan potong berkaitan dengan panas dan keausan. Putaran spindle berkaitan dengan diameter pisau. Gerak makan per

gigi berkaitan dengan tebal geram tiap mata potong. Kedalaman potong berkaitan dengan gaya pemotongan. Waktu pemesinan berkaitan dengan produktivitas. Saat makna ini dipahami, rumus tidak lagi terlihat sebagai beban hafalan, melainkan alat untuk mengendalikan proses. Kesalahan umum dalam pemilihan parameter frais biasanya muncul dari cara berpikir yang terlalu sederhana. Ada yang menaikkan putaran karena ingin cepat, tetapi lupa bahwa pahat bisa panas dan aus. Ada yang memperbesar gerak makan karena mengejar waktu, tetapi permukaan menjadi kasar. Ada yang menambah kedalaman potong agar material cepat habis, tetapi mesin mulai bergetar. Ada pula yang memakai parameter terlalu kecil, lalu proses menjadi lama dan pahat bergesekan. Semua kesalahan itu berasal dari satu akar yang sama, yaitu mengabaikan hubungan antarparameter.

Parameter pemotongan proses frais perlu dipilih melalui urutan berpikir yang jelas. Pertama, kenali material benda kerja. Kedua, pilih jenis dan diameter cutter. Ketiga, tentukan kecepatan potong yang sesuai. Keempat, hitung putaran spindle. Kelima, pilih gerak makan per gigi berdasarkan jenis pahat, material, dan tujuan pengerjaan. Keenam, hitung kecepatan makan. Ketujuh, tentukan kedalaman potong berdasarkan tahap pengasaran atau penyelesaian. Kedelapan, perkirakan waktu pemesinan. Urutan ini membuat proses lebih masuk akal daripada menyetel mesin berdasarkan firasat. Dalam praktik industri modern, parameter pemotongan tidak hanya ditentukan secara manual. Banyak mesin CNC memakai basis data pahat, rekomendasi pabrikan, simulasi lintasan, dan pemantauan sensor. Namun, prinsip dasarnya tetap sama. Sistem digital tetap membutuhkan masukan berupa diameter pahat, jumlah gigi, kecepatan potong, gerak makan, dan kedalaman potong. Jika dasar ini salah, sistem otomatis hanya akan menjalankan kesalahan dengan lebih cepat dan lebih rapi. Otomasi memang hebat, tetapi bukan pengganti pemahaman.

Parameter pemotongan juga berkaitan dengan umur pahat. Kecepatan terlalu tinggi meningkatkan panas. Gerak makan terlalu besar meningkatkan beban tiap gigi. Kedalaman potong terlalu besar meningkatkan gaya dan getaran. Jika pahat aus, permukaan memburuk dan dimensi mulai sulit dipertahankan. Karabacak (2024) memperlihatkan bahwa kondisi keausan pahat pada frais dapat diperkirakan melalui data sensor, yang menunjukkan betapa pentingnya memantau kondisi pahat dalam proses nyata.

Pemahaman terhadap parameter pemotongan membuat operator dapat menilai proses secara lebih rasional. Jika permukaan kasar, ia tidak langsung menyalahkan mesin. Ia dapat memeriksa gerak makan, ketajaman pahat, putaran, pencekaman, dan kedalaman potong. Jika pahat cepat aus, ia dapat meninjau kecepatan potong, pendinginan, dan beban per gigi. Jika waktu proses terlalu lama, ia dapat melihat apakah gerak makan atau jumlah lintasan terlalu konservatif. Pendekatan seperti ini jauh lebih sehat daripada menebak sambil berharap mesin berbaik hati.

G. Pemilihan Kondisi Pemotongan Berdasarkan Material dan Cutter

Pemilihan kondisi pemotongan berdasarkan material dan cutter merupakan tahap yang menentukan keberhasilan proses frais. Setelah kecepatan potong, putaran spindle, gerak makan per gigi, kedalaman potong, dan waktu pemesinan dipahami, pertanyaan berikutnya adalah bagaimana memilih nilai yang tepat untuk kondisi nyata. Nilai parameter tidak dapat diambil secara sembarangan, karena setiap material benda kerja dan setiap jenis pisau frais memiliki kemampuan yang berbeda. Mesin frais memang dapat bergerak pada sumbu X, Y, dan Z, tetapi arah gerak yang banyak tidak otomatis membuat keputusan teknis menjadi benar. Dalam proses frais, material benda kerja menjadi dasar pertama dalam pemilihan kondisi pemotongan. Material yang lunak seperti aluminium, tembaga, dan baja lunak umumnya dapat diproses dengan kecepatan potong dan gerak makan lebih tinggi dibandingkan material yang lebih keras. Baja perkakas, baja tahan karat, dan paduan temperatur tinggi membutuhkan pemilihan parameter yang lebih hati-hati karena gaya potong, panas, dan keausan pahat cenderung lebih besar. Prinsipnya sederhana, tetapi sering dilanggar: material yang lebih sulit dipotong tidak boleh dipaksa memakai kondisi yang sama dengan material lunak.

Jenis cutter menjadi dasar kedua. Pahat HSS atau high speed steel banyak digunakan dalam bengkel konvensional karena mudah diasah, relatif tangguh, dan cukup aman untuk pekerjaan umum. Cutter karbida atau carbide cutter memiliki kekerasan panas lebih baik sehingga dapat bekerja pada kecepatan lebih tinggi. Cutter keramik atau ceramic cutter bahkan dapat digunakan pada kondisi tertentu yang lebih panas dan lebih cepat, meskipun sifatnya lebih getas dan menuntut mesin yang lebih kaku. Jadi, semakin kuat bahan alat potong, semakin besar peluang memilih kondisi

pemotongan yang lebih agresif, asalkan sistem mesin memang mampu menahannya. Pemilihan kondisi pemotongan tidak hanya menyangkut angka kecepatan potong. Kecepatan potong harus dibaca bersama gerak makan per gigi, kedalaman potong, diameter cutter, jumlah gigi, bentuk pisau, jenis pendingin, dan metode pemakanan. Jika kecepatan dinaikkan tetapi gerak makan tidak sesuai, pahat dapat lebih banyak menggesek daripada menyayat. Jika gerak makan dinaikkan tanpa memperhatikan kedalaman potong, beban tiap gigi menjadi terlalu besar. Jika kedalaman potong dinaikkan pada mesin yang tidak kaku, getaran akan datang seperti tamu yang tidak diundang, tetapi sangat berisik.

Pada tahap pengasaran atau roughing, tujuan utama adalah membuang material dalam waktu yang lebih singkat. Karena itu, kedalaman potong dan gerak makan dapat dibuat lebih besar dalam batas aman. Permukaan hasilnya belum harus sangat halus, karena masih akan diselesaikan pada tahap berikutnya. Pada tahap penyelesaian atau finishing, tujuan kerja berubah. Fokusnya bukan lagi membuang material sebanyak mungkin, melainkan mencapai ukuran akhir dan kualitas permukaan yang baik. Pada tahap ini, kedalaman potong dan gerak makan biasanya dikurangi, sedangkan putaran dapat disesuaikan agar penyayatan lebih halus. Trinh (2024) menjelaskan bahwa pemilihan parameter pemotongan berkaitan dengan kualitas kekasaran permukaan, biaya, dan kondisi pemesinan. Pernyataan ini penting karena kondisi pemotongan tidak boleh dilihat hanya dari sisi produktivitas. Proses yang cepat tetapi menghasilkan permukaan kasar, ukuran menyimpang, atau pahat cepat aus bukan proses yang efisien. Itu hanya cara cepat menciptakan pekerjaan tambahan. Dalam proses frais, hasil yang baik muncul dari keseimbangan antara kecepatan kerja, umur pahat, kualitas permukaan, dan kestabilan pemotongan.

Material aluminium memberi contoh yang cukup jelas. Aluminium relatif lunak dan mudah dipotong, sehingga kecepatan potong dapat dibuat lebih tinggi dibandingkan baja. Namun, aluminium juga dapat menempel pada mata potong jika kondisi pemotongan, sudut pahat, dan pendinginan tidak sesuai. Pada kondisi seperti ini, built up edge dapat muncul dan merusak kualitas permukaan. Karena itu, meskipun aluminium mudah dipotong, pemilihan cutter tajam, gerak makan yang benar, dan pembuangan geram tetap penting. Baja lunak atau mild steel umumnya lebih berat dipotong daripada aluminium, tetapi masih

tergolong material yang relatif umum dikerjakan di bengkel. Untuk material ini, HSS dapat digunakan pada kondisi konservatif, sedangkan karbida dapat dipakai untuk kecepatan lebih tinggi bila mesin cukup kaku. Gerak makan dapat dipilih sedang pada tahap pengasaran dan diturunkan saat penyelesaian. Jika pahat mulai bergetar atau permukaan tampak sobek, parameter perlu ditinjau ulang, bukan diselesaikan dengan menambah tenaga dan berharap baja tersentuh secara emosional.

Baja tahan karat atau stainless steel menuntut pendekatan yang lebih hati-hati. Material ini cenderung ulet, dapat menghasilkan panas tinggi, dan pada beberapa jenis dapat mengalami pengerasan kerja jika pahat lebih banyak menggesek daripada menyayat. Karena itu, pemilihan cutter yang tajam, gerak makan yang cukup untuk membentuk geram, dan pendinginan yang tepat menjadi penting. Kecepatan potong tidak boleh terlalu tinggi bila pahat dan mesin tidak mendukung, karena panas berlebih akan mempercepat keausan pahat. Besi tuang atau cast iron memiliki karakter berbeda. Geramnya cenderung pendek dan rapuh, tetapi dapat bersifat abrasif. Pada proses frais, debu dan serpihan besi tuang dapat mempercepat keausan alat potong dan mengotori area mesin. Cutter karbida sering lebih sesuai untuk pekerjaan besi tuang karena ketahanan ausnya lebih baik. Namun, pencekaman tetap harus kuat karena pemotongan frais bersifat terputus-putus, sehingga gaya dapat berubah secara periodik.

Tembaga dan kuningan memiliki sifat yang juga perlu dibedakan. Kuningan biasanya relatif mudah dikerjakan dan dapat menghasilkan geram pendek jika pahat sesuai. Tembaga lebih ulet dan dapat cenderung menempel pada alat potong. Untuk kedua material ini, pemilihan sudut pahat, ketajaman pisau, dan gerak makan sangat menentukan. Pada material lunak, gerak makan terlalu kecil kadang justru membuat pahat menggosok permukaan terlalu lama, sebuah cara halus untuk memperburuk hasil sambil tampak berhati-hati. Bahan cutter menentukan batas kerja alat potong. HSS cocok untuk pekerjaan umum, kecepatan sedang, dan kondisi mesin yang tidak terlalu kaku. Karbida lebih tahan terhadap panas dan aus, sehingga cocok untuk kecepatan lebih tinggi dan produksi yang lebih serius. Keramik dapat digunakan pada kondisi tertentu dengan temperatur tinggi, tetapi kurang cocok untuk pemotongan yang banyak hentakan jika mesin dan benda kerja tidak stabil. Dalam proses frais, pemotongan terputus

membuat ketangguhan pahat menjadi penting, bukan hanya kekerasannya.

Bentuk cutter juga ikut memengaruhi kondisi pemotongan. Face mill berdiameter besar dapat meratakan bidang dengan cepat, tetapi membutuhkan daya dan kekakuan mesin lebih besar. End mill kecil lebih fleksibel untuk alur dan kantong, tetapi lebih mudah lentur jika penjulurannya panjang. Ball nose end mill cocok untuk kontur dan permukaan radius, tetapi membutuhkan jarak lintasan yang rapat jika ingin menghasilkan permukaan halus. Slitting cutter tipis memerlukan gerak makan hati hati karena lebih rentan melentur atau patah. Jumlah gigi pada cutter menentukan pembagian beban pemotongan. Pisau dengan gigi lebih banyak dapat memberi pemotongan lebih sering dalam satu putaran, tetapi ruang antar gigi untuk geram menjadi lebih kecil. Pisau dengan gigi lebih sedikit memberi ruang geram lebih besar, cocok untuk material lunak atau pemotongan yang menghasilkan geram besar. Pada aluminium, misalnya, end mill dengan ruang geram besar sering lebih membantu pembuangan geram. Pada baja, jumlah gigi dapat dipilih lebih banyak bila geram lebih terkendali dan mesin cukup stabil.

Pada pekerjaan aluminium, cutter dengan alur geram yang luas sering membantu. Geram aluminium dapat keluar lebih banyak dan lebih panjang, sehingga ruang geram yang sempit dapat membuat geram tersangkut. Jika geram tersayat ulang, permukaan menjadi buruk dan panas meningkat. Pendinginan, pelumasan, atau hembusan udara dapat membantu pembuangan geram. Dalam pekerjaan produksi, pemilihan pahat khusus aluminium sering memberi hasil lebih baik daripada memakai pahat umum untuk semua bahan. Pada pekerjaan baja lunak, pemilihan kondisi dapat dimulai dari nilai sedang. Untuk pengasaran, gerak makan dan kedalaman potong dapat dibuat lebih besar, tetapi suara mesin dan getaran harus diawasi. Untuk penyelesaian, gerak makan dan kedalaman potong diturunkan. Jika menggunakan HSS, kecepatan potong sebaiknya lebih konservatif dibanding karbida. Jika memakai karbida, kecepatan dapat dinaikkan, tetapi pencekaman dan kekakuan mesin harus memadai.

Pada pekerjaan baja tahan karat, menghindari gesekan berlebihan menjadi hal penting. Jika gerak makan terlalu kecil, pahat dapat menggosok permukaan dan memicu pengerasan kerja lokal. Setelah permukaan mengeras, pemotongan berikutnya

menjadi lebih sulit dan pahat lebih cepat aus. Karena itu, gerak makan harus cukup untuk menghasilkan geram, tetapi tidak terlalu besar sampai membebani pahat. Ini salah satu contoh bahwa “lebih kecil” tidak selalu berarti lebih aman, sebuah pelajaran yang tampaknya perlu diulang di banyak bengkel. Pada pekerjaan besi tuang, kondisi pemotongan perlu mempertimbangkan sifat abrasif material. Keausan pahat dapat berlangsung cepat bila alat potong tidak sesuai. Karbida sering menjadi pilihan karena lebih tahan aus dibanding HSS. Namun, operator juga perlu memperhatikan kebersihan mesin karena geram dan debu besi tuang dapat menyebar. Penggunaan pendingin pada besi tuang perlu disesuaikan dengan kebiasaan bengkel dan jenis pekerjaan, karena beberapa proses dilakukan kering untuk menghindari lumpur geram yang mengotori mesin.

Pada pekerjaan baja perkakas, pemilihan kondisi pemotongan cenderung lebih konservatif. Material ini lebih keras, sehingga kecepatan potong perlu diturunkan dan kedalaman potong dibuat bertahap. Cutter karbida atau pahat berlapis dapat membantu, tetapi bukan alasan untuk memaksa proses secara berlebihan. Jika mesin kurang kaku atau benda kerja sulit dicekam, parameter perlu dikurangi. Pahat mahal yang patah karena keputusan buruk tetap patah, meskipun namanya terdengar canggih. Tahap pengerjaan juga menjadi faktor penting. Pada roughing, fokusnya adalah laju pembuangan material. Kondisi pemotongan dapat dipilih lebih agresif, tetapi tetap dalam batas daya mesin, kekakuan pahat, dan pencekaman benda kerja. Pada finishing, fokusnya adalah kualitas permukaan dan ketelitian ukuran. Gerak makan per gigi diperkecil, kedalaman potong dikurangi, dan pahat harus tajam. Jika permukaan akhir adalah bidang dudukan, jalur geser, atau bidang pasangan, parameter finishing tidak boleh dipilih sembarangan.

Hata, Widiatmoko, dan Mulyana (2023) menunjukkan bahwa optimasi parameter pada proses CNC wet milling baja tahan karat austenitik dapat dikaitkan dengan kekasaran permukaan. Temuan ini mendukung gagasan bahwa parameter proses harus disesuaikan dengan material dan tujuan kualitas. Walaupun proses pada mesin CNC lebih terprogram, dasar penalarannya tetap sama: material, alat potong, pendingin, gerak makan, dan kedalaman potong bekerja bersama menentukan hasil. Karabacak (2024) membahas estimasi keausan pahat pada proses frais menggunakan sinyal multi

sensor dan algoritma machine learning. Kajian seperti ini menunjukkan bahwa kondisi pemotongan dapat dibaca dari respons proses, seperti getaran, sinyal, dan perubahan pahat. Dalam bengkel konvensional, operator mungkin belum memakai sensor canggih, tetapi ia tetap dapat membaca gejala dasar seperti suara potong, bentuk geram, bekas permukaan, dan panas pada pahat. Teknologinya berbeda, prinsip pengamatannya masih satu keluarga.

Kekakuan mesin atau rigidity membatasi seberapa besar kondisi pemotongan dapat dinaikkan. Mesin dengan konstruksi kaku, spindle baik, meja tidak longgar, dan ragam kuat dapat menerima pemotongan lebih stabil. Mesin yang sudah aus atau longgar harus diberi parameter lebih hati-hati. Jika getaran muncul, memperbesar gerak makan atau kedalaman potong bukan solusi. Itu lebih mirip mengundang masalah dengan undangan resmi. Pencekaman benda kerja menjadi pasangan wajib dari pemilihan kondisi pemotongan. Material yang sama dan cutter yang sama dapat membutuhkan parameter berbeda jika pencekamannya berbeda. Benda kerja pendek yang dijepit kuat dapat menerima pemakanan lebih baik daripada benda kerja tipis yang menonjol tinggi dari ragam. Pada benda kerja tipis, kedalaman potong dan gerak makan perlu dikurangi agar benda kerja tidak melendut atau bergetar.

Bentuk operasi frais juga memengaruhi pilihan kondisi. Pada face milling, pisau berdiameter besar dapat meratakan bidang dengan cepat, tetapi membutuhkan daya dan kekakuan yang cukup. Pada end milling, gaya samping perlu diperhatikan karena pahat dapat melentur. Pada slot milling, geram sulit keluar dari celah sehingga gerak makan dan kedalaman potong harus dipilih hati-hati. Pada ball nose milling, jarak lintasan dan gerak makan menentukan kehalusan kontur. Diameter cutter ikut menentukan putaran spindle. Untuk kecepatan potong yang sama, pisau berdiameter besar membutuhkan putaran lebih rendah, sedangkan pisau kecil membutuhkan putaran lebih tinggi. Hal ini terjadi karena titik pada keliling pisau besar menempuh jarak lebih panjang dalam satu putaran. Jika diameter tidak diperhitungkan, kecepatan potong nyata dapat berbeda jauh dari yang diharapkan. Ini salah satu contoh bagaimana rumus sederhana menyelamatkan manusia dari rasa percaya diri yang tidak berdasar.

Jumlah mata potong juga memengaruhi gerak makan. Pada pisau dengan banyak gigi, kecepatan makan dapat lebih tinggi untuk gerak makan per gigi yang sama. Namun, ruang antar gigi menjadi lebih kecil, sehingga pembuangan geram perlu diperhatikan. Pada material lunak yang menghasilkan geram besar, pisau dengan terlalu banyak gigi dapat membuat geram tersangkut. Pada material yang menghasilkan geram lebih kecil, jumlah gigi lebih banyak dapat membantu menghasilkan permukaan lebih rapi. Penggunaan media pendingin atau coolant perlu disesuaikan dengan material dan jenis pemotongan. Pendingin dapat menurunkan temperatur, mengurangi gesekan, membantu pembuangan geram, dan memperpanjang umur pahat. Namun, tidak semua proses membutuhkan pendingin yang sama. Ada pekerjaan yang lebih sesuai memakai pendinginan cair, ada yang cukup dengan udara, ada pula yang dikerjakan kering dengan pertimbangan tertentu. Wang et al. (2023) menempatkan cairan pendingin, energi, proses, dan strategi sebagai bagian dari pemesinan berkelanjutan, sehingga pemilihan pendingin juga terkait efisiensi dan dampak proses.

Kondisi pemotongan perlu dipilih dengan memperhatikan umur pahat atau tool life. Kecepatan potong yang terlalu tinggi dapat mempercepat keausan karena panas. Gerak makan terlalu besar dapat memperbesar beban mekanis tiap gigi. Kedalaman potong berlebihan dapat meningkatkan gaya dan getaran. Jika pahat cepat aus, biaya produksi naik karena pahat harus sering diganti dan benda kerja lebih berisiko gagal. Pahat bukan barang abadi, meski kadang diperlakukan seperti korban tak bersuara di bengkel. Permukaan benda kerja menjadi indikator langsung dari kondisi pemotongan. Permukaan kasar dapat menunjukkan gerak makan terlalu besar, pahat aus, getaran, atau kedalaman potong terlalu berat. Permukaan yang tampak tergesek dapat menunjukkan pahat tidak cukup menyayat. Bekas gelombang dapat menunjukkan getaran mesin atau pencekaman yang lemah. Dalam pekerjaan frais, membaca permukaan sama pentingnya dengan membaca tabel parameter.

Bentuk geram juga memberi petunjuk. Geram yang terlalu tebal dapat menunjukkan gerak makan atau kedalaman potong terlalu besar. Geram yang terlalu halus dan disertai panas dapat menunjukkan gesekan berlebihan. Geram yang tersangkut di sekitar pahat dapat menandakan ruang geram kurang cukup atau

pendinginan kurang efektif. Pada proses frais, setiap gigi pisau membentuk geram secara berkala, sehingga perubahan geram sering mengikuti perubahan kondisi potong. Pemilihan kondisi pemotongan sebaiknya dilakukan secara bertahap. Operator dapat memulai dari nilai rekomendasi yang aman, lalu mengamati suara, geram, getaran, dan permukaan. Jika proses stabil, parameter dapat disesuaikan sesuai kebutuhan produksi. Jika muncul getaran, panas, atau permukaan buruk, parameter harus diturunkan atau penyebab mekanis diperiksa. Mengubah semua parameter sekaligus hanya membuat sumber masalah sulit dilacak, sebuah kebiasaan yang tampak aktif tetapi sering tidak cerdas.

Pada mesin CNC, pemilihan kondisi pemotongan sering dibantu oleh katalog pahat, perangkat lunak CAM, dan basis data material. Meski begitu, operator tetap harus memahami prinsip dasarnya. Program CAM dapat memberikan nilai awal, tetapi tidak selalu mengetahui kondisi nyata ragam, kekakuan benda kerja, keausan pahat, atau kelonggaran mesin. Jika data awal salah, sistem otomatis hanya akan menjalankan kesalahan dengan rapi dan mahal. Otomasi memang cepat, termasuk cepat memperbesar akibat keputusan buruk. Pada mesin frais konvensional, pengalaman operator lebih terlihat. Namun, pengalaman tanpa dasar teknis dapat berubah menjadi kebiasaan yang sulit diuji. Pemilihan kondisi pemotongan perlu memadukan tabel rekomendasi, prinsip material, jenis cutter, kondisi mesin, dan pemeriksaan hasil. Dengan cara ini, keputusan tidak hanya bergantung pada “biasanya begini”, tetapi memiliki alasan yang dapat dijelaskan dan diperbaiki.

Dalam pembelajaran, contoh sederhana dapat digunakan. Jika benda kerja aluminium dikerjakan dengan end mill karbida, kecepatan potong dapat dipilih lebih tinggi dan gerak makan dapat dibuat cukup besar, selama geram keluar lancar dan mesin stabil. Jika benda kerja baja tahan karat dikerjakan dengan HSS, kecepatan perlu lebih rendah, pahat harus tajam, gerak makan tidak boleh terlalu kecil, dan pendinginan perlu diperhatikan. Dua contoh ini memperlihatkan bahwa material dan cutter mengubah seluruh strategi pemotongan. Contoh lain dapat dilihat pada pekerjaan face milling baja lunak. Jika memakai face mill karbida berdiameter besar, operator dapat memilih putaran berdasarkan kecepatan potong yang sesuai, lalu menetapkan gerak makan per gigi berdasarkan jumlah gigi. Untuk pengasaran, kedalaman

potong dapat lebih besar. Untuk penyelesaian, kedalaman dan gerak makan dikurangi. Pemeriksaan permukaan dilakukan setelah lintasan awal agar parameter dapat disesuaikan sebelum seluruh bidang selesai.

Kondisi pemotongan juga berkaitan dengan daya mesin. Mesin kecil tidak dapat menerima kedalaman potong dan gerak makan sebesar mesin industri yang lebih kuat. Jika daya tidak cukup, putaran dapat turun, suara mesin berubah, dan permukaan menjadi buruk. Pada kondisi seperti itu, mengurangi kedalaman potong biasanya lebih masuk akal daripada memaksa motor bekerja melampaui kemampuan. Motor listrik tidak sedang mencari pembuktian diri, ia hanya mengikuti batas dayanya. Pemilihan kondisi pemotongan harus memasukkan faktor keselamatan. Parameter agresif meningkatkan gaya potong dan risiko kegagalan pahat. Pahat kecil dapat patah jika dipaksa memotong terlalu dalam. Benda kerja dapat bergeser jika pencekaman lemah. Geram dapat keluar lebih panas dan tajam pada kondisi berat. Karena itu, kondisi pemotongan bukan hanya urusan kualitas dan waktu, tetapi juga pengendalian risiko kerja.

Pemilihan kondisi pemotongan berdasarkan material dan cutter dapat diringkas sebagai proses membaca kemampuan material, kemampuan alat potong, tuntutan permukaan, dan batas mesin. Material menentukan tingkat kesulitan penyayatan. Cutter menentukan kemampuan panas, ketahanan aus, dan bentuk geram. Tujuan pengerjaan menentukan apakah parameter diarahkan untuk pengasaran atau penyelesaian. Mesin dan pencekaman menentukan batas praktis yang aman. Pemahaman ini menjadi dasar untuk membahas metode frais naik dan frais turun. Setelah kondisi pemotongan dipilih, arah hubungan antara putaran pisau dan gerak benda kerja masih perlu ditentukan. Metode frais naik dan frais turun akan memengaruhi tebal geram, gaya potong, kecenderungan benda kerja terangkat atau tertarik, serta kualitas permukaan. Artinya, memilih material, cutter, dan parameter belum cukup. Arah pemakanan juga perlu dipahami, karena mesin frais tampaknya belum puas jika manusia hanya membuat satu keputusan teknis.

H. Metode Frais Naik atau Up Milling

Metode frais naik atau up milling merupakan salah satu metode dasar dalam proses frais yang menjelaskan hubungan arah putaran cutter dengan arah gerak makan benda kerja. Pada metode

ini, arah gerak benda kerja berlawanan dengan arah gerak mata potong di titik kontak. Karena itulah metode ini sering disebut juga sebagai metode frais konvensional atau conventional milling. Istilah konvensional bukan sekadar penamaan, melainkan menunjukkan bahwa metode ini banyak digunakan pada mesin frais manual, terutama ketika sistem penggerak meja masih memiliki celah balik atau backlash. Pada proses frais, alat potong berputar sebagai gerak utama, sedangkan benda kerja bergerak secara translasi mengikuti arah meja mesin. Ketika kedua gerak tersebut bertemu pada titik pemotongan, terbentuklah geram. Dalam frais naik, gigi cutter mulai menyentuh benda kerja dengan tebal geram yang sangat kecil. Setelah gigi bergerak lebih jauh, tebal geram bertambah secara bertahap sampai mencapai nilai maksimum menjelang akhir kontak. Pola pembentukan geram inilah yang menjadi ciri paling penting dari up milling.

Tebal geram yang dimulai dari kecil membuat proses awal pemotongan tidak langsung mengambil material secara penuh. Mata potong mula mula cenderung menggesek permukaan benda kerja sebelum benar benar menyayat. Setelah kontak berlanjut, mata potong mulai masuk lebih dalam dan menghasilkan geram yang makin tebal. Kondisi ini berbeda dari frais turun atau down milling, yang memulai penyayatan dari tebal geram maksimum lalu menurun. Perbedaan ini terlihat sederhana, tetapi dampaknya cukup besar terhadap gaya potong, panas, permukaan, dan umur pahat. Dalam up milling, gaya pemotongan cenderung memiliki komponen yang mengangkat benda kerja dari meja atau ragum. Karena arah pemotongan berlawanan dengan gerak makan, gaya yang muncul dapat menarik benda kerja ke atas, terutama bila pencekaman tidak kuat. Kecenderungan ini menjadi salah satu kelemahan utama metode frais naik. Jika benda kerja tidak dijepit dengan baik, hasil pemesinan dapat menjadi tidak rata, permukaan bergetar, dan ukuran menyimpang dari rencana.

Meskipun memiliki kelemahan tersebut, frais naik sering dipilih pada mesin frais konvensional. Alasannya berkaitan dengan keamanan gerak meja. Pada mesin yang memiliki backlash, up milling lebih aman karena arah gaya potong cenderung menahan gerak meja, bukan menarik meja masuk ke arah pahat secara tiba tiba. Dalam kondisi mesin manual yang belum memakai sistem bebas celah balik, hal ini sangat penting. Benda kerja mungkin perlu dijepit lebih kuat, tetapi gerak meja relatif lebih mudah

dikendalikan oleh operator. Metode frais naik banyak digunakan dalam pekerjaan dasar, terutama pada mesin manual di bengkel pendidikan dan bengkel perawatan. Operator dapat mengendalikan gerak makan secara lebih bertahap, lalu membaca respons mesin melalui suara, getaran, bentuk geram, dan permukaan benda kerja. Dalam proses pembelajaran, metode ini membantu menunjukkan bagaimana arah gerak makan memengaruhi pembentukan geram. Pembaca tidak hanya mengetahui bahwa pisau frais berputar, tetapi juga memahami bagaimana arah putaran itu berinteraksi dengan benda kerja.

Pola geram yang dimulai dari tipis menyebabkan adanya kecenderungan gesekan awal antara mata potong dan permukaan benda kerja. Pada saat gigi pisau pertama kali menyentuh permukaan, ketebalan geram belum cukup besar untuk langsung terlepas. Akibatnya, mata potong dapat meluncur atau menggosok sebentar sebelum proses penyayatan terjadi secara efektif. Gesekan awal ini dapat meningkatkan panas dan mempercepat keausan pada ujung pahat, terutama bila pahat sudah mulai tumpul atau material benda kerja cukup keras. Gesekan awal pada up milling juga dapat memengaruhi kualitas permukaan. Karena mata potong tidak langsung mengambil geram secara bersih, permukaan dapat mengalami tekanan dan gesekan sebelum material terpotong. Pada pekerjaan yang menuntut kualitas permukaan tinggi, kondisi ini perlu diperhatikan. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kekasaran permukaan hasil pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pada frais naik, hubungan itu tampak melalui pengaruh gerak makan, ketajaman pahat, dan kestabilan pencekaman terhadap bekas permukaan.

Kualitas permukaan pada frais naik biasanya tidak sehalus frais turun, terutama pada kondisi mesin dan pahat yang tidak ideal. Namun, hal itu tidak berarti frais naik selalu buruk. Jika pahat tajam, benda kerja tercekam kuat, gerak makan dipilih tepat, dan kedalaman potong tidak berlebihan, hasil yang diperoleh tetap dapat memenuhi kebutuhan pekerjaan umum. Metode ini lebih tepat dibaca sebagai metode yang memiliki wilayah penggunaan tertentu, bukan metode yang harus ditolak hanya karena ada alternatif yang lebih halus. Pada mesin manual, persoalan backlash menjadi alasan kuat mengapa frais naik tetap banyak digunakan. Backlash adalah celah gerak bebas pada ulir penggerak meja

sebelum gerakan benar benar diteruskan. Jika metode frais turun digunakan pada mesin dengan backlash besar, gaya potong dapat menarik meja secara mendadak ke arah pisau. Kondisi tersebut berbahaya karena benda kerja dapat terseret, pahat menerima beban kejut, dan permukaan benda kerja menjadi rusak. Pada frais naik, arah gaya lebih menahan meja sehingga risiko tertarik mendadak lebih kecil.

Dalam frais naik, operator tetap harus memperhatikan pencekaman benda kerja. Gaya yang cenderung mengangkat benda kerja dari ragum harus dilawan dengan penjepitan yang kuat dan posisi benda kerja yang benar. Benda kerja sebaiknya diletakkan serendah mungkin pada ragum agar tidak mudah bergetar. Jika permukaan bawah benda kerja tidak rata, dapat digunakan paralel blok agar posisi lebih stabil. Pencekaman yang lemah akan memperbesar risiko getaran, perubahan ukuran, dan bekas permukaan yang tidak teratur. Kedalaman potong juga perlu dipilih secara hati hati. Kedalaman potong yang terlalu besar akan meningkatkan gaya potong dan memperbesar kecenderungan benda kerja terangkat. Pada pengasaran atau roughing, kedalaman potong memang dapat dibuat lebih besar untuk mempercepat pengurangan material, tetapi tetap harus mengikuti kekakuan mesin dan kekuatan pencekaman. Pada penyelesaian atau finishing, kedalaman potong lebih kecil membantu menurunkan gaya dan memperbaiki permukaan.

Gerak makan atau feed dalam frais naik menentukan tebal geram tiap gigi. Gerak makan terlalu kecil dapat membuat mata potong lebih banyak menggesek daripada menyayat. Gerak makan terlalu besar dapat meningkatkan beban tiap gigi dan membuat permukaan kasar. Karena itu, gerak makan harus cukup untuk membentuk geram, tetapi tidak sampai membebani pahat secara berlebihan. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa kondisi operasi frais dapat dibaca melalui sinyal proses untuk memperkirakan keausan pahat, yang memperlihatkan pentingnya mengendalikan parameter pemotongan secara konsisten. Kecepatan potong pada frais naik dipilih berdasarkan material benda kerja dan bahan cutter. Material lunak seperti aluminium dapat menerima kecepatan lebih tinggi dibandingkan baja keras. Cutter karbida dapat digunakan pada kecepatan lebih tinggi dibandingkan HSS, asalkan mesin cukup kaku. Namun, kecepatan terlalu tinggi pada frais naik dapat memperbesar panas akibat gesekan awal dan

meningkatkan risiko keausan. Kecepatan yang terlalu rendah juga tidak selalu baik karena dapat memperpanjang kontak gesek dan membuat proses tidak efisien.

Pada pekerjaan pengasaran, frais naik dapat digunakan untuk mengurangi material secara bertahap. Parameter perlu dipilih agar beban pahat tetap wajar. Kedalaman potong dapat dinaikkan dalam batas aman, sedangkan gerak makan dipilih sesuai material dan jumlah mata potong. Jika mesin mulai bergetar, operator perlu mengurangi kedalaman potong atau gerak makan, bukan memaksa proses sampai pahat memberi tanda protes berupa suara kasar. Pada pekerjaan penyelesaian, frais naik memerlukan perhatian lebih besar terhadap permukaan akhir. Karena adanya gesekan awal, pahat harus tajam dan parameter harus lebih ringan. Gerak makan dapat dikurangi, tetapi tidak boleh terlalu kecil sampai pahat hanya menggosok permukaan. Kedalaman potong kecil membantu menurunkan gaya dan memperbaiki kualitas hasil. Jika permukaan masih kasar, operator perlu memeriksa pahat, pencekaman, putaran, dan getaran mesin.

Metode frais naik dapat diterapkan pada frais horizontal maupun frais vertikal. Pada frais horizontal, metode ini sering muncul saat pisau mantel atau slab cutter menyayat permukaan benda kerja. Pada frais vertikal, prinsip yang sama dapat terjadi saat end mill atau face mill bergerak dengan arah pemakanan tertentu terhadap putaran pahat. Orientasi mesin boleh berbeda, tetapi hubungan arah gerak makan dan putaran mata potong tetap menjadi dasar penentu apakah proses disebut frais naik atau frais turun. Pada frais horizontal, gaya angkat pada benda kerja perlu diperhatikan dengan serius. Pisau yang berputar pada arbor mendatar dapat menghasilkan gaya yang tidak hanya menyayat, tetapi juga mencoba mengangkat atau menggeser benda kerja. Jika benda kerja dijepit terlalu tinggi atau tidak ditopang dengan baik, getaran lebih mudah muncul. Pemasangan ragum, penggunaan paralel, dan penguncian meja menjadi bagian dari pengendalian proses, bukan sekadar persiapan biasa.

Pada frais vertikal, frais naik sering ditemukan ketika sisi end mill menyayat dinding alur atau kontur luar. Arah lintasan meja menentukan apakah mata potong bekerja dengan pola naik atau turun pada sisi yang disayat. Pada mesin CNC, arah lintasan ini dapat diprogram. Pada mesin manual, operator mengatur arah gerak meja melalui handel. Walaupun gerakannya tampak sederhana,

konsekuensinya pada gaya dan permukaan tetap nyata. Perbedaan utama frais naik dengan frais turun terletak pada awal pembentukan geram. Pada frais naik, geram dimulai dari nol atau sangat kecil, lalu bertambah. Pada frais turun, geram dimulai dari tebal maksimum, lalu menurun. Pola ini membuat frais naik lebih banyak mengalami gesekan awal, sedangkan frais turun cenderung memotong lebih tegas sejak awal kontak. Karena itu, frais turun sering menghasilkan permukaan lebih halus pada mesin yang kaku, tetapi juga lebih menuntut sistem penggerak meja bebas backlash.

Penelitian Zubir et al. (2025) pada proses kering AISI 4340 menunjukkan bahwa orientasi frais, termasuk up milling dan down milling, memengaruhi kekasaran permukaan dan umur pahat. Dalam kajian tersebut, gerak makan menjadi salah satu faktor penting terhadap kekasaran permukaan pada frais naik. Temuan semacam ini memperkuat pemahaman bahwa metode frais tidak cukup dipilih berdasarkan nama, tetapi harus dibaca bersama parameter seperti kecepatan potong, gerak makan, kedalaman potong, dan lebar pemotongan. Penggunaan cairan pendingin atau coolant pada frais naik dapat membantu menurunkan panas dan mengurangi gesekan, terutama pada material yang cenderung menghasilkan panas tinggi atau geram yang sulit keluar. Namun, penggunaannya tetap perlu disesuaikan dengan material dan jenis operasi. Pada beberapa kondisi, pendinginan cair membantu memperpanjang umur pahat. Pada kondisi lain, pembuangan geram dengan udara atau pemotongan kering dapat dipilih dengan pertimbangan tertentu. Wang et al. (2023) menempatkan pemilihan strategi proses, alat potong, dan cairan pemotongan sebagai bagian dari pemesinan berkelanjutan.

Bentuk geram pada frais naik dapat digunakan sebagai petunjuk awal kondisi pemotongan. Geram yang terlalu tipis dan disertai permukaan mengkilap karena gesekan dapat menunjukkan gerak makan terlalu kecil atau pahat kurang tajam. Geram yang terlalu tebal dapat menandakan gerak makan atau kedalaman potong terlalu besar. Geram yang berubah warna karena panas dapat menunjukkan kecepatan terlalu tinggi atau pendinginan kurang efektif. Pengamatan geram membantu operator membaca proses sebelum kerusakan menjadi lebih serius. Suara pemotongan juga penting. Suara yang stabil menunjukkan proses relatif terkendali. Suara berdecit dapat menunjukkan gesekan awal yang berlebihan. Suara bergetar dapat menunjukkan benda kerja kurang

kuat dicekam, pahat terlalu panjang, atau parameter terlalu berat. Pada frais naik, suara seperti ini perlu ditanggapi cepat karena gaya angkat dapat memperbesar ketidakstabilan. Mengabaikan suara mesin bukan sikap tegas, melainkan cara lambat menuju hasil buruk.

Kondisi pahat menjadi faktor penentu. Pahat yang tajam dapat mengurangi gesekan awal dan membantu pembentukan geram lebih bersih. Pahat yang tumpul akan memperparah gesekan, menaikkan panas, dan menurunkan kualitas permukaan. Dalam metode frais naik, ketajaman pahat menjadi makin penting karena awal kontak memang rentan terhadap penggosokan. Pemeriksaan pahat sebelum pekerjaan dan penggantian pahat pada waktu yang tepat akan membantu menjaga hasil proses. Metode frais naik juga perlu memperhatikan arah serat atau struktur material bila benda kerja memiliki sifat anisotropik atau tidak seragam. Pada material cor, bagian keras dan lunak dapat memberi respons berbeda saat pahat mulai menyentuh permukaan. Pada material yang sudah mengalami pengerasan permukaan, gesekan awal dapat memperburuk keausan pahat. Karena itu, pada benda kerja yang permukaannya keras atau kasar, pemilihan kedalaman potong awal harus dibuat cukup untuk menembus lapisan permukaan tanpa membebani pahat secara berlebihan.

Pada pekerjaan dengan permukaan hasil cor atau permukaan oksida, frais naik bisa membuat pahat bergesekan lebih lama pada lapisan luar sebelum penyayatan penuh terjadi. Lapisan luar semacam itu kadang lebih keras atau abrasif dibanding bagian dalam material. Jika pahat sering menggosok lapisan keras tersebut, keausan dapat meningkat. Untuk kondisi seperti ini, operator perlu memilih pahat yang sesuai, memakai parameter yang cukup tegas untuk memotong, dan memastikan pencekaman kuat. Dalam konteks pendidikan, frais naik dapat diajarkan melalui percobaan sederhana pada balok logam. Benda kerja dijepit pada ragam, cutter diputar, lalu meja digerakkan berlawanan dengan arah gerak mata potong pada titik kontak. Setelah satu lintasan, permukaan, geram, dan suara pemotongan diamati. Percobaan ini membantu kita memahami bahwa arah pemakanan bukan sekadar panah pada gambar, tetapi faktor yang mengubah gaya, geram, dan kualitas permukaan.

Agar proses lebih aman, operator perlu memeriksa beberapa hal sebelum menjalankan frais naik. Benda kerja harus tercekam

kuat, posisi pahat harus sesuai, meja perlu dikunci pada sumbu yang tidak digunakan, dan kedalaman potong harus masuk akal. Jika menggunakan mesin horizontal, arbor dan arbor support perlu diperiksa. Jika memakai mesin vertikal, panjang penjururan cutter perlu dibuat sependek mungkin sesuai kebutuhan. Pemeriksaan semacam ini sederhana, tetapi banyak masalah bengkel lahir dari hal sederhana yang disepelekan. Frais naik cocok digunakan ketika mesin memiliki backlash yang tidak dapat diabaikan, ketika operator membutuhkan kendali meja yang lebih aman, atau ketika pekerjaan masih berada pada tahap pengasaran umum. Metode ini juga sesuai untuk pembelajaran dasar karena memperlihatkan hubungan arah putaran pisau dan arah gerak makan secara jelas. Namun, untuk permukaan akhir yang sangat halus dan mesin yang sudah kaku serta bebas backlash, metode frais turun dapat dipertimbangkan pada pembahasan berikutnya.

Batas penggunaan frais naik perlu disadari. Jika benda kerja tipis, tinggi, atau sulit dicekam, gaya angkat dapat menimbulkan masalah. Jika permukaan akhir menuntut kualitas sangat halus, frais naik mungkin membutuhkan lintasan penyelesaian tambahan atau parameter yang lebih ringan. Jika pahat tumpul, gesekan awal akan makin buruk. Karena itu, metode ini tidak boleh dipakai secara otomatis untuk semua pekerjaan. Setiap metode punya tempat, dan tugas operator adalah memilih tempat itu dengan nalar teknis. Metode frais naik memperlihatkan bahwa proses frais tidak hanya ditentukan oleh alat potong yang berputar. Arah gerak meja terhadap putaran cutter mengubah pembentukan geram, arah gaya, risiko getaran, dan kualitas permukaan. Dalam metode ini, tebal geram meningkat dari kecil menuju besar, gaya dapat mengangkat benda kerja, dan kendali meja pada mesin konvensional menjadi lebih aman. Pemahaman tersebut menjadi dasar sebelum membahas frais turun atau down milling, yang memiliki arah gaya dan karakter permukaan berbeda.

I. Metode Frais Turun atau Down Milling

Metode frais turun atau down milling merupakan metode pemakanan pada proses frais yang ditentukan oleh hubungan antara arah putaran cutter dan arah gerak benda kerja. Pada metode ini, arah gerak mata potong di titik kontak searah dengan arah gerak makan benda kerja. Karena gerak pisau seolah menarik dan memanjat permukaan benda kerja, metode ini sering juga disebut climb milling. Istilah tersebut menggambarkan bagaimana gigi

pisau masuk ke benda kerja dengan beban awal yang besar, lalu keluar dengan tebal geram yang makin kecil. Pada mesin frais, alat potong berputar sebagai gerak utama, sedangkan benda kerja bergerak translasi mengikuti meja mesin. Dalam frais turun, gigi pisau langsung menyentuh benda kerja dengan tebal geram maksimum pada awal pemotongan. Setelah gigi bergerak melewati zona potong, tebal geram semakin menurun hingga mencapai minimum pada akhir penyayatan. Pola pembentukan geram ini menjadi pembeda utama dari frais naik, yang justru dimulai dari tebal geram kecil lalu meningkat.

Karakter geram pada frais turun membuat proses penyayatan lebih tegas sejak awal kontak. Mata potong tidak perlu menggosok permukaan terlalu lama sebelum benar benar menyayat material. Karena geram langsung terbentuk dengan ketebalan yang cukup, gesekan awal antara pahat dan permukaan benda kerja dapat berkurang. Kondisi ini membantu menekan panas dan dapat memperbaiki kualitas permukaan pada banyak situasi. Tentu saja, mesin tetap menuntut syaratnya sendiri, karena logam tampaknya tidak tertarik pada optimisme manusia. Kelebihan utama frais turun adalah kemampuan menghasilkan permukaan yang relatif lebih halus dibandingkan frais naik pada kondisi mesin yang mendukung. Karena gigi pisau mulai menyayat dari ketebalan geram maksimum, material lebih cepat terpotong dan tidak terlalu lama mengalami penggosokan awal. Bekas penyayatan dapat lebih bersih, terutama bila pahat tajam, pencekaman kuat, dan parameter pemotongan dipilih secara tepat. Trinh (2024) menekankan bahwa kualitas permukaan hasil pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja.

Metode frais turun juga dapat mengurangi kecenderungan panas berlebih karena kontak gesek awal lebih kecil. Pada frais naik, mata potong sering menggosok permukaan sebelum mulai menyayat dengan efektif. Pada frais turun, penyayatan terjadi lebih langsung. Penurunan gesekan ini membantu menjaga kondisi pahat dan benda kerja, terutama pada pekerjaan penyelesaian atau finishing. Meski begitu, pengurangan panas tidak berarti proses bebas risiko. Jika parameter terlalu berat, panas dan getaran tetap dapat muncul. Dari sisi gaya, frais turun memiliki karakter yang berbeda dari frais naik. Pada frais turun, komponen gaya potong cenderung menekan benda kerja ke arah meja. Keadaan ini dapat membantu kestabilan benda kerja jika pencekaman sudah benar.

Namun, gaya potong juga dapat menarik meja searah gerak makan. Pada mesin yang memiliki celah balik atau backlash besar, tarikan ini dapat menyebabkan meja bergerak mendadak. Inilah alasan mengapa frais turun tidak selalu disarankan pada mesin frais konvensional yang sistem gerak mejanya belum cukup rapat.

Persoalan backlash menjadi titik penting dalam memahami frais turun. Backlash adalah celah bebas pada ulir penggerak meja sebelum gerak benar benar diteruskan. Jika celah ini besar, gaya potong pada frais turun dapat menarik meja ke arah cutter secara tiba tiba. Akibatnya, kedalaman potong dapat berubah, gigi pisau menerima beban kejut, permukaan rusak, bahkan pahat bisa patah. Mesin tidak sedang berkhianat. Ia hanya memperlihatkan bahwa celah mekanis tidak bisa dikalahkan oleh niat baik operator. Karena risiko tersebut, frais turun lebih cocok digunakan pada mesin yang memiliki kekakuan baik dan sistem penggerak meja yang bebas atau minim backlash. Pada mesin CNC atau mesin frais modern dengan sistem penggerak yang presisi, metode ini sering dipilih untuk memperoleh permukaan yang lebih baik dan proses yang lebih efisien. Pada mesin manual lama, metode ini harus digunakan dengan sangat hati hati. Jika kondisi mesin tidak mendukung, frais naik sering menjadi pilihan yang lebih aman.

Frais turun sering dipilih untuk pekerjaan penyelesaian permukaan. Pada proses finishing, tujuan utama bukan hanya membuang material, tetapi menghasilkan bidang yang halus, ukuran yang tepat, dan bekas pemotongan yang terkendali. Karena pola geramnya membantu mengurangi gesekan awal, frais turun dapat memberi keuntungan pada pekerjaan permukaan akhir. Namun, parameter tetap perlu dibuat ringan. Gerak makan, kedalaman potong, dan kecepatan potong harus disesuaikan agar pahat tidak menerima beban berlebihan pada awal kontak. Pada pekerjaan pengasaran atau roughing, frais turun juga dapat digunakan bila mesin cukup kaku dan pencekaman sangat baik. Keuntungan utamanya adalah gaya potong yang cenderung menekan benda kerja ke meja. Akan tetapi, beban awal pada gigi pahat lebih besar karena tebal geram langsung maksimum. Jika kedalaman potong dan gerak makan terlalu besar, gigi pahat dapat menerima beban kejut yang tinggi. Untuk material keras atau permukaan benda kerja yang tidak rata, kondisi ini perlu dikendalikan dengan hati hati.

Permukaan benda kerja yang memiliki kerak, oksida, atau lapisan keras perlu mendapat perhatian khusus. Pada frais turun, mata potong langsung masuk dengan tebal geram besar. Jika permukaan awal sangat keras atau tidak seragam, gigi pahat dapat mengalami benturan lebih kuat pada awal kontak. Pada kondisi seperti ini, proses awal dapat dilakukan dengan parameter lebih konservatif. Setelah lapisan keras terbuang dan permukaan lebih seragam, parameter dapat disesuaikan untuk memperoleh hasil akhir yang lebih baik. Metode frais turun dapat diterapkan pada frais horizontal maupun frais vertikal. Pada frais horizontal, metode ini terjadi ketika arah gerak benda kerja searah dengan arah gerak gigi pisau pada titik kontak. Pada frais vertikal, prinsip yang sama muncul saat end mill atau face mill bergerak dengan lintasan tertentu terhadap putaran pahat. Orientasi mesin boleh berbeda, tetapi prinsip dasarnya tetap sama: arah gerak makan dan arah gerak mata potong saling searah pada daerah pemotongan.

Pada frais vertikal dengan end mill, metode turun sering dipakai untuk menghasilkan dinding alur atau kontur yang lebih halus. Dalam pemrograman CNC, arah lintasan pahat dapat diatur agar sisi tertentu dikerjakan dengan climb milling. Strategi ini umum digunakan ketika kualitas permukaan dan kontrol ukuran menjadi prioritas. Namun, pada mesin manual, operator perlu memastikan bahwa meja tidak tertarik secara mendadak oleh gaya pemotongan. Jika backlash tidak terkendali, hasil yang diharapkan halus bisa berubah menjadi gerakan yang terlalu “bersemangat”. Kualitas permukaan pada frais turun berkaitan erat dengan kondisi pahat. Pahat yang tajam akan masuk ke material dengan lebih bersih saat tebal geram maksimum terbentuk. Pahat yang tumpul justru dapat menerima beban besar pada awal kontak dan menghasilkan tekanan berlebih. Bila pahat aus, permukaan bisa tetap buruk meskipun metode yang dipilih sudah tepat. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa keausan pahat pada operasi frais dapat diperkirakan melalui analisis sinyal multi sensor dan algoritma machine learning, yang menegaskan pentingnya memantau kondisi pahat selama proses.

Gerak makan per gigi juga perlu dipilih secara cermat. Karena tebal geram pada awal kontak sudah maksimum, gerak makan terlalu besar dapat membuat beban tiap gigi meningkat tajam. Pada pahat berdiameter kecil atau end mill yang panjang, kondisi ini dapat menyebabkan lenturan, getaran, atau patah pahat.

Untuk pekerjaan finishing, gerak makan biasanya dibuat lebih kecil agar permukaan lebih rapi dan gaya potong lebih terkendali. Namun, gerak makan tidak boleh terlalu kecil sampai pahat hanya menggosok permukaan. Kedalaman potong pada frais turun perlu disesuaikan dengan tahap pengerjaan. Pada pengasaran, kedalaman potong dapat dibuat lebih besar bila mesin, pahat, dan pencekaman kuat. Pada penyelesaian, kedalaman potong kecil lebih disarankan untuk menjaga kualitas permukaan. Jika material keras atau bentuk benda kerja kurang kaku, kedalaman potong harus dikurangi. Mesin yang tidak kaku akan memberi tanda melalui getaran, suara kasar, dan permukaan yang tampak tidak bersih, seolah sedang mengirim memo mekanis yang sayangnya sering diabaikan manusia.

Kecepatan potong dipilih berdasarkan material benda kerja dan bahan cutter. Material lunak dapat dikerjakan dengan kecepatan lebih tinggi, sedangkan material keras membutuhkan kecepatan lebih rendah. Cutter carbide dapat menerima kecepatan lebih tinggi dibandingkan HSS jika kondisi mesin stabil. Pada frais turun, kecepatan tinggi dapat membantu produktivitas dan kualitas permukaan, tetapi risiko panas dan keausan tetap harus dikendalikan. Kecepatan bukan tanda keberhasilan jika pahat aus terlalu cepat. Penelitian Zubir et al. (2025) pada proses kering AISI 4340 menunjukkan bahwa orientasi pemakanan, termasuk frais naik dan frais turun, dapat memengaruhi kekasaran permukaan dan umur pahat. Kajian tersebut juga memperlihatkan bahwa parameter seperti kecepatan potong, gerak makan, kedalaman potong, dan lebar pemotongan perlu dibaca bersama strategi pemakanan. Temuan ini sejalan dengan praktik bengkel: metode pemotongan tidak berdiri sendiri, tetapi bekerja bersama kondisi proses.

Metode frais turun juga perlu dipahami dalam kaitannya dengan arah gaya terhadap pencekaman. Karena gaya dapat menekan benda kerja ke meja, benda kerja yang terpasang dengan benar cenderung lebih stabil. Namun, jika benda kerja tidak benar benar terkunci, tarikan searah gerak makan dapat menggeser posisinya. Pada ragam, benda kerja perlu dipasang di tengah mulut ragam, ditopang dengan paralel bila perlu, dan tidak dibiarkan menonjol terlalu tinggi. Pencekaman yang buruk akan merusak keuntungan metode ini. Pada mesin horizontal, penggunaan frais turun harus memperhatikan arbor, arbor support, dan kekakuan pemasangan pisau. Arbor panjang yang tidak ditopang dapat

melentur saat menerima gaya pemotongan. Bila ditambah tarikan gerak meja akibat frais turun, proses dapat menjadi tidak stabil. Karena itu, pada frais horizontal, penopang arbor dan penguncian meja menjadi sangat penting sebelum metode ini digunakan.

Pada mesin vertikal, perhatian utama terletak pada kekakuan spindle, tool holder, dan panjang penjururan pahat. End mill yang terlalu panjang lebih mudah melentur, terutama saat frais turun digunakan pada sisi benda kerja. Lenturan pahat dapat menyebabkan ukuran kontur meleset atau permukaan bergelombang. Jika pekerjaan menuntut presisi, penjururan pahat harus dibuat sependek mungkin sesuai kebutuhan akses. Fraisi turun sering menghasilkan geram yang lebih tebal pada awal kontak. Geram yang terbentuk perlu segera keluar dari zona potong agar tidak tersayat ulang. Pada pekerjaan alur atau kantong, pembuangan geram menjadi lebih sulit karena ruangnya terbatas. Geram yang tertahan dapat menimbulkan panas, merusak permukaan, dan mempercepat keausan pahat. Penggunaan coolant, hembusan udara, atau strategi lintasan yang memberi ruang keluar geram dapat membantu proses menjadi lebih stabil.

Penggunaan coolant dalam frais turun perlu disesuaikan dengan material. Pada aluminium, pelumasan dapat membantu mengurangi penempelan geram pada pahat. Pada baja tahan karat, pendinginan dapat membantu mengurangi panas dan mengendalikan keausan. Pada besi tuang, pemotongan kadang dilakukan kering dengan pengendalian debu dan geram. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan sebagai integrasi peralatan, proses, dan strategi, sehingga pemilihan cairan pemotongan perlu dipahami sebagai bagian dari strategi proses, bukan kebiasaan menyiram benda kerja agar terlihat sibuk. Fraisi turun memiliki keunggulan ketika permukaan akhir menjadi prioritas. Misalnya, pada face milling bidang dudukan, metode ini dapat membantu menghasilkan bekas sapuan pisau yang lebih bersih jika mesin cukup kaku. Pada end milling kontur luar, metode ini dapat memberikan dinding yang lebih halus. Pada pekerjaan CNC, climb milling sering dipilih karena arah lintasan dapat dikendalikan lebih presisi dan sistem penggerak mesin lebih mampu menahan gaya tanpa backlash yang merugikan.

Namun, frais turun kurang tepat bila mesin manual memiliki backlash besar, benda kerja sulit dicekam, atau pahat sudah aus. Dalam situasi seperti itu, gaya potong dapat menarik meja dan

membuat proses sulit dikendalikan. Lebih baik memilih frais naik atau menurunkan parameter sampai proses aman. Metode yang secara teori lebih baik tidak otomatis lebih baik dalam kondisi mesin yang buruk. Realitas mekanik, seperti biasa, tidak tertarik dengan teori yang dipaksakan. Perbandingan dengan frais naik membantu memperjelas wilayah kerja frais turun. Frais naik lebih aman pada mesin konvensional yang memiliki celah balik karena gaya potong cenderung menahan meja. Frais turun lebih unggul untuk kualitas permukaan pada mesin yang kaku dan bebas backlash. Frais naik memulai geram dari tipis menuju tebal, sedangkan frais turun memulai geram dari tebal menuju tipis. Perbedaan sederhana ini memengaruhi gesekan, panas, gaya, dan strategi pencekaman.

Dalam pembelajaran bengkel, frais turun sebaiknya tidak langsung diajarkan sebagai metode yang selalu lebih baik. Kita perlu memahami syarat penggunaannya. Percobaan dapat dilakukan pada benda kerja yang dicekam kuat, mesin yang celah baliknya kecil, dan parameter ringan. Hasil permukaan kemudian dibandingkan dengan frais naik. Dari perbandingan itu, kita dapat melihat bahwa metode pemakanan memengaruhi kualitas permukaan dan respons mesin, bukan sekadar istilah di gambar. Pengamatan suara mesin dapat membantu menilai kestabilan frais turun. Suara yang halus dan konsisten menunjukkan proses berjalan lebih baik. Suara tersentak atau bergetar dapat menandakan meja tertarik, pahat terlalu berat menerima beban, atau benda kerja kurang kuat dicekam. Jika tanda ini muncul, proses perlu dihentikan dan diperiksa. Mengabaikan suara tidak wajar adalah tradisi manusia yang aneh, mengingat mesin sudah berusaha memberi peringatan dengan sangat berisik.

Bentuk geram juga perlu diamati. Geram yang keluar bersih dan teratur menunjukkan proses pemotongan berlangsung lebih stabil. Geram yang terlalu tebal, berubah warna, atau menumpuk di area potong menunjukkan parameter perlu ditinjau ulang. Pada frais turun, geram tebal di awal kontak memang wajar, tetapi tetap harus sesuai kapasitas pahat dan mesin. Jika geram terlalu berat, beban pada gigi cutter dapat mempercepat kerusakan pahat. Pengukuran hasil tetap diperlukan setelah beberapa lintasan. Permukaan yang tampak halus belum tentu ukurannya benar. Operator perlu memeriksa kerataan, kedalaman, lebar alur, atau posisi kontur sesuai pekerjaan. Jika metode frais turun digunakan

untuk finishing, pemeriksaan ukuran menjadi sangat penting karena lintasan akhir biasanya menentukan apakah benda kerja siap digunakan. Permukaan mengkilap yang ukurannya salah tetap bukan keberhasilan, hanya kegagalan yang berkilau.

Pemilihan frais turun juga berkaitan dengan efisiensi. Dengan gesekan yang lebih rendah dan permukaan yang lebih baik, proses dapat mengurangi kebutuhan pengerjaan ulang. Namun, efisiensi itu hanya terjadi bila metode dipilih pada kondisi yang tepat. Jika salah digunakan, frais turun justru dapat merusak pahat, menarik meja, dan memperpanjang waktu perbaikan. Efisiensi tidak selalu berarti memilih metode yang paling agresif, tetapi metode yang paling stabil untuk mesin, material, dan tujuan pekerjaan. Pada mesin CNC, frais turun menjadi strategi yang sangat umum karena sistem penggerak lebih mampu mengendalikan posisi meja dan lintasan pahat. Program dapat mengatur arah pemakanan agar sisi tertentu dikerjakan dengan climb milling. Meski begitu, operator tetap harus memasukkan parameter yang benar. Kecepatan potong, gerak makan per gigi, kedalaman potong, dan strategi pembuangan geram tetap menentukan hasil. CNC tidak menghapus fisika, ia hanya membuat kesalahan bisa diulang dengan lebih cepat jika manusia salah memasukkan data.

Metode frais turun memperlihatkan bahwa arah pemakanan merupakan keputusan teknis yang berpengaruh besar. Arah gerak yang searah dengan putaran mata potong pada titik kontak membuat geram dimulai dari maksimum dan berkurang hingga akhir penyayatan. Pola ini mengurangi gesekan awal, membantu menurunkan panas, dan dapat menghasilkan permukaan lebih halus. Namun, metode ini menuntut mesin yang kaku, pencekaman yang baik, dan sistem meja yang minim backlash. Pemahaman tentang frais turun melengkapi pembahasan frais naik. Keduanya bukan lawan dalam arti baik dan buruk, melainkan dua metode dengan kondisi penggunaan berbeda. Frais naik lebih aman untuk banyak mesin konvensional yang masih memiliki celah balik. Frais turun lebih menguntungkan untuk kualitas permukaan dan efisiensi pada mesin yang cukup kaku dan terkendali. Setelah metode pemakanan ini dipahami, pembahasan berikutnya dapat bergerak ke pemasangan arbor support, karena kestabilan arbor menjadi bagian penting dalam menjaga proses frais tetap aman dan presisi.

J. Pemasangan Arbor Support

Pemasangan arbor support merupakan bagian penting dalam pengoperasian mesin frais horizontal. Pada mesin frais jenis ini, pisau frais tidak selalu dipasang langsung pada spindel seperti pada mesin frais vertikal, melainkan sering dipasang pada arbor yang memanjang secara horizontal. Arbor tersebut membawa pisau frais, spacer, cincin penahan, dan mur pengunci. Karena bentuknya memanjang, arbor memerlukan penopang tambahan agar tetap stabil saat berputar dan menerima gaya potong. Dalam proses frais, alat potong bermata jamak atau multi point cutting tool berputar sebagai gerak utama. Benda kerja bergerak mengikuti meja mesin pada sumbu X, Y, dan Z. Perbedaan ini membuat mesin frais lebih leluasa dibandingkan mesin bubut, tetapi juga menuntut kekakuan sistem yang lebih baik. Ivanov, Evtuhov, Dehtiarov, dan Trojanowska (2025) menjelaskan bahwa proses pemesinan seperti milling bekerja melalui kombinasi gerak alat potong, benda kerja, parameter pemotongan, dan kondisi kerja. Pada mesin frais horizontal, salah satu kondisi kerja yang sangat menentukan adalah kestabilan arbor.

Arbor support dapat dipahami sebagai penyangga ujung arbor agar putaran pisau frais tetap seimbang. Tanpa penopang, arbor panjang akan bekerja seperti batang kantilever yang hanya tertahan pada satu sisi. Ketika pisau frais mulai menyayat benda kerja, gaya potong tidak hanya bekerja pada pisau, tetapi juga membebani arbor. Jika beban tersebut tidak ditopang, arbor dapat melentur, bergetar, atau berputar tidak seimbang. Situasi ini membuat permukaan benda kerja menjadi kasar dan ukuran lebih sulit dikendalikan. Pada pekerjaan frais horizontal, penggunaan arbor panjang biasanya diperlukan ketika pisau dipasang di luar area dekat kolom mesin. Misalnya, ketika operator ingin membuat alur panjang pada blok baja menggunakan side milling cutter, atau ketika beberapa pisau dipasang sekaligus untuk pekerjaan straddle milling. Semakin jauh posisi pisau dari spindel, semakin besar pula momen lentur yang diterima arbor. Di sinilah arbor support berperan sebagai penahan tambahan agar arbor tidak bekerja sendirian.

Fungsi utama arbor support bukan sekadar menahan arbor secara mekanis. Penopang ini juga membantu menjaga kesesumbuan antara spindel, arbor, pisau frais, dan benda kerja. Ketika semua bagian berada pada satu garis kerja yang benar, pisau

frais dapat menyayat dengan lebih tenang. Geram keluar lebih teratur, suara mesin lebih stabil, dan bekas sayatan pada permukaan benda kerja lebih mudah dikendalikan. Hal kecil seperti ini sering membedakan pekerjaan frais yang rapi dari pekerjaan frais yang penuh getaran. Pemasangan arbor support juga perlu dilihat sebagai bagian dari keselamatan kerja. Arbor yang panjang dan membawa pisau frais berputar memiliki energi mekanis yang besar. Jika penopang tidak terpasang benar, getaran dapat meningkat secara bertahap. Pada awalnya mungkin hanya terdengar suara kasar. Setelah itu, permukaan benda kerja mulai buruk, pisau cepat aus, dan dalam kondisi ekstrem dapat terjadi kerusakan pada arbor atau pisau frais. Operator yang teliti biasanya menghentikan mesin begitu tanda getaran berlebihan mulai muncul.

Dalam praktik bengkel, pemasangan arbor support dimulai dari pemeriksaan kebersihan komponen. Permukaan arbor, lubang pisau frais, spacer, mur pengunci, dan bantalan penopang harus bebas dari geram, debu logam, karat, atau serpihan kecil. Satu serpihan tipis yang terjepit di antara pisau dan spacer dapat membuat pisau tidak duduk rata. Akibatnya, putaran menjadi tidak seimbang dan hasil pemotongan berubah. Karena itu, pekerjaan pemasangan tidak boleh dimulai dari pengencangan, melainkan dari pembersihan. Arbor harus dipilih sesuai ukuran mesin dan jenis pisau frais yang akan digunakan. Diameter arbor harus cocok dengan lubang pisau frais. Panjang arbor juga perlu sesuai dengan posisi pemotongan. Arbor yang terlalu pendek tidak memberi ruang pemasangan yang cukup, sedangkan arbor yang terlalu panjang dapat memperbesar kemungkinan lenturan. Pada pekerjaan sederhana, operator mungkin tergoda memakai arbor yang tersedia saja. Namun, pilihan seperti itu dapat membuat proses menjadi kurang stabil.

Setelah arbor dipasang pada spindel, pisau frais ditempatkan pada posisi yang direncanakan. Pisau tidak boleh dipasang sembarangan di sepanjang arbor. Posisi pisau harus mempertimbangkan letak benda kerja, arah pemakanan meja, ruang gerak pisau, dan posisi arbor support. Pisau yang terlalu jauh dari penopang akan lebih mudah menimbulkan getaran. Pisau yang terlalu dekat dengan penopang dapat menyulitkan ruang kerja atau membuat komponen penopang terlalu dekat dengan area pemotongan. Spacer atau cincin pengatur jarak berfungsi menjaga

posisi pisau frais pada arbor. Komponen ini terlihat sederhana, tetapi perannya cukup penting. Spacer yang bersih, rata, dan tersusun rapat membuat pisau frais tidak bergeser saat menerima gaya potong. Bila spacer tidak rata atau salah susun, pisau dapat mengalami penyimpangan posisi. Akibatnya, bidang hasil frais tidak rata, alur bisa melebar tidak seragam, dan permukaan benda kerja terlihat bergaris.

Mur pengunci pada ujung arbor harus dikencangkan dengan benar. Pengencangan yang terlalu lemah dapat membuat pisau atau spacer bergerak. Pengencangan yang berlebihan juga tidak selalu baik karena dapat merusak ulir, menekan komponen secara tidak wajar, atau menyulitkan pembongkaran. Operator perlu menggunakan kunci yang sesuai, bukan alat seadanya. Di bengkel, kebiasaan memakai pipa tambahan untuk memperpanjang kunci sering berisiko merusak komponen jika tidak dilakukan dengan perasaan teknis yang baik. Arbor support biasanya dipasang pada lengan atas atau overarm mesin frais horizontal. Posisi penopang digeser sampai bantalan atau bushing di dalam penopang sejajar dengan ujung arbor. Penyetelan ini harus dilakukan perlahan. Jika penopang dipaksa masuk ketika arbor belum sejajar, permukaan arbor dapat tergores atau bantalan mengalami beban miring. Kerusakan kecil pada bagian tumpuan dapat menimbulkan masalah besar saat putaran tinggi digunakan.

Setelah penopang masuk ke ujung arbor, penguncian arbor support pada overarm dilakukan secara bertahap. Jangan langsung mengencangkan semua bagian sebelum posisi benar benar sejajar. Operator perlu memastikan arbor dapat berputar bebas tanpa rasa seret. Putaran manual atau putaran mesin sangat rendah dapat digunakan untuk pemeriksaan awal. Jika terdengar gesekan tidak wajar, pemasangan harus dihentikan dan diperiksa ulang. Pelumasan pada bagian bantalan arbor support perlu diperhatikan. Gesekan pada titik tumpuan dapat menimbulkan panas, terutama saat mesin bekerja dalam waktu lama. Pelumas membantu mengurangi gesekan dan memperpanjang umur komponen. Bila pelumasan diabaikan, bantalan dapat panas, arbor menjadi berat berputar, dan getaran mudah muncul. Pada mesin lama, pemeriksaan pelumasan sering lebih penting karena kondisi komponen tidak selalu sebaik mesin baru.

Kekakuan sistem menjadi alasan teknis utama mengapa arbor support diperlukan. Dalam pemesinan, kekakuan tidak hanya

berasal dari mesin besar dan berat, tetapi juga dari susunan komponen yang benar. Arbor yang ditopang di kedua sisi lebih tahan terhadap lenturan dibandingkan arbor yang hanya ditahan dari sisi spindel. Liu, Li, Zhou, Huang, dan Li (2022) menegaskan bahwa teknologi pencekaman dan penopangan memiliki peran penting dalam menjaga kemampuan proses dan kualitas pemesinan. Gagasan ini sejalan dengan fungsi arbor support pada frais horizontal. Getaran menjadi salah satu masalah yang paling sering muncul ketika arbor kurang tertopang. Dalam proses frais, setiap gigi pisau masuk dan keluar dari benda kerja secara bergantian. Pola pemotongan yang terputus ini membuat gaya potong berubah-ubah. Jika arbor tidak cukup kaku, perubahan gaya tersebut dapat memicu getaran. Pasandidehpoor, Donegani, dan Fumagalli (2025) menjelaskan bahwa chatter dalam proses frais dapat menurunkan kualitas permukaan, mengganggu ketelitian dimensi, dan merusak alat potong.

Hubungan antara arbor support dan kualitas permukaan dapat dilihat dari bekas sayatan. Arbor yang stabil membuat pisau frais memotong dengan kedalaman yang lebih konsisten. Arbor yang bergetar membuat kedalaman potong berubah-ubah kecil demi kecil sepanjang lintasan. Hasilnya tampak seperti permukaan bergelombang, garis tidak teratur, atau suara potong yang kasar. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kualitas kekasaran permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pada mesin frais horizontal, kekakuan arbor ikut memperkuat hubungan tersebut. Parameter pemotongan tetap harus disesuaikan setelah arbor support dipasang. Penopang memang meningkatkan stabilitas, tetapi bukan berarti operator bebas menaikkan kedalaman potong dan gerak makan secara berlebihan. Jika pemakanan terlalu berat, gaya potong tetap dapat melampaui kemampuan sistem. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa pemantauan keausan pahat pada proses frais berkaitan dengan kondisi operasi dan sinyal proses. Ini memberi gambaran bahwa kestabilan mekanis, parameter, dan kondisi pahat berjalan bersama.

Pemasangan arbor support juga memengaruhi umur pisau frais. Pisau yang bekerja pada arbor tidak stabil menerima beban kejutan lebih besar pada setiap gigi. Satu gigi mungkin menyayat lebih dalam, sedangkan gigi lain menyayat lebih ringan. Ketidakseimbangan ini mempercepat keausan lokal dan dapat

menyebabkan tepi potong terkelupas. Pada pisau frais bermata banyak, kondisi seperti itu merugikan karena satu mata yang rusak dapat memengaruhi kualitas seluruh proses. Pada pekerjaan slab milling, arbor support sangat berguna karena pisau frais menyayat permukaan lebar menggunakan sisi kelilingnya. Gaya potong pada operasi ini dapat cukup besar, terutama saat kedalaman potong dan lebar pemotongan meningkat. Jika arbor tidak tertopang, pisau dapat terdorong menjauh dari benda kerja atau bergetar mengikuti arah gaya potong. Permukaan yang seharusnya rata dapat menjadi tidak seragam. Operator mungkin baru menyadari setelah benda kerja dilepas dan diperiksa dengan mistar presisi atau alat ukur kerataan.

Pada pekerjaan side milling atau pembuatan alur, posisi pisau pada arbor juga perlu diperhatikan. Alur menuntut sisi pisau bekerja dengan arah pemotongan yang cukup spesifik. Jika arbor melentur, lebar alur dapat berubah atau dinding alur menjadi tidak tegak. Dalam pekerjaan seperti alur pasak, kesalahan kecil dapat membuat komponen pasangan tidak masuk dengan baik. Karena itu, pemasangan penopang tidak hanya berhubungan dengan kelancaran pemotongan, tetapi juga kecocokan komponen saat dirakit. Pada pekerjaan straddle milling, dua pisau atau lebih dapat dipasang pada satu arbor untuk memotong dua sisi benda kerja secara bersamaan. Susunan ini efisien, tetapi beban pada arbor menjadi lebih kompleks. Gaya dari beberapa pisau dapat menambah momen lentur dan meningkatkan risiko getaran jika penopang tidak tepat. Arbor support membantu menjaga agar posisi antar pisau tetap stabil selama pemotongan. Tanpa dukungan yang baik, jarak antarbidang hasil frais dapat menyimpang dari ukuran rancangan.

Pemasangan arbor support perlu memperhatikan jarak antara pisau dan penopang. Secara umum, jarak tumpuan yang lebih dekat dengan pisau dapat mengurangi lenturan. Namun, penopang tidak boleh mengganggu ruang gerak pisau, benda kerja, ragum, atau klem. Operator harus membaca seluruh ruang kerja sebelum mesin dijalankan. Kesalahan membaca ruang gerak dapat membuat pisau atau arbor menabrak komponen lain ketika meja bergerak. Sebelum pemotongan dimulai, putaran uji perlu dilakukan. Mesin dijalankan pada putaran rendah tanpa menyentuhkan pisau ke benda kerja. Pada tahap ini, operator mengamati suara, getaran, dan gerakan visual arbor. Bila putaran terasa halus, barulah proses

dapat dilanjutkan. Bila terdengar suara berdenyut, gesekan, atau getaran yang tidak biasa, pemasangan perlu dibongkar sebagian dan diperiksa ulang. Pemeriksaan kecil seperti ini lebih murah daripada mengganti pisau yang rusak.

Kondisi overarm juga memengaruhi kerja arbor support. Overarm harus terkunci kuat pada badan mesin. Jika overarm longgar, arbor support tidak benar benar menjadi penopang yang kaku. Ia hanya tampak terpasang, tetapi tidak memberi dukungan yang memadai. Pada mesin yang sudah lama digunakan, celah dan keausan pada bagian pengunci perlu diperiksa lebih sering. Mesin tua masih dapat bekerja baik bila penyetelan dan perawatannya dilakukan dengan teliti. Pemasangan yang baik juga memperhatikan arah putaran pisau dan arah pemakanan. Pisau frais harus dipasang sesuai arah mata potong. Jika arah pemasangan salah, pisau tidak menyayat dengan benar dan justru menggesek benda kerja. Gesekan ini menimbulkan panas, mempercepat keausan, dan dapat membuat permukaan menjadi buruk. Kesalahan arah pisau sering terjadi ketika operator terburu buru atau memakai pisau yang tanda arahnya sudah tidak jelas.

Dalam konteks pemesinan berkelanjutan, pemasangan arbor support dapat dilihat sebagai bagian dari efisiensi proses. Wang, Cai, He, Peng, Xie, Hu, dan Li (2023) membahas pemesinan berkelanjutan melalui integrasi peralatan, proses, dan strategi. Penopang arbor yang benar membantu mengurangi getaran, memperpanjang umur pisau, menekan produk gagal, dan mengurangi pengulangan kerja. Efisiensi tidak selalu berasal dari teknologi mahal. Kadang ia dimulai dari pemasangan mekanis yang rapi. Perkembangan pemantauan proses berbasis data tidak mengurangi pentingnya pemasangan mekanis. Sensor dapat membaca getaran, arus motor, temperatur, atau sinyal akustik. Model prediksi dapat membantu memperkirakan keausan pisau dan kualitas permukaan. Zeng dan Pi (2023) menunjukkan bahwa prediksi kekasaran permukaan pada proses frais dapat dikembangkan dengan pendekatan physics informed machine learning. Meski begitu, data yang baik tetap membutuhkan proses yang dipasang dengan benar. Sensor tidak membuat arbor yang longgar menjadi stabil.

Pemasangan arbor support memiliki nilai pendidikan yang besar dalam pembelajaran mesin frais. Mahasiswa atau peserta praktik dapat melihat langsung bahwa satu komponen penopang

mampu mengubah perilaku proses. Arbor yang tidak ditopang mungkin tampak baik saat berputar tanpa beban. Namun ketika pisau menyentuh benda kerja, getaran mulai terlihat. Dari pengalaman seperti ini, pembelajar memahami bahwa mesin perkakas tidak hanya dipelajari melalui rumus, tetapi juga melalui rasa teknis terhadap kekakuan, suara, dan gerakan. Kesalahan umum pada pemasangan arbor support biasanya muncul dari tiga hal. Pertama, komponen tidak dibersihkan sebelum dipasang. Kedua, penopang dikencangkan saat posisi belum sejajar. Ketiga, operator tidak melakukan putaran uji sebelum pemotongan. Ketiganya tampak kecil, tetapi cukup untuk merusak kualitas pemesinan. Dalam pekerjaan presisi, kesalahan kecil sering menghasilkan akibat yang tidak kecil.

Pemasangan arbor support juga perlu dikaitkan dengan pencekaman benda kerja pada ragum. Arbor yang stabil tidak akan memberi hasil baik jika benda kerja labil. Sebaliknya, benda kerja yang terjepit kuat tetap dapat menghasilkan permukaan buruk jika arbor bergetar. Mesin frais bekerja sebagai sistem. Pisau, arbor, penopang, meja, ragum, benda kerja, dan parameter pemotongan harus berada dalam hubungan yang benar. Pada pekerjaan dengan material keras, peran arbor support semakin terasa. Material keras meningkatkan gaya potong dan membuat setiap gigi pisau menerima beban lebih berat. Jika arbor kurang kaku, getaran dapat muncul lebih cepat. Operator dapat mengurangi kedalaman potong atau gerak makan, tetapi pemasangan penopang tetap harus benar. Parameter yang hati-hati tidak dapat sepenuhnya menggantikan pemasangan mekanis yang buruk.

Pada pekerjaan dengan material lebih lunak seperti aluminium, masalahnya berbeda. Gaya potong mungkin lebih ringan, tetapi putaran dapat lebih tinggi. Putaran tinggi membuat keseimbangan arbor semakin penting. Jika ada susunan spacer yang tidak rata atau penopang yang kurang sejajar, getaran tetap dapat muncul. Permukaan aluminium yang seharusnya halus dapat menunjukkan bekas sayatan tidak teratur. Pemasangan arbor support perlu dilakukan dengan kesadaran bahwa mesin frais horizontal memanfaatkan kekuatan arbor sebagai pembawa pisau. Arbor bukan hanya tempat menaruh pisau, melainkan bagian struktural yang menerima putaran, gaya potong, dan momen lentur. Ketika arbor diberi penopang yang benar, sistem menjadi lebih kaku. Ketika penopang diabaikan, arbor bekerja terlalu berat.

Dalam bahasa bengkel, mesin seperti dipaksa menanggung beban yang seharusnya dibagi.

K. Pencekaman Benda Kerja pada Ragum

Pencekaman benda kerja pada ragum merupakan salah satu tahap paling penting dalam pengoperasian mesin frais. Pada proses frais, benda kerja tidak hanya diletakkan di atas meja mesin, tetapi harus ditahan dengan kuat agar tetap stabil selama pisau frais menyayat material. Karena alat potong berputar dan benda kerja bergerak mengikuti meja, gaya pemotongan dapat mendorong, menarik, mengangkat, atau menggetarkan benda kerja. Bila pencekaman tidak benar, hasil pemesinan dapat menyimpang dari ukuran, permukaan menjadi kasar, bahkan benda kerja dapat terlepas dan menimbulkan kecelakaan. Ragum pada mesin frais berfungsi sebagai alat cekam yang menahan benda kerja agar posisinya tidak berubah selama proses pemotongan berlangsung. Pada pekerjaan berbentuk balok, pelat tebal, atau benda kerja prismatik sederhana, ragum menjadi pilihan yang paling praktis. Cara kerjanya terlihat sederhana: benda kerja dijepit di antara rahang tetap dan rahang gerak. Namun, kesederhanaan ini jangan dibaca terlalu ringan. Banyak kesalahan pemesinan justru bermula dari ragum yang dianggap sudah kencang, padahal benda kerja belum benar benar duduk rata dan stabil.

Dalam proses frais, benda kerja menerima gaya potong yang berubah ubah karena pisau frais memiliki beberapa mata potong. Setiap gigi pisau menyayat material secara bergantian. Akibatnya, beban pada benda kerja tidak selalu konstan. Beban ini dapat menimbulkan getaran bila benda kerja terlalu tinggi keluar dari ragum, tidak ditopang dengan benar, atau tidak terjepit di bagian yang tepat. Liu et al. (2022) menekankan bahwa kualitas proses pemesinan sangat dipengaruhi oleh sistem pencekaman atau fixture, karena pencekaman berperan dalam menjaga stabilitas, mengurangi deformasi, dan mendukung ketelitian hasil. Pencekaman pada ragum harus dipahami sebagai bagian dari sistem pemesinan, bukan hanya tahap persiapan. Mesin frais, pisau frais, ragum, benda kerja, dan meja mesin bekerja sebagai satu rangkaian. Bila salah satu unsur tidak kaku, gaya potong dapat menghasilkan defleksi. Defleksi kecil sekalipun dapat memengaruhi ketelitian ukuran, terutama pada pekerjaan alur, bidang bertingkat, atau permukaan yang membutuhkan kesikuan. Di bengkel, kesalahan sepersepuluh milimeter mungkin tampak

kecil, sampai komponen itu gagal dipasang pada pasangan kerjanya.

Prinsip pertama dalam pencekaman benda kerja adalah menempatkan benda kerja tepat di tengah mulut ragum. Posisi ini membantu gaya jepit tersebar lebih merata pada permukaan benda kerja. Jika benda kerja dijepit terlalu ke satu sisi, gaya penjepitan tidak bekerja seimbang. Rahang ragum dapat menerima beban tidak merata, benda kerja dapat sedikit miring, dan hasil pemotongan menjadi kurang presisi. Pada pekerjaan frais yang membutuhkan bidang rata, kesalahan posisi awal seperti ini dapat muncul sebagai bidang yang tidak sejajar atau ukuran yang meleset. Rahang tetap pada ragum biasanya dijadikan acuan utama. Benda kerja ditempelkan pada rahang tetap, kemudian rahang gerak dikencangkan untuk menjepit. Karena rahang tetap menjadi referensi, kebersihan dan kerataan permukaannya sangat penting. Serpihan geram kecil, debu logam, atau bekas kotoran di antara benda kerja dan rahang dapat membuat benda kerja miring sedikit. Miring sedikit saja sudah cukup untuk menghasilkan permukaan yang tidak sejajar. Benda kerja tidak perlu bergerak jauh untuk merusak ukuran; ia hanya perlu duduk tidak benar sejak awal.

Sebelum benda kerja dipasang, permukaan ragum perlu dibersihkan. Rahang ragum, dasar ragum, meja mesin, dan permukaan bawah benda kerja harus bebas dari geram. Geram sisa pemotongan sering tajam, keras, dan cukup kecil untuk tidak terlihat jelas. Bila geram terjepit di bawah benda kerja, posisi benda kerja dapat terangkat pada salah satu sisi. Akibatnya, bidang yang difrais tidak akan sejajar dengan permukaan acuan. Membersihkan geram mungkin terlihat seperti pekerjaan kecil, tetapi justru pekerjaan kecil seperti ini sering menyelamatkan hasil akhir. Prinsip kedua adalah menggunakan paralel blok atau parallel block untuk menopang bagian bawah benda kerja. Paralel blok membantu menjaga benda kerja tetap rata dan sejajar terhadap permukaan meja mesin. Benda kerja diletakkan di atas dua paralel yang memiliki tinggi sama, lalu dijepit oleh rahang ragum. Dengan cara ini, permukaan bawah benda kerja memiliki acuan yang stabil. Penggunaan paralel sangat penting ketika benda kerja tidak boleh menyentuh dasar ragum secara langsung atau ketika permukaan yang akan difrais harus sejajar dengan meja mesin.

Pemasangan tanpa paralel blok dapat menyebabkan benda kerja tidak stabil saat penyayatan berlangsung. Jika permukaan

bawah benda kerja tidak rata atau tidak mendapat dukungan, tekanan penjepitan dapat membuat benda kerja sedikit miring. Saat pisau frais mulai menyayat, gaya potong dapat memperbesar ketidakstabilan tersebut. Hasilnya dapat berupa permukaan bergelombang, kedalaman potong tidak merata, atau bidang yang tidak siku. Dalam pemesinan, benda kerja yang “hampir rata” sering berarti hasil yang “hampir benar”, dan itu tetap salah. Prinsip ketiga adalah menjaga agar benda kerja tidak terlalu tinggi menonjol dari rahang ragum. Semakin tinggi bagian benda kerja yang keluar dari ragum, semakin besar kemungkinan benda kerja bergetar atau miring saat disayat. Gaya potong pada bagian atas benda kerja akan menghasilkan momen terhadap titik jepit. Jika momen ini terlalu besar, benda kerja dapat bergerak walaupun ragum terasa sudah dikencangkan. Karena itu, benda kerja sebaiknya dijepit serendah mungkin, selama area yang akan difrais tetap dapat dijangkau oleh pisau.

Ketinggian benda kerja dari rahang ragum perlu disesuaikan dengan bentuk operasi frais. Pada face milling, benda kerja perlu cukup terbuka agar permukaan atas dapat disayat, tetapi tidak perlu terlalu tinggi. Pada end milling untuk membuat alur atau kantong, pahat memerlukan ruang gerak tertentu, tetapi pencekaman tetap harus sedekat mungkin dengan daerah pemotongan. Pada pekerjaan sisi, benda kerja mungkin perlu menonjol lebih tinggi, tetapi risiko getaran juga meningkat. Dalam keadaan seperti ini, dukungan tambahan atau metode cekam lain dapat dipertimbangkan. Pencekaman yang baik juga memerlukan pemeriksaan kesejajaran ragum terhadap sumbu mesin. Pada banyak pekerjaan frais, rahang tetap ragum perlu sejajar dengan arah gerak meja, terutama sumbu X. Jika ragum miring terhadap meja, benda kerja yang ditempelkan pada rahang tetap juga akan ikut miring. Akibatnya, alur atau bidang yang dibuat tidak sejajar dengan sumbu gerak mesin. Pemeriksaan dapat dilakukan menggunakan dial indicator dengan menyapu permukaan rahang tetap saat meja digerakkan.

Penyetelan ragum terhadap sumbu mesin mungkin terasa memakan waktu, tetapi mengabaikannya lebih mahal. Pada pekerjaan yang membutuhkan alur lurus, bidang sejajar, atau sisi siku, ragum yang tidak sejajar akan menghasilkan kesalahan sistematis. Artinya, semua lintasan yang dibuat dapat ikut salah dengan pola yang sama. Mesin akan mengulang kesalahan itu

secara patuh. Ini salah satu bentuk kesetiaan mekanis yang sebaiknya tidak diuji. Selain sejajar, rahang ragum juga harus dalam kondisi baik. Rahang yang aus, permukaannya rusak, atau tidak rata dapat mengurangi kualitas penjepitan. Pada benda kerja yang permukaannya sudah halus, rahang keras dapat meninggalkan bekas. Untuk mencegah kerusakan permukaan, pelindung rahang atau soft jaw dapat digunakan. Namun, penggunaan pelindung harus tetap menjaga kekakuan dan tidak membuat benda kerja mudah bergerak. Melindungi permukaan benda kerja tidak boleh dibayar dengan hilangnya kestabilan pengepakan.

Setelah benda kerja dijepit, operator sebaiknya memastikan bahwa benda kerja benar benar duduk pada paralel blok. Salah satu cara yang lazim dilakukan adalah mengetuk ringan benda kerja menggunakan palu lunak atau soft hammer setelah ragum dikencangkan sebagian. Ketukan ringan membantu benda kerja turun dan menempel pada paralel. Setelah itu, ragum dikencangkan kembali secara wajar. Pemeriksaan dapat dilakukan dengan mencoba menggerakkan paralel. Jika paralel terasa longgar secara tidak wajar, benda kerja mungkin belum duduk rata. Kekuatan penjepitan perlu cukup, tetapi tidak berlebihan. Benda kerja harus tertahan dari gaya potong, tetapi tidak boleh sampai berubah bentuk karena tekanan ragum. Pada benda kerja tebal dan kaku, gaya jepit dapat diberikan lebih besar. Pada benda kerja tipis, lunak, atau berdinding rendah, gaya jepit berlebihan dapat menyebabkan deformasi. Liu et al. (2022) menunjukkan bahwa pada benda kerja berdinding tipis, masalah pengepakan dan penopangan sangat berkaitan dengan deformasi, getaran, efisiensi, dan integritas permukaan. Prinsip ini tetap relevan pada pengepakan ragum, terutama ketika benda kerja tidak cukup kaku.

Benda kerja yang panjang membutuhkan perhatian tambahan. Jika hanya bagian tengah yang dijepit, ujung benda kerja dapat bergetar saat pisau menyayat di dekat ujung. Dalam kondisi seperti ini, penopang tambahan, klem, atau metode pengepakan lain perlu dipertimbangkan. Ragum memang praktis, tetapi bukan jawaban untuk semua bentuk benda kerja. Memaksakan semua benda kerja masuk ragum hanya karena ragum tersedia adalah cara bengkel mengundang masalah dengan sopan. Untuk benda kerja tipis, luas bidang kontak antara benda kerja dan rahang perlu diperhatikan. Jika bidang kontak terlalu kecil, benda kerja mudah berubah bentuk atau bergeser. Pelat tipis

dapat dilengkapi penopang belakang, pelat bantu, atau rahang lunak agar tekanan lebih merata. Bila pemotongan menghasilkan gaya besar, lebih baik mengurangi kedalaman potong dan gerak makan daripada memaksa benda kerja tipis menerima beban yang tidak seimbang.

Pada benda kerja yang permukaannya tidak rata, ragam biasa mungkin tidak cukup. Permukaan tidak rata dapat menyebabkan titik kontak terbatas, sehingga benda kerja tidak stabil. Dalam kasus seperti ini, bidang acuan perlu diratakan terlebih dahulu, atau digunakan ganjal, rahang khusus, maupun metode cekam lain. Tujuannya adalah membuat benda kerja memiliki acuan yang jelas sebelum proses frais dilakukan. Tanpa acuan yang baik, pengukuran dan pemotongan akan berjalan di atas dasar yang keliru. Benda kerja silindris tidak ideal dijepit langsung pada rahang datar tanpa alat bantu. Bentuk silindris mudah berputar atau bergeser karena bidang kontakannya kecil. Jika benda kerja silindris harus diproses pada mesin frais, dapat digunakan V block atau alat bantu lain agar posisi lebih stabil. Prinsipnya tetap sama: benda kerja harus memiliki titik dukung yang cukup dan gaya jepit harus menahan arah gaya potong. Ragum bukan penjepit ajaib; ia tetap membutuhkan geometri kontak yang masuk akal.

Pencekaman pada ragum juga berkaitan dengan arah gaya pada metode frais naik dan frais turun. Pada frais naik, gaya potong dapat memiliki kecenderungan mengangkat benda kerja. Pada frais turun, gaya dapat menekan benda kerja ke meja tetapi juga dapat menarik meja atau benda kerja searah gerak makan, terutama bila ada backlash. Karena itu, pemilihan metode frais dan pencekaman tidak boleh dipisahkan. Benda kerja yang tercekam buruk akan memperburuk risiko pada kedua metode tersebut. Pada pekerjaan face milling, gaya potong dapat menekan dan sekaligus mendorong benda kerja. Jika benda kerja dijepit di tengah dengan dukungan paralel yang baik, proses dapat berlangsung lebih stabil. Namun, bila benda kerja menonjol terlalu tinggi, getaran dapat muncul pada permukaan atas. Getaran ini dapat meninggalkan bekas sapuan pisau yang tidak merata. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kualitas permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh kondisi pemotongan, alat potong, dan material. Dalam praktik frais, pencekaman menjadi bagian penting dari kondisi nyata yang memengaruhi permukaan tersebut.

Pada pekerjaan end milling, gaya samping menjadi lebih dominan. Pahat menyayat sisi benda kerja, alur, atau kontur, sehingga benda kerja cenderung terdorong secara lateral. Jika penjepitan tidak kuat atau posisi benda kerja terlalu tinggi, dinding alur dapat bergelombang dan ukuran alur berubah. Pada pekerjaan kantong atau pocket milling, pencekaman harus mampu menahan gaya dari beberapa arah karena lintasan pahat berubah mengikuti bentuk kantong. Pada pekerjaan alur T atau T slot milling, pencekaman harus benar benar stabil karena proses berlangsung dalam beberapa tahap. Alur awal dibuat lebih dulu, kemudian bagian bawah diperlebar menggunakan T slot cutter. Saat pisau bekerja di dalam alur, area pemotongan tidak selalu terlihat jelas. Bila benda kerja bergeser sedikit saja, bentuk alur dapat rusak dan pisau dapat menerima beban tidak seimbang. Ragum perlu dikencangkan dengan benar, dan benda kerja harus dipastikan duduk rata sebelum tahap kedua dilakukan.

Getaran atau vibration menjadi salah satu tanda bahwa pencekaman belum memadai atau parameter terlalu berat. Getaran dapat berasal dari benda kerja, ragum, pahat, spindle, meja mesin, atau kombinasi semuanya. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa kondisi operasi frais dan keausan pahat dapat dipelajari melalui sinyal proses, yang memperlihatkan bahwa getaran dan respons mesin bukan sekadar gangguan suara, tetapi gejala teknis yang perlu dibaca. Dalam bengkel konvensional, operator dapat membaca gejala itu melalui suara, bekas permukaan, dan perilaku geram. Bila getaran muncul, tindakan pertama bukan selalu menambah kekuatan penjepitan. Operator perlu memeriksa apakah benda kerja terlalu tinggi, paralel sudah benar, ragum sejajar, pahat terlalu panjang, atau kedalaman potong terlalu besar. Menambah kekencangan ragum pada benda kerja tipis justru dapat menyebabkan deformasi. Penyebab getaran harus dicari secara sistematis. Jika tidak, perbaikannya hanya akan menjadi tebakan yang kebetulan tampak sibuk.

Pencekaman juga berhubungan dengan keselamatan kerja. Benda kerja yang tidak stabil dapat terlepas saat pisau frais berputar. Geram dapat terlempar, pahat dapat patah, dan operator dapat terkena serpihan. Karena itu, sebelum mesin dijalankan, benda kerja harus diperiksa kembali. Ragum harus terkunci pada meja mesin. Kunci ragum harus dilepas dari posisinya setelah pengencangan. Tidak boleh ada alat bantu tertinggal di area gerak

pahat. Langkah ini sederhana, tetapi keselamatan sering bergantung pada hal sederhana yang tidak boleh dilupakan. Meja mesin juga perlu dikunci pada sumbu yang tidak digunakan. Jika proses hanya membutuhkan gerak pada sumbu X, sumbu Y dan Z sebaiknya dikunci setelah posisi ditetapkan. Penguncian ini membantu mengurangi gerak bebas dan meningkatkan kekakuan sistem. Pada pekerjaan presisi, penguncian meja dapat membantu menjaga ukuran tetap stabil. Tanpa penguncian, gaya potong dapat menyebabkan pergeseran kecil yang sulit terlihat, tetapi cukup untuk mengubah hasil akhir.

Ragum harus dipasang kuat pada meja mesin menggunakan baut dan mur T yang sesuai. Permukaan bawah ragum dan meja mesin perlu bersih. Jika ada geram di antara ragum dan meja, ragum dapat miring. Pemasangan ragum yang miring akan memengaruhi seluruh benda kerja yang dijepit. Dalam pekerjaan berulang, kesalahan ini dapat berulang pada semua komponen. Maka, pemeriksaan pemasangan ragum menjadi bagian awal yang tidak boleh dilewati. Pada pekerjaan yang membutuhkan pengulangan, penggunaan work stop dapat membantu. Work stop berfungsi sebagai pembatas posisi benda kerja agar setiap benda kerja dipasang pada lokasi yang sama. Alat ini berguna ketika beberapa benda kerja dengan ukuran serupa akan dikerjakan secara berurutan. Dengan work stop, waktu penyetelan dapat berkurang dan konsistensi posisi meningkat. Namun, work stop tidak boleh menjadi satu satunya penahan gaya potong. Fungsi utamanya adalah penentu posisi, bukan pengganti gaya cekam ragum.

Pada benda kerja yang sudah memiliki permukaan halus atau permukaan penting, penggunaan pelindung rahang dapat dipertimbangkan. Pelindung rahang membantu mencegah bekas jepitan pada permukaan benda kerja. Namun, bahan pelindung harus dipilih dengan hati hati. Bahan yang terlalu lunak dapat membuat benda kerja bergeser, sedangkan bahan yang terlalu tebal dapat mengurangi kekakuan. Keputusan ini perlu disesuaikan dengan material benda kerja, gaya potong, dan kualitas permukaan yang harus dijaga. Pencekaman tidak hanya memengaruhi ukuran, tetapi juga waktu pemesinan dan efisiensi. Benda kerja yang dipasang benar sejak awal mengurangi kebutuhan penyetelan ulang, pengukuran berulang, dan perbaikan hasil. Sebaliknya, pencekaman yang buruk dapat menyebabkan benda kerja gagal, pahat rusak, atau proses harus diulang. Wang et al. (2023)

membahas pemesinan berkelanjutan sebagai integrasi peralatan, proses, dan strategi. Dalam konteks ragam, strategi sederhana seperti penempatan benda kerja yang benar, penggunaan paralel, dan pengurangan getaran dapat membantu mengurangi pemborosan waktu dan material.

Dalam pembelajaran mesin frais, pencekaman pada ragam sebaiknya diajarkan melalui perbandingan kondisi benar dan salah. Benda kerja yang diletakkan di tengah ragam, ditopang paralel, dan tidak terlalu tinggi akan memberi proses yang lebih stabil. Benda kerja tanpa paralel, terlalu menonjol, atau dijepit di satu sisi akan lebih mudah menunjukkan getaran atau kesalahan bidang. Perbandingan seperti ini membantu kita melihat bahwa pencekaman bukan teori tambahan, melainkan penyebab langsung dari kualitas hasil. Sebelum proses dimulai, operator dapat melakukan pemeriksaan singkat. Permukaan ragam bersih. Paralel sudah terpasang. Benda kerja berada di tengah. Rahang ragam sudah menjepit cukup kuat. Benda kerja sudah duduk pada paralel. Ragam sejajar dengan sumbu mesin jika pekerjaan menuntut kesejajaran. Meja terkunci pada sumbu yang tidak digunakan. Area kerja bebas dari alat yang tertinggal. Pemeriksaan ini tidak perlu dibuat rumit, tetapi harus dilakukan dengan disiplin. Pencekaman benda kerja pada ragam memperlihatkan bahwa keberhasilan proses frais tidak hanya ditentukan oleh pisau dan parameter. Benda kerja harus berada pada posisi yang benar, tertopang dengan baik, dan cukup kuat menahan gaya potong. Ragam menjadi penghubung antara benda kerja dan mesin. Jika penghubung ini lemah, seluruh proses ikut lemah. Jika penghubung ini benar, pemotongan dapat berlangsung lebih stabil, ukuran lebih terkendali, permukaan lebih baik, dan risiko kecelakaan lebih rendah.

BAB 5

MESIN SEKRAP I: MEKANISME KERJA, PROFIL PAHAT, DAN ELEMEN DASAR PEMOTONGAN

A. Pengertian Mesin Sekrap

Mesin sekrap merupakan salah satu mesin perkakas yang digunakan untuk membentuk permukaan benda kerja melalui proses penyayat lurus. Dalam praktik bengkel pemesinan, mesin ini sering dikenal sebagai mesin ketam atau mesin serut, sedangkan dalam istilah teknis berbahasa Inggris disebut *shaping machine*. Penyebutan tersebut cukup masuk akal karena prinsip kerjanya memang berhubungan dengan pembentukan bidang melalui gerakan pahat yang maju dan kembali secara berulang. Gerakannya sederhana jika dilihat sekilas, tetapi proses yang terjadi di antara pahat dan benda kerja tetap melibatkan gaya potong, gesekan, panas, pembentukan geram, dan pengendalian ukuran. Ciri paling mendasar dari mesin sekrap adalah penggunaan pahat bermata tunggal atau *single point cutting tool*. Berbeda dari mesin frais yang memakai pisau bermata banyak, mesin sekrap hanya mengandalkan satu sisi mata potong untuk menyayat material pada setiap langkah kerja. Karena hanya satu mata potong yang bekerja, bentuk pahat, ketajaman ujung, sudut bebas, dan kekakuan pemasangan pahat menjadi sangat menentukan hasil penyekrapan. Satu pahat kecil yang dipasang kurang tepat bisa membuat seluruh permukaan benda kerja menjadi kasar, miring, atau bergelombang. Begitulah bengkel bekerja, kadang kesalahan satu derajat saja cukup untuk membuat operator merenungi hidup.

Pada mesin sekrap, gerak utama dilakukan oleh pahat. Pahat dipasang pada kepala pahat dan bergerak maju mundur bersama lengan mesin atau *ram*. Benda kerja umumnya dijepit pada meja mesin menggunakan ragum atau alat cekam lain, lalu diberi gerak makan secara bertahap. Pemotongan material terjadi saat pahat bergerak maju, sedangkan langkah balik umumnya tidak digunakan untuk menyayat. Langkah balik ini lebih berfungsi mengembalikan posisi pahat agar siap melakukan penyayat berikutnya. Prinsip tersebut membuat mesin sekrap berbeda dari mesin bubut. Pada mesin bubut, benda kerja berputar dan pahat bergerak menyayat sepanjang arah tertentu. Pada mesin sekrap, benda kerja relatif diam terhadap meja, sementara pahat bergerak

lurus melintasi permukaan benda kerja. Perbedaan sumber gerak utama ini memengaruhi jenis permukaan yang dapat dikerjakan, bentuk pahat yang digunakan, cara pencekaman, serta parameter pemotongan yang harus diatur. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa setiap metode pemesinan memiliki prinsip, penerapan, dan kondisi kerja yang berbeda, sehingga pemilihan mesin tidak boleh dilepaskan dari bentuk geometri yang ingin dibuat.

Secara fungsional, mesin sekrap banyak digunakan untuk menghasilkan bidang rata, bidang tegak, bidang miring, permukaan bertingkat, alur, dan profil tertentu. Mesin ini cocok untuk pekerjaan yang membutuhkan lintasan pemotongan lurus dengan bidang kerja yang relatif terbuka. Misalnya, meratakan permukaan balok baja kecil, membuat alur pasak pada komponen sederhana, membentuk bidang miring pada dudukan mesin, atau memperbaiki permukaan komponen yang tidak lagi rata. Untuk produksi massal modern, pekerjaan seperti ini sering dialihkan ke mesin frais atau mesin CNC. Namun, mesin sekrap tetap penting sebagai dasar pembelajaran pemesinan karena prinsip gerak potongnya sangat jelas dan mudah diamati. Mesin sekrap dapat dipahami sebagai mesin yang mengubah gerak putar motor menjadi gerak lurus bolak balik pahat. Gerak putar dari motor diteruskan melalui sistem transmisi dan mekanisme pengubah gerak, lalu menghasilkan langkah maju dan langkah balik pada *ram*. Pada langkah maju, pahat menyentuh benda kerja dan membuang lapisan material dalam bentuk geram. Pada langkah balik, pahat kembali ke posisi awal tanpa mengambil material secara signifikan. Pola ini terus berulang sampai seluruh permukaan yang direncanakan selesai disayat.

Dalam proses sekrap, langkah maju sering disebut sebagai *cutting stroke*, sementara langkah balik dapat disebut *return stroke* atau *idle stroke*. Istilah *idle* tidak berarti gerakan tersebut tidak penting. Langkah balik tetap menjadi bagian dari siklus mesin karena menentukan kapan pahat kembali ke posisi awal dan kapan gerak makan berikutnya diberikan. Hanya saja, dari sudut pandang pembuangan material, langkah balik tidak produktif karena tidak menghasilkan geram. Itulah sebabnya banyak mesin sekrap menggunakan mekanisme *quick return* agar langkah balik berlangsung lebih cepat dibandingkan langkah maju. Keberadaan langkah balik yang tidak memotong membuat produktivitas mesin sekrap memiliki karakter tersendiri. Pada satu sisi, mesin ini

sederhana, kuat, dan mudah dipahami. Pada sisi lain, sebagian waktu siklus digunakan untuk gerakan yang tidak membuang material. Dalam pekerjaan satuan, perawatan, atau latihan bengkel, hal ini masih dapat diterima. Namun, untuk produksi jumlah besar yang menuntut waktu pengerjaan singkat, mesin sekrap sering kalah efisien dibandingkan mesin frais. Di sinilah pemilihan mesin menjadi keputusan teknis, bukan urusan selera operator semata.

Walaupun terlihat sederhana, proses penyekrapan tidak boleh dianggap sebagai pekerjaan kasar yang dapat dilakukan tanpa perhitungan. Permukaan yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh kecepatan langkah pahat, gerak makan, kedalaman potong, jenis pahat, jenis material, kekakuan mesin, serta cara pencekaman benda kerja. Trinh (2024) menekankan bahwa kualitas permukaan hasil pemesinan berkaitan dengan parameter pemotongan, karakter alat potong, dan sifat benda kerja. Hubungan ini juga berlaku pada mesin sekrap, meskipun gerak potongnya berbeda dari proses bubut atau frais. Pengertian mesin sekrap perlu ditempatkan dalam konteks pemesinan konvensional. Mesin ini tidak hanya berfungsi membuang material, tetapi juga melatih pemahaman tentang hubungan antara gerak, gaya, pahat, dan benda kerja. Ketika pahat mulai menyayat, operator dapat mendengar perubahan suara, melihat bentuk geram, merasakan getaran, dan menilai apakah pemakanan terlalu berat atau terlalu ringan. Gejala seperti ini mungkin tampak sepele, tetapi justru menjadi bahasa teknis bengkel yang tidak selalu muncul di rumus.

Proses sekrap bekerja melalui interaksi mekanis antara mata pahat dan permukaan benda kerja. Saat pahat menekan dan bergerak maju, material di depan mata potong mengalami deformasi geser. Bagian material yang tidak lagi tertahan akan terangkat sebagai geram. Apabila sudut pahat sesuai, pencekaman kuat, dan parameter pemotongan wajar, geram dapat terbentuk lebih stabil. Apabila pahat tumpul, sudut bebas kurang tepat, atau benda kerja bergetar, pahat cenderung menggesek, menggaruk, atau meninggalkan bekas permukaan yang buruk. Dalam pengertian yang lebih luas, mesin sekrap merupakan sistem kerja yang terdiri atas mesin, pahat, benda kerja, alat cekam, operator, parameter pemotongan, dan alat ukur. Mesin menyediakan gerak lurus bolak balik. Pahat menyayat material. Benda kerja menjadi objek yang dibentuk. Alat cekam menjaga posisi benda kerja. Operator memilih setelan dan mengamati proses. Parameter

pemotongan mengatur seberapa cepat dan seberapa dalam penyayatan dilakukan. Alat ukur memastikan hasilnya tidak hanya terlihat rata, tetapi benar benar sesuai ukuran. Kalau salah satu unsur ini diabaikan, hasilnya biasanya ikut membalas dendam dalam bentuk permukaan jelek atau ukuran meleset.

Tabel 9. Unsur Dasar dalam Pengertian Mesin Sekrap

Unsur proses sekrap	Makna dalam proses	Contoh penerapan	Dampak terhadap hasil
Pahat bermata tunggal	Alat potong utama yang menyayat benda kerja	Pahat rata, pahat sisi, pahat alur, pahat profil	Menentukan bentuk sayatan, kualitas permukaan, dan gaya potong
Gerak maju pahat	Langkah produktif saat material dipotong	Pahat bergerak lurus melintasi bidang benda kerja	Menghasilkan geram dan membentuk permukaan kerja
Gerak balik pahat	Langkah kembali tanpa pemotongan utama	Pahat kembali ke posisi awal setelah menyayat	Mempengaruhi waktu siklus dan efisiensi proses
Gerak makan	Pergeseran bertahap benda kerja atau meja	Meja bergeser sedikit setelah satu langkah pemotongan	Menentukan jarak antar lintasan dan kehalusan permukaan
Kedalaman potong	Tebal material yang dibuang dalam satu lintasan	Pemakanan kecil untuk <i>finishing</i> , lebih besar untuk <i>roughing</i>	Mempengaruhi gaya potong, getaran, waktu pengerjaan, dan umur pahat
Pencekaman benda kerja	Cara menahan benda kerja agar tidak bergeser	Ragum, klem, blok bantu, penyangga	Menentukan keamanan, ketelitian, dan kestabilan proses
Pengukuran hasil	Pemeriksaan ukuran dan kualitas permukaan	Jangka sorong, mistar baja, siku, dial indikator	Menjamin hasil sesuai gambar kerja dan toleransi

Dari tabel tersebut terlihat bahwa mesin sekrap tidak dapat dipahami hanya sebagai mesin yang pahatnya bergerak maju mundur. Pengertian seperti itu terlalu tipis. Mesin sekrap lebih tepat dipahami sebagai sistem pemotongan linier yang memakai pahat bermata tunggal untuk membentuk bidang melalui siklus langkah maju, langkah balik, dan gerak makan bertahap. Siklus tersebut menghasilkan permukaan secara berlapis, sedikit demi sedikit, sampai ukuran dan bentuk yang diinginkan tercapai. Gerak makan pada mesin sekrap memiliki peranan penting karena menentukan jarak antar lintasan pahat. Setelah satu langkah pemotongan selesai, benda kerja atau meja bergeser sesuai nilai *feed* yang ditentukan. Jika gerak makan terlalu besar, proses menjadi lebih cepat, tetapi bekas lintasan pahat dapat terlihat lebih kasar. Jika gerak makan terlalu kecil, permukaan bisa lebih halus, tetapi waktu pengerjaan bertambah. Inilah kompromi klasik dalam pemesinan: manusia ingin cepat, material ingin dilayani dengan sabar.

Kedalaman potong atau *depth of cut* menunjukkan seberapa banyak material yang dibuang dalam satu lintasan. Pada pekerjaan awal atau *roughing*, kedalaman potong biasanya dibuat lebih besar untuk mempercepat pengurangan material. Pada pekerjaan akhir atau *finishing*, kedalaman potong dibuat lebih kecil agar ukuran lebih terkendali dan permukaan lebih halus. Das et al. (2022) menunjukkan bahwa kecepatan potong, gerak makan, dan kedalaman potong berkaitan dengan respons pemesinan seperti kekasaran permukaan, gaya potong, dan keausan pahat. Meskipun penelitian tersebut berada pada konteks pembubutan keras, prinsip hubungan antarparameter tetap relevan untuk memahami proses penyayatan pada mesin perkakas lain. Kecepatan potong pada mesin sekrap berbeda cara pembacaannya dibandingkan mesin bubut. Pada mesin bubut, kecepatan potong banyak dikaitkan dengan diameter benda kerja dan putaran spindel. Pada mesin sekrap, kecepatan potong berkaitan dengan panjang langkah pahat dan jumlah langkah per menit. Karena gerakannya bolak balik, perhitungan kecepatan rata rata juga perlu memperhatikan langkah maju dan langkah balik. Bagian ini akan menjadi dasar untuk memahami elemen pemotongan pada subbab berikutnya, terutama saat membahas panjang pemotongan, lebar pemotongan, gerak makan, kedalaman potong, jumlah langkah per menit, dan waktu pemotongan.

Benda kerja pada proses sekrap biasanya dijepit kuat pada meja mesin. Pencekaman ini sangat penting karena gaya potong bekerja secara berulang pada arah linier. Bila benda kerja bergeser sedikit saja, permukaan yang dihasilkan dapat miring atau tidak rata. Pada pekerjaan alur, kesalahan pencekaman bahkan dapat membuat alur menyimpang dari posisi yang ditentukan. Karena itu, sebelum pahat menyentuh material, operator harus memastikan ragam, klem, dan posisi benda kerja sudah benar. Ini bagian yang sering tampak membosankan, tetapi justru menyelamatkan pekerjaan dari kekacauan yang lebih mahal. Mesin sekrap juga menuntut pemasangan pahat yang benar. Pahat harus dijepit kuat pada *tool post*, dengan panjang penjururan yang tidak berlebihan. Pahat yang terlalu panjang keluar dari pemegangnya akan lebih mudah bergetar. Getaran ini dapat merusak kualitas permukaan, mempercepat keausan pahat, dan dalam kondisi tertentu membuat pahat patah. Pada pemotongan bidang tegak atau bidang miring, sudut pahat juga harus diatur agar bagian yang menyentuh benda kerja benar benar mata potongnya, bukan sisi pahat yang seharusnya bebas.

Dalam konteks pembentukan permukaan, mesin sekrap sering dipakai untuk pekerjaan bidang datar. Permukaan datar diperoleh dari lintasan pahat yang bergerak lurus berulang ulang, sementara meja memberi gerak makan sedikit demi sedikit. Setiap lintasan pahat membuang lapisan material pada jalur tertentu. Setelah banyak lintasan, terbentuklah bidang yang lebih rata. Jika diamati dari dekat, permukaan hasil sekrap masih memiliki jejak lintasan pahat. Jejak ini dapat dikurangi dengan pemilihan gerak makan yang lebih kecil, pahat yang lebih tajam, dan proses *finishing* yang lebih hati hati. Pengertian mesin sekrap juga berkaitan dengan bentuk pekerjaan yang dapat dibuat. Selain bidang rata, mesin ini dapat digunakan untuk membuat bidang menyudut, bidang tegak, alur lurus, alur pasak, dan bentuk profil sederhana. Pahat yang digunakan harus disesuaikan dengan bentuk tersebut. Pahat rata digunakan untuk meratakan permukaan. Pahat sisi digunakan ketika penyayatan dilakukan pada sisi benda kerja. Pahat alur dipakai untuk membentuk celah atau jalur tertentu. Pahat profil digunakan ketika permukaan yang dibuat membutuhkan bentuk khusus. Keragaman pahat inilah yang membuat mesin sekrap tetap berguna, meskipun dari segi produktivitas tidak selalu menjadi pilihan tercepat.

Dalam industri modern, mesin sekrap memang tidak selalu menjadi mesin utama untuk produksi komponen presisi dalam jumlah besar. Mesin frais dan CNC sering lebih unggul dalam kecepatan, fleksibilitas lintasan, dan pengulangan hasil. Namun, bukan berarti mesin sekrap tidak lagi penting. Pada bengkel pendidikan, bengkel perawatan, dan pekerjaan perbaikan sederhana, mesin sekrap masih memberi nilai praktis. Mesin ini membantu pengguna memahami konsep penyayatan secara langsung, terutama hubungan antara gerak potong, gerak makan, dan kedalaman potong. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan sebagai integrasi antara peralatan, proses, dan strategi. Gagasan tersebut dapat dipakai untuk membaca mesin sekrap secara lebih luas. Pemilihan parameter yang terlalu berat dapat mempercepat pekerjaan, tetapi berisiko meningkatkan gaya potong, getaran, keausan pahat, dan konsumsi energi. Parameter yang terlalu ringan dapat menghasilkan proses lebih aman, tetapi waktu pengerjaan menjadi lama. Mesin sekrap, meskipun konvensional, tetap menuntut keseimbangan antara produktivitas, kualitas, keamanan, dan efisiensi.

Mesin sekrap juga mengajarkan bahwa kualitas pemesinan tidak hanya ditentukan oleh mesin yang digunakan. Mesin yang baik tidak akan menghasilkan permukaan baik jika pahat tumpul, benda kerja longgar, atau gerak makan dipilih sembarangan. Sebaliknya, mesin sederhana masih dapat menghasilkan bidang yang cukup baik jika operator memahami prinsip kerja, memasang pahat dengan benar, dan mengatur parameter secara wajar. Di sinilah keterampilan teknis dan pemahaman teoritis bertemu. Keduanya perlu berjalan bersama, bukan saling menertawakan dari sudut bengkel. Dalam pembelajaran mesin perkakas, mesin sekrap sering menjadi contoh yang baik untuk memperkenalkan proses pemotongan linier. Gerak pahat dapat diamati secara langsung. Pembentukan geram terlihat jelas. Pengaruh kedalaman potong dan gerak makan dapat dirasakan pada suara mesin serta bentuk permukaan. Pembaca atau peserta praktik dapat melihat bahwa setiap perubahan setelan membawa akibat fisik. Hal ini membuat mesin sekrap berguna bukan hanya sebagai alat produksi, tetapi juga sebagai alat pendidikan teknik.

Penggunaan istilah *single point cutting tool* pada mesin sekrap juga perlu dipahami secara konseptual. Satu mata potong berarti satu titik utama pada pahat menjadi pusat interaksi dengan

benda kerja. Karena itu, beban pemotongan terpusat pada ujung pahat. Apabila pahat aus, perubahan kualitas permukaan akan cepat terlihat. Apabila sudut pahat tidak tepat, pemotongan bisa berubah menjadi gesekan. Keadaan ini berbeda dari pisau frais bermata jamak, di mana beberapa mata potong bekerja bergantian. Mesin sekrap membuat peran satu mata potong menjadi sangat nyata. Pemahaman tentang mesin sekrap juga tidak dapat dilepaskan dari keselamatan kerja. Pahat bergerak bolak balik dengan gaya yang cukup besar. Benda kerja harus dijepit kuat. Tangan operator tidak boleh berada di jalur gerak pahat. Serpihan geram dapat tajam dan panas. Pengaturan langkah harus disesuaikan dengan panjang benda kerja agar pahat tidak menabrak ragum atau bagian mesin. Kesalahan kecil dalam penyetelan dapat berakibat kerusakan pahat, benda kerja, atau mesin. Kadang bengkel tidak memberi peringatan kedua, karena fisika rupanya kurang berminat pada negosiasi.

Sebagai mesin perkakas, mesin sekrap memiliki hubungan langsung dengan gambar kerja. Operator tidak hanya menyayat sampai permukaan terlihat rata, tetapi harus mengikuti ukuran, batas toleransi, dan bentuk yang diminta. Panjang bidang yang disekrap, lebar bidang, posisi alur, dan kedalaman pemakanan perlu dikendalikan. Setelah proses dilakukan, hasil harus diperiksa menggunakan alat ukur yang sesuai. Pemeriksaan ini penting karena mata manusia mudah tertipu oleh permukaan yang tampak rata, padahal ukurannya bisa saja tidak sesuai.

Dari uraian tersebut, mesin sekrap dapat dirumuskan sebagai mesin perkakas pemotong linier yang menggunakan pahat bermata tunggal untuk membentuk permukaan benda kerja melalui gerak maju mundur pahat, dengan pemotongan utama terjadi pada langkah maju dan gerak makan diberikan secara bertahap untuk menyelesaikan bidang kerja. Rumusan ini mencakup unsur mesin, pahat, benda kerja, gerak utama, gerak makan, dan tujuan pemesinan. Definisi tersebut juga cukup luas untuk menjelaskan berbagai pekerjaan sekrap, mulai dari bidang rata sampai alur sederhana.

B. Mekanisme Kerja Mesin Sekrap

Mekanisme kerja mesin sekrap dapat dipahami sebagai proses pengubahan energi dan gerak menjadi aksi penyayatan lurus pada permukaan benda kerja. Mesin ini tidak bekerja dengan memutar benda kerja seperti pada mesin bubut, dan tidak pula memakai pisau bermata jamak seperti pada mesin frais. Pada mesin

sekrap, pahat bermata tunggal bergerak maju dan mundur secara berulang, sementara benda kerja dijepit kuat pada meja mesin. Pemotongan utama terjadi ketika pahat bergerak maju. Saat pahat kembali, penyayat tidak dilakukan, lalu benda kerja atau meja bergeser sedikit untuk menyiapkan lintasan potong berikutnya. Gerak maju mundur pahat tersebut berasal dari gerakan motor yang diteruskan ke sistem transmisi mesin. Gerak putar dari motor tidak langsung dapat menyayat benda kerja, karena pahat sekrap membutuhkan gerak lurus. Di sinilah mekanisme mesin bekerja. Putaran motor diubah menjadi gerak translasi bolak balik pada bagian ram, yaitu bagian mesin yang membawa kepala pahat. Perubahan bentuk gerak ini menjadi inti mekanisme mesin sekrap. Tanpa mekanisme tersebut, pahat hanya akan diam di tempat, dan benda kerja hanya menjadi logam yang menunggu nasib.

Pada mesin sekrap konvensional, ram bergerak sepanjang lintasan lurus horizontal. Pahat dipasang pada kepala pahat di ujung ram, lalu diarahkan agar mata potongnya menyentuh permukaan benda kerja pada posisi yang tepat. Ketika ram bergerak maju, pahat menekan dan menyayat lapisan material. Material yang terpotong keluar sebagai geram. Setelah mencapai akhir langkah, ram bergerak kembali ke posisi awal. Siklus ini berlangsung terus menerus sampai bidang yang direncanakan selesai dikerjakan. Langkah maju disebut sebagai cutting stroke, karena pada langkah inilah terjadi pemotongan material. Langkah balik disebut return stroke, karena fungsinya mengembalikan pahat ke posisi awal sebelum penyayat berikutnya. Pada mesin sekrap standar, langkah balik tidak dipakai untuk membuang material. Perbedaan fungsi antara langkah maju dan langkah balik ini penting dipahami sejak awal, karena dari sinilah muncul persoalan efisiensi waktu pada mesin sekrap.

Mekanisme kerja mesin sekrap tidak hanya berbicara tentang pahat yang bergerak maju mundur. Lebih tepatnya, mesin ini bekerja melalui siklus yang terdiri atas pengaturan posisi benda kerja, pemasangan pahat, penentuan panjang langkah, penyetulan kedalaman potong, pemilihan kecepatan langkah, pelaksanaan penyayat, gerak balik, pemberian gerak makan, lalu pengulangan proses. Siklus ini tampak sederhana, tetapi setiap bagian menentukan kualitas hasil. Satu setelan yang keliru dapat membuat permukaan kasar, ukuran meleset, atau pahat bergetar. Gerak potong pada mesin sekrap bersifat linier. Artinya, pahat bergerak

pada garis lurus terhadap permukaan benda kerja. Sifat gerak ini membuat mesin sekrup cocok untuk pekerjaan bidang datar, bidang tegak, bidang menyudut, bidang bertingkat, serta alur tertentu. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa metode pemesinan memiliki prinsip kerja dan wilayah penerapan yang berbeda, sehingga pemilihan proses harus disesuaikan dengan bentuk geometri yang ingin dihasilkan. Pada mesin sekrup, geometri yang paling mudah dibentuk adalah geometri yang mengikuti lintasan lurus.

Benda kerja pada mesin sekrup umumnya dijepit pada ragum yang berada di atas meja mesin. Meja ini dapat digerakkan secara melintang atau vertikal, tergantung jenis pekerjaan yang dilakukan. Untuk penyekrapan bidang datar mendatar, meja atau benda kerja diberi gerak makan secara bertahap ke arah samping. Untuk penyekrapan bidang tegak atau menyudut, pengaturan posisi pahat dan meja perlu disesuaikan agar mata pahat menyayat bagian yang benar. Di sinilah operator tidak cukup hanya tahu cara menyalakan mesin. Ia harus memahami arah gerak, posisi pahat, dan bidang kerja yang sedang dibentuk. Pada saat langkah maju, ujung pahat menekan permukaan benda kerja dan menggeser material di depan mata potong. Material mengalami deformasi geser, lalu terangkat menjadi geram. Proses ini terjadi sangat cepat pada daerah kecil di sekitar mata pahat. Walaupun terlihat seperti pahat hanya menggaruk permukaan, secara mekanis terjadi interaksi gaya, gesekan, panas, dan perubahan bentuk material. Trinh (2024) menekankan bahwa kekasaran permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Prinsip ini sangat terasa pada mesin sekrup karena satu mata pahat langsung meninggalkan jejak lintasan pada permukaan.

Langkah balik tidak digunakan untuk pemotongan utama karena sisi potong pahat dirancang menghadap arah langkah maju. Jika pahat dipaksa memotong saat kembali tanpa geometri yang sesuai, gesekan dan benturan dapat meningkat. Permukaan benda kerja bisa tergores, pahat dapat cepat aus, bahkan kepala pahat dapat menerima beban yang tidak diinginkan. Karena itu, pada mesin sekrup konvensional, pahat perlu diberi kebebasan saat kembali agar tidak menggesek permukaan secara berlebihan. Salah satu bagian penting dalam mekanisme ini adalah rumah ayun pahat atau clapper box. Bagian ini memungkinkan pahat sedikit terangkat

atau berayun saat langkah balik. Gerakan kecil tersebut membantu mengurangi gesekan antara pahat dan permukaan benda kerja. Pada langkah maju, pahat kembali pada posisi potongnya sehingga dapat menyayat material dengan stabil. Fungsi ini tampak sederhana, tetapi cukup penting. Tanpa kebebasan pada langkah balik, pahat akan menyeret permukaan benda kerja seperti seseorang menyeret kursi besi di lantai keramik, berisik dan tidak perlu.

Mesin sekrap juga sering dilengkapi dengan mekanisme langkah balik cepat atau quick return mechanism. Mekanisme ini membuat waktu langkah balik lebih singkat daripada waktu langkah maju. Alasannya jelas: langkah maju menghasilkan pemotongan, sedangkan langkah balik tidak menghasilkan geram. Jika kedua langkah berlangsung terlalu lama dengan durasi yang sama, waktu kerja akan banyak terpakai untuk gerakan yang tidak produktif. Karena manusia tampaknya masih ingin menyelesaikan pekerjaan sebelum usia pensiun, langkah balik dibuat lebih cepat. Pada mekanisme quick return, ram bergerak lebih lambat saat melakukan pemotongan dan bergerak lebih cepat saat kembali. Kecepatan lebih rendah pada langkah maju memberi kesempatan pahat menyayat material dengan gaya yang lebih terkendali. Kecepatan lebih tinggi pada langkah balik mengurangi waktu kosong dalam satu siklus. Secara praktis, mekanisme ini meningkatkan efisiensi mesin tanpa mengubah prinsip dasar penyayatan. Mesin tetap memotong pada langkah maju dan kembali tanpa pemotongan utama pada langkah balik.

Hubungan antara langkah maju, langkah balik, dan gerak makan dapat dilihat sebagai inti kerja mesin sekrap. Setelah pahat selesai menyayat satu jalur permukaan, pahat kembali ke posisi awal. Pada saat itu, meja atau benda kerja bergeser sedikit sebesar nilai gerak makan. Pergeseran ini membuat pahat tidak mengulang jalur yang sama, melainkan memotong jalur baru yang berdekatan. Setelah banyak siklus, jalur jalur tersebut membentuk satu bidang permukaan yang lebih luas. Pengaturan panjang langkah ram menjadi bagian penting dalam mekanisme kerja. Panjang langkah harus lebih besar sedikit daripada panjang benda kerja yang disayat. Jika terlalu pendek, pahat tidak menyayat seluruh bidang. Jika terlalu panjang, waktu kerja terbuang karena pahat bergerak melewati area yang tidak perlu. Dalam kondisi yang lebih buruk, pahat bisa mendekati ragam atau bagian mesin yang tidak

seharusnya tersentuh. Mesin tidak memiliki rasa bersalah ketika menabrak sesuatu. Operatorlah yang biasanya menanggung akibatnya.

Panjang langkah biasanya mencakup panjang pemotongan pada benda kerja, langkah awal, dan langkah akhir. Langkah awal memberi ruang agar pahat mulai bergerak sebelum menyentuh benda kerja. Langkah akhir memberi ruang agar pahat keluar dari bidang kerja setelah proses penyayatan. Konsep ini sejalan dengan elemen dasar proses sekrap yang memuat panjang pemotongan, langkah awal, langkah akhir, dan panjang pemesinan total. Pengaturan tersebut membantu proses berjalan lebih aman dan lebih terkontrol. Gerak makan pada mesin sekrap dapat dilakukan secara manual atau otomatis, tergantung konstruksi mesin. Pada pekerjaan latihan, operator kadang mengatur pemakanan secara manual agar dapat merasakan perubahan proses. Pada pekerjaan yang membutuhkan hasil lebih seragam, gerak makan otomatis lebih membantu karena perpindahan meja dapat dibuat konsisten pada setiap langkah. Konsistensi ini penting, sebab permukaan hasil sekrap sangat dipengaruhi oleh jarak antar lintasan pahat.

Kedalaman potong diatur dengan menggeser posisi pahat terhadap benda kerja. Pada penyekrapan bidang datar, kedalaman potong menentukan tebal lapisan material yang dibuang dalam satu lintasan. Untuk pekerjaan kasar, kedalaman potong dapat dibuat lebih besar agar material cepat berkurang. Untuk pekerjaan akhir, kedalaman potong dibuat lebih kecil agar gaya potong turun dan permukaan lebih halus. Das et al. (2022) menunjukkan bahwa kecepatan, gerak makan, dan kedalaman potong berkaitan dengan kekasaran permukaan, gaya potong, dan keausan pahat pada proses pemesinan. Walau kajian tersebut berada pada proses bubut keras, hubungan dasarnya tetap berguna untuk membaca penyayatan pada mesin sekrap. Kecepatan langkah juga memengaruhi mekanisme pemotongan. Kecepatan yang terlalu rendah membuat waktu pemesinan menjadi panjang, terutama karena mesin sekrap memiliki langkah balik yang tidak produktif. Kecepatan yang terlalu tinggi dapat meningkatkan benturan awal saat pahat masuk ke benda kerja, memperbesar getaran, dan mempercepat keausan pahat. Dalam praktik, pemilihan kecepatan perlu mempertimbangkan jenis material, bahan pahat, kedalaman potong, dan kekakuan pencekaman. Tidak semua benda kerja boleh

dipaksa cepat, meskipun jadwal praktikum biasanya bertingkah seolah fisika bisa dinegosiasikan.

Pada mekanisme penyayat, pahat mengalami beban yang bersifat berulang. Setiap kali langkah maju dimulai, pahat masuk ke permukaan benda kerja dan menerima gaya potong. Pada akhir langkah, gaya berkurang. Ketika langkah balik berlangsung, pahat kembali tanpa pemotongan utama. Pola beban berulang ini dapat menyebabkan getaran jika pahat terlalu panjang keluar dari pemegangnya, benda kerja tidak tercekam kuat, atau kedalaman potong terlalu besar. Karena itu, pemasangan pahat dan pengecaman benda kerja menjadi bagian dari mekanisme kerja, bukan sekadar persiapan. Bentuk geram yang keluar juga dapat digunakan untuk membaca kondisi mekanisme pemotongan. Pada material tertentu, geram dapat berbentuk serpihan pendek. Pada material yang lebih ulet, geram dapat lebih panjang atau melengkung. Geram yang terlalu tebal dapat menandakan gerak makan atau kedalaman potong terlalu besar. Geram yang sangat tipis tetapi disertai suara gesekan dapat menunjukkan pahat kurang tajam atau kedalaman potong terlalu kecil sehingga pahat lebih banyak menggosok daripada menyayat. Pengamatan seperti ini memberi informasi praktis yang kadang lebih cepat daripada menunggu hasil pengukuran akhir.

Kualitas permukaan hasil sekrap terbentuk dari kombinasi lintasan pahat, ketajaman mata potong, gerak makan, dan kekakuan sistem. Trinh (2024) menjelaskan bahwa pemilihan parameter pemotongan dapat membantu mengurangi biaya, memperbaiki kondisi pemotongan, dan meningkatkan kualitas permukaan. Pada mesin sekrap, hal ini tampak pada perbedaan antara proses kasar dan proses akhir. Proses kasar mengejar pengurangan material, sedangkan proses akhir mengejar ketelitian dan kehalusan. Mekanisme kerja mesin sekrap juga berkaitan dengan arah gaya potong. Saat pahat menyayat, gaya bekerja pada pahat dan diteruskan ke pemegang pahat, kepala pahat, ram, rangka mesin, benda kerja, ragam, dan meja. Jika salah satu bagian kurang kaku, getaran dapat muncul. Getaran ini sering meninggalkan pola garis atau gelombang pada permukaan. Pada pekerjaan presisi, pola seperti itu bukan sekadar kurang indah, melainkan tanda bahwa proses tidak stabil.

Stabilitas mesin dipengaruhi oleh konstruksi dasar seperti alas, kolom, ram, meja, eretan, kepala pahat, dan sistem penggerak.

Alas menjaga mesin tetap kokoh. Kolom menopang mekanisme penggerak. Ram membawa pahat maju mundur. Meja menahan benda kerja dan mengatur gerak makan. Kepala pahat memungkinkan pengaturan posisi dan sudut pahat. Jika seluruh bagian bekerja selaras, penyayatan berlangsung lebih tenang. Jika tidak, mesin akan memberi konser getaran yang tidak pernah diminta siapa pun. Pada pekerjaan bidang datar, mekanisme kerja mesin sekrup relatif mudah diamati. Pahat bergerak maju menyayat satu garis permukaan. Setelah kembali, meja bergeser sedikit, lalu pahat menyayat garis berikutnya. Jejak pahat akan tersusun sejajar hingga membentuk bidang yang rata. Untuk mendapatkan hasil lebih baik, operator perlu menjaga agar pahat tajam, gerak makan tidak terlalu besar, kedalaman potong sesuai, dan benda kerja tidak berubah posisi selama proses berlangsung.

Pada pekerjaan bidang tegak, mekanisme geraknya sedikit berbeda. Pahat perlu diatur agar ujung mata potong menyayat bagian sisi benda kerja, sementara bagian badan pahat tidak menggesek bidang yang sudah terbentuk. Jika pahat tidak diberi sudut bebas yang cukup, sisi pahat dapat menggesek permukaan dan merusak hasil. Karena itu, penyekrapan tegak membutuhkan perhatian lebih pada posisi kepala pahat, arah pemakanan, dan kebebasan gerak pahat saat langkah balik. Pada pekerjaan bidang menyudut, kepala pahat atau eretan pahat dapat diatur sesuai sudut yang dibutuhkan. Pahat tetap bergerak bolak balik, tetapi lintasan penyayatan diarahkan mengikuti bidang miring yang ingin dibuat. Kesalahan kecil pada sudut pengaturan dapat membuat permukaan tidak sesuai dengan gambar kerja. Untuk pekerjaan semacam ini, pengukuran tidak cukup dilakukan setelah semua proses selesai. Pemeriksaan antara perlu dilakukan agar kesalahan tidak terlanjur menyebar ke seluruh bidang.

Mekanisme kerja mesin sekrup pada pembuatan alur menuntut pahat yang sesuai dengan bentuk alur. Alur lurus, alur tembus, alur buntu, alur U, alur V, atau alur ekor burung membutuhkan bentuk pahat dan urutan kerja yang berbeda. Pahat alur harus mampu masuk ke celah tanpa badan pahat bergesekan berlebihan dengan sisi alur. Kedalaman potong juga perlu diatur bertahap agar pahat tidak menerima beban terlalu besar. Dalam pekerjaan alur, kesabaran teknis lebih berguna daripada keberanian asal tekan. Mesin sekrup memiliki keterbatasan produktivitas karena hanya satu mata pahat yang bekerja dan pemotongan utama

hanya terjadi pada langkah maju. Dibandingkan mesin frais, waktu pengerjaan dapat lebih lama untuk bidang yang luas. Namun, dari sudut pembelajaran dan pekerjaan bengkel tertentu, mekanisme ini justru memberi kelebihan. Prosesnya mudah diamati, hubungan antara gerak potong dan gerak makan terlihat jelas, dan pengaruh parameter terhadap hasil dapat dipahami secara langsung.

Dalam konteks manufaktur modern, mekanisme mesin sekrap dapat dibaca bersama isu efisiensi proses. Wang et al. (2023) menempatkan pemesinan berkelanjutan sebagai integrasi antara peralatan, proses, dan strategi. Pada mesin sekrap, gagasan ini dapat diterjemahkan ke dalam pemilihan panjang langkah yang tidak berlebihan, gerak makan yang sesuai, kedalaman potong yang tidak memaksa mesin, dan penggunaan pahat yang tepat. Efisiensi tidak selalu berarti mempercepat semua setelan. Kadang efisiensi berarti mengurangi gerakan yang tidak perlu dan menjaga proses tetap stabil. Operator perlu memahami bahwa mekanisme kerja mesin sekrap selalu berhubungan dengan keselamatan. Ram bergerak maju mundur dengan gaya besar. Pahat tajam berada pada lintasan terbuka. Gerak dapat panas dan tajam. Benda kerja yang tidak tercekam kuat dapat bergeser atau terlepas. Pengaturan langkah yang salah dapat menyebabkan pahat menabrak ragam. Karena itu, sebelum mesin dijalankan, area kerja harus bersih, kunci pengencang tidak tertinggal, benda kerja harus tercekam kuat, dan posisi tangan tidak boleh berada di jalur gerak pahat. Pemeriksaan hasil menjadi bagian penutup dari mekanisme kerja. Setelah beberapa lintasan, operator perlu memeriksa ukuran, kerataan, kesikuan, atau kedalaman bidang yang dikerjakan. Alat ukur yang digunakan dapat berupa jangka sorong, mistar baja, siku, dial indikator, atau alat ukur lain sesuai kebutuhan. Pemeriksaan ini menjaga agar proses tidak bergerak terlalu jauh dari ukuran rancangan. Dalam pemesinan, kesalahan yang cepat diketahui biasanya masih murah. Kesalahan yang diketahui setelah benda kerja selesai sering berubah menjadi pelajaran mahal. Mekanisme kerja mesin sekrap memperlihatkan hubungan yang cukup jernih antara energi, gerak, pahat, dan bentuk benda kerja. Motor menyediakan tenaga. Sistem transmisi dan mekanisme pengubah gerak menghasilkan gerak bolak balik ram. Pahat bermata tunggal menyayat pada langkah maju. Langkah balik mengembalikan pahat ke posisi awal. Gerak makan memindahkan benda kerja ke lintasan berikutnya. Kedalaman potong menentukan

tebal material yang dibuang. Semua unsur tersebut bekerja sebagai satu rangkaian, bukan sebagai bagian yang berdiri sendiri.

C. Gerak Maju, Gerak Balik, dan Proses Penyayatan

Gerak maju, gerak balik, dan proses penyayatan merupakan inti dari cara kerja mesin sekrap. Pada mesin ini, pahat tidak berputar seperti mata bor dan benda kerja tidak berputar seperti pada mesin bubut. Pahat bergerak lurus maju dan mundur secara berulang, sementara benda kerja dijepit pada meja mesin. Dari gerakan yang terlihat sederhana itu, terbentuklah permukaan benda kerja secara bertahap. Setiap langkah maju membuang sebagian kecil material, sedangkan setiap langkah balik mengembalikan pahat ke posisi semula untuk menyiapkan penyayatan berikutnya. Gerak maju disebut sebagai langkah kerja karena pada saat inilah pahat benar benar menyayat benda kerja. Ujung pahat masuk ke permukaan material, menekan lapisan benda kerja, lalu memisahkan bagian yang tidak diperlukan menjadi geram. Pahat sekrap yang digunakan umumnya berupa pahat bermata tunggal atau *single point cutting tool*, sehingga satu sisi mata potong menjadi pusat terjadinya pemotongan. Kondisi ini membuat ketajaman pahat, sudut potong, dan kekakuan pemasangan pahat sangat menentukan hasil permukaan.

Gerak balik memiliki fungsi yang berbeda. Pada langkah ini, pahat kembali ke posisi awal tanpa melakukan pemotongan utama. Dalam proses sekrap konvensional, langkah balik tidak dirancang untuk membuang material. Pahat hanya bergerak kembali agar dapat memulai lintasan baru. Walaupun tampak seperti gerakan kosong, langkah balik tetap penting karena menentukan kelancaran siklus kerja. Tanpa langkah balik, pahat tidak dapat mengulang proses penyayatan pada jalur berikutnya. Mesin tidak bisa diminta melompati fisika hanya karena manusia ingin pekerjaan cepat selesai. Perbedaan fungsi antara gerak maju dan gerak balik membuat mesin sekrap memiliki karakter produktivitas yang khas. Gerak maju menghasilkan pemotongan, sedangkan gerak balik tidak menghasilkan geram. Karena itu, pada banyak mesin sekrap digunakan mekanisme *quick return*, yaitu mekanisme yang membuat langkah balik berlangsung lebih cepat daripada langkah maju. Tujuannya bukan untuk memperindah gerakan mesin, melainkan untuk mengurangi waktu tidak produktif dalam satu siklus pemesinan.

Pada langkah maju, kecepatan pahat perlu dikendalikan agar proses pemotongan berlangsung stabil. Jika kecepatan terlalu tinggi, pahat dapat mengalami beban kejut saat memasuki benda kerja. Getaran meningkat, permukaan menjadi kurang halus, dan umur pahat dapat menurun. Jika kecepatan terlalu rendah, pemotongan memang terasa lebih aman, tetapi waktu pengerjaan menjadi lama. Pemilihan kecepatan harus mempertimbangkan jenis material, bahan pahat, kedalaman potong, serta kekakuan benda kerja dan mesin. Proses penyayatan pada langkah maju terjadi melalui deformasi material di depan mata potong. Saat pahat menekan material, lapisan benda kerja mengalami gaya geser. Bagian material yang tidak lagi mampu bertahan akan terangkat sebagai geram. Pada material yang relatif ulet, geram dapat berbentuk lebih panjang atau melengkung. Pada material yang rapuh, geram dapat pecah menjadi serpihan pendek. Bentuk geram ini dapat memberi petunjuk tentang kondisi pemotongan, meskipun tidak boleh dijadikan satu satunya dasar penilaian.

Penyayatan pada mesin sekrap tidak terjadi sekaligus pada seluruh permukaan. Bidang kerja terbentuk dari banyak lintasan pahat yang tersusun berdampingan. Setelah satu langkah maju selesai dan pahat melakukan gerak balik, meja atau benda kerja bergeser sedikit sebesar nilai gerak makan. Pergeseran kecil ini membuat lintasan berikutnya berada di samping lintasan sebelumnya. Jika siklus ini diulang berkali kali, permukaan benda kerja akan terbentuk secara bertahap menjadi bidang rata, bidang tegak, bidang menyudut, atau alur tertentu. Dalam istilah pemesinan, gerak maju berkaitan langsung dengan gerak utama. Gerak utama adalah gerakan yang menyebabkan aksi pemotongan terjadi. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa proses pemesinan memiliki prinsip gerak yang berbeda sesuai jenis mesin dan kondisi penggunaannya. Pada mesin sekrap, gerak utama berasal dari langkah maju pahat. Artinya, kualitas pemotongan tidak dapat dilepaskan dari kestabilan ram, kekakuan kepala pahat, dan kemampuan pahat mempertahankan sudut potong saat menerima gaya.

Gerak balik lebih dekat dengan fungsi pengembalian posisi. Walaupun tidak menyayat, gerak ini tetap memengaruhi waktu pemesinan. Pada mesin yang memiliki perbandingan kecepatan maju dan balik, langkah balik biasanya dibuat lebih cepat. Dalam elemen dasar proses sekrap, hubungan ini dapat dibaca melalui

perbandingan kecepatan langkah maju dan langkah mundur. Jika langkah balik terlalu lambat, waktu pemesinan membesar karena sebagian siklus digunakan untuk gerakan tanpa pemotongan. Jika terlalu cepat tetapi tidak stabil, mesin dapat mengalami hentakan dan getaran. Gerak makan atau feed pada proses sekrap terjadi setelah satu lintasan pemotongan selesai. Gerak makan ini menentukan jarak perpindahan benda kerja atau meja untuk lintasan berikutnya. Nilai gerak makan dinyatakan dalam milimeter per langkah. Nilai yang terlalu besar membuat jarak antarbekas pahat menjadi kasar. Nilai yang terlalu kecil dapat menghasilkan permukaan lebih halus, tetapi waktu pengerjaan menjadi lebih panjang. Di bengkel, keputusan ini tidak bisa diambil dengan semangat asal cepat, karena permukaan benda kerja tidak peduli pada ambisi manusia.

Hubungan antara gerak maju, gerak balik, dan gerak makan dapat dijelaskan melalui urutan yang teratur. Pahat bergerak maju dan menyayat. Pahat keluar dari bidang kerja. Pahat bergerak balik menuju posisi awal. Meja bergeser sedikit. Pahat maju lagi pada lintasan baru. Urutan ini terus berulang sampai seluruh lebar benda kerja tersayat. Jika salah satu urutan terganggu, misalnya gerak makan tidak seragam atau pahat menyentuh benda kerja saat balik, hasil permukaan dapat berubah menjadi tidak rata. Pada saat pahat melakukan gerak maju, gaya potong tidak hanya bekerja pada ujung pahat. Gaya tersebut diteruskan ke pemegang pahat, kepala pahat, ram, rangka mesin, benda kerja, ragum, dan meja. Bila pahat terlalu panjang keluar dari pemegangnya, sistem menjadi kurang kaku dan getaran mudah muncul. Bila benda kerja tidak dicekam kuat, permukaan dapat bergeser atau miring. Bila meja tidak terkunci dengan baik, penyayatan dapat kehilangan arah. Proses sekrap yang terlihat sederhana ternyata cukup mudah berubah menjadi drama mekanik bila persiapannya asal-asalan.

Pada langkah balik, pahat perlu bebas dari permukaan benda kerja agar tidak menggores bidang yang baru disayat. Pada beberapa mesin, bagian kepala pahat dilengkapi rumah ayun atau clapper box yang memungkinkan pahat sedikit terangkat ketika kembali. Gerakan kecil ini membantu mengurangi gesekan balik. Saat langkah maju berikutnya dimulai, pahat kembali berada pada posisi pemotongan. Fungsi rumah ayun ini sangat penting terutama pada pekerjaan bidang datar, karena bidang yang baru terbentuk tidak boleh terus digesek oleh pahat saat pahat kembali. Gesekan

yang terjadi pada langkah balik dapat menurunkan kualitas permukaan. Jika pahat tidak cukup bebas, sisi pahat dapat menyeret permukaan benda kerja. Akibatnya, bidang yang seharusnya selesai disayat justru mendapat goresan tambahan. Dalam pekerjaan kasar, goresan kecil mungkin masih bisa diterima. Namun, pada pekerjaan akhir atau finishing, hal semacam itu dapat membuat permukaan tidak memenuhi syarat. Trinh (2024) menegaskan bahwa kualitas kekasaran permukaan dalam proses pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat pahat, dan sifat benda kerja. Pada mesin sekrup, pengaruh itu tampak langsung pada bekas lintasan pahat.

Proses penyayatan juga dipengaruhi oleh kedalaman potong. Kedalaman potong menunjukkan tebal material yang dibuang oleh pahat dalam satu lintasan. Untuk pemakanan awal, kedalaman potong dapat dibuat lebih besar agar material cepat berkurang. Untuk pemakanan akhir, kedalaman potong dibuat lebih kecil agar permukaan lebih halus dan ukuran lebih mudah dikendalikan. Namun, kedalaman potong yang terlalu besar dapat menaikkan gaya potong, memperbesar getaran, dan mempercepat keausan pahat. Das et al. (2022) menunjukkan bahwa kecepatan, gerak makan, dan kedalaman potong berhubungan dengan respons pemesinan seperti kekasaran permukaan, gaya potong, dan keausan pahat. Gerak makan juga memengaruhi bentuk tekstur permukaan. Setiap lintasan pahat meninggalkan bekas. Jika gerak makan besar, jarak antarbekas lintasan menjadi lebih lebar. Permukaan tampak lebih kasar dan dapat terasa bergelombang bila diraba. Jika gerak makan kecil, bekas lintasan lebih rapat sehingga permukaan cenderung lebih halus. Pilihan ini harus disesuaikan dengan tujuan pekerjaan. Untuk roughing, gerak makan yang lebih besar masih dapat diterima. Untuk finishing, gerak makan lebih kecil biasanya lebih sesuai.

Kecepatan langkah pahat berkaitan dengan jumlah langkah per menit. Pada mesin sekrup, jumlah langkah per menit tidak boleh dipilih sembarangan. Material lunak dapat dikerjakan dengan kecepatan lebih tinggi, selama pahat dan pencekaman mendukung. Material keras membutuhkan kecepatan lebih hati-hati agar pahat tidak cepat aus. Jika kecepatan terlalu tinggi pada material keras, pahat dapat panas, tumpul, atau mengalami kerusakan pada ujung potong. Pemesinan memang sering terlihat seperti urusan tenaga, padahal sebagian besarnya adalah urusan menahan diri. Dalam

elemen proses sekrap, panjang langkah juga berpengaruh terhadap waktu pemotongan. Panjang pemesinan tidak hanya terdiri atas panjang benda kerja yang dipotong, tetapi juga langkah awal dan langkah akhir. Langkah awal memberi ruang agar pahat memasuki benda kerja dengan aman. Langkah akhir memberi ruang agar pahat keluar dari benda kerja sebelum kembali. Jika panjang langkah terlalu pendek, bidang tidak tersayat penuh. Jika terlalu panjang, waktu terbuang karena pahat bergerak melewati ruang kosong yang tidak perlu.

Proses penyayatan pada mesin sekrap juga memperlihatkan hubungan antara gerak dan panas. Saat pahat menyayat, energi mekanik sebagian berubah menjadi panas akibat deformasi material dan gesekan. Panas ini terkonsentrasi di sekitar mata potong dan geram. Jika kondisi pemotongan terlalu berat, temperatur meningkat dan pahat lebih cepat aus. Dalam beberapa pekerjaan, pendinginan atau pelumasan dapat membantu mengurangi gesekan dan memperbaiki kondisi pemotongan, meskipun penerapannya tetap bergantung pada material, jenis pahat, dan kebutuhan kerja. Wang et al. (2023) menekankan bahwa pemesinan berkelanjutan perlu dilihat melalui integrasi peralatan, proses, dan strategi. Pada mesin sekrap, gagasan ini dapat diterapkan melalui pengaturan gerak maju, gerak balik, dan gerak makan secara efisien. Panjang langkah tidak perlu dibuat berlebihan. Gerak makan tidak perlu terlalu kecil jika pekerjaan masih tahap kasar. Kedalaman potong tidak perlu dipaksakan jika mesin mulai bergetar. Efisiensi tidak selalu berarti mempercepat semua gerakan, melainkan memilih kondisi yang stabil, aman, dan tidak memboroskan energi maupun pahat.

Pada pekerjaan sekrap datar, gerak maju menghasilkan sayatan lurus sepanjang permukaan benda kerja. Gerak balik mengembalikan pahat ke awal lintasan. Setelah itu, meja bergerak melintang sebagai gerak makan. Pola ini diulang sampai seluruh lebar bidang selesai dikerjakan. Hasil akhirnya berupa permukaan datar dengan bekas lintasan yang sejajar. Jika pahat tajam dan gerak makan diatur wajar, bidang dapat terlihat rapi. Jika pahat tumpul atau gerak makan terlalu besar, permukaan tampak kasar. Pada pekerjaan sekrap tegak, proses penyayatan memiliki perhatian tambahan. Pahat harus diatur agar bagian ujung yang menyayat, sedangkan bagian sisi tetap bebas dari gesekan. Gerak pahat tetap maju mundur, tetapi orientasi penyayatan diarahkan pada sisi

benda kerja. Kedalaman potong dapat diatur melalui pergerakan meja, sedangkan gerak makan diberikan melalui eretan alat potong. Pengaturan seperti ini menuntut ketelitian karena bidang tegak lebih mudah menunjukkan kesalahan sudut atau gesekan sisi pahat.

Pada pekerjaan sekrap menyudut, gerak penyayatan perlu mengikuti bidang miring yang diinginkan. Eretan pahat dapat disetel sesuai sudut tertentu, lalu pahat bergerak maju mundur membentuk permukaan miring. Proses ini memerlukan pengukuran lebih sering karena kesalahan sudut akan terbawa sepanjang bidang. Bukan hanya permukaan yang dapat menjadi kurang rapi, tetapi juga ukuran dan fungsi komponen dapat terganggu. Pada komponen dudukan, misalnya, bidang miring yang salah dapat menyebabkan pasangan komponen tidak menempel sempurna. Pada pekerjaan alur, gerak maju menghasilkan penyayatan pada jalur yang lebih sempit. Pahat alur harus memiliki bentuk yang sesuai agar dapat masuk ke celah tanpa menggesek dinding alur secara berlebihan. Gerak makan dan kedalaman potong perlu dibuat lebih hati-hati. Jika pemakanan terlalu besar, pahat mudah terjepit atau patah. Jika kedalaman dipaksakan, permukaan alur dapat rusak. Alur seperti V groove dan dovetail membutuhkan pengaturan sudut pahat yang lebih cermat karena bentuknya tidak sekadar lurus sederhana.

Dalam proses penyayatan, suara mesin juga dapat menjadi indikator awal. Suara yang halus dan stabil biasanya menunjukkan proses berjalan lebih terkendali. Suara berdecit dapat menunjukkan gesekan berlebihan. Suara bergetar atau berketuk dapat menunjukkan pahat terlalu panjang, benda kerja kurang kuat dicekam, atau kedalaman potong terlalu besar. Walaupun pengalaman mendengar suara mesin tidak menggantikan pengukuran, pengamatan seperti ini membantu operator mengambil tindakan sebelum kerusakan menjadi lebih jauh. Bentuk geram juga perlu diamati. Geram yang keluar terlalu tebal dapat menunjukkan pemakanan terlalu berat. Geram yang sangat tipis dengan permukaan benda kerja tampak mengkilap karena tergesek dapat menunjukkan pahat tidak benar-benar menyayat. Geram yang berubah warna karena panas dapat menjadi tanda bahwa kecepatan atau gesekan terlalu tinggi. Pada tahap pembelajaran, pengamatan geram membantu kita memahami bahwa penyayatan bukan sekadar mengurangi ukuran, tetapi juga proses fisik yang dapat dibaca dari gejalanya.

Pengukuran hasil tetap menjadi bagian penting setelah beberapa siklus penyayatan. Bidang yang terlihat rata belum tentu benar benar rata menurut ukuran teknik. Operator perlu memeriksa panjang, lebar, kedalaman, kesikuan, dan kerataan sesuai kebutuhan pekerjaan. Alat ukur seperti jangka sorong, mistar baja, siku, dan dial indikator dapat digunakan sesuai tingkat ketelitian yang diminta. Pemeriksaan antara sangat berguna karena kesalahan dapat dikoreksi sebelum seluruh bidang selesai dikerjakan. Gerak maju, gerak balik, dan gerak makan memperlihatkan bahwa mesin sekrap bekerja dengan logika bertahap. Tidak ada permukaan yang muncul begitu saja. Setiap bidang adalah hasil dari banyak lintasan kecil, banyak keputusan kecil, dan banyak pengulangan mekanis. Di sinilah pembelajaran mesin sekrap menjadi berharga. Kita dapat melihat secara langsung bagaimana parameter proses memengaruhi hasil benda kerja. Teori tidak lagi berada di papan tulis saja, tetapi muncul dalam bentuk geram, suara mesin, bekas pahat, dan ukuran yang harus diperiksa.

Pemahaman terhadap gerak maju dan gerak balik juga membantu menjelaskan mengapa mesin sekrap lebih cocok untuk pekerjaan tertentu. Untuk bidang datar sederhana, alur lurus, atau pekerjaan perbaikan di bengkel, mesin ini masih cukup berguna. Untuk produksi massal bidang luas, mesin frais atau mesin CNC biasanya lebih efisien karena memiliki gerak potong yang lebih produktif dan berkelanjutan. Mesin sekrap bukan mesin yang buruk, hanya saja ia punya wilayah kerja yang perlu dipahami. Seperti banyak alat lain, masalah muncul ketika manusia memaksanya menjadi sesuatu yang bukan tugasnya. Secara konseptual, gerak maju adalah tahap pembentukan, gerak balik adalah tahap pengembalian, dan gerak makan adalah tahap perpindahan lintasan. Ketiganya membentuk siklus dasar penyekrapan. Kedalaman potong menentukan beban tiap lintasan, sedangkan kecepatan langkah memengaruhi waktu dan kestabilan pemotongan. Jika hubungan ini dipahami, proses sekrap tidak lagi tampak sebagai gerakan bolak balik yang monoton. Ia menjadi sistem pemesinan linier yang bekerja melalui pengaturan gerak, gaya, dan geometri.

D. Profil Pahat Sekrap

Profil pahat sekrap merupakan salah satu unsur penting yang menentukan bentuk permukaan hasil penyayatan. Pada mesin sekrap, pahat bekerja sebagai alat potong bermata tunggal atau

single point cutting tool. Artinya, proses pemotongan bergantung pada satu mata potong utama yang menyentuh benda kerja saat langkah maju. Karena hanya satu bagian pahat yang menyayat, bentuk ujung pahat, sudut bebas, ketajaman mata potong, dan kekakuan pemasangan pahat menjadi sangat menentukan mutu hasil sekrap. Pahat sekrap tidak dibuat dalam satu bentuk saja. Setiap profil pahat disesuaikan dengan jenis permukaan yang ingin dihasilkan. Ada pahat untuk meratakan bidang, ada pahat untuk membuat sisi tegak, ada pahat untuk pekerjaan kasar, ada juga pahat yang digunakan untuk membentuk alur menyudut. Perbedaan bentuk ini bukan sekadar variasi tampilan. Dalam pemesinan, bentuk pahat menentukan arah gaya potong, bentuk geram, bidang kontak, dan risiko gesekan. Kalau pahat salah dipilih, mesin tetap bisa bergerak, tetapi hasilnya biasanya ikut salah. Begitulah mekanika bekerja, tidak peduli niat baik operator.

Pada mesin sekrap, pahat menyayat benda kerja hanya pada langkah maju. Saat pahat bergerak maju, ujung mata potong menekan lapisan material dan membuangnya dalam bentuk geram. Saat langkah balik, pahat kembali ke posisi awal tanpa pemotongan utama. Pola kerja seperti ini membuat pahat sekrap harus memiliki geometri yang mampu menahan gaya potong berulang. Pahat tidak hanya perlu tajam, tetapi juga cukup kuat agar tidak mudah bergetar, aus, atau patah saat menerima beban. Secara umum, bagian penting pada pahat sekrap mencakup mata potong, bidang geram, sudut bebas, sudut potong, tangkai pahat, dan ujung pahat. Mata potong merupakan bagian yang langsung memisahkan material dari benda kerja. Bidang geram atau face menjadi jalur keluarnya geram setelah material tersayat. Sudut bebas atau relief angle memberi jarak agar sisi pahat tidak menggesek permukaan benda kerja secara berlebihan. Sudut geram atau rake angle membantu mengarahkan pembentukan dan aliran geram. Semuanya bekerja bersama, walaupun dari luar hanya terlihat seperti sepotong logam tajam yang dipasang di kepala pahat.

Profil pahat sekrap perlu dipahami bersama fungsi permukaan yang akan dibuat. Untuk bidang datar, pahat harus mampu menyayat secara lebar dan stabil. Untuk sisi tegak, pahat perlu memiliki sisi potong yang sesuai agar bagian dinding benda kerja dapat dibentuk tanpa gesekan berlebih. Untuk alur, pahat harus cukup ramping agar dapat masuk ke celah, tetapi tetap kuat

menahan beban. Untuk profil khusus, bentuk ujung pahat perlu mengikuti kontur yang diinginkan. Di sinilah pemilihan pahat menjadi keputusan teknis, bukan sekadar mengambil alat yang kebetulan paling dekat di meja kerja. Pahat rata lurus biasanya digunakan ketika permukaan yang dikerjakan tidak memerlukan kontur khusus. Kelebihan utamanya terletak pada kemudahan pengasahan dan kestabilan saat menyayat bidang terbuka. Namun, pahat ini tetap harus dipasang dengan sudut yang tepat. Jika sudut bebas terlalu kecil, sisi pahat dapat menggesek permukaan benda kerja. Jika sudutnya terlalu besar, ujung pahat bisa menjadi lemah. Dalam pekerjaan sekrap, terlalu percaya diri pada pahat yang tampak sederhana adalah cara klasik untuk menghasilkan permukaan yang tidak sederhana sama sekali.

Pahat lengkung sering berguna pada pekerjaan yang membutuhkan permukaan lebih rapi setelah proses kasar selesai dilakukan. Pada tahap awal, operator dapat memakai pahat yang lebih kuat untuk membuang material lebih banyak. Setelah ukuran mendekati target, pahat lengkung dapat digunakan untuk memperbaiki kualitas permukaan. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kekasaran permukaan hasil pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pada mesin sekrap, bentuk ujung pahat lengkung menjadi salah satu faktor yang dapat membantu mengendalikan jejak lintasan pahat. Pahat datar harus digunakan dengan memperhatikan lebar pemotongan. Jika bidang potong terlalu lebar sementara mesin, pahat, atau benda kerja kurang kaku, gaya potong meningkat dan getaran lebih mudah muncul. Getaran tersebut dapat meninggalkan bekas bergelombang pada permukaan. Das et al. (2022) menunjukkan bahwa parameter seperti kecepatan potong, gerak makan, dan kedalaman potong berkaitan dengan gaya potong, keausan pahat, serta kualitas permukaan. Walaupun kajian tersebut berada pada konteks pembubutan keras, hubungan dasarnya tetap berguna untuk membaca proses pemotongan pada pahat sekrap.

Pahat runcing memiliki karakter gaya potong yang berbeda dari pahat datar. Karena bidang kontakannya lebih kecil, pahat dapat masuk ke area sempit, tetapi ujungnya menerima beban lebih terpusat. Pada material keras, pemakanan perlu dibuat ringan agar pahat tidak mengalami beban berlebihan. Pada material yang lebih lunak, pahat runcing tetap perlu dijaga dari gesekan samping. Jika

sisi pahat ikut menggesek dinding benda kerja, hasil alur atau sudut dapat menjadi kasar dan ukuran dapat menyimpang.

Pahat sisi penting dalam pekerjaan bidang tegak, bahu, dinding alur, dan sisi komponen bertingkat. Saat digunakan, posisi kepala pahat dan arah pemakanan harus disesuaikan dengan bidang yang akan dibentuk. Pemasangan pahat tidak boleh terlalu panjang keluar dari pemegang karena gaya potong pada sisi dapat menimbulkan momen lentur. Semakin panjang pahat menjulur, semakin mudah getaran terjadi. Dalam praktik, pahat sisi yang dipasang pendek dan kaku cenderung menghasilkan bidang yang lebih bersih.

Pahat sisi kasar umumnya digunakan ketika material pada dinding benda kerja masih perlu dikurangi cukup banyak. Gerak makan dan kedalaman potong dapat dibuat lebih besar dibandingkan proses akhir, tetapi tetap harus memperhatikan kemampuan mesin dan kekakuan pencekaman. Jika benda kerja tidak dijepit kuat, gaya potong pada sisi dapat menyebabkan pergeseran. Pergeseran kecil pada awal proses bisa berubah menjadi kesalahan ukuran yang tidak kecil. Bengkel punya bakat mengubah kelalaian kecil menjadi pekerjaan ulang yang panjang. Pahat profil membutuhkan pengasahan yang lebih teliti dibandingkan pahat rata biasa. Sudut dan radius pada ujung pahat harus disesuaikan dengan gambar kerja. Pada pekerjaan yang membutuhkan keseragaman, bentuk profil pahat perlu diperiksa sebelum digunakan. Jika pahat sudah aus, kontur yang dihasilkan dapat berubah. Keausan kecil pada ujung profil dapat membuat radius tidak sesuai atau sudut menjadi tumpul. Karena itu, pahat profil tidak hanya dipasang, tetapi juga harus dikontrol bentuknya.

Pahat profil juga menimbulkan bidang kontak yang dapat lebih besar daripada pahat runcing. Bidang kontak yang besar dapat meningkatkan gaya potong. Karena itu, pemakanan pada pahat profil biasanya perlu dilakukan secara bertahap. Proses awal dapat memakai pahat lain untuk membuang material berlebih, lalu pahat profil digunakan untuk membentuk kontur akhir. Cara ini lebih aman daripada memaksa pahat profil bekerja terlalu berat sejak awal. Wang et al. (2023) menjelaskan bahwa efisiensi pemesinan perlu dilihat melalui integrasi peralatan, proses, dan strategi, bukan hanya dari kecepatan pengurangan material. Pahat alur sudut menuntut pemakanan yang hati-hati. Kedalaman potong perlu dinaikkan secara bertahap, bukan dipaksakan dalam satu

lintasan berat. Pada alur ekor burung, kesalahan kecil dapat membuat pasangan komponen tidak bisa masuk atau terlalu longgar. Karena itu, proses penyekrapan alur sudut biasanya membutuhkan pengukuran berulang. Pekerjaan ini bukan tempat yang cocok untuk operator yang merasa penggaris dan siku hanyalah hiasan meja.

Dalam penggunaan pahat alur sudut, pengaturan eretan pahat menjadi sangat penting. Eretan perlu diarahkan sesuai sudut alur yang dibutuhkan. Pahat kemudian melakukan langkah maju dan balik seperti biasa, tetapi bidang yang terbentuk mengikuti sudut pengaturan tersebut. Untuk alur V, pahat dapat menyayat dari dua arah atau melalui beberapa tahap agar kedua sisi alur terbentuk simetris. Untuk alur ekor burung, tahapan awal sering dimulai dari alur biasa, lalu dilanjutkan dengan penyayatan sisi miring. Pemilihan profil pahat sekrap selalu berkaitan dengan urutan kerja. Pekerjaan tidak selalu dimulai dan selesai dengan pahat yang sama. Pada permukaan yang masih kasar, pahat kasar lebih sesuai untuk membuang material. Setelah mendekati ukuran, pahat rata atau pahat lengkung dapat digunakan untuk memperbaiki permukaan. Pada sisi benda kerja, pahat sisi kasar dapat digunakan lebih dulu, lalu pahat sisi rata dipakai untuk penyelesaian. Pada alur sudut, pahat datar atau pahat runcing bisa membantu tahap awal sebelum pahat alur sudut membentuk geometri akhir.

Selain bentuk pahat, bahan pahat juga memengaruhi kemampuan pemotongan. Pahat baja kecepatan tinggi atau high speed steel masih banyak digunakan pada pekerjaan bengkel konvensional karena mudah diasah dan cukup tangguh. Pahat karbida dapat bekerja pada kondisi pemotongan lebih tinggi, tetapi membutuhkan pemasangan yang lebih kaku karena sifatnya lebih getas. Dalam pembahasan dasar mesin sekrap, perbedaan ini penting agar kita memahami bahwa profil pahat dan bahan pahat sama-sama memengaruhi hasil proses. Sudut potong pada pahat sekrap perlu disesuaikan dengan material benda kerja. Material lunak umumnya lebih mudah disayat, tetapi dapat menempel pada pahat jika sudut dan kondisi pemotongan kurang sesuai. Material keras membutuhkan sudut dan parameter yang lebih hati-hati agar pahat tidak cepat aus. Besi tuang dapat menghasilkan geram yang lebih pendek, sedangkan baja liat dapat menghasilkan geram lebih panjang. Perbedaan material ini membuat satu profil pahat tidak otomatis memberi hasil sama pada semua benda kerja.

Kualitas permukaan juga dipengaruhi oleh radius ujung pahat. Ujung yang terlalu tajam dapat membentuk garis bekas potong yang jelas, terutama bila gerak makan besar. Ujung yang memiliki radius kecil dapat membantu memperhalus jejak lintasan, tetapi jika radius terlalu besar gaya potong dapat meningkat. Pada pahat lengkung dan pahat profil, radius ini menjadi bagian yang sangat penting. Keseimbangannya perlu dipilih sesuai tujuan pengerjaan, apakah untuk pengasaran atau penyelesaian. Pengasaran pahat menjadi bagian yang tidak dapat dipisahkan dari profil pahat sekrap. Pahat yang bentuknya tepat tetapi tumpul tetap tidak akan bekerja baik. Pahat tumpul cenderung menekan dan menggesek material, bukan menyayat dengan bersih. Akibatnya, gaya potong meningkat, panas bertambah, permukaan menjadi kasar, dan kemungkinan getaran lebih besar. Dalam pemesinan, ketajaman pahat bukan kemewahan. Itu kebutuhan dasar, seperti rem pada kendaraan, meski anehnya masih saja ada yang mengabaikannya.

Pemasangan pahat pada tool post juga memengaruhi efektivitas profil pahat. Pahat harus dijepit kuat dan tidak menjulur terlalu panjang. Penjuluran yang berlebihan meningkatkan kemungkinan lenturan dan getaran. Pada pahat sisi, pahat profil, dan pahat alur sudut, hal ini lebih penting karena arah gaya potong dapat menimbulkan beban samping yang besar. Pahat yang dipasang pendek, kaku, dan sejajar dengan kebutuhan penyayatan akan lebih mampu menghasilkan permukaan yang stabil. Pemilihan pahat juga perlu dikaitkan dengan kedalaman potong dan gerak makan. Pahat kasar dapat menerima gerak makan lebih besar dalam batas tertentu, sedangkan pahat penyelesai lebih cocok dengan gerak makan kecil. Pahat runcing dan pahat alur sudut membutuhkan pemakanan yang lebih ringan karena ujungnya lebih rentan menerima beban terpusat. Pahat datar dapat digunakan untuk bidang yang lebih luas, tetapi gaya potong meningkat bila lebar pemotongan terlalu besar. Hubungan ini menunjukkan bahwa profil pahat tidak berdiri sendiri, melainkan selalu berpasangan dengan parameter proses.

Dalam pekerjaan pendidikan bengkel, pengenalan profil pahat sekrap sebaiknya dilakukan melalui hubungan antara bentuk pahat dan hasil permukaan. Kita perlu melihat bahwa pahat rata lurus menghasilkan bidang datar, pahat sisi membentuk dinding, pahat profil membentuk kontur, dan pahat alur sudut membentuk

alur menyudut. Pemahaman seperti ini lebih berguna daripada hanya menghafal nama pahat. Nama pahat mudah lupa. Bekas potong pada benda kerja biasanya lebih jujur. Dari sisi keselamatan, profil pahat juga tidak boleh diabaikan. Pahat runcing dan pahat alur memiliki ujung yang lebih mudah patah jika dipaksa terlalu berat. Pahat sisi dapat menimbulkan gaya samping yang besar jika pemakanan berlebihan. Pahat profil dapat tersangkut jika bentuknya tidak diberi sudut bebas yang cukup. Karena itu, sebelum mesin dijalankan, operator harus memastikan pahat sesuai dengan pekerjaan, terpasang kuat, dan tidak bertabrakan dengan ragam atau benda kerja pada akhir langkah.

Pemeriksaan hasil setelah menggunakan pahat tertentu juga perlu dilakukan dengan alat ukur yang sesuai. Bidang datar dapat diperiksa dengan mistar baja, siku, atau dial indikator sesuai tingkat ketelitian yang diminta. Alur dapat diperiksa lebar, kedalaman, dan kesikuannya. Alur V dan ekor burung membutuhkan perhatian pada sudut serta kesesuaian bentuk pasangan. Untuk pahat profil, pemeriksaan kontur menjadi penting karena bentuk permukaan mengikuti bentuk ujung pahat. Profil pahat sekrap memperlihatkan bahwa proses penyayatan bukan hanya soal gerak maju pahat. Bentuk alat potong menentukan jenis permukaan yang dapat dibuat. Pahat rata, lengkung, datar, runcing, sisi, sisi kasar, sisi rata, profil, dan alur sudut masing masing memiliki fungsi yang berbeda. Pemilihan yang benar membantu proses lebih stabil, hasil lebih sesuai, dan waktu pengerjaan lebih terkendali. Pemilihan yang salah membuat mesin bekerja keras untuk menghasilkan kesalahan dengan sangat disiplin.

E. Elemen Dasar Proses Sekrap

Elemen dasar proses sekrap merupakan bagian yang menjelaskan ukuran kerja dan parameter utama yang harus diperhatikan sebelum penyayatan dilakukan. Mesin sekrap memang terlihat sederhana karena pahat hanya bergerak maju dan mundur. Namun, di balik gerakan itu terdapat sejumlah besaran teknis yang menentukan apakah proses berjalan efisien, aman, dan menghasilkan permukaan yang sesuai. Besaran tersebut meliputi panjang pemotongan, lebar pemotongan, gerak makan, kedalaman potong, jumlah langkah per menit, serta waktu pemotongan. Dalam proses sekrap, elemen dasar tidak dapat dipahami sebagai angka yang berdiri sendiri. Panjang pemotongan menentukan sejauh mana pahat harus bergerak sepanjang benda kerja. Lebar

pemotongan menentukan seberapa banyak lintasan yang harus dilakukan pahat. Gerak makan menentukan jarak perpindahan antar lintasan. Kedalaman potong menentukan tebal material yang dibuang. Jumlah langkah per menit menentukan kecepatan siklus mesin. Waktu pemotongan menunjukkan lama proses yang dibutuhkan untuk menyelesaikan bidang kerja. Semua elemen ini saling terhubung, seperti rangkaian sebab akibat yang diam diam menunggu operator salah hitung.

Panjang pemotongan adalah panjang lintasan kerja pahat pada arah gerak maju. Pada mesin sekrap, pahat tidak cukup hanya bergerak sepanjang ukuran benda kerja yang akan disayat. Pahat perlu memiliki ruang awal sebelum menyentuh benda kerja dan ruang akhir setelah keluar dari benda kerja. Ruang ini diperlukan agar pahat dapat masuk dan keluar dari bidang penyayatan dengan lebih aman. Karena itu, panjang pemesinan total biasanya lebih besar daripada panjang benda kerja yang benar benar disayat. Dalam praktik sekrap, panjang pemotongan pada benda kerja sering dinyatakan sebagai l_w . Selain itu, terdapat langkah awal yang dapat dinyatakan sebagai l_v dan langkah akhir yang dapat dinyatakan sebagai l_n . Panjang pemesinan total dapat dinyatakan sebagai l_t . Secara sederhana, hubungan tersebut dapat ditulis sebagai $l_t = l_v + l_w + l_n$. Satuan yang digunakan umumnya milimeter. Rumus ini tampak sangat jinak, tetapi kalau panjang awal atau panjang akhir diabaikan, pahat bisa masuk terlalu mendadak atau keluar terlalu dekat dengan ragum. Fisika, seperti biasa, tidak peduli pada kelalaian administratif manusia.

Lebar pemotongan adalah ukuran bidang yang harus diselesaikan pada arah melintang terhadap gerak utama pahat. Jika panjang pemotongan mengikuti arah maju mundur pahat, maka lebar pemotongan berkaitan dengan arah perpindahan meja atau benda kerja akibat gerak makan. Lebar ini sering dinyatakan sebagai w . Semakin besar lebar pemotongan, semakin banyak lintasan penyayatan yang diperlukan. Artinya, waktu pengerjaan juga cenderung bertambah, terutama jika gerak makan dibuat kecil untuk memperoleh permukaan yang lebih halus. Panjang dan lebar pemotongan perlu dibaca bersama. Sebuah benda kerja dapat memiliki panjang penyayatan yang pendek, tetapi lebar bidangnya besar. Dalam kondisi seperti itu, satu lintasan pahat memang tidak panjang, tetapi jumlah lintasannya banyak. Sebaliknya, benda kerja dengan bidang sempit tetapi panjang membutuhkan lintasan yang

lebih sedikit, namun setiap lintasannya memakan waktu lebih lama. Dua kondisi ini memberi beban waktu yang berbeda pada mesin, walaupun secara kasatmata pekerjaan tampak sama sama hanya meratakan permukaan.

Gerak makan atau feed pada proses sekrap adalah perpindahan meja atau benda kerja setiap satu langkah penyayatan. Dalam proses sekrap, satuan gerak makan biasanya dinyatakan dalam mm per langkah. Setelah pahat menyayat pada langkah maju dan kembali pada langkah balik, meja bergeser sedikit agar pahat dapat menyayat jalur berikutnya. Gerak makan inilah yang membuat pahat tidak hanya mengulang lintasan yang sama, melainkan membentuk bidang secara bertahap dari banyak lintasan yang berdampingan. Gerak makan memiliki pengaruh langsung terhadap kualitas permukaan dan waktu pemotongan. Jika gerak makan dibuat besar, jumlah lintasan yang dibutuhkan menjadi lebih sedikit. Waktu kerja dapat berkurang, tetapi bekas sayatan pahat menjadi lebih renggang dan permukaan cenderung lebih kasar. Jika gerak makan dibuat kecil, bekas lintasan menjadi lebih rapat dan permukaan dapat lebih halus, tetapi waktu pemotongan bertambah. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kualitas kekasaran permukaan dalam proses pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja.

Kedalaman potong atau depth of cut adalah tebal lapisan material yang dibuang pahat dalam satu lintasan. Pada proses sekrap, kedalaman potong biasanya dinyatakan sebagai a dengan satuan milimeter. Besaran ini menunjukkan seberapa jauh pahat masuk ke dalam benda kerja pada arah tegak lurus terhadap permukaan yang sedang dikerjakan. Kedalaman potong yang terlalu kecil membuat proses berjalan lama karena material berkurang sedikit demi sedikit. Kedalaman potong yang terlalu besar dapat memperbesar gaya potong, menimbulkan getaran, mempercepat keausan pahat, dan merusak permukaan. Dalam pekerjaan kasar atau roughing, kedalaman potong dapat dibuat lebih besar karena tujuan utamanya adalah membuang material dengan cepat. Permukaan hasilnya belum harus sangat halus, asalkan ukuran akhir masih menyisakan bahan untuk proses penyelesaian. Dalam pekerjaan akhir atau finishing, kedalaman potong dibuat lebih kecil agar gaya potong berkurang dan permukaan lebih mudah dikendalikan. Das et al. (2022) menunjukkan bahwa kecepatan, gerak makan, dan kedalaman

potong berhubungan dengan respons pemesinan seperti kekasaran permukaan, gaya potong, dan keausan pahat.

Jumlah langkah per menit menunjukkan berapa kali pahat melakukan siklus gerak dalam satu menit. Besaran ini dapat dinyatakan sebagai np dengan satuan langkah per menit. Dalam mesin sekrup, satu siklus biasanya mencakup langkah maju dan langkah balik. Jumlah langkah per menit menentukan laju kerja mesin. Jika jumlah langkah dinaikkan, pahat lebih sering bergerak dalam satu menit sehingga waktu proses dapat berkurang. Namun, peningkatan ini tidak selalu aman. Material keras, pahat tumpul, kedalaman potong besar, dan pencekaman kurang kaku dapat membuat kecepatan tinggi berubah menjadi sumber getaran. Pada mesin sekrup, langkah maju dan langkah balik tidak selalu memiliki kecepatan yang sama. Langkah maju lebih lambat karena pahat sedang menyayat benda kerja. Langkah balik sering dibuat lebih cepat melalui mekanisme quick return karena pada tahap ini pahat tidak melakukan pemotongan utama. Perbandingan kecepatan langkah maju dan langkah balik dapat dinyatakan sebagai R_s . Dalam banyak mesin sekrup, nilai ini lebih kecil dari satu jika dinyatakan sebagai perbandingan kecepatan langkah maju terhadap langkah balik. Artinya, langkah balik berlangsung lebih cepat daripada langkah maju.

Waktu pemotongan adalah lama waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan penyayatan pada bidang tertentu. Besaran ini dipengaruhi oleh lebar pemotongan, gerak makan, dan jumlah langkah per menit. Bila lebar bidang makin besar, lintasan yang diperlukan makin banyak. Bila gerak makan makin kecil, jumlah lintasan juga makin banyak. Bila jumlah langkah per menit makin tinggi, waktu pemotongan cenderung lebih pendek. Di sinilah perhitungan menjadi penting, karena menebak waktu pemesinan dengan perasaan biasanya hanya membuat jadwal bengkel tampak optimis secara tragis. Kecepatan makan atau feed speed pada proses sekrup dapat dipahami sebagai laju perpindahan benda kerja atau meja pada arah gerak makan. Jika f adalah gerak makan dalam mm per langkah dan np adalah jumlah langkah per menit, maka kecepatan makan dapat ditulis sebagai $vf = f \times np$. Satuan vf adalah mm per menit. Dengan hubungan ini, waktu pemotongan untuk menyelesaikan lebar bidang w dapat diperkirakan melalui $t_c = w / vf$ atau $t_c = w / (f \times np)$. Satuan t_c adalah menit. Hubungan ini menunjukkan bahwa waktu proses tidak hanya ditentukan oleh

panjang langkah pahat, tetapi juga oleh banyaknya lintasan melintang yang harus diselesaikan.

Kecepatan potong rata rata pada mesin sekrap berbeda dari mesin bubut. Pada mesin bubut, kecepatan potong berkaitan dengan diameter benda kerja dan putaran spindel. Pada mesin sekrap, kecepatan potong berkaitan dengan panjang langkah, jumlah langkah per menit, dan perbandingan kecepatan langkah maju serta balik. Dalam bentuk praktis, bila l_t adalah panjang pemesinan total dalam mm, n_p adalah jumlah langkah per menit, dan R_s adalah perbandingan kecepatan langkah maju terhadap langkah balik, maka kecepatan potong rata rata dapat dituliskan sebagai $v = l_t \times n_p \times (1 + R_s) / 1000$. Hasilnya dinyatakan dalam m per menit. Rumus ini perlu dipakai dengan memahami definisi R_s yang digunakan dalam buku atau standar pelatihan, karena beberapa sumber dapat menyatakan rasio berdasarkan waktu, bukan kecepatan. Dalam penerapan bengkel, operator biasanya memulai dari membaca gambar kerja. Dari gambar tersebut diketahui panjang bidang yang akan disekrap, lebar bidang, kedalaman material yang harus dibuang, serta kualitas permukaan yang diharapkan. Setelah itu, panjang langkah mesin diatur agar sedikit lebih panjang daripada bidang pemotongan. Ruang awal dan ruang akhir harus diberikan secara wajar. Terlalu pendek berisiko membuat proses tidak selesai sempurna. Terlalu panjang membuat waktu terbuang pada gerakan yang tidak perlu.

Panjang pemotongan tidak boleh hanya dilihat dari ukuran benda kerja mentah. Pada benda kerja yang sudah memiliki bahu, alur, atau bentuk bertingkat, panjang bidang yang disekrap dapat berbeda dari panjang total benda kerja. Misalnya, sebuah balok baja sepanjang 120 mm mungkin hanya perlu disekrap sepanjang 80 mm pada bagian tertentu. Dalam kasus seperti ini, l_w adalah panjang bidang yang dikerjakan, bukan panjang total balok. Perbedaan kecil seperti ini penting, karena perhitungan waktu akan berubah bila panjang kerja keliru diambil. Lebar pemotongan juga perlu diperhatikan dengan teliti. Pada penyekrapan bidang datar, lebar pemotongan menentukan berapa kali meja harus bergerak memberi makan. Jika bidang yang disekrap memiliki lebar 60 mm dan gerak makan dipilih 0,5 mm per langkah, secara kasar dibutuhkan sekitar 120 lintasan pemakanan. Jika gerak makan diperkecil menjadi 0,25 mm per langkah, jumlah lintasan menjadi sekitar dua kali lipat. Permukaan mungkin lebih halus, tetapi waktu

pengerjaan meningkat. Manusia sering ingin hasil halus dan cepat sekaligus, seolah mesin sedang menjalankan sihir.

Gerak makan perlu dipilih sesuai tujuan pengerjaan. Untuk pengasaran, gerak makan dapat dibuat lebih besar agar material cepat berkurang. Untuk penyelesaian akhir, gerak makan dibuat lebih kecil agar bekas lintasan lebih rapat dan permukaan lebih baik. Namun, nilai gerak makan tidak boleh hanya ditentukan dari keinginan halus atau cepat. Jenis material, bentuk pahat, kekakuan pencekaman, dan kondisi mesin ikut menentukan nilai yang aman. Pada material keras, gerak makan terlalu besar dapat membuat pahat cepat aus atau patah. Kedalaman potong bekerja bersama gerak makan dalam menentukan luas penampang geram. Jika gerak makan besar dan kedalaman potong besar, beban pahat meningkat. Pahat harus mendorong dan memisahkan material lebih banyak dalam satu lintasan. Kondisi ini dapat mempercepat proses, tetapi risikonya adalah gaya potong lebih besar, panas lebih tinggi, getaran meningkat, dan permukaan cenderung lebih kasar. Untuk mesin yang sudah aus atau benda kerja yang kurang kaku, kombinasi parameter berat seperti ini sebaiknya dihindari. Mesin tua tidak butuh tantangan hidup tambahan.

Jumlah langkah per menit perlu disesuaikan dengan panjang langkah dan karakter material. Pada panjang langkah yang besar, ram harus bergerak menempuh jarak lebih panjang setiap siklus. Bila jumlah langkah per menit terlalu tinggi, gerak ram menjadi lebih agresif dan beban dinamis meningkat. Pada panjang langkah pendek, jumlah langkah per menit dapat dibuat lebih tinggi dalam batas tertentu. Pemilihan ini menunjukkan bahwa kecepatan mesin tidak cukup ditentukan dari satu angka. Panjang langkah dan jumlah langkah harus dipertimbangkan sebagai pasangan. Perbandingan langkah maju dan langkah balik juga memengaruhi efisiensi waktu. Langkah maju menghasilkan pemotongan, sedangkan langkah balik tidak menghasilkan penyayatan utama. Mekanisme quick return membantu mempercepat langkah balik agar waktu tidak terlalu banyak habis pada gerak tidak produktif. Wang et al. (2023) menjelaskan bahwa pemesinan berkelanjutan perlu melihat integrasi peralatan, proses, dan strategi. Dalam proses sekrap, pemilihan panjang langkah yang tepat dan pengurangan waktu kosong pada langkah balik merupakan bentuk sederhana dari pengendalian efisiensi proses.

Waktu pemotongan dapat digunakan untuk memperkirakan produktivitas. Bila $t_c = w / (f \times np)$, maka waktu akan berkurang jika gerak makan atau jumlah langkah per menit dinaikkan. Namun, menaikkan dua besaran itu tidak selalu berarti proses menjadi lebih baik. Gerak makan besar dapat membuat permukaan kasar. Jumlah langkah terlalu tinggi dapat memunculkan getaran. Karena itu, waktu pemotongan bukan satu satunya ukuran keberhasilan. Komponen yang selesai cepat tetapi ukurannya salah tetap saja bukan produk yang baik, hanya kesalahan yang diproduksi dengan percaya diri.

Pengukuran awal sebelum proses juga menjadi bagian penting dari penggunaan elemen dasar sekrap. Operator perlu memastikan ukuran benda kerja mentah, bidang yang akan disayat, dan sisa material yang tersedia. Jika benda kerja sudah terlalu dekat dengan ukuran akhir, kedalaman potong harus dipilih sangat hati hati. Jika masih banyak material yang harus dibuang, proses dapat dimulai dengan pemakanan kasar. Kesalahan membaca ukuran awal dapat menyebabkan benda kerja kurang material untuk proses akhir, dan pada titik itu tidak ada rumus yang bisa menumbuhkan baja kembali. Proses pengasaran biasanya memakai kombinasi kedalaman potong dan gerak makan yang lebih besar. Tujuannya adalah membuang material berlebih dengan waktu yang tidak terlalu panjang. Permukaan hasil pengasaran tidak menjadi prioritas utama, tetapi bentuk dasar dan batas ukuran tetap perlu dijaga. Setelah bidang mendekati ukuran yang diinginkan, proses dapat dilanjutkan dengan penyayatan akhir. Pada tahap ini, kedalaman potong dan gerak makan dibuat lebih kecil agar kualitas permukaan dan ketelitian ukuran meningkat.

Proses penyelesaian akhir membutuhkan perhatian lebih pada pahat, gerak makan, dan kestabilan mesin. Pahat harus tajam dan dipasang dengan penjuruan yang tidak berlebihan. Gerak makan perlu cukup kecil agar bekas lintasan rapat. Kedalaman potong tidak boleh terlalu besar agar gaya potong turun. Jumlah langkah per menit juga perlu dipilih agar tidak menimbulkan getaran. Trinh (2024) menegaskan bahwa prediksi kekasaran permukaan membantu pemilihan kondisi pemotongan, mengurangi biaya, dan meningkatkan kualitas hasil pemesinan. Ada hubungan langsung antara elemen pemotongan dan bentuk geram. Gerak makan dan kedalaman potong menentukan tebal serta ukuran geram yang terbentuk. Jika geram terlalu tebal, pahat menerima beban besar.

Jika geram terlalu tipis dan pahat lebih banyak menggosok, panas dapat meningkat karena gesekan. Geram yang keluar dari proses sekrap dapat menjadi petunjuk awal tentang kondisi pemotongan, meskipun pemeriksaan ukuran dan permukaan tetap harus dilakukan dengan alat ukur.

Pemilihan elemen proses juga harus mempertimbangkan jenis pahat. Pahat rata dapat dipakai untuk bidang datar dengan pemakanan yang relatif stabil. Pahat runcing atau pahat alur sudut memerlukan pemakanan lebih hati-hati karena ujung pahat lebih rentan menerima beban terpusat. Pahat sisi kasar dapat digunakan untuk mengurangi material pada dinding, sedangkan pahat sisi rata lebih sesuai untuk penyelesaian. Profil pahat dan elemen pemotongan harus dipilih sebagai satu paket, bukan seperti memilih alat secara acak dari laci yang berantakan. Dari sisi keselamatan, elemen dasar proses sekrap juga memiliki peranan penting. Panjang langkah yang terlalu besar dapat membuat pahat mendekati ragum atau bagian mesin lain. Kedalaman potong berlebihan dapat menyebabkan pahat patah. Gerak makan terlalu besar dapat membuat benda kerja menerima gaya samping yang tinggi. Jumlah langkah per menit terlalu tinggi dapat membuat mesin bergetar. Karena itu, perhitungan elemen dasar bukan hanya urusan produktivitas, tetapi juga bagian dari pengendalian risiko kerja.

Selain faktor teknis, elemen dasar proses sekrap membantu perencanaan waktu kerja. Di bengkel pendidikan, waktu pemotongan dapat dipakai untuk memperkirakan berapa lama satu kelompok menyelesaikan benda kerja praktik. Di bengkel produksi, waktu ini berhubungan dengan biaya tenaga kerja, pemakaian mesin, dan jadwal penyelesaian. Perhitungan yang baik membantu proses lebih terencana. Tanpa perhitungan, pekerjaan sering terlihat mudah di awal, lalu tiba-tiba memakan waktu jauh lebih panjang dari dugaan. Fenomena manusia yang sangat tua dan sayangnya masih populer. Dalam pendidikan mesin perkakas, elemen dasar proses sekrap sebaiknya diajarkan melalui contoh nyata. Misalnya, sebuah bidang dengan panjang pemotongan 100 mm dan lebar 50 mm akan membutuhkan pengaturan langkah yang berbeda dari bidang dengan panjang 200 mm dan lebar 20 mm. Jika gerak makan dipilih 0,5 mm per langkah, jumlah lintasan untuk lebar 50 mm kira-kira 100 lintasan. Jika jumlah langkah per menit 40, maka waktu pemotongan secara sederhana dapat

diperkirakan dari hubungan $t_c = w / (f \times np)$. Contoh seperti ini membantu kita melihat bahwa rumus bukan hiasan, tetapi alat untuk membaca proses.

Elemen dasar proses sekrap juga menjadi dasar untuk memilih kecepatan potong dan gerak makan pada bagian berikutnya. Setelah panjang pemotongan, lebar pemotongan, gerak makan, kedalaman potong, jumlah langkah per menit, dan waktu pemotongan dipahami, kita dapat lebih mudah melihat mengapa tabel rekomendasi parameter diperlukan. Tabel kecepatan potong dan gerak makan bukan angka yang berdiri sendiri. Nilainya harus dikaitkan dengan material, pahat, kualitas permukaan, kemampuan mesin, dan tujuan pekerjaan. Dengan memahami elemen dasar ini, proses sekrap tidak lagi tampak sebagai gerakan bolak balik yang sederhana. Setiap lintasan pahat dapat dibaca secara teknis. Panjang langkah menentukan jarak kerja. Lebar pemotongan menentukan jumlah lintasan. Gerak makan mengatur jarak antar lintasan. Kedalaman potong menentukan beban penyayatan. Jumlah langkah per menit mengatur laju kerja. Waktu pemotongan memberi gambaran produktivitas. Ketika semua elemen ini dipilih secara tepat, mesin sekrap dapat bekerja lebih stabil, aman, dan menghasilkan permukaan yang sesuai dengan kebutuhan.

F. Pemilihan Kecepatan Potong dan Gerak Makan

Pemilihan kecepatan potong dan gerak makan pada mesin sekrap merupakan tahap penting sebelum proses penyayatan dilakukan. Mesin sekrap memang bekerja dengan gerak pahat maju dan mundur, tetapi kualitas hasil tidak hanya ditentukan oleh Bergeraknya pahat. Operator perlu menentukan seberapa cepat pahat menyayat benda kerja dan seberapa besar meja bergeser setelah satu langkah pemotongan. Dua keputusan ini terlihat sederhana, namun pengaruhnya langsung terasa pada bentuk geram, gaya potong, kekasaran permukaan, umur pahat, waktu pengerjaan, dan keamanan proses. Kecepatan potong pada mesin sekrap dapat dipahami sebagai kecepatan rata-rata pahat ketika melakukan proses penyayatan terhadap benda kerja. Pada mesin bubut, kecepatan potong sering dikaitkan dengan diameter benda kerja dan putaran spindel. Pada mesin sekrap, pembahasannya berbeda karena benda kerja tidak berputar. Pahat bergerak lurus bolak-balik, sedangkan pemotongan utama terjadi pada langkah maju. Karena itu, kecepatan potong pada proses sekrap berkaitan

dengan panjang langkah, jumlah langkah per menit, dan perbandingan antara kecepatan langkah maju serta langkah balik.

Gerak makan atau *feed* pada mesin sekrap adalah perpindahan meja atau benda kerja setiap satu langkah penyayat. Dalam proses sekrap, satuannya lazim dinyatakan dalam milimeter per langkah. Setelah pahat menyayat pada langkah maju dan kembali pada langkah balik, meja bergeser sedikit agar pahat menyayat jalur berikutnya. Gerak kecil ini menentukan rapat atau renggangnya jejak lintasan pahat pada permukaan benda kerja. Jika gerak makan terlalu besar, bidang dapat lebih cepat selesai, tetapi permukaan menjadi lebih kasar. Jika terlalu kecil, permukaan lebih halus, tetapi waktu pemotongan bertambah. Pemilihan kecepatan potong tidak dapat dilepaskan dari jenis material benda kerja. Material yang lunak seperti kuningan umumnya dapat disekrap dengan kecepatan lebih tinggi dibandingkan baja perkakas. Material yang lebih keras membutuhkan kecepatan potong lebih rendah karena gaya potong dan panas cenderung lebih besar. Bila kecepatan dipaksakan terlalu tinggi pada material keras, pahat akan cepat tumpul, ujung potong dapat rusak, dan permukaan benda kerja menjadi buruk. Benda kerja tidak akan memberi protes, tetapi hasilnya akan cukup memperlukan.

Jenis pahat juga memengaruhi pemilihan kecepatan potong. Pahat HSS atau *high speed steel* banyak digunakan pada mesin sekrap konvensional karena mudah diasah, relatif tangguh, dan cocok untuk pekerjaan bengkel umum. Pahat *carbide* memiliki kekerasan panas yang lebih baik sehingga dapat digunakan pada kecepatan potong lebih tinggi. Namun, *carbide* lebih getas dibandingkan HSS, sehingga pemasangan pahat, kekakuan mesin, dan kestabilan pencekaman harus lebih diperhatikan. Kecepatan tinggi hanya berguna jika sistem cukup kaku untuk menanggungnya. Hubungan antara material dan jenis pahat menjadi dasar pertama dalam memilih kecepatan potong. Bila material sama tetapi pahat berbeda, pahat *carbide* umumnya dapat memakai kecepatan lebih tinggi daripada HSS. Bila jenis pahat sama tetapi material berbeda, material yang lebih keras biasanya membutuhkan kecepatan lebih rendah. Prinsip ini sejalan dengan pemahaman umum proses pemesinan, yaitu bahwa kecepatan relatif antara pahat dan benda kerja harus disesuaikan dengan kemampuan alat potong dan sifat material. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa setiap metode pemesinan memiliki prinsip

kerja dan kondisi penggunaan yang perlu diperhatikan sesuai karakter prosesnya.

Gerak makan dipilih dengan mempertimbangkan tujuan pengerjaan. Pada pekerjaan pengasaran atau *roughing*, gerak makan dapat dibuat lebih besar karena tujuan utama proses adalah membuang material lebih cepat. Permukaan yang dihasilkan belum dituntut sangat halus, selama masih tersedia sisa ukuran untuk proses akhir. Pada pekerjaan penyelesaian atau *finishing*, gerak makan dibuat lebih kecil agar bekas lintasan pahat lebih rapat dan permukaan lebih halus. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kekasaran permukaan hasil pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Kecepatan potong dan gerak makan tidak boleh dipilih secara terpisah. Kecepatan yang tinggi dengan gerak makan besar dapat mempercepat proses, tetapi juga meningkatkan beban pahat. Gerak makan kecil dengan kecepatan rendah dapat menghasilkan proses yang lebih aman, tetapi waktu pengerjaan bisa menjadi terlalu lama. Pilihan yang baik biasanya berada pada titik kompromi antara produktivitas dan kualitas. Dalam praktik bengkel, titik kompromi ini sering ditemukan melalui kombinasi tabel rekomendasi, pengalaman operator, kondisi mesin, dan pemeriksaan hasil.

Pada mesin sekrap, kecepatan potong rata-rata sering dikaitkan dengan panjang pemesinan total. Panjang ini tidak hanya mencakup panjang bidang yang disayat, tetapi juga langkah awal dan langkah akhir. Jika panjang langkah dibuat terlalu besar, pahat menghabiskan waktu untuk bergerak melewati ruang kosong. Jika terlalu pendek, pahat tidak menyayat seluruh bidang dengan aman. Karena itu, sebelum memilih jumlah langkah per menit, operator perlu memastikan panjang langkah sudah masuk akal. Kecepatan potong yang dihitung dari panjang langkah yang salah tentu menghasilkan keputusan yang ikut salah. Gerak makan berhubungan langsung dengan lebar bidang yang akan diselesaikan. Semakin lebar bidang, semakin banyak lintasan yang diperlukan. Jika gerak makan kecil, lintasan menjadi lebih banyak dan waktu pemotongan meningkat. Jika gerak makan besar, jumlah lintasan menurun, tetapi permukaan menjadi lebih kasar. Dalam pekerjaan produksi, hubungan ini penting untuk memperkirakan waktu kerja. Dalam pekerjaan pendidikan, hubungan ini membantu

peserta praktik memahami bahwa permukaan halus selalu memiliki harga berupa waktu dan ketelitian.

Dalam proses sekrup, rumus kecepatan makan dapat ditulis sebagai $v_f = f \times n_p$. Simbol v_f menyatakan kecepatan makan dalam mm per menit, f menyatakan gerak makan dalam mm per langkah, dan n_p menyatakan jumlah langkah per menit. Hubungan ini memperlihatkan bahwa laju perpindahan meja ditentukan oleh besar gerak makan dan jumlah langkah mesin. Jika f dinaikkan, meja bergerak lebih cepat secara efektif. Jika n_p dinaikkan, jumlah kesempatan meja bergeser dalam satu menit juga meningkat. Waktu pemotongan dapat diperkirakan dari hubungan antara lebar pemotongan dan kecepatan makan. Secara sederhana, $t_c = w / v_f$ atau $t_c = w / (f \times n_p)$. Simbol t_c menyatakan waktu pemotongan dalam menit, sedangkan w adalah lebar pemotongan dalam mm. Rumus ini membantu memperkirakan lama pekerjaan pada bidang tertentu. Namun, rumus tersebut tetap perlu dibaca sebagai pendekatan. Waktu nyata dapat bertambah karena penyetelan benda kerja, pemeriksaan ukuran, pergantian pahat, pembersihan geram, dan penyesuaian proses. Mesin boleh matematis, manusia dan bengkel tidak selalu sebersih itu.

Pada *tool steel*, kecepatan potong untuk HSS lebih rendah dibandingkan *machine steel*. Hal ini wajar karena *tool steel* umumnya lebih keras dan menuntut kondisi pemotongan yang lebih hati-hati. Pahat *carbide* dapat menaikkan kecepatan potong, tetapi tidak berarti seluruh parameter boleh dinaikkan tanpa batas. Gerak makan tetap perlu dikendalikan agar gaya potong tidak berlebihan. Das et al. (2022) menunjukkan bahwa kecepatan, gerak makan, dan kedalaman potong berhubungan dengan respons pemesinan seperti kekasaran permukaan, gaya potong, dan keausan pahat. Pada *cast iron*, geram yang terbentuk cenderung lebih pendek dan rapuh dibandingkan baja liat. Gerak makan untuk HSS pada tabel dapat lebih besar, yaitu sekitar 0,51 mm per langkah. Meski begitu, pemesinan besi tuang memerlukan perhatian terhadap debu geram dan kebersihan bidang kerja. Geram besi tuang dapat bersifat abrasif, sehingga pahat dan permukaan mesin perlu dijaga. Kecepatan dengan pahat *carbide* lebih tinggi daripada HSS, tetapi gerak makan yang direkomendasikan lebih kecil untuk menjaga kestabilan proses.

Pada *brass*, kecepatan potong yang direkomendasikan relatif tinggi. Material ini umumnya lebih mudah dipotong dibandingkan

baja perkakas. Dengan pahat HSS, kecepatan potong dapat mencapai sekitar 48 m per menit. Dengan pahat *carbide*, nilainya dapat meningkat hingga sekitar 92 m per menit. Namun, pemotongan kuningan tetap membutuhkan pahat yang tajam dan sudut yang sesuai. Jika pahat tidak tepat, material dapat tersayat tidak bersih atau meninggalkan permukaan yang kurang rapi. Tabel rekomendasi sebaiknya tidak dibaca sebagai angka yang selalu langsung diterapkan. Nilai tersebut adalah titik awal. Bila mesin sudah tua, meja kurang kaku, pahat terlalu panjang keluar dari pemegang, atau benda kerja sulit dicekam, operator perlu menurunkan kecepatan atau gerak makan. Bila mesin masih baik, pahat tajam, benda kerja kuat dicekam, dan material mudah dipotong, parameter dapat disesuaikan lebih mendekati nilai rekomendasi. Kecerdasan pemesinan terletak pada membaca kondisi, bukan memuja tabel seperti kitab suci mekanik.

Pemilihan kecepatan potong juga harus mempertimbangkan kedalaman potong. Kedalaman potong besar meningkatkan beban pada pahat. Jika kedalaman potong besar dipadukan dengan kecepatan tinggi, panas dan gaya potong dapat meningkat. Untuk pekerjaan pengasaran, kedalaman potong memang bisa lebih besar, tetapi kecepatan dan gerak makan perlu disesuaikan. Untuk pekerjaan akhir, kedalaman potong lebih kecil memungkinkan pemilihan gerak makan yang lebih halus dan kecepatan yang lebih stabil. Gerak makan harus dipilih sesuai kualitas permukaan yang diinginkan. Pada bidang dudukan yang akan dipasangkan dengan komponen lain, permukaan perlu lebih rapi dan rata. Gerak makan kecil lebih sesuai untuk pekerjaan seperti ini. Pada permukaan yang hanya menjadi tahap awal sebelum proses lanjutan, gerak makan lebih besar masih dapat diterima. Keputusan ini perlu dikaitkan dengan fungsi komponen. Tidak semua permukaan membutuhkan kualitas yang sama. Mengejar kehalusan berlebihan pada permukaan yang tidak kritis hanya menambah waktu tanpa manfaat teknis yang jelas.

Dalam pekerjaan nyata, pemilihan kecepatan potong dan gerak makan sering dilakukan secara bertahap. Operator dapat memulai dari nilai aman, lalu mengamati suara pemotongan, bentuk geram, getaran, dan permukaan hasil. Jika proses terlalu berat, kecepatan atau gerak makan dapat diturunkan. Jika proses terlalu lambat dan pahat masih bekerja stabil, parameter dapat dinaikkan secara hati hati. Pendekatan ini lebih masuk akal

daripada langsung memakai setelan agresif dan berharap benda kerja bersikap kooperatif. Suara mesin dapat menjadi petunjuk awal. Suara potong yang stabil menunjukkan proses relatif terkendali. Suara berdecit dapat menunjukkan gesekan berlebihan atau pahat mulai tumpul. Suara bergetar dapat menunjukkan pahat terlalu panjang, benda kerja kurang kuat dicekam, atau parameter terlalu berat. Walaupun suara tidak menggantikan pengukuran, pengamatan seperti ini membantu operator mengambil keputusan sebelum kerusakan lebih jauh terjadi.

Bentuk geram juga membantu membaca pilihan parameter. Geram yang terlalu tebal dapat menandakan gerak makan atau kedalaman potong terlalu besar. Geram yang sangat tipis dengan permukaan tampak tergesek dapat menunjukkan bahwa pahat tidak benar benar menyayat. Geram yang berubah warna karena panas dapat menjadi tanda kecepatan atau gesekan terlalu tinggi. Pengamatan geram perlu digabungkan dengan pemeriksaan permukaan, karena geram yang tampak baik belum tentu menjamin ukuran sudah benar. Kualitas permukaan menjadi indikator penting dalam pemilihan gerak makan. Trinh (2024) menyebutkan bahwa prediksi kekasaran permukaan dapat membantu pemilihan kondisi pemotongan, mengurangi biaya, dan meningkatkan mutu hasil pemesinan. Pada mesin sekrup, pengaruh gerak makan terlihat dari bekas lintasan pahat. Gerak makan besar meninggalkan jejak lebih renggang. Gerak makan kecil membuat jejak lebih rapat. Bila pahat tajam dan mesin stabil, gerak makan kecil dapat memberi permukaan yang lebih halus.

Efisiensi proses tidak hanya berarti memakai kecepatan paling tinggi. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan sebagai integrasi antara peralatan, proses, dan strategi. Pada mesin sekrup, pemikiran ini dapat diterapkan melalui pemilihan kecepatan dan gerak makan yang mengurangi waktu kosong, menjaga umur pahat, menekan getaran, dan menghindari pengerjaan ulang. Proses yang terlalu cepat tetapi menghasilkan permukaan buruk bukan efisien. Itu hanya cara cepat menciptakan pekerjaan tambahan. Pada pekerjaan pengasaran, parameter dapat dipilih untuk mempercepat pembuangan material. Kecepatan potong dipilih sesuai material dan pahat, gerak makan dapat dibuat lebih besar, dan kedalaman potong disesuaikan dengan kemampuan mesin. Namun, proses tetap harus stabil. Jika mesin mulai bergetar, gerak makan atau kedalaman potong perlu

dikurangi. Pengasaran bukan berarti menyiksa mesin sampai seluruh bengkel mendengar penderitaannya.

Pada pekerjaan penyelesaian, pendekatannya berbeda. Kecepatan potong dipilih agar pahat dapat menyayat halus tanpa panas berlebihan. Gerak makan dibuat lebih kecil. Kedalaman potong juga dikurangi. Pahat yang digunakan sebaiknya tajam dan sesuai profil permukaan yang diinginkan. Permukaan hasil *finishing* biasanya menjadi penentu apakah komponen dapat langsung digunakan atau perlu proses tambahan. Karena itu, tahap ini menuntut kesabaran dan pemeriksaan ukuran yang lebih sering. Pemilihan parameter juga harus memperhatikan keselamatan. Kecepatan langkah yang terlalu tinggi dapat membuat gerak ram lebih agresif. Gerak makan terlalu besar dapat menaikkan gaya potong. Kedalaman potong berlebihan dapat menyebabkan pahat patah. Bila benda kerja tidak tercekam kuat, gaya pemotongan dapat membuatnya bergeser. Setiap perubahan parameter harus dilakukan dengan memperhatikan batas mesin, posisi ragum, panjang langkah, dan ruang aman pahat.

Dalam praktik pendidikan, kita dapat diberi contoh sederhana. Misalnya, sebuah benda kerja dari *machine steel* akan disekrap menggunakan pahat HSS. Dari tabel, kecepatan potong awal dapat dipilih sekitar 24 m per menit dan gerak makan sekitar 0,25 mm per langkah. Jika permukaan masih kasar dan waktu tidak terlalu kritis, gerak makan dapat dikurangi pada lintasan akhir. Jika proses terlalu lambat tetapi mesin stabil, operator dapat mempertimbangkan penyesuaian jumlah langkah per menit dalam batas aman. Contoh seperti ini membantu menunjukkan bahwa tabel bukan akhir keputusan, melainkan awal penalaran. Contoh lain dapat diberikan pada benda kerja kuningan atau *brass* dengan pahat *carbide*. Kecepatan potong rekomendasi lebih tinggi, yaitu sekitar 92 m per menit, dengan gerak makan sekitar 0,38 mm per langkah. Nilai ini menunjukkan bahwa material dan pahat memungkinkan proses lebih cepat. Namun, bila mesin yang digunakan kurang kaku atau pahat menjulur terlalu panjang, nilai tersebut perlu diturunkan. Parameter tinggi hanya bermanfaat jika kondisi mekanis mendukung. Kalau tidak, hasilnya hanyalah optimisme yang dibayar dengan getaran.

Perlu diperhatikan bahwa nilai rekomendasi dalam tabel biasanya disusun untuk kondisi umum. Setiap bengkel dapat memiliki kondisi berbeda. Mesin yang baru direkondisi tidak sama

dengan mesin yang eretannya sudah longgar. Pahat yang baru diasah tidak sama dengan pahat yang sudah digunakan berkali kali. Ragum yang kuat tidak sama dengan pencekaman seadanya. Karena itu, pemilihan kecepatan potong dan gerak makan harus selalu disertai pemeriksaan proses nyata. Pemilihan kecepatan potong dan gerak makan juga berkaitan dengan umur pahat. Kecepatan terlalu tinggi dapat mempercepat keausan akibat panas. Gerak makan terlalu besar dapat memperbesar beban mekanis pada ujung pahat. Gerak makan terlalu kecil pun tidak selalu baik, karena pahat dapat lebih banyak menggesek daripada menyayat. Kondisi gesekan ini dapat menaikkan temperatur lokal dan memperburuk permukaan. Pahat yang bekerja baik bukan pahat yang dipaksa keras, melainkan pahat yang menyayat pada kondisi yang sesuai.

Pada mesin sekrap, perubahan parameter sebaiknya dilakukan secara terukur. Jika hasil permukaan kasar, jangan langsung mengubah semua parameter sekaligus. Operator dapat memeriksa ketajaman pahat, kekakuan pencekaman, gerak makan, lalu kecepatan. Jika semua diubah bersamaan, penyebab masalah sulit diketahui. Pendekatan yang sistematis membantu proses perbaikan berjalan lebih jelas. Bengkel sudah cukup bisung tanpa perlu ditambah kebingungan metodologis. Hubungan antara kecepatan potong dan gerak makan juga dapat dijelaskan melalui produktivitas. Kecepatan potong memengaruhi seberapa cepat pahat menyayat sepanjang lintasan. Gerak makan memengaruhi seberapa cepat bidang lebar diselesaikan. Jika keduanya terlalu rendah, waktu pengerjaan panjang. Jika keduanya terlalu tinggi, gaya potong dan risiko kerusakan meningkat. Pemilihan yang baik harus menyeimbangkan waktu, kualitas, umur pahat, dan keamanan.

Pada proses sekrap, parameter yang dipilih juga perlu disesuaikan dengan jenis profil pahat. Pahat rata lurus dapat digunakan untuk penyayatan bidang datar dengan gerak makan yang stabil. Pahat runcing atau pahat alur sudut membutuhkan gerak makan lebih hati hati karena ujung potong lebih sempit dan beban terpusat. Pahat sisi kasar dapat menerima pemakanan lebih besar dibandingkan pahat sisi rata, tetapi tetap harus memperhatikan gaya samping. Profil pahat menentukan seberapa agresif parameter dapat dipilih. Kekakuan pencekaman menjadi faktor yang sering menentukan batas praktis. Walaupun tabel

merekomendasikan kecepatan dan gerak makan tertentu, benda kerja yang tidak tercekam kuat tidak boleh diproses dengan parameter berat. Gaya potong pada mesin sekrap bekerja berulang pada langkah maju. Jika penjepitan lemah, benda kerja dapat bergeser sedikit demi sedikit. Pergeseran ini dapat membuat bidang tidak rata atau ukuran menyimpang. Dalam keadaan buruk, benda kerja dapat terlepas dan menciptakan pelajaran keselamatan yang tidak perlu.

Pemilihan parameter perlu diikuti pemeriksaan hasil. Setelah beberapa lintasan, permukaan benda kerja dapat diamati dan ukuran diperiksa. Jika permukaan terlalu kasar, gerak makan bisa dikurangi pada lintasan akhir. Jika pahat cepat panas atau aus, kecepatan perlu ditinjau ulang. Jika getaran muncul, kedalaman potong, penjururan pahat, dan pencekaman harus diperiksa. Proses sekrap yang baik adalah proses yang dikendalikan, bukan hanya dijalankan sampai selesai. Secara konseptual, pemilihan kecepatan potong dan gerak makan dapat dirumuskan sebagai usaha menyeimbangkan kemampuan material, kekuatan pahat, kondisi mesin, dan tuntutan hasil. Material menentukan tingkat kesulitan penyayatan. Pahat menentukan batas kecepatan dan beban. Mesin menentukan kestabilan gerak. Kualitas permukaan menentukan nilai gerak makan yang sesuai. Waktu produksi menentukan seberapa efisien proses harus dijalankan. Semua faktor ini perlu dibaca bersama, karena pemesian jarang memberi hadiah kepada keputusan yang terlalu sederhana.



BAB 6

MESIN GURDI: GEOMETRI MATA GURDI, PARAMETER PEMOTONGAN, DAN PENGASAHAN

A. Pengertian dan Fungsi Mesin Gurdi

Mesin gurdi merupakan mesin perkakas yang digunakan untuk membuat lubang pada benda kerja dengan bantuan mata gurdi yang berputar. Pada proses ini, alat potong bergerak masuk ke material, sedangkan benda kerja harus ditahan kuat agar tidak ikut berputar. Dari luar, pekerjaan gurdi tampak sederhana. Mata gurdi turun, lubang terbentuk, selesai. Padahal, proses kecil ini melibatkan banyak keputusan teknis yang menentukan apakah lubang benar benar berada pada posisi, ukuran, dan kualitas yang diminta. Dalam kegiatan bengkel, mesin gurdi sering menjadi mesin yang paling cepat dikenali karena bentuk kerjanya langsung terlihat. Pelat baja diberi tanda titik, benda kerja dicekam, mata gurdi dipasang, lalu lubang dibuat sesuai ukuran. Pekerjaan seperti ini muncul pada banyak komponen, mulai dari lubang baut pada pelat dudukan, lubang pin pada engsel, lubang senter awal pada poros, sampai lubang persiapan sebelum proses lanjutan seperti reaming, boring, atau pembuatan ulir dalam.

Fungsi dasar mesin gurdi adalah menghasilkan lubang. Namun, fungsi itu tidak sesempit kelihatannya. Lubang dalam komponen mesin dapat menjadi jalur baut, tempat pin, saluran pelumas, ruang dudukan poros kecil, titik pengikat, atau lubang awal untuk proses lain. Lubang yang posisinya bergeser sedikit saja dapat membuat komponen tidak bisa dirakit. Lubang yang diameternya terlalu besar dapat membuat baut longgar. Lubang yang terlalu kecil membuat komponen pasangan sulit masuk. Jadi, membuat lubang bukan pekerjaan sekadar “melubangi”. Pada mesin gurdi, gerak utama berasal dari putaran mata gurdi. Mata gurdi berputar pada spindel, lalu diberi gerak makan ke arah aksial agar masuk ke benda kerja. Kombinasi putaran dan gerak masuk inilah yang membuat material tersayat menjadi geram. Berbeda dari mesin bubut yang umumnya memutar benda kerja, mesin gurdi memutar alat potong. Benda kerja justru harus diam, stabil, dan tertahan kuat pada meja mesin atau perlengkapan pencekam.

Perbedaan ini penting. Pada mesin bubut, bentuk silindris muncul karena benda kerja berputar. Pada mesin gurdi, bentuk

lubang muncul karena mata gurdi berputar dan bergerak masuk mengikuti sumbu lubang. Bila benda kerja ikut bergerak, lubang dapat membesar, miring, atau rusak. Pada kondisi buruk, benda kerja bisa terlempar. Karena itu, pencekaman pada proses gurdi bukan sekadar urusan kerapian, melainkan urusan keselamatan dan ketelitian. Mesin gurdi dapat dijumpai dalam beberapa bentuk. Mesin gurdi meja atau bench drilling machine cocok untuk benda kerja kecil dan pekerjaan ringan. Mesin gurdi tiang atau pillar drilling machine dipakai untuk benda kerja yang lebih besar dan membutuhkan ruang kerja lebih tinggi. Mesin gurdi radial memberi jangkauan lebih luas karena lengan mesinnya dapat diarahkan ke berbagai posisi pada benda kerja besar. Pada industri modern, proses gurdi juga dapat dilakukan pada mesin CNC machining center dengan lintasan dan parameter yang diprogram.

Walaupun bentuk mesinnya berbeda, prinsip kerjanya tetap serupa. Mata gurdi berputar. Benda kerja ditahan. Operator atau sistem mesin memberi gerak makan. Geram keluar melalui alur mata gurdi. Lubang terbentuk. Prinsip sederhana ini menjadi fondasi untuk memahami bagian berikutnya, seperti geometri mata gurdi, pemilihan sudut mata gurdi, kecepatan potong, gerak makan, dan pengasahan ulang. Mesin gurdi memiliki hubungan dekat dengan istilah drill bit. Mata gurdi adalah alat potong yang melakukan penyayat langsung. Bentuk mata gurdi tidak dibuat sembarangan. Di dalamnya ada alur heliks, sisi potong, sudut ujung, sudut bebas, badan mata gurdi, dan tangkai. Setiap bagian ikut menentukan cara geram keluar, besarnya gaya tekan, serta kualitas dinding lubang. Ivanov et al. (2025) menempatkan drilling sebagai salah satu metode pemesinan dasar bersama turning, milling, grinding, dan proses lain, sehingga penggurdian perlu dibaca sebagai proses pemotongan yang memiliki prinsip dan kondisi kerja tersendiri.

Pada praktik penggurdian, hasil lubang tidak hanya dinilai dari apakah mata gurdi berhasil menembus benda kerja. Lubang perlu diperiksa dari sisi diameter, posisi, ketegaklurusan, kebulatan, kekasaran dinding, dan burr pada tepi keluar. Untuk lubang baut biasa, toleransinya mungkin tidak terlalu ketat. Namun, untuk lubang pin penepat, lubang pasak, atau lubang yang akan menjadi acuan perakitan, kesalahan kecil dapat mengganggu fungsi komponen. Aamir et al. (2023) menunjukkan bahwa kualitas lubang hasil penggurdian dapat dinilai melalui ukuran

lubang, kebulatan, kesilindrisan, ketegaklurusan, burr, dan kondisi permukaan bagian dalam lubang. Temuan seperti ini sejalan dengan pengalaman bengkel. Lubang yang tampak “jadi” belum tentu baik. Kadang lubang terlihat bersih dari atas, tetapi dinding dalamnya kasar. Kadang diameter bagian masuk dan keluar tidak sama. Kadang posisi lubang bergeser karena titik awal kurang tepat atau benda kerja tidak tercekam kuat.

Fungsi mesin gurdi juga tampak pada pekerjaan persiapan. Sebelum proses penyekrapan alur buntu, misalnya, lubang awal dapat dibuat untuk memberi batas gerak pahat. Sebelum membuat ulir dalam, lubang inti harus dibuat terlebih dahulu sesuai diameter yang benar. Sebelum proses reaming, lubang awal perlu disiapkan sedikit lebih kecil dari ukuran akhir. Ini menunjukkan bahwa mesin gurdi sering menjadi pintu masuk bagi operasi pemesinan lain. Dalam proses pembuatan lubang, tahap layout memiliki peran penting. Layout berarti penandaan posisi lubang pada benda kerja sebelum penggurdian dilakukan. Penandaan ini dapat memakai penggores, mistar baja, jangka, siku, height gauge, atau metode lain sesuai ketelitian yang dibutuhkan. Pada pekerjaan sederhana, tanda silang dan titik pusat mungkin cukup. Pada pekerjaan presisi, posisi lubang harus ditentukan melalui acuan ukuran yang lebih teliti.

Setelah layout, titik lubang biasanya diberi tanda dengan penitik atau center punch. Tanda ini membantu mata gurdi tidak meleset saat mulai menyentuh permukaan benda kerja. Tanpa tanda awal, mata gurdi dapat berjalan di permukaan, terutama pada pelat logam yang licin atau permukaan yang sedikit miring. Untuk lubang yang lebih presisi, proses dapat diawali dengan center drill atau mata gurdi pendek agar arah awal lebih stabil. Pemilihan mata gurdi perlu mengikuti ukuran dan material benda kerja. Mata gurdi kecil tidak memerlukan gaya tekan sebesar mata gurdi besar. Mata gurdi untuk baja tidak selalu nyaman dipakai pada plastik lunak atau kuningan tanpa penyesuaian. Bahan mata gurdi juga beragam, mulai dari high speed steel, cobalt, sampai karbida. Pada pembelajaran dasar, HSS sering dipakai karena mudah ditemukan, cukup tangguh, dan sesuai untuk banyak pekerjaan umum.

Pemegang mata gurdi ikut menentukan kestabilan proses. Mata gurdi bertangkai lurus biasanya dipasang pada cekam bor atau drill chuck. Mata gurdi bertangkai tirus dapat dipasang melalui sarung tirus atau taper sleeve agar sesuai dengan spindel

mesin. Jika pemegang tidak tepat, mata gurdi dapat berputar tidak senter, selip, atau lepas. Masalah seperti ini bukan hanya membuat lubang rusak, tetapi juga berbahaya bagi operator. Pencekaman benda kerja menjadi unsur yang tidak boleh ditawar. Benda kerja kecil dapat dijepit dengan ragum mesin. Benda kerja besar dapat ditahan memakai klem dan baut T pada meja mesin. Benda kerja silindris dapat membutuhkan blok V agar tidak bergulir. Pelat tipis perlu ditopang agar tidak terangkat saat mata gurdi hampir menembus. Jika benda kerja hanya dipegang dengan tangan, risikonya terlalu besar. Mata gurdi dapat menggigit material, lalu benda kerja ikut berputar seperti baling baling kecil. Itu berbahaya.

Mesin gurdi juga berfungsi sebagai alat untuk menjaga pengulangan kerja. Dalam pekerjaan produksi, satu pelat mungkin perlu dibuat puluhan lubang dengan posisi yang sama. Bila setiap lubang ditandai dan digurdi tanpa metode yang rapi, posisi dapat bergeser sedikit demi sedikit. Untuk pekerjaan semacam ini, jig, mal, pembatas, atau meja koordinat dapat membantu. Semakin banyak lubang yang dibuat, semakin penting cara kerja yang konsisten. Pada lubang tembus, mata gurdi menembus seluruh ketebalan benda kerja. Prosesnya terlihat mudah, tetapi bagian akhir lubang sering menimbulkan burr atau sobekan pada sisi keluar. Pada lubang buntu, mata gurdi tidak menembus seluruh benda kerja. Operator harus mengendalikan kedalaman agar dasar lubang tidak terlalu dalam. Kedua jenis lubang ini membutuhkan perhatian yang berbeda. Lubang tembus menuntut kontrol burr dan penopang bawah. Lubang buntu menuntut kontrol kedalaman.

Fungsi mesin gurdi juga mencakup pekerjaan memperbesar lubang yang sudah ada. Lubang kecil dapat diperbesar dengan mata gurdi lebih besar, lalu diselesaikan dengan proses lain bila diperlukan. Namun, memperbesar lubang tidak selalu semudah membuat lubang baru. Mata gurdi dapat mengikuti lubang lama yang mungkin sudah miring. Jika lubang awal tidak senter atau tidak lurus, lubang hasil pembesaran dapat tetap membawa kesalahan tersebut. Pada pekerjaan perawatan mesin, mesin gurdi sering dipakai untuk memperbaiki komponen. Misalnya, membuat ulang lubang baut yang rusak, menambah lubang pengikat pada dudukan, atau menyiapkan lubang untuk pasak dan pin. Pekerjaan seperti ini menuntut kehati-hatian karena benda kerja biasanya bukan bahan baru yang mudah dipasang. Bentuknya bisa tidak rata,

ukurannya besar, atau sudah memiliki permukaan yang tidak boleh rusak.

Mesin gurdi memberi keuntungan karena prosesnya relatif cepat dan mudah dipelajari. Namun, kemudahan ini kadang membuat operator meremehkan persiapan. Padahal, banyak kerusakan lubang muncul dari langkah awal yang kurang rapi. Titik pusat tidak dipastikan. Benda kerja tidak dicekam. Mata gurdi tumpul tetap dipakai. Putaran terlalu tinggi. Gerak makan ditekan berlebihan. Kesalahan seperti ini terlihat kecil, tetapi hasilnya langsung terbaca pada lubang. Arah gaya pada proses gurdi berbeda dari banyak operasi lain. Mata gurdi mendorong benda kerja ke bawah sambil menyayat. Gaya aksial ini dapat cukup besar, terutama pada mata gurdi berdiameter besar atau material keras. Jika benda kerja tipis tidak ditopang, ia dapat melengkung. Jika benda kerja kecil tidak dicekam, ia dapat berputar. Jika mesin kurang kaku, lubang dapat menjadi tidak lurus. Jadi, fungsi mesin gurdi harus dibaca bersama gaya yang muncul selama proses.

Geram pada proses gurdi keluar melalui alur heliks mata gurdi. Jika geram tidak keluar lancar, ia dapat menyumbat lubang, menaikkan panas, menggores dinding lubang, dan memperberat kerja mata gurdi. Pada lubang dalam, masalah ini makin terasa. Operator kadang perlu menarik mata gurdi sesekali untuk membersihkan geram. Pada mesin atau operasi tertentu, cairan pendingin membantu membawa geram keluar sekaligus menurunkan panas. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan melalui hubungan antara peralatan, proses, dan strategi, termasuk alat potong, material, cairan pendingin, serta optimasi proses. Pada mesin gurdi, gagasan ini dapat dibaca secara praktis. Pilih mata gurdi yang sesuai. Pakai parameter yang tidak merusak pahat. Gunakan pendinginan secukupnya. Kurangi pengerjaan ulang akibat lubang salah. Proses yang rapi biasanya lebih hemat waktu, pahat, dan energi.

Kualitas lubang juga dipengaruhi oleh kondisi mata gurdi. Mata gurdi yang tajam akan lebih mudah masuk ke material dan menghasilkan geram lebih teratur. Mata gurdi yang tumpul membutuhkan tekanan lebih besar, menghasilkan panas lebih tinggi, dan dapat membuat lubang membesar atau kasar. Abbas et al. (2023) menunjukkan bahwa kondisi mata gurdi dan perlakuan terhadap alat dapat memengaruhi gaya dorong, getaran, integritas permukaan lubang, serta kekasaran permukaan pada proses

penggurdian material komposit logam. Penggunaan mesin gurdi juga berkaitan dengan efisiensi energi. Mesin yang dibiarkan menyala tanpa pekerjaan, parameter yang salah, dan mata gurdi tumpul dapat meningkatkan konsumsi energi tanpa memberi kualitas yang lebih baik. Pawanr dan Gupta (2024) meninjau bahwa efisiensi energi proses pemesinan dapat ditingkatkan melalui desain mesin, pemodelan konsumsi energi, optimasi parameter, dan penerapan pendekatan cerdas. Untuk bengkel biasa, pesan praktisnya sederhana: proses yang benar lebih hemat daripada proses yang harus diulang.

Fungsi mesin gurdi dalam pendidikan teknik cukup kuat karena prosesnya mudah diamati. Peserta dapat melihat bagaimana tanda titik berubah menjadi lubang, bagaimana geram keluar, bagaimana suara mesin berubah saat mata gurdi tumpul, dan bagaimana benda kerja bereaksi jika tidak dicekam. Dari proses yang tampak sederhana ini, kita dapat belajar tentang gerak utama, gerak makan, alat potong, pengecaman, parameter, keselamatan, dan kontrol kualitas sekaligus. Keselamatan kerja perlu masuk sejak awal pembahasan mesin gurdi. Operator tidak boleh memegang benda kerja kecil hanya dengan tangan. Sarung tangan longgar tidak aman di dekat benda berputar. Rambut, kain, tali, dan lengan baju harus dijauhkan dari spindel. Kunci cekam bor harus dilepas sebelum mesin dihidupkan. Geram tidak boleh dibersihkan dengan jari saat mata gurdi masih berputar. Aturan semacam ini terdengar dasar, tetapi justru dasar itulah yang menjaga proses tetap aman.

Dalam pembuatan lubang yang baik, urutan kerja lebih penting daripada kecepatan tangan. Baca gambar. Tentukan posisi. Buat layout. Tandai pusat. Pilih mata gurdi. Pasang pemegang. Cekam benda kerja. Atur putaran. Lakukan penggurdian. Bersihkan geram. Periksa hasil. Urutan ini tidak harus selalu ditulis panjang di bengkel, tetapi harus hidup dalam kebiasaan operator. Mesin gurdi juga sering menjadi penghubung antara pekerjaan manual dan pekerjaan presisi. Pada pekerjaan ringan, operator dapat memberi gerak makan dengan tangan melalui tuas. Pada pekerjaan yang lebih terkendali, mesin dapat memakai pengaturan gerak makan tertentu. Pada sistem CNC, kedalaman, putaran, gerak makan, dan urutan lubang dapat diprogram. Walaupun tingkat kendalinya berbeda, prinsipnya tetap sama: mata gurdi harus masuk pada posisi yang benar dengan parameter yang sesuai.

Pengertian mesin gurdi sebaiknya tidak dibatasi sebagai mesin pembuat lubang saja. Mesin ini adalah sistem pemesinan untuk menghasilkan lubang melalui putaran alat potong, gerak makan aksial, pencekaman benda kerja, dan pengendalian parameter. Lubang yang dihasilkan harus dibaca dari fungsi tekniknya, bukan hanya dari tampilannya. Apakah lubang itu untuk baut, pin, poros kecil, pelumas, atau proses lanjutan? Jawaban atas pertanyaan ini menentukan cara kerja yang dipilih. Mesin gurdi memang tampak sederhana. Namun, di balik gerakan naik turun mata gurdi, ada keputusan teknis yang cukup padat. Posisi lubang harus benar. Benda kerja harus stabil. Mata gurdi harus sesuai. Putaran dan gerak makan harus masuk akal. Geram harus keluar. Hasil harus diperiksa. Bila semua unsur itu bekerja bersama, mesin gurdi tidak hanya membuat lubang, tetapi menghasilkan lubang yang layak dipakai dalam perakitan dan fungsi mesin.

B. Urutan Kerja Proses Penggurdian

Urutan kerja proses penggurdian merupakan bagian penting dalam pekerjaan mesin gurdi karena lubang yang baik tidak hanya bergantung pada mata gurdi yang tajam. Lubang yang tepat lahir dari rangkaian kerja yang teratur, mulai dari membaca gambar kerja, menentukan titik lubang, memilih mata gurdi, memasang pemegang, mencekam benda kerja, mengatur putaran, memberi gerak makan, sampai memeriksa hasil akhirnya. Proses ini tampak sederhana dari luar, tetapi di bengkel sering menjadi sumber kesalahan ukuran, lubang miring, permukaan kasar, atau mata gurdi patah. Mesin gurdi atau drilling machine umum digunakan untuk membuat lubang pada benda kerja. Gerak utamanya berasal dari putaran mata gurdi, sedangkan gerak masuknya dilakukan ke arah benda kerja. Berbeda dari mesin bubut yang membentuk benda kerja melalui putaran benda kerja, mesin gurdi memusatkan proses pada alat potong yang berputar dan bergerak aksial. Ivanov, Evtuhov, Dehtiarov, dan Trojanowska (2025) menempatkan drilling sebagai salah satu metode pemesinan dasar yang berfungsi membuat lubang, memperbesar lubang, atau menyiapkan proses lanjutan seperti reaming, counterboring, dan pembuatan ulir.

Proses penggurdian perlu dimulai dari pemahaman gambar kerja. Operator harus mengetahui diameter lubang, posisi lubang, jumlah lubang, toleransi, kedalaman, serta apakah lubang tersebut tembus atau buntu. Sebuah pelat dudukan motor, misalnya, tidak cukup hanya diberi lubang pada empat sudutnya. Jarak antarlubang

harus sesuai dengan pola baut, diameter harus cocok dengan baut atau pin, dan posisi lubang harus tetap sejajar dengan bidang acuan. Kesalahan kecil pada tahap membaca gambar dapat membuat komponen tidak dapat dirakit. Tahap pertama yang bersifat teknis adalah pembuatan tata letak atau layout. Pada tahap ini, titik lubang dipindahkan dari gambar kerja ke permukaan benda kerja. Garis acuan dibuat menggunakan penggores, mistar baja, siku, jangka, atau alat ukur lain yang sesuai. Titik pusat lubang kemudian diberi tanda menggunakan penitik. Tanda ini membantu mata gurdi masuk pada posisi yang benar. Tanpa titik awal yang jelas, mata gurdi dapat bergeser saat mulai menyayat, terutama pada permukaan logam yang licin.

Pekerjaan layout tidak boleh dianggap sekadar menggambar garis pada permukaan benda kerja. Garis itulah yang menjadi bahasa awal antara gambar teknik dan benda nyata. Bila garis acuan bergeser, seluruh urutan berikutnya ikut bergeser. Pada benda kerja kecil, kesalahan setengah milimeter mungkin sudah terasa besar. Pada pelat sambungan, lubang yang tidak tepat dapat membuat baut sulit masuk. Pada komponen presisi, posisi lubang yang meleset dapat membuat poros, pin, atau pena pengarah tidak bekerja sebagaimana mestinya. Setelah titik lubang ditentukan, permukaan benda kerja perlu disiapkan. Bila permukaan terlalu kasar, berminyak, atau tertutup karat, tanda layout sulit terlihat. Operator dapat membersihkan permukaan terlebih dahulu, lalu memberi lapisan tipis pewarna penanda bila diperlukan. Pada pekerjaan bengkel, cairan penanda biru sering digunakan agar garis gores tampak jelas. Tahap ini terlihat kecil, tetapi membantu mata dan tangan bekerja lebih pasti.

Tahap berikutnya adalah penitik pusat lubang. Penitik digunakan untuk membuat cekungan kecil pada titik yang akan digurdi. Cekungan ini menjadi tempat awal ujung mata gurdi agar tidak lari ke samping. Pada lubang kecil, tanda penitik biasanya cukup ringan. Pada lubang besar, tanda dapat dibuat lebih jelas, lalu diawali dengan mata gurdi kecil sebagai lubang pendahulu. Cara ini membantu mengurangi beban awal pada mata gurdi besar. Pemilihan mata gurdi atau drill bit menjadi tahap yang sangat menentukan. Diameter mata gurdi harus sesuai dengan kebutuhan lubang. Bila lubang akan dipakai untuk baut tembus, diameter biasanya sedikit lebih besar dari diameter baut. Bila lubang akan dilanjutkan dengan pengetapan ulir, diameter mata gurdi harus

mengikuti ukuran bor inti atau tap drill size. Bila lubang menuntut ketelitian tinggi, penggurdian sering hanya menjadi proses awal sebelum reaming atau proses penyelesaian lain.

Geometri mata gurdi juga perlu diperhatikan. Sudut ujung, sudut heliks, dan sudut bebas memengaruhi cara mata gurdi memotong material. Handout menjelaskan bahwa sudut ujung umum sekitar 118 derajat cocok untuk baja lunak, kuningan, dan material umum, sedangkan material lebih keras dapat memerlukan sudut ujung lebih besar. Sudut heliks juga memengaruhi kemampuan alur mata gurdi membawa geram keluar dari lubang. Semakin tidak sesuai geometri dengan material, semakin besar kemungkinan geram tersangkut, panas meningkat, atau lubang menjadi kasar. Bolat et al. (2023) menunjukkan bahwa parameter penggurdian dan geometri alat berpengaruh terhadap gaya tekan dan kekasaran permukaan pada proses penggurdian material komposit. Walaupun material komposit berbeda dari baja atau aluminium yang sering dipakai di bengkel dasar, prinsipnya tetap berguna. Geometri alat, kecepatan potong, gerak makan, dan diameter mata gurdi tidak berdiri sendiri. Semuanya memengaruhi beban pemotongan dan mutu lubang.

Pemegang mata gurdi perlu dipilih sesuai jenis tangkai mata gurdi. Mata gurdi kecil umumnya dipasang pada drill chuck. Mata gurdi bertangkai tirus dipasang melalui sarung tirus atau taper sleeve agar sesuai dengan spindel mesin. Pemasangan harus bersih dan rapat. Jika tangkai mata gurdi atau lubang pemegang kotor oleh geram, mata gurdi dapat berputar tidak sepusat. Akibatnya, lubang menjadi lebih besar dari ukuran seharusnya atau permukaannya menjadi tidak rata. Pada drill chuck, pengencangan harus dilakukan merata. Operator perlu memastikan mata gurdi masuk lurus dan tidak tergigit miring oleh rahang cekam. Setelah dikencangkan, kunci chuck harus segera dilepas. Kebiasaan meninggalkan kunci pada chuck sangat berbahaya karena kunci dapat terlempar ketika spindel berputar. Hal ini termasuk aturan keselamatan dasar yang tidak boleh ditawar.

Pencekaman benda kerja menjadi tahap berikutnya. Benda kerja tidak boleh ditahan hanya dengan tangan, terutama pada logam, pelat kecil, atau benda kerja yang mudah tersangkut mata gurdi. Ketika mata gurdi mulai menembus, torsi dapat menarik benda kerja ikut berputar. Jika benda kerja dipegang tangan, operator dapat terluka. Karena itu, ragam mesin, klem, blok

paralel, atau meja mesin harus digunakan sesuai bentuk benda kerja. Pada pelat datar, benda kerja dapat dicekam dengan ragum atau klem langsung ke meja mesin. Pada benda kerja silindris, blok V dapat digunakan agar benda tidak menggelinding. Pada benda kerja tipis, penopang tambahan diperlukan agar benda tidak melengkung saat ditekan. Liu, Wang, Li, Bo, Liu, dan Wang (2022) menekankan bahwa teknologi pengecaman berperan penting dalam menjaga kemampuan proses dan kualitas pemesinan, terutama ketika benda kerja mudah berubah bentuk. Prinsip ini juga berlaku pada penggurdian karena gaya tekan bekerja langsung ke arah benda kerja.

Sebelum mesin dinyalakan, posisi mata gurdi harus diperiksa terhadap titik penitik. Operator menurunkan spindel secara perlahan sampai ujung mata gurdi mendekati cekungan titik. Jika belum tepat, posisi meja atau benda kerja perlu disetel ulang. Jangan memaksa mata gurdi mencari posisi sendiri saat sudah berputar cepat. Pada tahap awal, gerakan harus lambat dan terkendali agar ujung gurdi masuk pada pusat yang benar. Putaran spindel dipilih berdasarkan diameter mata gurdi dan jenis material benda kerja. Diameter kecil membutuhkan putaran lebih tinggi, sedangkan diameter besar membutuhkan putaran lebih rendah untuk kecepatan potong yang sama. Material lunak seperti aluminium umumnya dapat menggunakan kecepatan lebih tinggi dibandingkan baja keras. Crăciun et al. (2024) menunjukkan bahwa diameter mata gurdi dan gerak makan memiliki pengaruh besar terhadap gaya tekan dan torsi pada penggurdian paduan aluminium 2024. Artinya, ukuran mata gurdi bukan sekadar ukuran lubang, tetapi juga penentu beban kerja mesin.

Gerak makan atau feed pada mesin gurdi meja sering dikendalikan manual melalui tuas spindel. Karena itu, rasa tangan operator sangat berpengaruh. Tekanan yang terlalu ringan membuat mata gurdi lebih banyak menggesek daripada memotong. Tekanan terlalu besar meningkatkan gaya tekan, panas, dan risiko patah. Pada mesin gurdi radial atau mesin yang lebih besar, gerak makan dapat diatur otomatis sehingga proses lebih konsisten. Namun, pengaturan otomatis tetap memerlukan pemilihan nilai yang benar. Pramanik et al. (2024) menjelaskan bahwa pada penggurdian material komposit matriks aluminium, torsi dan gaya tekan cenderung menurun ketika sudut ujung dan kecepatan meningkat, tetapi meningkat ketika gerak makan dinaikkan.

Temuan ini membantu memperjelas mengapa operator tidak boleh menekan tuas makan secara kasar. Semakin besar gerak makan, semakin besar tebal geram yang dibentuk, dan semakin besar pula beban yang harus ditanggung mata gurdi.

Pada lubang besar, penggurdian sebaiknya diawali dengan lubang pendahulu atau pilot hole. Lubang kecil ini membantu mengurangi beban pada ujung mata gurdi besar. Mata gurdi besar memiliki bidang penyayat lebih lebar dan membutuhkan gaya tekan lebih besar, terutama pada bagian chisel edge di pusat mata gurdi. Dengan lubang pendahulu, mata gurdi besar lebih mudah mengikuti pusat lubang dan pemotongan menjadi lebih ringan. Cairan pendingin atau cutting fluid digunakan untuk mengurangi panas, melumasi daerah potong, dan membantu geram keluar dari lubang. Pada baja, pendingin sering membantu menjaga umur mata gurdi. Pada aluminium, pelumasan membantu mengurangi kecenderungan material menempel pada mata gurdi. Pada beberapa material tertentu, pemilihan pendingin perlu lebih hati-hati. Wang et al. (2023) membahas pemmesinan berkelanjutan sebagai integrasi antara peralatan, proses, strategi, energi, dan penggunaan cairan pemotongan. Dalam penggurdian, penggunaan cairan tidak hanya berhubungan dengan kualitas lubang, tetapi juga umur alat dan efisiensi proses.

Saat proses penggurdian dimulai, mata gurdi diturunkan perlahan sampai menyentuh tanda penitik. Setelah ujung masuk stabil, tekanan makan dapat dinaikkan secara bertahap. Geram harus diperhatikan. Geram yang keluar lancar menunjukkan alur mata gurdi bekerja membawa material keluar dari lubang. Bila geram berhenti keluar, mata gurdi dapat tersumbat. Pada lubang dalam, mata gurdi perlu dinaikkan sesekali untuk membuang geram dan memberi kesempatan pendingin masuk ke daerah potong. Pola menaikkan dan menurunkan mata gurdi secara berkala sering disebut peck drilling. Cara ini berguna untuk lubang dalam, material liat, atau diameter kecil yang mudah patah. Mata gurdi tidak dipaksa masuk terus menerus. Ia diberi jeda agar geram keluar. Dalam praktik sederhana, operator menurunkan mata gurdi beberapa milimeter, mengangkatnya sedikit, lalu melanjutkan pemotongan. Cara ini membuat proses lebih aman meskipun waktu kerja sedikit bertambah.

Kedalaman lubang perlu dikendalikan sejak awal. Untuk lubang tembus, operator perlu memastikan ada ruang bebas di

bawah benda kerja agar mata gurdi tidak merusak meja mesin. Blok paralel atau alas korban dapat digunakan sebagai penopang. Untuk lubang buntu, batas kedalaman harus ditandai dengan pengatur kedalaman mesin, skala spindel, atau tanda pada mata gurdi. Tanpa pengendalian kedalaman, lubang dapat terlalu dangkal atau terlalu dalam. Ketika mata gurdi hampir menembus benda kerja, tekanan makan sebaiknya dikurangi. Pada momen tembus, gaya potong berubah tiba tiba. Jika tekanan terlalu besar, mata gurdi dapat menarik benda kerja, menimbulkan burr besar, atau bahkan tersangkut. Bagian bawah lubang biasanya menghasilkan geram dan burr lebih banyak. Karena itu, tahap akhir penggurdian membutuhkan kontrol tangan yang halus, bukan tekanan yang terburu-buru.

Setelah lubang selesai, mata gurdi dinaikkan saat masih berputar atau setelah putaran dikurangi sesuai kondisi pekerjaan. Geram dibersihkan dengan kuas, bukan dengan tangan kosong. Geram logam bisa tajam dan panas. Operator juga perlu mematikan mesin sebelum melakukan pemeriksaan dekat. Kebiasaan meniup geram dengan mulut sebaiknya dihindari karena serpihan dapat mengenai mata. Penggunaan kacamata keselamatan tetap menjadi bagian penting dalam pekerjaan gurdi. Pemeriksaan hasil lubang dilakukan setelah benda kerja aman disentuh dan geram dibersihkan. Diameter dapat diperiksa dengan jangka sorong, pin ukur, atau alat ukur lain sesuai ketelitian. Posisi lubang diperiksa terhadap garis acuan atau ukuran dari tepi benda kerja. Untuk lubang tembus, burr pada sisi keluar perlu diperhatikan. Bila burr mengganggu perakitan, proses deburring atau pembersihan tepi harus dilakukan dengan countersink, kikir halus, atau alat khusus.

Kualitas lubang tidak hanya dilihat dari diameter. Permukaan dinding lubang, kebulatan, kelurusan, dan posisi juga penting. Lubang yang tampak benar dari atas bisa saja miring karena benda kerja tidak rata atau meja tidak sejajar. Lubang yang diameternya benar bisa memiliki dinding kasar karena mata gurdi tumpul atau geram tersumbat. Trinh (2024) menekankan bahwa kualitas permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan benda kerja. Dalam proses gurdi, ketiganya bertemu di dalam ruang lubang yang sempit. Kesalahan umum pada urutan penggurdian sering berasal dari tahap awal yang diabaikan. Operator tidak membuat layout dengan

jelas, tidak menitik pusat, memilih mata gurdi tumpul, atau mencekam benda kerja terlalu lemah. Akibatnya, mata gurdi meleset, lubang menjadi oval, benda kerja berputar, atau permukaan lubang kasar. Kesalahan lain muncul ketika putaran terlalu tinggi untuk diameter besar atau tekanan makan terlalu berat untuk mata gurdi kecil.

Urutan kerja yang baik membantu operator membaca gejala selama proses. Suara melengking dapat menunjukkan gesekan berlebih. Geram yang berubah warna terlalu gelap dapat menandakan panas tinggi. Mata gurdi yang bergetar dapat menandakan pengecaman kurang kuat atau ujung gurdi tidak simetris. Benda kerja yang bergerak sedikit saja harus segera dihentikan. Pengamatan semacam ini membuat proses penggurdian tidak berjalan buta. Dalam pekerjaan pendidikan, urutan penggurdian perlu diajarkan sebagai kebiasaan teknis. Peserta praktik sebaiknya tidak hanya diminta membuat lubang, tetapi juga diminta menjelaskan alasan tiap langkah. Mengapa harus menitik pusat. Mengapa benda kerja harus dicekam. Mengapa diameter besar membutuhkan putaran lebih rendah. Mengapa lubang dalam perlu pengangkatan berkala. Dengan cara ini, pembelajaran tidak berhenti pada hasil benda kerja, tetapi juga membangun nalar kerja bengkel.

Pada pekerjaan industri, urutan kerja menjadi dasar konsistensi. Jika satu komponen dibuat hanya sekali, kesalahan mungkin dianggap sebagai kejadian tunggal. Namun, bila ratusan pelat harus digurdi dengan pola lubang yang sama, kesalahan kecil akan berulang dan menimbulkan kerugian besar. Di sinilah alat bantu seperti jig, stopper, ragum khusus, atau mesin dengan pengaturan otomatis menjadi penting. Meski begitu, prinsip dasarnya tetap sama: posisi harus benar, alat harus sesuai, benda kerja harus stabil, dan hasil harus diperiksa. Proses penggurdian juga sering menjadi tahap awal untuk proses lain. Lubang hasil gurdi dapat dilanjutkan dengan reaming untuk memperoleh diameter lebih presisi, tapping untuk membuat ulir dalam, atau counterboring untuk membuat dudukan kepala baut. Karena itu, mutu penggurdian awal menentukan kelancaran proses berikutnya. Jika lubang awal miring, proses lanjutan ikut sulit diperbaiki.

Kondisi mata gurdi perlu diperiksa sebelum dan sesudah digunakan. Mata gurdi tumpul membutuhkan tekanan lebih besar, menghasilkan panas lebih tinggi, dan membuat lubang lebih kasar.

Bila kedua sisi penyayat tidak sama panjang, lubang dapat menjadi lebih besar dari diameter mata gurdi. Jika sudut ujung tidak seimbang, mata gurdi dapat menyayat berat sebelah. Pemeriksaan ini akan dibahas lebih jauh pada subbab pengasahan, tetapi urutan kerja penggurdian sudah perlu memperkenalkan pentingnya kondisi alat. Urutan kerja proses penggurdian dapat diringkas sebagai rangkaian pengendalian posisi, alat, benda kerja, parameter, dan hasil. Layout mengendalikan posisi. Pemilihan drill bit mengendalikan alat potong. Pemegang dan pencekaman mengendalikan kestabilan. Putaran dan gerak makan mengendalikan beban pemotongan. Pemeriksaan mengendalikan mutu akhir. Jika kelima hal ini berjalan baik, proses penggurdian menjadi lebih aman, lebih terukur, dan lebih mudah diulang.

C. Geometri Mata Gurdi

Mata gurdi terlihat seperti batang beralur yang ujungnya tajam, tetapi bentuk kecil pada ujung dan badannya menentukan hampir seluruh perilaku proses penggurdian. Saat mata gurdi berputar, dua sisi potong bekerja menyayat material, pahat lintang menekan bagian pusat, alur heliks membawa geram keluar, dan sudut bebas mencegah bidang belakang mata potong menggesek benda kerja. Kalau salah satu unsur ini tidak sesuai, lubang tetap bisa terbentuk, tetapi kualitasnya sering menurun. Geometri mata gurdi perlu dibaca sebagai hubungan antara bentuk alat dan respons material. Baja lunak, aluminium, kuningan, plastik keras, dan baja tahan karat tidak memberi reaksi yang sama ketika digurdi. Ada material yang geramnya mudah keluar. Ada yang lengket. Ada yang keras dan cepat memanaskan mata gurdi. Ada pula yang rapuh sehingga geramnya pendek. Karena itulah sudut mata gurdi tidak cukup dipahami sebagai angka tunggal.

Dalam proses penggurdian, bagian mata gurdi yang paling sering dibahas adalah sudut heliks, sudut ujung, dan sudut bebas. Ketiganya bekerja bersama. Sudut heliks membantu geram keluar melalui alur. Sudut ujung menentukan cara mata gurdi masuk ke material. Sudut bebas memberi ruang agar mata potong benar benar menyayat, bukan menggosok permukaan lubang. Hubungan ini terdengar sederhana, tetapi di bengkel efeknya sangat terasa. Bagian pertama yang mudah dikenali adalah tangkai mata gurdi. Tangkai berfungsi sebagai bagian yang dijepit pada pemegang, baik melalui *drill chuck* maupun sarung tirus. Mata gurdi kecil umumnya memakai tangkai lurus. Mata gurdi berdiameter lebih

besar sering memakai tangkai tirus agar pemindahan putaran dari spindel lebih kuat. Bila tangkai tidak terpasang baik, mata gurdi dapat berputar tidak senter, selip, atau bahkan terlepas saat proses berlangsung.

Badan mata gurdi adalah bagian yang memuat alur heliks dan bidang pemandu. Di bagian inilah geram bergerak naik keluar dari lubang. Pada lubang dangkal, masalah pembuangan geram mungkin belum terlalu terasa. Pada lubang yang lebih dalam, alur heliks menjadi sangat penting karena geram harus menempuh jalur lebih panjang untuk keluar. Jika geram tertahan, panas naik, dinding lubang tergores, dan mata gurdi dapat macet. Alur heliks atau *flute* merupakan jalur spiral pada badan mata gurdi. Fungsi utamanya adalah menyediakan ruang untuk geram dan membantu membawa geram keluar dari lubang. Alur ini juga berhubungan dengan sudut geram pada sisi potong. Mitsubishi Materials menjelaskan bahwa sudut heliks adalah kemiringan alur terhadap garis tengah mata gurdi, dan secara umum sudut heliks sekitar 30 derajat digunakan pada banyak mata gurdi tipe umum (Mitsubishi Materials, n.d.).

Sudut heliks tidak hanya memengaruhi pembuangan geram. Sudut ini juga memengaruhi tahanan potong. Sudut heliks yang lebih besar biasanya membuat penyayatan terasa lebih ringan karena sudut geram menjadi lebih besar. Namun, sudut yang terlalu besar dapat membuat tepi potong lebih tajam sekaligus lebih rentan terhadap pecah pada kondisi tertentu. Di sisi lain, sudut heliks yang lebih kecil memberi kekuatan lebih pada badan mata gurdi, tetapi puntiran yang dibutuhkan dapat meningkat. Untuk baja lunak sampai baja menengah, sudut heliks sekitar 25 sampai 32 derajat sering dipakai sebagai pilihan umum. Nilai ini cukup seimbang antara kekuatan mata gurdi dan kemampuan membuang geram. Untuk tembaga, magnesium, dan plastik lunak, sudut heliks lebih besar, sekitar 35 sampai 45 derajat, dapat membantu geram keluar lebih lancar. Untuk paduan tembaga, rentang sekitar 20 sampai 25 derajat sering dipilih. Untuk plastik keras, sudut heliks sekitar 17 derajat dapat memberi kontrol yang lebih baik terhadap material yang mudah retak atau terangkat.

Sudut ujung atau *point angle* adalah sudut yang terbentuk di ujung mata gurdi antara dua sisi potong utama. Sudut ini menentukan cara mata gurdi mulai masuk ke benda kerja. Pada mata gurdi komersial umum, sudut 118 derajat banyak digunakan

untuk baja lunak, kuningan, dan material umum. Sudut ini cukup praktis karena dapat bekerja pada banyak material tanpa menuntut geometri khusus. Untuk logam yang lebih keras, sudut ujung yang lebih besar sering memberi performa lebih baik. Sudut yang lebih besar membuat ujung mata gurdi tampak lebih tumpul atau lebih datar, tetapi beban pada sisi potong dapat tersebar lebih baik. Pada beberapa pekerjaan baja tahan karat atau baja yang lebih keras, sudut 130 sampai 135 derajat sering ditemui, terutama bila mata gurdi memakai desain *split point*. Aamir et al. (2023) menunjukkan bahwa material mata gurdi dan parameter penggurdian memengaruhi kualitas lubang, termasuk ukuran, kebulatan, kesilindrisan, ketegaklurusan, dan kondisi burr.

Sudut ujung juga memengaruhi kecenderungan mata gurdi berjalan atau *walking* pada awal penggurdian. Pada permukaan licin, mata gurdi dapat bergeser sebelum benar benar menggigit material. Semakin tidak stabil titik awalnya, semakin besar kemungkinan lubang bergeser dari posisi *layout*. Karena itu, penitik, *center drill*, atau mata gurdi awal yang pendek sering dipakai untuk menjaga posisi awal. Sudut bebas atau *clearance angle* terletak di belakang sisi potong. Fungsinya memberi ruang agar bidang belakang mata gurdi tidak menggosok permukaan benda kerja. Tanpa sudut bebas yang cukup, mata gurdi akan lebih banyak bergesekan daripada menyayat. Tanda yang muncul biasanya suara berat, panas cepat naik, tekanan makan meningkat, dan permukaan lubang tampak buruk.

Sudut bebas yang terlalu kecil membuat mata gurdi sulit masuk. Namun, sudut bebas yang terlalu besar juga bukan solusi. Tepi potong menjadi lebih lemah dan mudah gompal, terutama saat menggurdi material keras atau ketika operator memberi tekanan makan terlalu besar. Mitsubishi Materials menyebutkan bahwa sudut bebas umum berada sekitar 7 sampai 15 derajat, dengan catatan sudut lebih besar dapat menurunkan gaya dorong dan keausan bidang bebas, tetapi juga dapat mengurangi kekuatan sisi potong (Mitsubishi Materials, n.d.). Bagian lain yang penting adalah sisi potong atau *cutting lips*. Pada mata gurdi puntir umum, ada dua sisi potong utama yang seharusnya memiliki panjang dan sudut sama. Keduanya harus bekerja seimbang. Jika satu sisi lebih panjang atau lebih tajam daripada sisi lainnya, mata gurdi akan menyayat tidak merata. Lubang dapat membesar, tidak bulat, atau bergeser dari sumbu yang diinginkan.

Pahat lintang atau *chisel edge* berada di pusat ujung mata gurdi. Bagian ini tidak menyayat seefektif sisi potong utama. Ia lebih banyak menekan material di bagian tengah sebelum material terdorong ke arah sisi potong. Karena itu, pahat lintang sering menjadi sumber gaya tekan aksial yang besar. Pada mata gurdi besar, efeknya makin terasa. Operator perlu memberi tekanan makan yang stabil agar mata gurdi tidak hanya menggosok di pusat lubang. Web atau inti mata gurdi adalah bagian tengah yang memberi kekuatan pada badan mata gurdi. Web yang lebih tebal membuat mata gurdi lebih kaku, tetapi ruang alur untuk geram menjadi lebih sempit. Web yang terlalu tipis dapat membantu pembuangan geram, tetapi kekuatan mata gurdi berkurang. Pada mata gurdi yang sering diasah ulang, web dapat tampak makin tebal di ujung karena diameter inti bertambah ke arah tangkai. Kondisi ini dapat meningkatkan gaya dorong.

Margin adalah bidang sempit di tepi luar mata gurdi yang membantu memandu mata gurdi di dalam lubang. Bagian ini menjaga diameter dan membantu kestabilan arah. Jika margin aus atau tergores, lubang dapat menjadi kurang halus dan akurasinya menurun. Pada lubang dalam, margin yang baik membantu mata gurdi tetap mengikuti jalur, meskipun pencekaman dan titik awal tetap menjadi faktor besar. Land adalah bidang di antara alur heliks. Bagian ini menjadi struktur pendukung mata gurdi. Land dan margin bekerja bersama menjaga kekakuan sekaligus memberi ruang bagi alur. Bila alur terlalu besar, geram memang mudah keluar, tetapi badan mata gurdi dapat menjadi kurang kaku. Bila land terlalu dominan, mata gurdi kuat, tetapi pembuangan geram dapat terganggu. Bentuk ini lagi lagi menunjukkan bahwa geometri mata gurdi selalu berupa kompromi.

Geometri mata gurdi memengaruhi gaya dorong atau *thrust force*. Mata gurdi tidak hanya berputar, tetapi juga menekan material sepanjang sumbu lubang. Jika sudut ujung salah, pahat lintang terlalu dominan, atau sudut bebas kurang, gaya dorong dapat meningkat. Tekanan yang terlalu besar dapat membuat benda kerja tipis melengkung, lubang keluar dengan burr besar, atau mata gurdi cepat aus. Sedlak et al. (2023) meneliti pengaruh geometri mata gurdi, terutama sudut ujung dan sudut bebas, terhadap kualitas lubang pada proses penggurdian. Kajian semacam ini berguna karena menunjukkan bahwa geometri bukan sekadar pengetahuan bengkel tradisional, tetapi juga variabel teknis yang

dapat diuji melalui gaya, getaran, keausan, dan kualitas permukaan. Pada pembelajaran dasar, pesan praktisnya jelas: mata gurdi dengan sudut salah akan menghasilkan lubang yang sulit dipercaya.

Mathavan et al. (2025) juga menekankan bahwa variabel geometri seperti *point angle*, *helix angle*, *primary clearance angle*, dan *chisel edge angle* memengaruhi mekanisme pemotongan pada proses penggurdian material tumpuk untuk aplikasi industri pesawat. Walaupun konteksnya lebih maju daripada pekerjaan bengkel umum, prinsipnya tetap relevan. Bagian kecil pada ujung mata gurdi menentukan bagaimana material mulai terpotong, bagaimana geram terbentuk, dan bagaimana alat mengalami aus. Sudut heliks berhubungan langsung dengan karakter geram. Pada material lunak dan liat, geram dapat panjang dan mudah menyumbat alur. Sudut heliks lebih besar membantu geram bergerak keluar, tetapi mata potong menjadi lebih tajam dan perlu dijaga dari beban kejut. Pada material yang lebih rapuh, geram pendek lebih mudah keluar, sehingga sudut heliks tidak selalu perlu dibuat besar. Pemilihan sudut harus mempertimbangkan bentuk geram yang diharapkan.

Sudut ujung berhubungan dengan awal lubang. Sudut 118 derajat mudah ditemukan dan cocok untuk banyak pekerjaan umum. Namun, untuk material keras, sudut yang lebih besar dapat membantu mengurangi kecenderungan mata gurdi berjalan dan membagi beban pemotongan lebih baik. Pada permukaan yang miring atau licin, sudut ujung saja belum cukup. Titik awal tetap perlu dibuat dengan penitik atau *center drill* agar mata gurdi tidak meleset. Sudut bebas berhubungan dengan gesekan pada dinding lubang dan ujung potong. Kalau sudut bebas terlalu kecil, mata gurdi terasa berat, cepat panas, dan sulit menghasilkan geram yang bersih. Kalau terlalu besar, sisi potong menjadi mudah rusak. Pada proses pengasahan ulang, sudut bebas menjadi bagian yang sering keliru karena bentuknya tidak selalu mudah dibaca oleh mata. Itulah sebabnya pemeriksaan dengan penera atau mal akan dibahas pada subbab berikutnya.

Panjang alur atau *flute length* juga tidak boleh diabaikan. Alur yang panjang memang memungkinkan mata gurdi membuat lubang lebih dalam, tetapi mata gurdi menjadi kurang kaku. Semakin panjang bagian yang bekerja, semakin besar kemungkinan mata gurdi melengkung atau berjalan dari sumbu.

Mitsubishi Materials menekankan bahwa panjang alur memengaruhi akurasi lubang dan umur alat, sehingga panjang alur sebaiknya dipilih sesingkat mungkin selama masih cukup untuk kedalaman lubang yang dibutuhkan (Mitsubishi Materials, n.d.). Geometri mata gurdi ikut menentukan kualitas dinding lubang. Dinding lubang yang halus tidak hanya dipengaruhi putaran dan gerak makan, tetapi juga cara geram keluar dan cara margin memandu mata gurdi. Jika geram tersangkut di alur, dinding lubang dapat tergores. Jika margin aus, lubang bisa tampak tidak rata. Jika sisi potong tidak seimbang, diameter lubang dapat lebih besar daripada diameter mata gurdi.

Aamir et al. (2023) menilai kualitas lubang melalui ketegaklurusan, kesilindrisan, kebulatan, ukuran lubang, burr, dan kondisi permukaan bagian dalam. Cara pandang ini penting untuk memahami geometri mata gurdi. Lubang tidak cukup disebut baik hanya karena tembus. Lubang yang baik harus berada pada posisi yang benar, diameternya sesuai, dindingnya layak, dan tepinya tidak memiliki burr berlebihan. Burr pada sisi keluar lubang sering berkaitan dengan kombinasi geometri dan parameter. Sudut ujung, ketajaman sisi potong, gerak makan, dan penopang bawah benda kerja semuanya berpengaruh. Pada pelat tipis, burr bisa cukup besar bila mata gurdi tumpul atau tekanan makan berlebihan. Pada lubang yang akan dipakai untuk sambungan baut, burr mungkin masih bisa dibersihkan. Pada lubang presisi, burr dapat mengganggu pemasangan komponen pasangan.

Geometri juga memengaruhi panas. Mata gurdi bekerja di dalam lubang, sehingga panas tidak selalu mudah keluar. Geram yang tersumbat memperparah keadaan. Sudut heliks yang tidak sesuai, sudut bebas yang kurang, atau mata potong yang tumpul dapat menaikkan temperatur. Panas berlebih mempercepat keausan mata gurdi dan dapat menurunkan kualitas permukaan lubang. Pada material tertentu, panas juga dapat menyebabkan perubahan warna atau pengerasan lokal. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan sebagai hubungan antara peralatan, proses, dan strategi. Dalam konteks geometri mata gurdi, gagasan ini dapat dibaca secara praktis. Pilihan geometri yang tepat membantu proses lebih ringan, geram lebih terkendali, pendinginan lebih efektif, dan mata gurdi lebih awet. Proses yang tidak memaksa alat biasanya lebih hemat waktu, energi, dan biaya penggantian perkakas.

Dalam pekerjaan bengkel, geometri mata gurdi sering diperiksa saat masalah muncul. Lubang terlalu besar. Mata gurdi cepat panas. Geram tidak keluar. Lubang miring. Operator lalu melihat mata gurdi dan baru menyadari bahwa sisi potong tidak sama, sudut bebas hilang, atau ujungnya sudah tumpul. Kebiasaan yang lebih baik adalah memeriksa geometri sebelum proses, terutama untuk lubang yang penting. Mata gurdi yang pernah diasah ulang perlu mendapat perhatian lebih. Pengasahan yang tidak seimbang membuat satu sisi potong lebih panjang daripada sisi lainnya. Akibatnya, mata gurdi menyayat lebih banyak di satu sisi dan lubang menjadi oversize. Sudut ujung juga bisa berubah dari nilai yang diinginkan. Pada lubang presisi, kesalahan seperti ini langsung terasa. Mata gurdi masih terlihat tajam, tetapi hasilnya tidak benar.

Untuk pembelajaran, geometri mata gurdi dapat diamati langsung dengan membandingkan beberapa mata gurdi. Ambil satu mata gurdi baru, satu mata gurdi tumpul, dan satu mata gurdi yang pernah diasah manual. Perhatikan ujungnya. Bandingkan panjang sisi potong. Lihat alur heliks. Amati sudut bebas di belakang sisi potong. Latihan kecil seperti ini membuat istilah teknis menjadi lebih mudah dipahami karena kita melihat bentuknya secara nyata. Operator juga dapat menghubungkan geometri dengan suara dan rasa proses. Mata gurdi yang tajam dan sesuai biasanya menghasilkan suara potong yang lebih stabil. Geram keluar lebih teratur. Tekanan tuas terasa masuk akal. Mata gurdi yang tumpul atau salah geometri sering membutuhkan tekanan lebih besar, berbunyi berat, dan menghasilkan geram buruk. Pengamatan ini memang tidak menggantikan alat ukur, tetapi sangat berguna sebagai tanda awal.

Pemilihan geometri mata gurdi sebaiknya selalu dimulai dari pertanyaan fungsi lubang. Apakah lubang hanya untuk baut biasa? Apakah lubang akan dilanjutkan dengan *reaming*? Apakah lubang harus tegak lurus dan presisi? Apakah materialnya lunak, keras, liat, atau rapuh? Dari pertanyaan itu, operator dapat memilih sudut ujung, sudut heliks, sudut bebas, bahan mata gurdi, dan parameter pemotongan yang lebih masuk akal. Pada lubang yang akan di-*reaming*, mata gurdi tidak harus langsung menghasilkan ukuran akhir. Lubang awal dibuat sedikit lebih kecil agar *reamer* memiliki sisa material yang cukup untuk menyelesaikan diameter dan permukaan. Dalam kondisi ini, geometri mata gurdi tetap penting

karena lubang awal yang miring atau kasar dapat menyulitkan proses lanjutan. Proses akhir yang baik membutuhkan persiapan lubang yang baik.

Pada lubang untuk ulir dalam, diameter awal harus sesuai dengan ukuran tap. Geometri mata gurdi yang buruk dapat membuat lubang terlalu besar atau tidak lurus. Jika lubang terlalu besar, kedalaman ulir berkurang dan sambungan melemah. Jika lubang miring, tap dapat patah atau ulir menjadi tidak sejajar. Jadi, geometri mata gurdi berpengaruh sampai ke operasi setelah penggurdian. Pada benda kerja tipis, geometri juga harus dipilih hati-hati. Mata gurdi dapat menembus terlalu agresif dan menarik benda kerja bila pencekaman kurang baik. Sudut ujung, ketajaman, dan gerak makan perlu dijaga. Benda kerja tipis sebaiknya ditopang dari bawah agar tidak melengkung saat mata gurdi hampir keluar. Lubang yang tampak sederhana pada pelat tipis justru sering menghasilkan burr dan sobekan bila persiapannya buruk.

Pada benda kerja tebal atau lubang dalam, alur heliks dan pembuangan geram menjadi perhatian utama. Geram harus keluar, bukan menumpuk di dalam lubang. Operator dapat menarik mata gurdi secara berkala untuk membersihkan geram, terutama pada mesin manual. Jika tersedia, cairan pendingin dapat membantu menurunkan panas dan membawa geram keluar. Namun, pendinginan tidak akan menyelesaikan masalah bila geometri mata gurdi sejak awal tidak sesuai. Geometri mata gurdi menjadi dasar untuk memahami pengasahan ulang. Pengasahan bukan sekadar membuat ujung kembali tajam. Pengasahan harus mengembalikan sudut ujung, sudut bebas, kesamaan panjang sisi potong, dan posisi pahat lintang sedekat mungkin dengan kondisi kerja yang benar. Jika yang diasah hanya “tajamnya”, mata gurdi dapat terlihat baik, tetapi lubang yang dibuat tetap bermasalah.

D. Pemilihan Sudut Mata Gurdi Berdasarkan Material Benda Kerja

Pemilihan sudut mata gurdi merupakan keputusan kecil yang dampaknya besar dalam proses penggurdian. Mata gurdi mungkin tampak hanya sebagai alat berbentuk spiral yang berputar masuk ke benda kerja, tetapi bentuk ujung dan alurnya menentukan bagaimana material mulai terpotong, bagaimana geram keluar, seberapa besar gaya tekan yang muncul, serta seberapa baik kualitas lubang yang dihasilkan. Karena itu, sudut mata gurdi tidak dapat dipilih secara asal. Ia harus dibaca bersama jenis material,

diameter lubang, kondisi mesin, cara pencekaman, dan tujuan akhir lubang. Dalam proses gurdi, mata gurdi bekerja pada ruang yang sempit. Berbeda dari proses bubut atau frais yang geramnya relatif mudah terlihat, geram pada proses gurdi terbentuk di dalam lubang dan harus keluar melalui alur heliks. Bila sudut mata gurdi tidak sesuai, geram dapat tersangkut, panas meningkat, dan mata gurdi lebih mudah tumpul. Pada lubang kecil, masalah ini sering muncul sebagai bunyi melengking atau mata gurdi patah. Pada lubang besar, gejalanya dapat berupa gaya tekan berat, permukaan lubang kasar, dan diameter lubang yang sedikit melebar.

Mata gurdi memiliki beberapa sudut penting, terutama sudut ujung atau point angle, sudut heliks atau helix angle, dan sudut bebas atau clearance angle. Ketiganya memiliki fungsi yang saling terkait. Sudut ujung menentukan cara ujung mata gurdi pertama kali menekan dan menyayat material. Sudut heliks menentukan kemampuan alur membawa geram keluar. Sudut bebas memberi ruang agar bagian belakang mata potong tidak menggesek permukaan lubang yang baru terbentuk. Sudut ujung yang paling umum digunakan pada mata gurdi komersial adalah sekitar 118 derajat. Sudut ini banyak dipakai karena cukup seimbang untuk material umum seperti baja lunak, kuningan, dan beberapa logam nonferro. Pada pekerjaan bengkel dasar, mata gurdi 118 derajat sering menjadi pilihan awal karena mudah ditemukan, mudah diasah, dan cukup toleran terhadap variasi pekerjaan. Namun, sudut ini bukan jawaban untuk semua material.

Material yang lebih keras biasanya memerlukan sudut ujung lebih besar. Sudut ujung yang lebih besar, misalnya sekitar 130 derajat sampai 140 derajat, membuat ujung mata gurdi lebih kuat dan tidak terlalu lancip. Bentuk ini membantu mengurangi kecenderungan ujung patah ketika menghadapi material keras atau material yang menimbulkan gaya tekan tinggi. Pada baja paduan, baja tahan karat, atau material keras lain, ujung yang terlalu lancip dapat cepat aus karena beban terkonsentrasi pada daerah kecil. Sebaliknya, material yang lebih lunak tidak selalu membutuhkan sudut ujung besar. Pada aluminium, tembaga, magnesium, atau plastik lunak, persoalan utamanya sering bukan kekuatan ujung, melainkan kelancaran pemotongan dan keluarnya geram. Material lunak dapat membentuk geram panjang, menggulung, atau menempel pada sisi potong. Jika sudut dan alur tidak membantu

geram keluar, lubang mudah menjadi kasar dan mata gurdi terasa seperti tertahan di dalam benda kerja.

Sudut heliks juga perlu dipilih berdasarkan material. Sudut heliks pada mata gurdi dapat bervariasi cukup lebar, tetapi mata gurdi umum untuk baja biasanya memiliki sudut sekitar 30 derajat. Sudut heliks memengaruhi ruang aliran geram. Semakin besar sudut heliks, geram cenderung lebih mudah terangkat keluar. Semakin kecil sudut heliks, aliran geram menjadi lebih kaku dan gaya puntir dapat meningkat. Pada pekerjaan nyata, perbedaan ini terasa ketika menggurdi material liat yang menghasilkan geram panjang. Untuk tembaga, magnesium, dan plastik lunak, sudut heliks yang lebih besar sering lebih membantu karena geram perlu keluar dengan lancar. Rentang sekitar 35 derajat sampai 45 derajat dapat dipakai sebagai acuan awal. Pada paduan tembaga, sudut heliks dapat dibuat lebih rendah, sekitar 20 derajat sampai 25 derajat, karena sifat materialnya dapat menyebabkan mata gurdi tertarik masuk terlalu agresif bila alur terlalu tajam. Untuk plastik keras, sudut heliks yang lebih kecil, sekitar 17 derajat, dapat membantu mengurangi pengambilan material yang terlalu cepat.

Pada baja lunak sampai baja menengah, sudut heliks sekitar 25 derajat sampai 32 derajat biasanya cukup seimbang. Rentang ini memungkinkan geram keluar tanpa membuat mata gurdi terlalu agresif. Baja menghasilkan geram yang berbeda dari aluminium. Ia membutuhkan alur yang cukup terbuka, tetapi tetap memerlukan kekuatan badan mata gurdi. Jika sudut heliks terlalu besar pada diameter kecil, kekakuan mata gurdi dapat berkurang dan risiko patah meningkat. Sudut bebas atau clearance angle berfungsi memberi jarak antara bagian belakang mata potong dan permukaan lubang. Jika sudut bebas terlalu kecil, mata gurdi lebih banyak menggesek daripada memotong. Gesekan ini menimbulkan panas, membuat bunyi pemotongan tidak nyaman, dan mempercepat keausan. Jika sudut bebas terlalu besar, mata potong menjadi terlalu tipis dan mudah rusak. Pada pengasahan manual, kesalahan sudut bebas termasuk kesalahan yang cukup sering terjadi.

Pada material keras, sudut bebas harus cukup untuk menghindari gesekan, tetapi tidak boleh melemahkan bibir potong. Baja keras dan baja tahan karat membutuhkan tepi potong yang kuat karena gaya tekan dan panasnya relatif tinggi. Pada material lunak, sudut bebas yang cukup membantu mengurangi gesekan dan mencegah material menempel di belakang sisi potong. Di sini

terlihat bahwa sudut bebas bukan sekadar sudut tambahan, melainkan penentu apakah mata gurdi benar benar menyayat atau hanya menggosok dinding lubang. Bolat et al. (2023) menunjukkan bahwa geometri alat dan parameter penggurdian berpengaruh terhadap gaya tekan serta kekasaran permukaan pada proses penggurdian material komposit. Temuan ini memperkuat gagasan bahwa bentuk mata gurdi tidak dapat dipisahkan dari kualitas hasil. Pada lubang, kualitas permukaan terbentuk di daerah yang sulit dilihat langsung. Maka, pemilihan sudut menjadi salah satu cara mengendalikan proses sebelum kesalahan terlihat pada hasil akhir.

Pramanik dan Basak (2024) juga menunjukkan bahwa point angle, putaran spindel, dan gerak makan memengaruhi torsi, gaya tekan, burr, kualitas permukaan, serta kesalahan dimensi pada penggurdian komposit matriks aluminium. Dalam hasil mereka, torsi dan gaya tekan cenderung menurun ketika sudut ujung dan kecepatan meningkat, tetapi meningkat ketika gerak makan dinaikkan. Temuan ini dapat dipahami secara sederhana: sudut ujung yang sesuai membantu pembagian beban pemotongan, sedangkan gerak makan yang terlalu besar membuat mata gurdi harus membentuk geram lebih tebal. Pada aluminium, pemilihan sudut mata gurdi perlu mempertimbangkan sifat material yang relatif lunak dan mudah menempel pada alat potong. Mata gurdi dengan alur yang mendukung keluarnya geram sangat membantu. Jika geram tidak keluar lancar, aluminium dapat menumpuk pada sisi potong dan membentuk built up edge. Akibatnya, mata gurdi seakan kehilangan ketajaman, lubang menjadi kasar, dan ukuran dapat menyimpang. Penggunaan pelumas atau cutting fluid sering membantu mengurangi gejala ini.

Crăciun et al. (2024) meneliti gaya potong pada penggurdian aluminium 2024 T351 dan menunjukkan bahwa diameter mata gurdi serta gerak makan berhubungan dengan gaya tekan dan torsi. Walaupun penelitian itu lebih menekankan gaya potong daripada tabel sudut, hasilnya penting untuk menjelaskan bahwa pemilihan sudut tidak bekerja sendirian. Mata gurdi yang sudutnya tepat tetap dapat menghasilkan gaya tinggi bila diameter besar dan gerak makan terlalu agresif. Begitu pula sebaliknya, parameter yang ringan tidak selalu menyelamatkan mata gurdi yang geometri ujungnya keliru. Pada kuningan, sifat pemotongannya berbeda dari aluminium. Kuningan cenderung mudah dipotong, tetapi pada kondisi tertentu mata gurdi dapat terasa seperti tertarik masuk

terlalu cepat. Karena itu, sudut heliks yang terlalu besar atau sisi potong yang terlalu agresif perlu dihindari. Untuk pekerjaan umum, sudut ujung sekitar 118 derajat masih sering digunakan, tetapi operator perlu menjaga tekanan makan agar tidak terlalu berat. Jika benda kerja tipis, pencekaman dan alas pendukung menjadi semakin penting agar mata gurdi tidak menyambar saat tembus.

Tembaga memiliki kecenderungan menghasilkan geram liat. Geram seperti ini dapat menggulung dan menyumbat alur jika heliks kurang membantu. Sudut heliks yang lebih besar dapat membantu geram keluar, tetapi mata gurdi tetap perlu tajam. Mata gurdi tumpul pada tembaga sering membuat permukaan lubang menjadi kasar dan panas meningkat. Pada pekerjaan kecil, gejala ini terasa dari tuas makan yang menjadi berat meskipun materialnya tampak lunak. Baja karbon lunak biasanya menjadi bahan latihan yang cukup umum dalam pembelajaran mesin gurdi. Mata gurdi standar 118 derajat dapat digunakan sebagai pilihan awal. Namun, baja tetap membutuhkan perhatian pada pendinginan, gerak makan, dan ketajaman mata gurdi. Jika operator menekan terlalu ringan, mata gurdi hanya menggesek dan menimbulkan panas. Jika terlalu kuat, gaya tekan meningkat dan mata gurdi dapat cepat aus. Maka, sudut yang benar tetap harus ditemani pengaturan proses yang benar.

Baja tahan karat lebih menuntut kehati-hatian. Material ini ulet, dapat menimbulkan panas tinggi, dan pada kondisi tertentu mudah mengalami pengerasan permukaan akibat gesekan. Bila mata gurdi tumpul atau sudut ujung kurang sesuai, pahat dapat menggosok lebih banyak daripada menyayat. Setelah permukaan mengeras, proses berikutnya menjadi lebih berat. Sudut ujung lebih besar, mata gurdi tajam, gerak makan terkendali, dan pendingin yang sesuai menjadi kombinasi yang lebih aman. Besi tuang memiliki karakter geram yang cenderung pendek dan rapuh. Pada satu sisi, geram pendek lebih mudah keluar daripada geram liat panjang. Pada sisi lain, serpihan besi tuang dapat bersifat abrasif dan mempercepat keausan alat. Mata gurdi dengan sudut standar dapat digunakan untuk banyak pekerjaan besi tuang, tetapi perhatian perlu diberikan pada debu dan serpihan. Dalam beberapa kondisi, pemesianan besi tuang dilakukan relatif kering karena sifat materialnya, tetapi kebersihan area kerja dan perlindungan mata tetap penting.

Plastik dan bahan nonlogam membutuhkan pendekatan berbeda. Panas menjadi masalah besar karena sebagian plastik dapat melunak atau meleleh jika mata gurdi terlalu panas. Sudut ujung yang sesuai, putaran tidak berlebihan, dan gerak makan yang tidak terlalu kasar membantu menjaga tepi lubang tetap bersih. Pada plastik keras, risiko retak kecil di tepi lubang perlu diperhatikan. Pada plastik lunak, risiko lubang berbulu dan permukaan meleleh lebih sering muncul. Pemilihan sudut juga dipengaruhi oleh diameter mata gurdi. Mata gurdi kecil lebih mudah patah jika mendapat beban berlebihan. Pada ukuran kecil, kesalahan sudut, tekanan makan, atau pencekaman sering langsung terasa. Mata gurdi besar lebih kuat, tetapi memerlukan torsi dan gaya tekan lebih besar. Pada diameter besar, penggunaan lubang pendahulu atau pilot hole sering membantu mengurangi beban pada ujung mata gurdi, terutama pada bagian chisel edge.

Mata gurdi yang diasah ulang harus kembali mengikuti sudut yang sesuai dengan material. Pengasahan yang tidak seimbang dapat membuat satu bibir potong lebih panjang daripada yang lain. Jika hal ini terjadi, mata gurdi memotong berat sebelah dan lubang menjadi lebih besar dari diameter nominal. Kesalahan sudut ujung juga membuat mata gurdi sulit masuk tepat pada titik. Karena itu, pemilihan sudut berdasarkan material tidak berhenti pada saat membeli mata gurdi, tetapi berlanjut pada saat pengasahan ulang. Pengasahan manual membutuhkan latihan karena operator harus menjaga sudut ujung, sudut bebas, dan kesamaan kedua bibir potong secara bersamaan. Mata gurdi yang tampak tajam belum tentu benar. Ia mungkin tajam di satu sisi, tetapi tidak seimbang. Ia mungkin memiliki sudut bebas terlalu kecil sehingga menggesek. Ia mungkin memiliki sudut ujung tidak sesuai dengan material. Pemeriksaan menggunakan mal atau penera menjadi penting agar hasil pengasahan tidak hanya mengandalkan perkiraan mata.

Dalam konteks pembelajaran, pemilihan sudut mata gurdi dapat diajarkan melalui perbandingan langsung. Misalnya, dua mata gurdi digunakan pada pelat aluminium, satu dengan alur yang lebih sesuai dan satu lagi dengan geometri kurang cocok. Mahasiswa dapat mengamati perbedaan bentuk geram, suara mesin, suhu mata gurdi, dan permukaan lubang. Pengamatan sederhana seperti ini sering lebih mudah dipahami daripada langsung menghafal tabel. Pada pekerjaan produksi, pemilihan sudut yang tepat dapat menghemat waktu dan biaya. Mata gurdi

yang sesuai lebih tahan lama, lubang lebih konsisten, dan kebutuhan pengerjaan ulang lebih sedikit. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan sebagai integrasi antara peralatan, proses, dan strategi, termasuk pengendalian energi dan optimasi pemotongan. Jika gagasan ini dibawa ke proses gurdi, pemilihan sudut mata gurdi menjadi bagian dari efisiensi proses, bukan hanya urusan geometri alat.

Kualitas lubang hasil gurdi tidak hanya dilihat dari apakah lubang berhasil tembus. Diameter, kebulatan, kelurusan, kekasaran dinding, burr, dan posisi lubang sama pentingnya. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kualitas permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pada penggurdian, sifat alat potong tersebut mencakup sudut ujung, sudut heliks, sudut bebas, ketajaman, dan kondisi alur mata gurdi. Pemilihan sudut yang tidak sesuai sering menimbulkan tanda yang dapat dibaca. Bila mata gurdi cepat panas, kemungkinan sudut bebas kurang, putaran terlalu tinggi, atau pendinginan tidak cukup. Bila geram sulit keluar, sudut heliks mungkin kurang sesuai atau alur tersumbat. Bila lubang melebar, kedua bibir potong mungkin tidak sama panjang. Bila mata gurdi terasa tertarik masuk terlalu kuat, geometri ujung bisa terlalu agresif untuk material tersebut. Gejala seperti ini membantu operator melakukan koreksi.

Pemilihan sudut mata gurdi juga perlu memperhatikan apakah lubang akan menjadi lubang akhir atau lubang awal. Jika lubang hanya berfungsi sebagai persiapan untuk reaming, ukuran hasil gurdi tidak harus menjadi ukuran akhir, tetapi posisinya harus benar dan cukup lurus. Jika lubang akan langsung digunakan untuk baut bebas, kualitasnya harus cukup baik agar baut masuk tanpa memaksa. Jika lubang akan ditap, diameter bor inti harus tepat karena terlalu kecil membuat tap berat, sedangkan terlalu besar membuat ulir lemah. Pada proses tapping, sudut mata gurdi yang salah pada tahap awal dapat menimbulkan masalah lanjutan. Lubang yang miring akan membuat tap bekerja miring. Lubang yang permukaannya terlalu kasar dapat membuat proses pengetapan terasa berat. Lubang yang terlalu kecil meningkatkan risiko tap patah. Dengan kata lain, pemilihan sudut mata gurdi tidak hanya memengaruhi penggurdian, tetapi juga menentukan kelancaran proses setelahnya.

Untuk lubang buntu, pemilihan sudut ujung memengaruhi bentuk dasar lubang. Mata gurdi standar akan menghasilkan dasar berbentuk kerucut sesuai sudut ujungnya. Jika gambar kerja meminta kedalaman efektif tertentu, operator harus memperhitungkan bagian kerucut ini. Pada pekerjaan presisi, kedalaman lubang tidak boleh hanya dibaca dari bagian paling ujung, tetapi juga dari kedalaman silinder yang benar benar dapat dipakai. Pada lubang tembus, sudut ujung memengaruhi kondisi saat mata gurdi keluar dari sisi bawah benda kerja. Jika tekanan makan terlalu besar ketika hampir tembus, burr dapat terbentuk lebih besar. Pada material ulet seperti aluminium atau tembaga, burr ini sering cukup jelas. Sudut yang tepat membantu mengurangi masalah, tetapi kontrol gerak makan pada saat tembus tetap diperlukan. Operator sebaiknya mengurangi tekanan ketika ujung mata gurdi hampir keluar.

Dalam pekerjaan manual pada mesin gurdi meja, pemilihan sudut harus dipadukan dengan rasa tangan operator. Mesin gurdi meja sering tidak memiliki pengaturan gerak makan otomatis. Tekanan tuas bergantung pada operator. Mata gurdi dengan sudut yang kurang sesuai akan membuat operator cenderung menekan lebih kuat. Tindakan ini kadang memperparah keadaan karena gaya tekan naik, panas meningkat, dan lubang menjadi buruk. Maka, geometri yang sesuai membantu pekerjaan manual menjadi lebih terkendali. Pada mesin gurdi radial atau mesin produksi yang memiliki gerak makan otomatis, sudut mata gurdi tetap penting. Mesin dapat memberi gerak makan konsisten, tetapi tidak dapat mengubah sifat material. Jika mata gurdi tidak sesuai, mesin hanya akan mengulang kesalahan dengan lebih konsisten. Inilah alasan operator tetap perlu memilih alat potong sebelum mengandalkan pengaturan otomatis. Pemilihan sudut juga berkaitan dengan bahan mata gurdi. Mata gurdi high speed steel banyak digunakan untuk pekerjaan umum karena mudah diasah dan cukup tangguh. Mata gurdi kobalt lebih tahan panas dan cocok untuk material yang lebih sulit dipotong. Mata gurdi karbida lebih keras dan dapat bekerja pada kondisi tertentu dengan kecepatan lebih tinggi, tetapi lebih rapuh terhadap getaran. Sudut yang sesuai perlu dipadukan dengan bahan alat potong yang sesuai.

Getaran selama penggurdian dapat memperburuk kerja sudut mata gurdi. Mata gurdi yang sebenarnya sesuai dapat menghasilkan lubang buruk jika benda kerja tidak dicekam kuat

atau spindel memiliki kelonggaran. Benda kerja yang bergerak sedikit saja dapat membuat mata gurdi menyayat tidak simetris. Karena itu, sudut mata gurdi harus dibaca bersama pencekaman dan kondisi mesin. Geometri alat tidak dapat bekerja baik jika sistem mekanisnya tidak stabil. Pendingin juga memengaruhi hasil pemilihan sudut. Pada material yang mudah panas, pendingin membantu menjaga sisi potong tetap bekerja. Pada material yang mudah menempel, pelumas membantu mengurangi penumpukan material. Pada plastik, pendinginan dan pengaturan putaran membantu menghindari pelelehan. Sudut yang sesuai akan lebih efektif bila temperatur proses tetap terkendali. Dalam praktik bengkel, rekomendasi sudut sering menjadi titik awal, bukan keputusan akhir. Operator dapat mulai dari sudut umum sesuai tabel, lalu menyesuaikan berdasarkan gejala. Jika geram tidak keluar, alur dan teknik penggurdian perlu diperbaiki. Jika ujung cepat aus, sudut ujung atau bahan mata gurdi perlu ditinjau. Jika lubang selalu melebar, pengasahan dan keseimbangan bibir potong perlu diperiksa. Pendekatan ini membuat tabel menjadi alat bantu berpikir, bukan aturan mati.

E. Parameter Pemotongan Proses Gurdi

Parameter pemotongan proses gurdi merupakan dasar untuk mengendalikan bagaimana mata gurdi masuk ke benda kerja, membentuk geram, menghasilkan lubang, dan menjaga kualitas permukaan bagian dalam lubang. Walaupun proses gurdi terlihat lebih sederhana dibandingkan bubut atau frais, pengaturannya tetap membutuhkan perhatian. Mata gurdi tidak hanya berputar, tetapi juga bergerak masuk ke dalam material sambil membawa geram keluar melalui alur heliks. Bila parameter dipilih sembarangan, lubang dapat menjadi kasar, tidak lurus, terlalu besar, menghasilkan burr berlebih, atau membuat mata gurdi cepat tumpul. Dalam proses penggurdian, parameter utama yang perlu dipahami adalah kecepatan potong, putaran spindel, gerak makan, dan kedalaman potong. Keempatnya tidak berdiri sendiri. Kecepatan potong menentukan kecepatan relatif sisi potong terhadap benda kerja. Putaran spindel menerjemahkan kecepatan potong ke dalam jumlah putaran per menit. Gerak makan menentukan seberapa jauh mata gurdi maju setiap satu putaran. Kedalaman potong menentukan ukuran bidang pemotongan yang dibentuk oleh diameter mata gurdi dan kedalaman lubang yang dikerjakan.

Mesin gurdi bekerja dengan prinsip alat potong berputar dan bergerak aksial menuju benda kerja. Ivanov, Evtuhov, Dehtiarov, dan Trojanowska (2025) menjelaskan bahwa drilling merupakan salah satu metode pemesinan dasar untuk menghasilkan lubang, memperbesar lubang, atau menyiapkan proses lanjutan. Berbeda dari mesin bubut yang banyak berhubungan dengan benda kerja berputar, pada mesin gurdi pusat perhatian berada pada mata gurdi yang berputar dan masuk ke material. Karena itu, diameter mata gurdi menjadi unsur penting dalam perhitungan parameter. Kecepatan potong atau cutting speed adalah kecepatan gerak titik potong pada keliling mata gurdi terhadap benda kerja. Satuan yang umum digunakan adalah meter per menit. Dalam penggurdian, kecepatan potong dipengaruhi oleh diameter mata gurdi dan putaran spindel. Rumus yang sering digunakan adalah $v = \pi \times d \times n / 1000$. Dalam rumus ini, v adalah kecepatan potong dalam meter per menit, d adalah diameter mata gurdi dalam milimeter, dan n adalah putaran spindel dalam putaran per menit.

Rumus tersebut menunjukkan hubungan yang sangat penting. Pada kecepatan potong yang sama, mata gurdi berdiameter kecil membutuhkan putaran spindel lebih tinggi. Mata gurdi berdiameter besar membutuhkan putaran lebih rendah. Sebagai contoh, mata gurdi 5 mm dapat diputar lebih cepat dibandingkan mata gurdi 20 mm pada material yang sama. Jika diameter besar dipaksa berputar terlalu tinggi, panas meningkat cepat, torsi menjadi berat, dan mata gurdi mudah aus. Pemilihan kecepatan potong perlu memperhatikan material benda kerja. Aluminium biasanya dapat digurdi dengan kecepatan lebih tinggi dibandingkan baja karbon. Baja tahan karat membutuhkan kecepatan lebih hati-hati karena panas mudah meningkat dan material dapat menjadi lebih sulit dipotong bila terjadi gesekan berlebihan. Besi tuang memiliki karakter geram pendek, tetapi sifat abrasifnya dapat mempercepat keausan. Plastik perlu perlakuan berbeda karena panas dapat membuat tepi lubang meleleh atau berbulu. Pada pekerjaan bengkel dasar, tabel rekomendasi kecepatan potong sering digunakan sebagai nilai awal. Namun, tabel bukan pengganti pengamatan. Bila suara mesin terlalu kasar, geram berubah warna, atau mata gurdi terasa sangat panas, parameter perlu dievaluasi. Bolat et al. (2023) menunjukkan bahwa pada proses penggurdian, variasi cutting speed, feed rate, diameter mata gurdi, dan geometri alat dapat memengaruhi gaya tekan serta kekasaran permukaan. Ini

memperlihatkan bahwa kecepatan potong tidak hanya memengaruhi waktu kerja, tetapi juga kualitas hasil.

Putaran spindel atau spindle speed adalah jumlah putaran mata gurdi dalam satu menit. Satuan yang digunakan adalah rpm. Putaran spindel dihitung dari kecepatan potong yang dipilih dan diameter mata gurdi. Rumusnya dapat ditulis sebagai $n = 1000 \times v / (\pi \times d)$. Dengan rumus ini, operator dapat menentukan putaran yang mendekati kebutuhan proses, lalu menyesuaikannya dengan pilihan putaran yang tersedia pada mesin. Contoh sederhana dapat membantu memperjelas hubungan ini. Jika sebuah mata gurdi berdiameter 10 mm digunakan untuk menggurdi baja lunak dengan kecepatan potong 25 meter per menit, maka putaran spindel dihitung dengan $n = 1000 \times 25 / (\pi \times 10)$. Hasilnya sekitar 796 rpm. Dalam praktik, operator memilih putaran terdekat yang tersedia pada mesin, misalnya 800 rpm. Bila diameter gurdi dinaikkan menjadi 20 mm dengan kecepatan potong yang sama, putaran menjadi sekitar 398 rpm. Diameter naik dua kali, putaran turun sekitar setengahnya.

Gerak makan atau feed pada proses gurdi menunjukkan jarak masuk mata gurdi ke dalam benda kerja setiap satu putaran. Satuannya biasanya milimeter per putaran. Pada mesin gurdi meja, gerak makan sering dikendalikan manual melalui tuas spindel. Karena itu, kekuatan tangan operator sangat memengaruhi proses. Pada mesin gurdi radial atau mesin yang lebih besar, gerak makan dapat diatur otomatis sehingga gerak masuk lebih seragam. Gerak makan terlalu kecil membuat mata gurdi lebih banyak menggesek daripada memotong. Gesekan ini menghasilkan panas, membuat bunyi melengking, dan mempercepat keausan. Gerak makan terlalu besar membuat geram terlalu tebal, gaya tekan meningkat, dan mata gurdi dapat patah, terutama pada diameter kecil. Pilihan gerak makan yang baik biasanya terasa dari proses yang stabil. Geram keluar teratur, tuas tidak terasa berat berlebihan, dan suara pemotongan tidak kasar.

Pramanik dan Basak (2024) menunjukkan bahwa point angle, putaran spindel, dan gerak makan memengaruhi torsi, gaya tekan, burr, kualitas permukaan, serta kesalahan dimensi pada proses penggurdian komposit matriks aluminium. Mereka juga melaporkan bahwa torsi dan gaya tekan meningkat ketika feed rate dinaikkan. Temuan ini sejalan dengan pengalaman bengkel. Semakin besar gerak makan, semakin besar tebal geram yang harus

dipotong oleh mata gurdi. Kedalaman potong dalam proses gurdi memiliki dua pengertian yang perlu dibedakan. Dalam pengertian bidang pemotongan, kedalaman potong sering berkaitan dengan setengah diameter mata gurdi, karena mata gurdi membentuk lubang dari pusat sampai kelilingnya. Dalam pengertian pekerjaan lubang, kedalaman juga dapat berarti seberapa jauh mata gurdi masuk ke benda kerja. Kedua makna ini sama sama penting. Diameter menentukan beban pemotongan, sedangkan kedalaman lubang menentukan lamanya proses dan kesulitan pembuangan geram.

Pada lubang dangkal, geram biasanya lebih mudah keluar. Pada lubang dalam, geram harus melewati alur heliks dalam jarak yang lebih panjang. Jika geram tidak keluar, ia dapat tersangkut di dalam lubang, menambah gesekan, menaikkan panas, dan membuat mata gurdi macet. Karena itu, penggurdian lubang dalam sering dilakukan dengan teknik peck drilling. Mata gurdi dimasukkan beberapa saat, diangkat untuk membuang geram, lalu dimasukkan kembali. Pada lubang tembus, operator perlu mengurangi tekanan makan ketika mata gurdi hampir keluar dari sisi bawah benda kerja. Saat ujung mata gurdi menembus, gaya pemotongan berubah secara tiba tiba. Bila tekanan tetap besar, mata gurdi dapat menyambar, burr menjadi besar, dan benda kerja yang kurang kuat dicekam dapat terangkat. Pada pelat tipis, gejala ini sering terasa jelas. Lubang bagian atas tampak baik, tetapi sisi bawah penuh sisa tajam.

Pada lubang buntu, pengendalian kedalaman menjadi lebih penting. Operator perlu memperhitungkan bentuk kerucut pada ujung mata gurdi. Jika gambar kerja meminta kedalaman silindris tertentu, kedalaman total pengeboran harus memperhatikan ujung kerucut tersebut. Tanpa perhitungan ini, lubang dapat terlihat cukup dalam, tetapi bagian silindris efektifnya belum memenuhi ukuran yang diperlukan. Hal ini penting untuk lubang dudukan pin, lubang ulir, atau lubang pasangan komponen. Crăciun, Teodor, Baroiu, Păunoiu, dan Moroşanu (2024) menunjukkan bahwa diameter mata gurdi dan gerak makan berhubungan dengan gaya aksial serta torsi ketika menggurdi aluminium 2024 T351. Hasil seperti ini membantu menjelaskan mengapa diameter tidak boleh dilihat hanya sebagai ukuran lubang. Diameter yang lebih besar berarti sisi potong lebih panjang, bidang potong lebih luas, dan beban mesin lebih tinggi. Karena itu, diameter besar sering

membutuhkan putaran lebih rendah dan gerak makan yang lebih terkendali.

Kecepatan potong, putaran spindel, dan gerak makan juga berhubungan dengan kualitas permukaan lubang. Trinh (2024) menegaskan bahwa kualitas kekasaran permukaan dalam proses pemesian dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Dalam proses gurdi, permukaan lubang terbentuk di dalam ruang sempit, sehingga kesalahan sering tidak langsung terlihat sampai mata gurdi diangkat. Lubang yang kasar biasanya terasa ketika baut atau pin dimasukkan, atau ketika permukaannya diperiksa setelah proses selesai. Mata gurdi yang tumpul membuat parameter yang semula benar menjadi terasa keliru. Putaran yang biasanya aman dapat menghasilkan panas lebih tinggi. Gerak makan yang biasa dipakai menjadi terasa berat. Lubang yang biasanya bersih mulai menghasilkan burr lebih besar. Maka, ketika hasil penggurdian memburuk, operator tidak boleh hanya mengubah angka putaran atau gerak makan. Kondisi mata gurdi perlu diperiksa terlebih dahulu.

Pencekaman benda kerja ikut menentukan keberhasilan parameter pemotongan. Bila benda kerja tidak terjepit kuat, gerak makan yang kecil pun dapat menimbulkan getaran atau pergeseran. Pada benda kerja tipis, tekanan mata gurdi dapat melengkungkan benda kerja. Pada benda kerja silindris, bentuknya dapat bergeser jika tidak memakai blok V atau penopang yang sesuai. Liu, Wang, Li, Bo, Liu, dan Wang (2022) menjelaskan bahwa teknologi pencekaman berperan penting dalam menjaga kemampuan proses dan kualitas pemesian, terutama ketika benda kerja mudah berubah bentuk. Cairan pendingin atau cutting fluid membantu menjaga temperatur, mengurangi gesekan, dan membantu geram keluar dari lubang. Pada baja, pendingin dapat memperpanjang umur mata gurdi. Pada aluminium, pelumas mengurangi kecenderungan material menempel. Pada plastik, pengaturan panas menjadi lebih penting agar lubang tidak meleleh. Wang et al. (2023) membahas pemesian berkelanjutan sebagai hubungan antara peralatan, proses, strategi, energi, dan penggunaan cairan pemotongan. Dalam proses gurdi, penggunaan pendingin yang tepat membantu kualitas sekaligus efisiensi.

Pemilihan parameter sebaiknya mengikuti urutan berpikir yang jelas. Pertama, kenali material benda kerja. Kedua, tentukan diameter lubang dan pilih mata gurdi. Ketiga, tentukan kecepatan

potong awal dari tabel rekomendasi. Keempat, hitung putaran spindel. Kelima, pilih gerak makan sesuai diameter dan kondisi mesin. Keenam, tentukan strategi penggurdian, apakah langsung, bertahap, memakai pilot hole, atau memakai peck drilling. Ketujuh, periksa hasil lubang dan lakukan koreksi bila diperlukan. Pada mata gurdi besar, lubang pendahulu atau pilot hole sering membantu. Mata gurdi besar memiliki penyayat lintang yang lebih lebar dan membutuhkan gaya tekan lebih besar di bagian pusat. Dengan membuat lubang pendahulu, beban awal berkurang dan mata gurdi besar lebih mudah mengikuti posisi pusat. Cara ini juga membantu mengurangi kemungkinan mata gurdi meleset dari titik yang sudah diberi tanda penitik.

Gerak makan manual membutuhkan kepekaan operator. Pada mesin gurdi meja, tuas spindel memberi umpan balik langsung. Jika tuas terasa terlalu ringan tetapi geram tidak keluar, mata gurdi mungkin hanya menggesek. Jika tuas terasa terlalu berat, gerak makan mungkin terlalu besar atau mata gurdi tumpul. Operator yang berpengalaman biasanya membaca kombinasi suara, geram, panas, dan rasa tuas. Kepekaan ini tidak menggantikan rumus, tetapi melengkapi rumus. Pada mesin gurdi radial, gerak makan otomatis dapat membuat proses lebih seragam. Namun, otomatis bukan berarti bebas kesalahan. Nilai gerak makan tetap harus dipilih sesuai material dan diameter. Jika nilai terlalu besar, mesin akan memberi tekanan berlebih secara konsisten. Jika terlalu kecil, proses menjadi lama dan gesekan meningkat. Pengaturan otomatis justru membutuhkan pemahaman parameter yang lebih baik karena kesalahan dapat berulang tanpa terasa.

Kesalahan umum pertama adalah memakai putaran terlalu tinggi pada diameter besar. Gejalanya biasanya panas meningkat, mata gurdi cepat tumpul, dan geram berubah warna. Kesalahan kedua adalah menekan tuas terlalu kuat pada mata gurdi kecil. Akibatnya, mata gurdi mudah patah. Kesalahan ketiga adalah tidak mengangkat mata gurdi pada lubang dalam. Geram tersumbat, suara mesin berubah, lalu mata gurdi macet. Kesalahan keempat adalah mengabaikan pendingin pada material yang membutuhkan pelumasan. Parameter pemotongan juga menentukan produktivitas. Putaran dan gerak makan yang terlalu rendah membuat pekerjaan lama. Putaran dan gerak makan yang terlalu tinggi membuat alat cepat rusak dan benda kerja berisiko gagal. Pilihan terbaik tidak selalu yang paling cepat. Dalam banyak pekerjaan bengkel, pilihan

terbaik adalah yang stabil, aman, dan dapat menghasilkan lubang yang sama berulang kali.

Pada pekerjaan presisi, penggurdian sering tidak dijadikan proses akhir. Lubang hasil gurdi dapat dilanjutkan dengan reaming untuk memperoleh diameter lebih teliti, atau tapping untuk membuat ulir dalam. Meski begitu, parameter penggurdian awal tetap penting. Lubang awal yang miring akan membuat proses reaming atau tapping ikut bermasalah. Lubang awal yang terlalu kasar dapat memperberat proses lanjutan. Jika lubang akan ditap, diameter mata gurdi harus mengikuti ukuran bor inti. Parameter pemotongannya pun perlu dipilih agar lubang tidak mengeras, tidak terlalu kasar, dan tidak menghasilkan burr berlebihan. Lubang yang terlalu kecil membuat tap bekerja berat dan mudah patah. Lubang yang terlalu besar membuat ulir menjadi dangkal. Dalam konteks ini, parameter gurdi tidak hanya menentukan lubang, tetapi juga menentukan kekuatan sambungan ulir.

Pada material komposit atau material modern, parameter gurdi menjadi lebih sensitif. Bolat et al. (2023) menjelaskan bahwa penggurdian komposit dapat menghasilkan masalah seperti gaya tekan, kekasaran permukaan, dan delaminasi bila parameter serta geometri alat tidak sesuai. Walaupun pembelajaran dasar lebih banyak memakai logam umum, temuan ini memberi pelajaran penting. Penggurdian adalah proses yang tampak sederhana, tetapi respons material dapat berbeda jauh. Dalam pembelajaran mesin gurdi, parameter sebaiknya diajarkan melalui kombinasi rumus, tabel, dan praktik. Rumus membantu menghitung putaran. Tabel membantu memilih nilai awal. Praktik membantu membaca gejala nyata. Jika hanya rumus yang diajarkan, kita dapat menghafal angka tanpa memahami suara mesin. Jika hanya praktik yang diajarkan, operator mungkin terbiasa menebak tanpa dasar perhitungan. Keduanya perlu bertemu. Parameter pemotongan proses gurdi membentuk hubungan langsung antara teori dan benda kerja. Kecepatan potong menjelaskan hubungan diameter dan panas. Putaran spindel mengubah perhitungan menjadi setelan mesin. Gerak makan menentukan tebal geram dan gaya tekan. Kedalaman lubang menentukan strategi pembuangan geram. Ketika semua bagian dipahami, proses gurdi menjadi lebih terkendali, bukan sekadar menekan tuas sampai lubang tembus.

F. Pengasahan Mata Gurdi dengan Tool Grinder

Pengasahan mata gurdi dengan tool grinder merupakan tahap penting dalam perawatan alat potong pada mesin gurdi. Mata gurdi yang sudah tumpul tidak hanya membuat proses penggurdian menjadi berat, tetapi juga dapat merusak kualitas lubang. Lubang bisa membesar, permukaannya kasar, geram sulit keluar, dan gaya tekan menjadi lebih tinggi. Karena itu, pengasahan tidak boleh dipahami sebagai pekerjaan tambahan setelah alat rusak, melainkan sebagai bagian dari pengendalian mutu proses penggurdian. Mata gurdi bekerja dengan dua bibir potong yang harus menyayat secara seimbang. Bila salah satu bibir lebih panjang atau sudutnya berbeda, beban pemotongan menjadi tidak merata. Mata gurdi dapat melenceng dari titik pusat, lubang menjadi lebih besar dari diameter nominal, dan sisi potong cepat aus. Kondisi seperti ini sering terjadi ketika mata gurdi diasah secara kasar tanpa alat bantu penyetelan. Di sinilah tool grinder memiliki peran yang lebih aman dan lebih terukur dibandingkan pengasahan tangan biasa.

Tool grinder atau mesin gerinda pahat digunakan untuk membentuk kembali sudut potong mata gurdi secara lebih presisi. Mesin ini memungkinkan operator menyetel posisi mata gurdi berdasarkan diameter, panjang, sudut ujung, dan sudut bebas yang diinginkan. Pengasahan tidak hanya dilakukan dengan mendekatkan mata gurdi ke batu gerinda, tetapi dengan mengatur kedudukan, posisi sumbu, serta kemiringan alat terhadap permukaan gerinda. Hasilnya lebih konsisten, terutama untuk mata gurdi yang harus dipakai berulang pada pekerjaan dengan ukuran lubang yang sama. Dalam pekerjaan bengkel, perbedaan antara mata gurdi tajam dan tumpul dapat dirasakan langsung melalui tuas makan mesin gurdi. Mata gurdi tajam akan masuk dengan gerak makan yang stabil dan menghasilkan geram yang relatif teratur. Mata gurdi tumpul membutuhkan tekanan lebih besar, mengeluarkan bunyi kasar, dan sering menimbulkan panas berlebih. Sedlak, Zouhar, Kolomy, Slany, dan Necesanek (2023) menjelaskan bahwa penggurdian membutuhkan pembuangan geram yang baik dari daerah potong, karena bentuk geram yang tidak menguntungkan dapat menurunkan kualitas lubang dan meningkatkan panas akibat kontak geram dengan mata gurdi.

Pengasahan dengan tool grinder berhubungan langsung dengan geometri mata gurdi. Bagian yang paling perlu diperhatikan ialah sudut ujung atau point angle, sudut bebas atau

clearance angle, bibir potong atau cutting lip, dan penyayat lintang atau chisel edge. Sudut ujung menentukan cara mata gurdi masuk ke material. Sudut bebas menentukan apakah mata potong benar benar menyayat atau justru menggesek dinding lubang. Bibir potong menentukan keseimbangan penyayatan. Penyayat lintang menentukan besarnya gaya tekan awal di pusat lubang. Pada mata gurdi standar, sudut ujung yang umum digunakan sekitar 118 derajat untuk baja lunak, kuningan, dan material umum. Untuk material lebih keras, sudut ujung yang lebih besar dapat memberi ketahanan lebih baik pada ujung potong. Namun, pengasahan ulang harus tetap mengikuti kebutuhan material. Mata gurdi untuk baja tahan karat, aluminium, kuningan, plastik, dan besi tuang tidak selalu ideal bila diasah dengan geometri yang sama. Pemilihan sudut sudah dibahas pada subbab sebelumnya, sedangkan bagian ini menekankan bagaimana sudut itu dibentuk kembali secara lebih tepat.

Keuntungan utama tool grinder adalah ketepatan sudut. Ketika mata gurdi diasah secara manual, operator harus mengandalkan mata, rasa tangan, dan pengalaman. Pada tool grinder, sudut dapat disetel lebih jelas. Pengaturan ini membantu menghasilkan dua bibir potong yang sama panjang dan memiliki sudut yang sama besar. Prinsip ini sangat penting karena kedua bibir potong harus bekerja bersama. Bila hanya satu sisi yang memotong, mata gurdi akan dibebani sepihak dan cepat rusak. Keuntungan berikutnya adalah kehilangan bahan perkakas yang lebih kecil. Pengasahan yang tidak terkontrol sering membuang terlalu banyak material dari ujung mata gurdi. Akibatnya, panjang mata gurdi cepat berkurang dan umur pakai menjadi pendek. Dengan tool grinder, pengasahan dapat dilakukan secukupnya pada bagian yang memang perlu diperbaiki. Mata gurdi tidak harus dipendekkan secara berlebihan hanya karena sudutnya salah dibentuk.

Pengasahan yang baik juga membantu menjaga kualitas lubang. Bolat et al. (2023) menunjukkan bahwa parameter penggurdian dan geometri alat berpengaruh terhadap gaya tekan serta kekasaran permukaan pada proses penggurdian. Temuan ini dapat diterapkan dalam pembahasan pengasahan karena geometri alat yang berubah akibat aus atau salah asah akan mengubah cara mata gurdi memotong. Bila geometri kembali benar, proses penggurdian menjadi lebih ringan dan kualitas lubang lebih mudah

dijaga. Sebelum pengasahan dilakukan, mata gurdi perlu diperiksa terlebih dahulu. Pemeriksaan awal mencakup kondisi bibir potong, keausan ujung, retak kecil, perubahan warna akibat panas, dan kerusakan pada alur heliks. Mata gurdi yang hanya tumpul dapat diasah ulang. Mata gurdi yang retak, bengkok, atau bagian alurnya rusak berat sebaiknya tidak dipaksakan. Pengasahan tidak dapat memperbaiki semua kerusakan. Ia hanya mengembalikan geometri potong pada alat yang masih layak pakai.

Kebersihan mata gurdi juga perlu diperhatikan. Sisa minyak, geram halus, atau kerak pada alur dapat mengganggu penjepitan diudukan tool grinder. Jika mata gurdi tidak terpasang lurus pada dudukan, sudut yang terbentuk bisa menyimpang walaupun setelan mesin tampak benar. Karena itu, mata gurdi sebaiknya dibersihkan sebelum diasah. Langkah sederhana ini membantu mencegah kesalahan yang tidak perlu. Batu gerinda pada tool grinder harus sesuai dengan bahan mata gurdi. Mata gurdi high speed steel umumnya diasah dengan batu gerinda aluminium oksida. Untuk alat potong karbida, batu gerinda yang lebih sesuai seperti silikon karbida atau roda berlian dapat digunakan, tergantung perlengkapan bengkel. Pemilihan roda gerinda yang salah dapat memperlambat proses, membuat panas berlebih, atau merusak tepi potong. Jadi, mesin yang baik tetap membutuhkan roda gerinda yang tepat.

Kondisi batu gerinda perlu diperiksa sebelum digunakan. Permukaan batu harus rata, bersih, dan tidak bergetar. Batu yang tidak rata akan menghasilkan permukaan asah yang buruk. Batu yang tersumbat oleh serpihan logam dapat menghasilkan panas lebih tinggi. Bila perlu, batu gerinda didresing terlebih dahulu agar permukaannya kembali tajam dan rata. Dalam pengasahan alat potong, batu gerinda yang baik sama pentingnya dengan setelan sudut. Penyetelan dudukan pada tool grinder harus mengikuti diameter dan panjang mata gurdi. Mata gurdi kecil membutuhkan perhatian lebih karena bagian ujungnya mudah panas dan mudah berubah bentuk. Mata gurdi besar lebih kuat, tetapi membutuhkan pengasahan yang lebih rata karena luas bidang potongnya besar. Bila setelan dudukan tidak sesuai ukuran, sudut potong dapat terbentuk tidak seimbang.

Pada saat mengasah, tekanan terhadap batu gerinda sebaiknya ringan dan terkendali. Menekan terlalu kuat tidak membuat pengasahan lebih baik. Tekanan berlebihan justru

menimbulkan panas tinggi, mempercepat ausnya batu gerinda, dan dapat mengubah warna ujung mata gurdi. Ujung yang berubah warna menjadi kebiruan biasanya menunjukkan panas berlebih. Pada mata gurdi HSS, panas seperti ini dapat menurunkan kekerasan dan mengurangi kemampuan potong. Pendinginan menjadi bagian penting selama pengasahan. Mata gurdi perlu dicelupkan ke cairan pendingin secara berkala agar temperatur tidak naik berlebihan. Walaupun tool grinder lebih terkontrol dibandingkan pengasahan manual, panas tetap dapat muncul pada titik kontak dengan batu gerinda. Jika pengasahan dilakukan kering, operator harus sangat hati-hati. Mata gurdi tidak boleh dibiarkan panas melebihi batas aman karena dapat menyebabkan hangus, retak halus, atau kehilangan kekerasan.

Bibir potong pertama diasah dengan mengikuti setelan sudut yang sudah ditentukan. Setelah itu, mata gurdi diputar 180 derajat untuk mengasah bibir potong kedua. Pemutaran ini harus tepat. Jika posisinya tidak benar, bibir kedua tidak akan sama dengan bibir pertama. Perbedaan kecil saja dapat menyebabkan mata gurdi menyayat berat sebelah. Dalam proses penggurdian, kesalahan kecil pada ujung alat sering berubah menjadi lubang yang tidak sesuai ukuran. Kesamaan panjang bibir potong adalah syarat dasar hasil pengasahan. Kedua bibir harus bertemu pada titik pusat yang benar. Jika satu bibir lebih panjang, titik pusat bergeser. Mata gurdi akan berputar dengan pusat geometris yang tidak sama dengan pusat pemotongan. Akibatnya, lubang dapat lebih besar dari diameter mata gurdi. Pada pekerjaan presisi, kesalahan ini sulit diterima karena lubang tidak lagi sesuai dengan toleransi.

Sudut bebas juga perlu dibentuk dengan hati-hati. Sudut bebas terlalu kecil membuat mata gurdi menggesek dinding lubang. Penggurdian menjadi berat, panas meningkat, dan operator perlu memberi tekanan lebih besar. Sudut bebas terlalu besar membuat bibir potong menjadi lemah dan mudah tersangkut. Pada diameter kecil, kesalahan ini dapat langsung menyebabkan patah. Karena itu, sudut bebas bukan sekadar pelengkap, melainkan bagian penting dari kemampuan potong. Sedlak et al. (2023) menekankan bahwa modifikasi geometri gurdi, termasuk sudut ujung dan sudut bebas, menjadi bagian dari solusi untuk memperoleh pemesinan yang lebih baik pada baja tahan karat austenitik. Dalam konteks pengasahan, temuan ini mengingatkan bahwa mengembalikan geometri mata gurdi bukan hanya urusan

ketajaman. Sudut yang benar membantu mata gurdi memotong, membawa geram, dan mengurangi beban yang tidak perlu.

Pengasahan dengan tool grinder juga membantu menjaga penyayat lintang. Penyayat lintang berada di pusat ujung mata gurdi dan berperan besar terhadap gaya tekan awal. Bagian ini tidak menyayat seperti bibir utama, tetapi lebih banyak mendorong material. Bila bentuknya terlalu lebar atau tidak seimbang, gaya tekan meningkat. Beberapa pengasahan khusus dapat mengoreksi bagian ini agar mata gurdi lebih mudah masuk ke benda kerja. Pada penggurdian diameter besar, penyayat lintang yang tidak baik membuat operator harus menekan tuas makan lebih kuat. Tekanan ini dapat membebani mesin, benda kerja, dan alat cekam. Pada mesin gurdi meja, tekanan tangan operator menjadi sangat menentukan. Jika mata gurdi tidak diasah baik, operator mungkin mengira material terlalu keras, padahal masalahnya ada pada geometri ujung mata gurdi.

Kualitas lubang setelah pengasahan dapat diamati dari geram yang keluar. Mata gurdi yang diasah baik menghasilkan geram lebih seimbang dari kedua alur. Jika geram hanya dominan dari satu sisi, ada kemungkinan salah satu bibir potong bekerja lebih besar. Pada material lunak, geram yang tersumbat juga dapat menandakan alur kotor, sudut kurang sesuai, atau mata gurdi masih tumpul. Pengamatan geram membantu operator menilai hasil pengasahan secara praktis. Selain geram, suara pemotongan juga memberi petunjuk. Mata gurdi yang tajam dan seimbang biasanya menghasilkan suara lebih stabil. Suara melengking, bergetar, atau terputus putus dapat menunjukkan gesekan, pencekaman kurang baik, atau geometri mata gurdi belum benar. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kekasaran permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Dalam proses gurdi, sifat alat potong tersebut sangat dipengaruhi oleh hasil pengasahan.

Pada pengasahan mata gurdi untuk baja lunak, sudut standar sering cukup. Operator dapat menyetel sudut ujung sekitar 118 derajat, lalu memeriksa kesamaan bibir potong dan sudut bebas. Untuk baja tahan karat atau material lebih keras, sudut ujung lebih besar dapat dipertimbangkan sesuai kebutuhan. Pada aluminium, perhatian lebih besar diberikan pada ketajaman sisi potong dan kemampuan alur membawa geram. Pada plastik, panas akibat pengasahan dan pemakaian perlu lebih hati-hati karena lubang

dapat meleleh jika proses tidak terkendali. Pengasahan dengan tool grinder memberi keuntungan pada pekerjaan berulang. Misalnya, bengkel harus membuat banyak lubang diameter 10 mm pada pelat baja. Jika mata gurdi mulai tumpul, pengasahan manual yang tidak konsisten dapat membuat diameter lubang berubah dari satu benda ke benda berikutnya. Dengan tool grinder, mata gurdi dapat diasah lebih seragam sehingga kualitas produksi lebih mudah dipertahankan. Ini penting untuk pekerjaan yang mengandalkan pengulangan ukuran.

Penggunaan tool grinder juga membantu mengurangi ketergantungan pada pengalaman tangan semata. Pengasahan manual tetap penting untuk kondisi tertentu, tetapi membutuhkan latihan panjang. Pada operator pemula, kesalahan sudut sering terjadi karena mata gurdi diputar terlalu banyak, ditekan terlalu kuat, atau tidak didinginkan cukup. Mesin gerinda pahat memberi bantuan mekanis agar posisi dan sudut lebih terjaga. Pengalaman tetap diperlukan, tetapi risiko kesalahan dapat dikurangi. Meski lebih akurat, tool grinder bukan mesin yang bekerja sendiri tanpa pengetahuan operator. Operator tetap harus memahami sudut apa yang dibutuhkan, bagaimana mata gurdi dipasang, kapan harus mendinginkan, dan bagaimana memeriksa hasilnya. Mesin hanya membantu menjaga gerak dan posisi. Keputusan teknis tetap berada pada operator. Jika sudut yang disetel salah, hasil pengasahan tetap salah meskipun dilakukan dengan mesin yang baik.

Keselamatan kerja pada pengasahan harus diperhatikan. Batu gerinda berputar cepat dan dapat melempar serpihan halus. Operator perlu menggunakan kaca mata pelindung, menjaga jarak aman, dan tidak memakai sarung tangan longgar yang dapat tersangkut. Penutup batu gerinda harus terpasang. Dudukan alat perlu dikunci kuat. Mata gurdi juga harus dipegang atau dijepit dengan benar agar tidak terlempar saat menyentuh batu gerinda. Pemeriksaan batu gerinda sebelum mesin dijalankan termasuk bagian keselamatan. Batu yang retak tidak boleh digunakan. Getaran tidak normal harus segera dihentikan. Permukaan batu yang aus tidak merata perlu didresing. Dalam pekerjaan pengasahan, kecelakaan sering terjadi bukan karena prosesnya rumit, tetapi karena pemeriksaan awal diabaikan. Mesin yang terlihat biasa saja tetap menyimpan risiko bila batu gerinda berputar dalam kondisi buruk.

Setelah pengasahan selesai, hasilnya perlu diperiksa menggunakan mal atau penera. Pemeriksaan ini mencakup sudut pucuk, sudut bebas, panjang bibir potong, dan posisi penyayat lintang. Pengamatan mata saja sering tidak cukup. Mata gurdi bisa tampak tajam, tetapi dua bibirnya tidak sama panjang. Bila langsung digunakan, kesalahan baru terlihat setelah lubang dibuat. Pemeriksaan dengan penera mencegah kesalahan itu masuk ke benda kerja. Pengujian sederhana dapat dilakukan pada benda kerja percobaan. Mata gurdi yang baru diasah digunakan untuk membuat lubang pada material sejenis. Operator mengamati apakah mata gurdi masuk tepat pada titik, apakah geram keluar dari dua alur secara relatif seimbang, apakah suara stabil, dan apakah diameter lubang sesuai. Uji ini tidak selalu diperlukan untuk pekerjaan kasar, tetapi berguna pada pekerjaan presisi atau setelah pengasahan mata gurdi besar.

Pengasahan ulang juga perlu mempertimbangkan umur alat. Mata gurdi yang terlalu sering diasah akan semakin pendek. Bagian alur yang tersisa mungkin tidak lagi cukup untuk membuang geram pada lubang dalam. Tangkai mungkin masih panjang, tetapi bagian kerja sudah berkurang. Dalam kondisi seperti itu, mata gurdi sebaiknya dipakai untuk lubang dangkal atau diganti dengan yang baru. Pengasahan bukan berarti alat dapat dipakai tanpa batas. Pengaruh pengasahan terhadap gaya tekan dan torsi tidak boleh diabaikan. Crăciun, Teodor, Baroiu, Păunoiu, dan Moroșanu (2024) menunjukkan bahwa diameter mata gurdi dan gerak makan berhubungan dengan gaya aksial serta torsi saat menggurdi aluminium 2024 T351. Mata gurdi yang tumpul atau salah asah dapat membuat gaya tersebut terasa lebih besar. Mesin mungkin masih mampu berputar, tetapi beban proses meningkat dan kualitas lubang menurun.

Pramanik dan Basak (2024) memperlihatkan bahwa masukan proses seperti sudut ujung, putaran spindel, dan gerak makan memengaruhi kualitas lubang pada penggurdian komposit matriks aluminium. Hubungan ini penting untuk pengasahan karena sudut ujung merupakan salah satu hasil utama dari proses asah. Jika sudut ujung berubah tanpa kontrol, parameter pemotongan yang sebelumnya sudah tepat dapat menjadi kurang sesuai. Pengasahan juga memiliki hubungan dengan efisiensi produksi. Mata gurdi yang tajam mengurangi waktu pemotongan, mengurangi tekanan operator, dan menekan kemungkinan benda kerja gagal. Wang,

Cai, He, Peng, Xie, Hu, dan Li (2023) membahas pemesian berkelanjutan sebagai integrasi antara peralatan, proses, dan strategi. Dalam konteks mesin gurdi, pengasahan alat potong merupakan bagian dari strategi itu. Alat yang terawat membuat proses lebih hemat, lebih stabil, dan lebih sedikit menghasilkan produk cacat.

Pada bahan komposit seperti CFRP, keausan mata gurdi menjadi persoalan serius karena dapat meningkatkan gaya, temperatur, dan kerusakan permukaan. Xu (2022) menjelaskan bahwa keausan alat pada penggurdian CFRP dapat menyebabkan gaya potong meningkat, temperatur naik, serta kualitas permukaan memburuk. Walaupun pembahasan dasar mesin gurdi biasanya lebih banyak memakai baja dan aluminium, prinsipnya tetap relevan. Mata gurdi yang aus harus dikendalikan, salah satunya melalui pengasahan atau penggantian alat. Dalam pendidikan bengkel, pengasahan dengan tool grinder sebaiknya diperkenalkan sebagai keterampilan yang memadukan teori dan praktik. Peserta praktik perlu mengenali bagian mata gurdi, memahami fungsi sudut, menyetel mesin, melakukan pengasahan, lalu memeriksa hasilnya. Pembelajaran tidak berhenti pada membuat ujung terlihat tajam. Yang lebih penting adalah memahami mengapa bibir potong harus sama panjang, mengapa sudut bebas tidak boleh terlalu kecil, dan mengapa pendinginan perlu dilakukan.

Kesalahan umum pada tool grinder biasanya terjadi karena operator terlalu percaya pada mesin. Dudukan memang membantu, tetapi pemasangan mata gurdi yang miring tetap menghasilkan asahan miring. Batu gerinda yang kotor tetap membuat hasil buruk. Pendinginan yang kurang tetap dapat membuat ujung panas. Pemeriksaan akhir yang dilewati tetap membuka peluang kesalahan. Mesin membantu, tetapi disiplin kerja tetap menentukan. Pengasahan mata gurdi dengan tool grinder juga berkaitan dengan subbab berikutnya, yaitu pengasahan manual. Pengasahan manual dapat dilakukan dalam keadaan tertentu, terutama ketika alat bantu terbatas. Namun, pengasahan manual membutuhkan latihan, pengetahuan, dan konsentrasi yang lebih tinggi. Tool grinder memberi dasar pembandingan yang baik karena memperlihatkan bentuk geometri yang seharusnya dicapai.

Pembahasan ini menunjukkan bahwa tool grinder bukan hanya mesin untuk menajamkan kembali mata gurdi. Ia adalah alat bantu untuk mengembalikan geometri potong, menjaga kesamaan

dua bibir penyayat, mengendalikan sudut ujung, membentuk sudut bebas, dan memperpanjang umur alat. Mata gurdi yang diasah dengan benar membantu proses penggurdian menjadi lebih ringan, lebih aman, dan lebih dekat dengan tuntutan gambar kerja. Penguasaan pengasahan dengan tool grinder membuat operator lebih peka terhadap hubungan antara alat potong dan hasil lubang. Bila lubang kasar, operator tidak langsung menyalahkan material. Bila lubang membesar, ia memeriksa panjang bibir potong. Bila tekanan makan terasa berat, ia meninjau sudut bebas dan ketajaman ujung. Cara berpikir seperti ini membuat pekerjaan mesin gurdi tidak berjalan berdasarkan dugaan, tetapi berdasarkan gejala teknis yang dapat diperiksa. Setelah memahami pengasahan dengan tool grinder, pembahasan dapat bergerak ke pengasahan manual dengan tangan. Perbandingan keduanya penting karena tidak semua bengkel memiliki mesin gerinda pahat khusus. Namun, standar hasilnya tetap sama. Kedua bibir potong harus sama panjang, sudut ujung harus sesuai, sudut bebas harus cukup, dan mata gurdi tidak boleh rusak akibat panas. Prinsip inilah yang menjaga agar proses penggurdian tetap aman dan menghasilkan lubang yang layak pakai.

G. Pengasahan Manual dengan Tangan

Pengasahan manual dengan tangan merupakan keterampilan bengkel yang tampak sederhana, tetapi sebenarnya menuntut ketelitian tinggi. Mata gurdi tidak cukup hanya dibuat tajam di ujungnya. Dua bibir penyayat harus memiliki panjang yang sama, sudut pucuk harus seimbang, sudut bebas harus cukup, dan bagian penyayat lintang harus tetap berada pada posisi yang benar. Jika salah satu bagian berubah terlalu jauh, mata gurdi mungkin masih terlihat tajam, tetapi hasil lubang dapat menjadi kasar, melebar, atau tidak tepat pada titik pusat. Pengasahan manual biasanya dilakukan ketika mesin tool grinder tidak tersedia, ketika mata gurdi harus segera dipakai kembali, atau ketika pekerjaan bengkel menuntut perbaikan cepat. Cara ini sering ditemukan di bengkel pendidikan, bengkel perawatan, dan bengkel kecil yang tidak memiliki perlengkapan pengasahan khusus. Meskipun begitu, pengasahan manual tidak boleh dipahami sebagai cara yang asal cepat. Justru karena dilakukan dengan tangan, proses ini memerlukan pengetahuan, latihan, dan konsentrasi yang lebih besar.

Dalam proses penggurdian, mata gurdi bekerja melalui dua bibir potong yang menyayat material secara bersamaan. Kedua bibir ini harus berbagi beban secara seimbang. Bila satu bibir lebih panjang, sisi tersebut akan menyayat lebih banyak. Bila sudut salah satu bibir berbeda, gaya pemotongan menjadi berat sebelah. Akibatnya, mata gurdi dapat melenceng, diameter lubang membesar, dan permukaan bagian dalam lubang menjadi kurang halus. Pengasahan manual juga berkaitan dengan panas. Saat mata gurdi disentuhkan pada batu gerinda, gesekan terjadi pada area kecil. Panas dapat naik dengan cepat, terutama pada mata gurdi kecil. Jika panas terlalu tinggi, ujung mata gurdi dapat berubah warna, kehilangan kekerasan, atau mengalami retak halus akibat pengasahan. Karena itu, pendinginan harus dilakukan secara intensif dengan mencelupkan mata gurdi ke cairan pendingin secara berkala.

Pada kondisi darurat, pengasahan kering kadang dilakukan. Namun, suhu mata gurdi tidak boleh dibiarkan melebihi kemampuan tangan untuk menahannya. Prinsip sederhana ini penting karena operator dapat merasakan langsung apakah mata gurdi sudah terlalu panas. Jika ujung mata gurdi mulai terasa sangat panas atau berubah warna kebiruan, proses harus dihentikan dan alat segera didinginkan. Mata gurdi yang hangus biasanya tidak lagi memotong dengan baik meskipun bentuknya tampak runcing. Pengasahan manual dimulai dari memahami sudut pucuk atau point angle. Untuk mata gurdi standar, sudut pucuk umum sekitar 118 derajat. Ketika diasah dengan tangan, mata gurdi didekatkan ke cakram batu gerinda dengan sudut penyetulan sekitar setengah sudut pucuk. Artinya, untuk sudut pucuk 118 derajat, posisi setiap sisi bibir terhadap permukaan gerinda dibayangkan sekitar 59 derajat. Perhitungan ini membantu operator menjaga bentuk dasar ujung gurdi.

Gerakan tangan saat mengasah perlu lembut dan terarah. Mata gurdi tidak boleh ditekan terlalu kuat. Tekanan berlebihan membuat panas cepat naik dan dapat membuang terlalu banyak material dari ujung gurdi. Pengasahan yang baik justru dilakukan dengan sentuhan ringan, singkat, lalu didinginkan. Setelah beberapa sentuhan, operator memeriksa bentuk ujung. Cara ini lebih aman daripada mengasah lama tanpa jeda. Bibir potong pertama diasah lebih dulu. Setelah bidang penyayat pertama terbentuk, mata gurdi diputar 180 derajat untuk mengasah bidang

penyayat kedua. Pemutaran ini harus benar benar setengah putaran, bukan sekadar dibalik dengan perkiraan kasar. Jika posisi putaran tidak tepat, bibir kedua tidak akan sama dengan bibir pertama. Mata gurdi yang tidak simetris akan menghasilkan lubang yang tidak sesuai diameter nominal.

Kesamaan panjang dua bibir penyayat menjadi syarat utama. Dua bibir yang sama panjang membuat titik pusat mata gurdi berada di tengah. Bila satu bibir lebih panjang, titik pusat bergeser ke sisi lain. Ketika digunakan, mata gurdi akan membuat lubang lebih besar dari diameternya. Kesalahan ini sering tidak terlihat saat mata gurdi baru selesai diasah, tetapi baru tampak ketika lubang diperiksa dengan jangka sorong atau pin ukur. Sudut pucuk juga harus sama besar di kedua sisi. Jika sudut pucuk berbeda, mata gurdi tetap dapat berputar, tetapi hanya satu sisi yang bekerja lebih dominan. Beban sepihak mempercepat keausan, membuat mata gurdi mudah melenceng, dan menghasilkan lubang yang kasar. Pada pekerjaan presisi, kesalahan seperti ini cukup serius karena lubang tidak hanya harus tembus, tetapi juga harus berada pada posisi dan diameter yang benar.

Sudut bebas atau clearance angle menjadi bagian yang sering sulit dikuasai dalam pengasahan manual. Sudut bebas terlalu kecil membuat bagian belakang mata potong menggesek permukaan lubang. Akibatnya, mata gurdi terasa berat, panas naik, dan operator perlu memberi tekanan makan lebih besar. Sudut bebas terlalu besar membuat bibir potong menjadi terlalu tipis dan mudah tersangkut. Pada mata gurdi kecil, kondisi ini dapat menyebabkan patah. Pengasahan manual membutuhkan koordinasi antara mata, tangan, dan pemahaman bentuk. Operator harus melihat sudut, merasakan tekanan, sekaligus memperkirakan banyaknya material yang terbang. Pada tahap awal belajar, hasilnya sering belum konsisten. Satu sisi bisa lebih pendek. Sudut bebas bisa terlalu besar. Bibir potong terlihat tajam tetapi titik pusat bergeser. Karena itu, latihan berulang menjadi bagian yang tidak dapat digantikan.

Sedlak, Zouhar, Kolomy, Slany, dan Necesanek (2023) menunjukkan bahwa geometri mata gurdi HSS memengaruhi kinerja pemotongan pada baja tahan karat austenitik. Temuan ini memperkuat makna pengasahan manual. Ketika geometri berubah akibat aus atau salah asah, kinerja penggurdian juga berubah. Mata gurdi yang salah sudut dapat menaikkan gaya potong, memperburuk bentuk geram, dan mengurangi kualitas lubang.

Bolat et al. (2023) juga menunjukkan bahwa geometri alat dan parameter penggurdian memengaruhi gaya tekan serta kekasaran permukaan. Dalam pengasahan manual, geometri alat sangat bergantung pada tangan operator. Bila sudut pucuk dan sudut bebas tidak terjaga, parameter pemotongan yang sebelumnya benar dapat menjadi tidak sesuai. Mata gurdi akan membutuhkan gaya tekan lebih besar dan lubang dapat menjadi lebih kasar.

Pengasahan manual perlu selalu dikaitkan dengan jenis material benda kerja. Mata gurdi untuk baja lunak umumnya dapat diasah dengan sudut pucuk sekitar 118 derajat. Untuk material lebih keras, sudut lebih besar sering memberi ketahanan lebih baik pada ujung. Untuk aluminium, perhatian lebih besar diberikan pada ketajaman sisi potong dan kelancaran keluarnya geram. Untuk plastik, panas harus dikendalikan agar lubang tidak meleleh. Artinya, pengasahan tidak hanya mengembalikan tajam, tetapi juga mengembalikan bentuk yang sesuai dengan pekerjaan. Ketika mata gurdi digunakan pada baja tahan karat, kesalahan pengasahan dapat terasa lebih cepat. Baja tahan karat cenderung ulet dan mudah memunculkan panas tinggi jika mata gurdi menggesek. Sudut bebas terlalu kecil dapat membuat mata gurdi tidak menyayat dengan baik. Operator lalu menekan lebih kuat, tetapi tekanan ini justru menambah panas. Jika permukaan mengalami pengerasan akibat gesekan, penggurdian berikutnya menjadi lebih berat.

Pada aluminium, masalahnya berbeda. Mata gurdi tumpul atau sudut yang buruk dapat menyebabkan material menempel pada sisi potong. Geram menjadi tidak lancar dan lubang tampak kasar. Pramanik dan Basak (2024) menjelaskan bahwa point angle, putaran spindel, dan gerak makan memengaruhi torsi, gaya tekan, burr, kualitas permukaan, dan kesalahan dimensi pada penggurdian komposit matriks aluminium. Ini menunjukkan bahwa bentuk ujung mata gurdi tetap berperan besar dalam mutu lubang. Pengasahan manual juga memerlukan pemilihan batu gerinda yang sesuai. Untuk mata gurdi HSS, batu gerinda aluminium oksida sering digunakan. Batu harus rata, bersih, dan tidak terlalu kasar. Batu yang kotor atau tersumbat serpihan logam dapat menimbulkan panas berlebih dan membuat hasil asah tidak halus. Jika permukaan batu tidak rata, bidang asah pada mata gurdi juga dapat tidak rata.

Sebelum pengasahan dimulai, batu gerinda perlu diperiksa. Batu yang retak tidak boleh dipakai. Pelindung batu harus

terpasang. Jarak kedudukan alat terhadap batu tidak boleh terlalu jauh agar mata gurdi tidak tersangkut. Operator juga perlu memakai kacamata pelindung karena percikan dan serpihan halus dapat terlempar. Pengasahan manual terlihat seperti pekerjaan kecil, tetapi risikonya nyata karena batu gerinda berputar sangat cepat. Posisi tubuh saat mengasah juga memengaruhi hasil. Operator sebaiknya berdiri stabil, tidak terlalu dekat dengan batu, dan memegang mata gurdi dengan dua tangan. Satu tangan mengendalikan tangkai, tangan lain membantu mengatur sudut dan gerakan. Bila posisi tubuh tidak stabil, tekanan pada batu gerinda ikut berubah. Gerakan yang berubah ubah membuat sudut asah tidak konsisten.

Pendinginan berkala menjadi kebiasaan penting. Mata gurdi dicelupkan ke cairan pendingin sebelum terlalu panas. Jangan menunggu sampai ujung berubah warna. Pada alat potong HSS, perubahan warna akibat panas dapat menandakan perubahan sifat pada tepi potong. Ujung yang kehilangan kekerasan akan cepat tumpul saat digunakan. Dengan pendinginan teratur, umur mata gurdi dapat dipertahankan lebih lama. Mata gurdi kecil membutuhkan kehati-hatian lebih tinggi. Ukurannya kecil membuat panas mudah terkumpul pada ujung. Selain itu, bentuk bibir potong lebih sulit dilihat. Pengasahan yang terlalu kuat dapat langsung menghabiskan bagian penyayat. Pada mata gurdi besar, bidang potong lebih mudah dilihat, tetapi pengasahan harus tetap seimbang karena sedikit perbedaan panjang bibir dapat memperbesar kesalahan lubang.

Kesalahan pengasahan yang paling umum adalah sudut pucuk tidak sama. Pada kondisi ini, pucuk mungkin masih tampak berada di tengah, tetapi yang bekerja dominan hanya satu penyayat. Mata gurdi dibebani sepihak, cepat aus, melenceng dari pusat, dan menghasilkan lubang kasar. Operator sering keliru mengira masalahnya berasal dari mesin, padahal sumbernya ada pada geometri ujung mata gurdi. Kesalahan berikutnya adalah panjang penyayat tidak sama. Kedua sudut pucuk bisa saja sama besar, tetapi titik pusat tidak berada di tengah karena panjang bibir berbeda. Akibatnya, diameter lubang menjadi lebih besar daripada diameter mata gurdi. Kesalahan ini berbahaya pada pekerjaan yang membutuhkan toleransi diameter. Lubang yang terlalu besar sulit diperbaiki, terutama bila benda kerja sudah menjadi komponen akhir.

Kesalahan lain muncul ketika sudut pucuk dan panjang penyayat sama-sama tidak seimbang. Dalam kondisi ini, mata gurdi menerima beban sepihak yang lebih besar. Lubang menjadi lebih besar, permukaan tidak bersih, mata gurdi cepat tumpul, dan bibir penyayat dapat retak. Kesalahan seperti ini sering terjadi pada pengasahan manual yang dilakukan terburu-buru tanpa pemeriksaan dengan mal atau penera. Pengujian hasil pengasahan dapat dilakukan dengan mengamati geram saat mata gurdi dipakai pada benda percobaan. Jika kedua alur menghasilkan geram yang relatif seimbang, bibir potong kemungkinan bekerja cukup merata. Jika geram lebih banyak keluar dari satu alur, salah satu bibir mungkin menyayat lebih dominan. Pengamatan ini tidak menggantikan penera, tetapi membantu membaca kondisi alat secara praktis di bengkel.

Suara pemotongan juga memberi petunjuk. Mata gurdi yang diasah baik biasanya menghasilkan suara yang lebih stabil. Suara melengking atau bergetar dapat menunjukkan gesekan, sudut bebas kurang, pencekaman benda kerja lemah, atau mata gurdi tidak simetris. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kualitas permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Dalam proses gurdi, sifat alat potong sangat ditentukan oleh hasil pengasahan. Pengasahan manual perlu dipadukan dengan pemeriksaan memakai mal atau penera. Pemeriksaan ini akan dibahas lebih khusus pada subbab berikutnya, tetapi hubungannya sudah perlu ditegaskan. Penera membantu memeriksa sudut pucuk, sudut asah relief, dan sudut penyayat lintang. Tanpa penera, operator hanya mengandalkan penglihatan. Penglihatan saja sering menipu, terutama pada mata gurdi kecil atau ujung yang baru diasah.

Pengasahan manual juga tidak boleh dipisahkan dari keselamatan kerja. Mata gurdi kecil dapat tersangkut di celah antara batu danudukan jika jaraknya terlalu lebar. Mata gurdi yang dipegang longgar dapat terlempar. Percikan gerinda dapat mengenai mata. Geram atau debu halus dari pengasahan dapat mengganggu pernapasan. Karena itu, kacamata pelindung, posisi tubuh yang stabil, batu gerinda yang baik, dan pengaturanudukan harus diperhatikan. Blecha et al. (2022) menekankan bahwa keselamatan mesin perkakas perlu diperhatikan sepanjang siklus hidup mesin, terutama pada tahap operasi dan perawatan karena tahap tersebut berkaitan langsung dengan risiko cedera.

Pengasahan mata gurdi termasuk kegiatan perawatan alat potong. Walaupun bukan proses pemotongan benda kerja secara langsung, energi gerinda dan ketajaman alat tetap menuntut prosedur aman.

Dalam pekerjaan produksi, pengasahan manual sebaiknya digunakan dengan batas yang jelas. Untuk pekerjaan kasar atau kondisi darurat, cara ini cukup berguna. Untuk pekerjaan presisi berulang, tool grinder lebih disarankan karena memberi konsistensi sudut yang lebih baik. Namun, operator tetap perlu menguasai pengasahan manual. Keterampilan ini menjadi cadangan penting ketika alat khusus tidak tersedia atau ketika koreksi kecil perlu dilakukan segera. Pengasahan manual juga memiliki nilai pendidikan yang kuat. Melalui proses ini, pembelajar melihat langsung hubungan antara sudut, ketajaman, panas, dan kualitas lubang. Mereka belajar bahwa mata gurdi tajam bukan hanya soal ujung runcing. Ada geometri yang harus dijaga. Ada keseimbangan dua bibir yang harus dicapai. Ada sudut bebas yang harus cukup, tidak kurang dan tidak berlebihan.

Pada pembelajaran bengkel, latihan pengasahan sebaiknya dilakukan bertahap. Pertama, peserta mengenali bagian mata gurdi. Kedua, peserta mengamati contoh mata gurdi yang benar. Ketiga, peserta mencoba mengasah pada mata gurdi bekas. Keempat, hasil asahan diperiksa dengan penera. Kelima, mata gurdi diuji membuat lubang pada benda kerja percobaan. Urutan ini membantu menghubungkan teori, tangan, dan hasil nyata. Xu (2022) menjelaskan bahwa keausan alat dalam penggurdian CFRP dapat meningkatkan gaya potong, temperatur, dan menurunkan kualitas permukaan. Walaupun contoh tersebut berasal dari material komposit, pesan dasarnya tetap berlaku pada penggurdian logam umum. Mata gurdi yang aus atau salah asah memaksa proses bekerja lebih berat. Panas meningkat, gaya naik, dan hasil lubang memburuk.

Pengasahan manual yang baik dapat memperpanjang umur mata gurdi. Namun, alat potong tetap memiliki batas pakai. Mata gurdi yang sudah terlalu pendek, alurnya rusak, atau ujungnya retak sebaiknya tidak terus diasah. Jika dipaksakan, alat dapat patah di dalam lubang dan merusak benda kerja. Penghematan alat tidak boleh mengorbankan keselamatan dan kualitas. Dalam praktik, pengasahan manual sering menjadi ujian kepekaan teknis operator. Ia harus tahu kapan cukup mengasah, kapan harus mendinginkan, kapan hasil belum simetris, dan kapan mata gurdi

sebaiknya tidak dipakai lagi. Keputusan seperti ini tidak selalu tertulis dalam rumus. Namun, keputusan tersebut tetap harus didukung prinsip teknis yang jelas. Dua bibir harus sama panjang. Sudut harus sama besar. Relief harus cukup. Ujung tidak boleh hangus. Pengasahan manual dengan tangan dapat dipahami sebagai keterampilan dasar yang menjembatani teori geometri mata gurdi dan praktik pemeliharaan alat potong. Di satu sisi, ia membutuhkan rasa bengkel. Di sisi lain, ia tidak boleh lepas dari ukuran, sudut, pendinginan, dan pemeriksaan. Bila dilakukan dengan benar, mata gurdi dapat kembali menyayat dengan lebih ringan, geram keluar lebih teratur, dan lubang yang dihasilkan lebih mendekati ukuran yang diinginkan.

Penerbitan & Percetakan



DUMMY

Penerbitan & Percetakan



BAB 7

KEPALA PEMBAGI, PEMBAGIAN LANGSUNG, DAN INTEGRASI APLIKASI MESIN PERKAKAS

A. Fungsi Kepala Pembagi dalam Proses Frais

Kepala pembagi atau dividing head merupakan alat bantu penting pada mesin frais karena mampu mengatur posisi keliling benda kerja secara bertahap dan terukur. Tanpa alat ini, pekerjaan yang membutuhkan pembagian sudut sama pada benda berbentuk silinder akan sulit dikerjakan dengan rapi. Mesin frais memang dapat menyayat bidang datar, alur, dan profil tertentu, tetapi ketika permukaan benda kerja harus dibagi menjadi beberapa bagian yang sama, meja frais biasa tidak cukup. Di titik itulah kepala pembagi mulai mengambil peran. Dalam proses frais, pisau frais atau cutter berputar sebagai gerak utama, sementara benda kerja bergerak mengikuti meja mesin. Gerakan ini sudah memadai untuk membuat bidang datar, alur memanjang, kantong, atau permukaan bertingkat. Namun, untuk membuat roda gigi, segi empat pada poros, segi enam pada kepala baut, atau segi delapan pada batang silindris, benda kerja harus diputar pada sudut tertentu setelah setiap penyayatan. Putaran itu tidak boleh memakai perkiraan mata. Ia harus terkendali.

Kepala pembagi berfungsi sebagai pengatur putaran benda kerja agar setiap sisi atau setiap gigi berada pada jarak sudut yang sama. Misalnya, ketika operator membuat kepala baut segi enam, benda kerja harus diposisikan dalam enam kedudukan yang merata sepanjang satu putaran penuh. Jika satu kedudukan meleset, bentuk segi enam tidak lagi simetris. Mungkin masih terlihat seperti segi enam, tetapi saat dipasang dengan kunci, bidang kontakannya bisa tidak rata. Pada pembuatan roda gigi, fungsi kepala pembagi menjadi lebih jelas lagi. Setiap gigi harus memiliki jarak keliling yang sama terhadap gigi berikutnya. Jika jumlah gigi 24, maka satu putaran benda kerja harus dibagi menjadi 24 bagian sama. Jika jumlah gigi 64, pembagian menjadi jauh lebih rapat. Operator tidak mungkin mengandalkan tanda manual tanpa mekanisme pembagi. Kepala pembagi membuat pekerjaan seperti ini masuk akal untuk dilakukan pada mesin frais konvensional.

Kepala pembagi tidak bekerja sebagai alat potong. Ia tidak menyayat benda kerja. Perannya lebih dekat dengan alat pengatur

posisi atau alat bantu pencekaman bersudut. Benda kerja dipegang pada spindle kepala pembagi, lalu diputar sesuai pembagian yang dibutuhkan. Setelah posisi dikunci, pisau frais melakukan penyayatan. Setelah satu sisi selesai, benda kerja diputar lagi. Proses ini berulang sampai seluruh pembagian selesai. Secara teknis, kepala pembagi menggunakan mekanisme roda gigi cacing. Pada kepala pembagi konvensional yang umum dibahas dalam praktik bengkel, rasio yang digunakan adalah 40:1. Artinya, satu putaran penuh benda kerja membutuhkan empat puluh putaran engkol kepala pembagi. Rasio ini memberi keuntungan mekanis karena gerakan kecil pada engkol dapat diterjemahkan menjadi perubahan posisi benda kerja yang lebih halus. Dalam pekerjaan pembagian keliling, kehalusan gerak ini sangat penting.

Rasio 40:1 juga membuat proses pembagian dapat dihitung secara sistematis. Untuk membuat pembagian tertentu, operator tidak perlu langsung memutar benda kerja berdasarkan sudut derajat secara manual. Ia dapat menghitung jumlah putaran engkol yang diperlukan untuk setiap pembagian. Rumus dan contoh perhitungan akan dibahas pada subbab berikutnya, tetapi pada bagian fungsi ini cukup dipahami bahwa rasio tersebut menjadi dasar kerja kepala pembagi. Kepala pembagi sering dipakai bersama mesin frais horizontal maupun mesin frais vertikal. Pada mesin frais horizontal, kepala pembagi banyak digunakan untuk pekerjaan roda gigi karena pisau roda gigi dapat dipasang pada arbor. Benda kerja dipasang pada kepala pembagi, lalu setiap celah gigi disayat satu per satu. Pada mesin frais vertikal, kepala pembagi dapat membantu pembuatan bidang segi pada kepala baut, mur, poros kecil, atau benda yang perlu diputar bertahap terhadap pisau frais.

Fungsi kepala pembagi dapat dibaca dari dua kebutuhan utama. Pertama, kebutuhan membagi keliling benda kerja menjadi bagian yang sama. Kedua, kebutuhan memutar benda kerja dengan posisi yang terkendali terhadap meja mesin. Kebutuhan pertama terlihat pada pembuatan segi empat, segi enam, segi delapan, dan roda gigi. Kebutuhan kedua muncul pada pekerjaan yang memerlukan hubungan putaran benda kerja dengan gerak meja, misalnya pekerjaan heliks atau bentuk spiral sederhana. Dalam praktik bengkel, kepala pembagi membuat pekerjaan frais menjadi lebih luas. Tanpa kepala pembagi, mesin frais mudah dipahami hanya sebagai mesin pembuat bidang dan alur. Dengan kepala

pembagi, mesin frais mampu mengerjakan bentuk yang berulang mengelilingi sumbu benda kerja. Ini membuat mesin frais dapat dipakai untuk membuat komponen yang lebih kompleks, terutama komponen yang menuntut pembagian sudut.

Kepala pembagi menjadi sangat berguna ketika benda kerja berbentuk silindris harus diubah menjadi bentuk bersisi. Contohnya, batang bulat yang akan dibuat segi empat. Tanpa kepala pembagi, operator harus memutar benda kerja setiap 90 derajat secara manual dan berharap posisinya tepat. Dengan kepala pembagi, setiap perubahan posisi dapat dikendalikan. Untuk segi enam, pembagian menjadi 60 derajat tiap sisi. Untuk segi delapan, pembagian menjadi 45 derajat tiap sisi. Pada kepala pembagi yang memiliki lubang pembagi langsung, pekerjaan segi empat, segi enam, atau segi delapan dapat dilakukan dengan lebih cepat. Spindel utama memiliki sejumlah lubang tertentu di sekelilingnya, misalnya 24 lubang. Bila ingin membuat segi enam, operator dapat membagi 24 lubang menjadi 6 bagian, sehingga setiap langkah berpindah 4 lubang. Cara ini jauh lebih praktis untuk pembagian sederhana dibanding menghitung putaran engkol panjang.

Namun, fungsi kepala pembagi tidak berhenti pada pembagian langsung. Untuk jumlah pembagian yang lebih banyak atau tidak cocok dengan lubang langsung, operator menggunakan piring pembagi. Piring pembagi menyediakan lingkaran lubang dengan jumlah tertentu. Melalui kombinasi putaran engkol dan jumlah lubang, pembagian yang lebih bervariasi dapat dilakukan. Inilah alasan kepala pembagi tetap penting pada mesin frais konvensional. Dalam pembuatan roda gigi, kepala pembagi membantu menentukan jarak antar gigi. Pisau frais membentuk celah gigi, sementara kepala pembagi menentukan posisi celah berikutnya. Setiap kali satu celah selesai, benda kerja diputar sesuai perhitungan. Proses ini diulang sampai jumlah gigi terpenuhi. Jika pembagiannya benar, jarak antar gigi menjadi seragam. Jika salah satu langkah salah, kesalahan itu akan terbawa dan sulit diperbaiki.

Fungsi kepala pembagi juga berkaitan dengan pencekaman benda kerja. Benda kerja yang diputar bertahap harus tetap berada pada sumbu yang sama. Jika pemasangan tidak sepusat, setiap sisi atau gigi dapat memiliki kedalaman yang berbeda. Pada roda gigi, kondisi ini dapat membuat gigi tidak seragam. Pada segi enam, sisi yang dihasilkan dapat tampak lebih lebar di satu bagian dan lebih

sempit di bagian lain. Jadi, kepala pembagi membutuhkan pencekaman yang rapi, bukan hanya perhitungan yang benar. Pada mesin frais, kualitas hasil tidak hanya ditentukan oleh ketepatan posisi sudut. Pisau frais juga harus dipilih sesuai bentuk pekerjaan. Untuk membuat bidang segi, pisau frais rata atau end mill dapat digunakan sesuai orientasi mesin. Untuk roda gigi, pisau roda gigi harus sesuai modul dan jumlah gigi yang direncanakan. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa metode pemesinan, termasuk milling dan gear machining, perlu dipahami melalui prinsip, aplikasi, serta kondisi kerja yang sesuai.

Kepala pembagi membantu operator menghubungkan rancangan geometris dengan gerakan mesin. Gambar kerja mungkin hanya menunjukkan jumlah sisi atau jumlah gigi. Di bengkel, informasi itu harus diterjemahkan menjadi gerakan engkol, pilihan lubang pembagi, posisi benda kerja, dan lintasan pisau frais. Di sinilah kepala pembagi menjadi jembatan antara angka pada gambar dan bentuk fisik pada benda kerja. Bagi operator pemula, kepala pembagi sering terasa rumit karena melibatkan angka, lubang, engkol, dan rasio. Sebenarnya, ide dasarnya cukup sederhana. Satu lingkaran penuh harus dibagi menjadi sejumlah bagian. Kepala pembagi menyediakan mekanisme agar pembagian itu dapat dilakukan tanpa mengandalkan perkiraan. Yang membuatnya terlihat rumit adalah variasi jumlah pembagian dan pilihan lubang yang harus disesuaikan.

Fungsi kepala pembagi juga dapat dipahami sebagai pengurang kesalahan manusia. Jika operator harus memutar benda kerja manual tanpa acuan, setiap langkah rawan meleset. Mata manusia tidak cukup teliti untuk membagi keliling poros menjadi 64 bagian sama. Kepala pembagi memberi sistem mekanis yang lebih dapat diulang. Tetap ada kemungkinan salah, tentu saja. Salah menghitung putaran engkol, salah memilih lubang, atau lupa mengunci posisi dapat merusak hasil. Namun, alat ini membuat proses jauh lebih terkendali. Pada pekerjaan produksi satuan, kepala pembagi membantu membuat komponen yang tidak ekonomis jika dibuat dengan mesin khusus. Misalnya, bengkel perawatan perlu membuat satu roda gigi pengganti sederhana untuk mesin lama. Mesin frais dengan kepala pembagi dapat menjadi pilihan yang masuk akal. Prosesnya memang lebih lambat

dibanding mesin pembuat roda gigi khusus, tetapi cukup fleksibel untuk pekerjaan perbaikan dan pendidikan.

Pada pekerjaan latihan, kepala pembagi melatih kita memahami hubungan antara sudut, keliling, dan proses penyayatan. Membuat segi empat dari poros bulat bukan hanya latihan memotong empat bidang. Ia mengajarkan bahwa setiap bidang harus diputar pada interval sudut yang sama. Membuat segi enam bukan hanya meniru kepala baut. Ia melatih cara menjaga posisi, mengunci benda kerja, menyayat, lalu memutar lagi dengan disiplin. Kepala pembagi juga membuat mesin frais lebih dekat dengan konsep pembentukan berulang. Banyak komponen mesin memiliki pola berulang: gigi roda, alur spline, sisi kepala baut, lubang melingkar, dan profil keliling tertentu. Pola seperti ini membutuhkan pengulangan yang seragam. Dalam pemesinan, pengulangan yang seragam jarang terjadi karena kebetulan. Ia muncul dari mekanisme yang dikendalikan dan diperiksa.

Ketelitian kepala pembagi tetap harus didukung oleh pengaturan parameter pemotongan. Jika kedalaman potong terlalu besar, benda kerja dapat bergetar atau pahat menerima beban berlebih. Jika feed terlalu kasar, permukaan hasil frais dapat terlihat bergaris. Trinh (2024) menekankan bahwa surface roughness dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pada pekerjaan dengan kepala pembagi, ketepatan sudut dan kualitas permukaan harus dijaga bersama. Pemilihan kecepatan dan pemakanan tidak boleh dilepaskan dari jenis material. Aluminium dapat dikerjakan lebih ringan dan cepat dibanding baja karbon keras, tetapi aluminium juga dapat menempel pada pisau jika kondisi pemotongan kurang sesuai. Baja membutuhkan perhatian terhadap gaya potong dan keausan pisau. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa keausan alat pada proses frais dapat diperkirakan melalui analisis sinyal multi sensor dan pendekatan machine learning, yang memperlihatkan bahwa proses frais modern tetap sangat bergantung pada kondisi alat potong dan parameter kerja.

Walaupun pembahasan kepala pembagi berada pada konteks mesin konvensional, prinsipnya tetap relevan dalam manufaktur modern. Mesin CNC dapat melakukan pembagian sudut melalui sumbu putar, tetapi gagasan dasarnya tidak berubah: benda kerja harus diposisikan pada sudut tertentu sebelum disayat. Kepala pembagi konvensional membantu kita memahami prinsip itu secara

mekanis. Dari engkol, piring pembagi, dan roda gigi cacing, kita dapat melihat bagaimana pembagian sudut terbentuk. Dalam perspektif efisiensi, kepala pembagi membantu memperluas kemampuan mesin frais tanpa harus memakai mesin khusus untuk setiap bentuk. Wang et al. (2023) membahas pemesian berkelanjutan melalui integrasi peralatan, proses, dan strategi. Kepala pembagi dapat dilihat sebagai bagian dari strategi tersebut karena memungkinkan satu mesin frais mengerjakan lebih banyak variasi bentuk, selama operator mampu menyetel dan menggunakannya dengan benar.

Fungsi kepala pembagi juga menyangkut keselamatan kerja. Benda kerja yang dipasang pada spindle kepala pembagi harus dikunci dengan baik. Jika menggunakan chuck, rahangnya harus menjepit kuat. Jika memakai senter dan penyangga, kesejajaran harus diperiksa. Engkol tidak boleh dibiarkan mengganggu ruang gerak operator atau lintasan mesin. Setelah posisi pembagian ditetapkan, mekanisme pengunci harus bekerja sebelum pisau frais menyayat. Kesalahan yang sering terjadi pada penggunaan kepala pembagi biasanya bukan karena alatnya tidak mampu, melainkan karena prosedurnya kurang teliti. Operator dapat lupa menghitung lubang dari titik yang benar, salah memilih lingkaran lubang, lupa mengencangkan pengunci, atau memutar engkol melewati posisi yang seharusnya. Pada pekerjaan roda gigi, satu kesalahan pembagian dapat merusak seluruh benda kerja karena pola gigi harus seragam dari awal sampai akhir.

Kepala pembagi memiliki fungsi pendidikan yang kuat karena menggabungkan geometri, mekanika, dan praktik frais dalam satu alat. Pembaca tidak hanya mempelajari bahwa satu lingkaran memiliki 360 derajat. Ia melihat bagaimana 360 derajat itu dibagi menjadi 4, 6, 8, 24, 64, atau jumlah lain melalui mekanisme nyata. Ia juga melihat bahwa pembagian sudut baru bermanfaat jika pahat, benda kerja, dan parameter pemotongan dikendalikan dengan baik. Fungsi kepala pembagi dalam proses frais dapat diringkas secara konseptual sebagai pengatur posisi keliling benda kerja. Namun, makna praktisnya lebih kaya dari itu. Ia membantu membuat roda gigi. Ia membentuk sisi pada benda silindris. Ia memberi pola berulang pada keliling benda kerja. Ia membuat mesin frais lebih fleksibel. Ia juga memaksa operator bekerja teliti, karena setiap putaran engkol akan terlihat pada hasil akhir benda kerja. Ketika kepala pembagi digunakan

dengan benar, proses frais menjadi lebih terarah. Benda kerja tidak hanya digeser pada meja, tetapi juga diputar menurut pembagian tertentu. Pisau frais tidak hanya menyayat bidang, tetapi menyayat bidang yang sudah ditempatkan pada sudut yang tepat. Hubungan antara posisi benda kerja dan gerak pisau inilah yang membuat kepala pembagi menjadi alat bantu penting dalam pekerjaan frais yang membutuhkan pembagian keliling.

B. Komponen Kepala Pembagi

Kepala pembagi atau dividing head bekerja melalui beberapa komponen yang saling terhubung. Alat ini tidak hanya berupa rumah logam dengan engkol di sampingnya. Di dalamnya ada mekanisme pemindah putaran, pengunci posisi, piring pembagi, spindel, dan perlengkapan pencekaman benda kerja. Setiap bagian memiliki tugas sendiri, tetapi hasil pembagian baru tepat ketika semuanya bekerja sebagai satu sistem. Pada mesin frais, kepala pembagi dipasang di atas meja mesin untuk menahan benda kerja sekaligus mengatur putarannya. Benda kerja dapat berupa bakal roda gigi, poros yang akan dibuat segi enam, atau benda silindris yang akan diberi beberapa alur berulang. Ketika pisau frais selesai menyayat satu sisi, operator memutar kepala pembagi ke posisi berikutnya. Perubahan posisi itu dilakukan melalui komponen pembagi, bukan dengan mengira ngira sudut secara manual.

Komponen yang paling mudah dikenali adalah badan kepala pembagi. Badan ini menjadi rangka utama yang menahan semua bagian lain. Bentuknya dibuat kokoh karena harus menerima gaya dari benda kerja, tekanan pencekaman, dan getaran selama proses frais. Walaupun kepala pembagi tidak menyayat material secara langsung, ia berada sangat dekat dengan proses pemotongan. Jika badannya tidak kaku, posisi benda kerja dapat berubah dan pembagian keliling menjadi tidak konsisten. Badan kepala pembagi juga berfungsi sebagaiudukan bagi spindel dan mekanisme roda gigi cacing. Pada beberapa tipe, badan kepala pembagi dapat dimiringkan untuk pekerjaan tertentu, misalnya ketika benda kerja perlu disetel pada sudut khusus terhadap meja mesin. Namun, pada pembahasan dasar ini, fungsi paling penting dari badan kepala pembagi adalah menjaga sumbu putar tetap stabil. Sumbu inilah yang menjadi pusat pembagian keliling benda kerja.

Spindel kepala pembagi merupakan poros utama tempat benda kerja dipasang atau diputar. Spindel ini dapat membawa

chuck, senter, pelat pembawa, atau perlengkapan lain sesuai bentuk benda kerja. Saat engkol pembagi diputar, gerakan tersebut diteruskan melalui mekanisme roda gigi cacing sampai akhirnya memutar spindel. Jadi, spindel menjadi bagian yang langsung menentukan perubahan sudut benda kerja. Pada pekerjaan roda gigi, spindel memegang bakal roda gigi agar setiap posisi celah gigi dapat disayat secara berurutan. Pada pekerjaan segi enam, spindel memutar benda kerja dari satu bidang ke bidang berikutnya. Jika spindel tidak sepusat atau benda kerja tidak terpasang lurus, semua perhitungan pembagian tetap dapat gagal. Kesalahan pencekaman pada spindel dapat membuat sisi segi tidak sama lebar atau gigi roda tidak seragam.

Roda gigi cacing atau worm gear menjadi inti mekanisme kepala pembagi. Dalam kepala pembagi konvensional yang dijelaskan pada materi ini, roda gigi cacing memiliki rasio 40:1. Artinya, empat puluh putaran engkol menghasilkan satu putaran penuh pada spindel benda kerja. Rasio ini membuat gerak putar dapat diatur lebih halus dan lebih mudah dihitung untuk pembagian keliling. Mekanisme cacing terdiri dari ulir cacing dan roda gigi cacing. Ulir cacing menerima putaran dari engkol, lalu menggerakkan roda gigi yang terhubung dengan spindel. Hubungan ini tidak hanya memperlambat putaran, tetapi juga memberi kemampuan pengaturan yang lebih presisi. Dengan rasio 40:1, satu putaran engkol hanya memutar benda kerja sebesar $\frac{1}{40}$ putaran. Gerak kecil seperti ini sangat berguna ketika jumlah pembagian cukup banyak.

Engkol pembagi adalah bagian yang dipegang operator saat melakukan pembagian. Dari luar, engkol terlihat seperti tuas putar biasa. Namun, perannya cukup besar. Engkol menjadi penghubung antara perhitungan pembagian dan gerakan fisik kepala pembagi. Operator menghitung berapa putaran atau berapa lubang yang harus dilewati, lalu menerapkannya melalui putaran engkol. Engkol biasanya dilengkapi penunjuk atau pin yang dapat masuk ke lubang pada piring pembagi. Pin ini membantu operator berhenti pada posisi yang benar. Tanpa pin dan piring pembagi, operator harus mengandalkan tanda visual pada lingkaran, dan cara itu jelas kurang teliti untuk pekerjaan seperti roda gigi. Pada pembagian 64 gigi, misalnya, kesalahan kecil pada satu langkah dapat merusak pola pembagian berikutnya.

Piring pembagi atau index plate merupakan pelat berlubang yang dipasang pada kepala pembagi. Lubang lubang ini tersusun dalam beberapa lingkaran dengan jumlah berbeda. Fungsi piring pembagi adalah menyediakan acuan mekanis bagi putaran engkol. Jika pembagian tidak dapat dilakukan hanya dengan putaran penuh engkol, operator menggunakan lubang tertentu pada piring pembagi untuk memperoleh bagian putaran yang lebih kecil. Pada praktiknya, piring pembagi sering tersedia dalam beberapa seri. Setiap seri memiliki jumlah lubang tertentu. Materi ini menyebutkan contoh piring pembagi seri B 1 dengan jumlah lubang 15, 16, 17, 18, 19, dan 20. Dalam contoh roda gigi 64, dipilih lingkaran 16 lubang karena pecahan $\frac{5}{8}$ dapat diterjemahkan menjadi 10 lubang pada lingkaran tersebut. Dari contoh ini terlihat bahwa piring pembagi bukan aksesori tambahan, melainkan komponen yang membuat perhitungan pembagian dapat diterapkan.

Lengan sektor atau sector arms sering terlihat sederhana, tetapi sangat membantu saat operator harus memindahkan engkol dengan jumlah lubang yang sama berulang kali. Dua lengan ini dapat diatur menggapit jarak lubang tertentu pada piring pembagi. Setelah satu langkah selesai, operator tidak perlu menghitung dari awal. Ia cukup memindahkan pin dari satu batas sektor ke batas berikutnya. Dalam pekerjaan dengan banyak gigi, bantuan kecil seperti ini mengurangi risiko salah hitung. Pin pengunci pada engkol perlu masuk penuh ke lubang piring pembagi. Jika pin hanya masuk sebagian, posisi engkol dapat bergeser ketika tangan operator melepas tuas. Gerakan kecil seperti itu terlihat sepele, tetapi pada pembagian roda gigi dapat menghasilkan kesalahan sudut. Karena itu, setelah memutar engkol, operator sebaiknya memastikan pin benar benar duduk pada lubang yang dipilih sebelum spindel dikunci dan penyayatan dilakukan.

Pengunci spindel berfungsi menahan benda kerja setelah pembagian ditetapkan. Ini penting karena pada saat pisau frais menyayat, benda kerja menerima gaya pemotongan. Jika spindel tidak dikunci, benda kerja bisa berputar sedikit mengikuti tekanan pisau. Hasilnya dapat berupa bidang yang tidak rata, celah gigi yang bergeser, atau sisi segi yang tidak sama. Pembagian yang dihitung benar tetap dapat rusak jika pengunci spindel tidak dipakai dengan disiplin. Pada beberapa kepala pembagi, terdapat mekanisme pembagian langsung. Pembagian langsung

memanfaatkan lubang yang berada pada spindel utama atau pelat langsung. Materi ini menjelaskan bahwa spindel utama memiliki 24 lubang di sekelilingnya. Lubang tersebut dapat dipakai untuk pekerjaan seperti segi empat, segi enam, atau segi delapan tanpa harus memakai perhitungan piring pembagi yang lebih rumit.

Komponen lain yang sering menyertai kepala pembagi adalah chuck. Chuck dipasang pada spindel untuk menjepit benda kerja silindris pendek atau benda berbentuk tertentu yang masih dapat dijepit oleh rahang. Pada pekerjaan kepala baut segi enam, misalnya, batang atau benda kerja pendek dapat dijepit pada chuck, lalu diputar bertahap melalui kepala pembagi. Pencekaman harus kuat karena tiap bidang akan menerima tekanan dari pisau frais. Untuk benda kerja yang panjang, kepala pembagi sering dipasangkan dengan kepala lepas atau tailstock. Kepala lepas menopang ujung benda kerja agar tidak melendut. Ini penting ketika benda kerja berbentuk poros panjang yang akan dibuat alur berulang atau bentuk sisi sepanjang permukaannya. Tanpa penopang, ujung benda dapat bergetar, dan hasil frais menjadi tidak konsisten sepanjang panjang benda.

Senter juga menjadi bagian dari perlengkapan kepala pembagi. Benda kerja dapat dipasang di antara senter kepala pembagi dan senter kepala lepas. Metode ini membantu menjaga sumbu benda kerja tetap lurus. Namun, benda kerja tetap memerlukan penggerak atau penjepit agar ikut berputar bersama spindel. Jika tidak, spindel dapat bergerak tetapi benda kerja tidak mengikuti dengan benar. Pelat pembawa atau driving plate dapat dipakai untuk membantu memutar benda kerja yang dipasang di antara dua senter. Pelat ini bekerja bersama pembawa atau dog yang mengikat benda kerja. Dalam praktiknya, sistem seperti ini berguna untuk benda kerja yang lebih panjang atau benda yang membutuhkan kesepusatan lebih baik. Penggunaannya memang sedikit lebih lama dibanding chuck, tetapi dapat memberi dukungan yang lebih stabil.

Komponen pengunci pada kepala pembagi perlu diperhatikan sebelum penyayatan dimulai. Ada pengunci pada spindel, pengunci pada posisi kepala, dan kadang pengunci pada piring atau lengan sektor. Pengunci bukan hanya untuk kenyamanan. Ia mencegah perubahan posisi ketika pisau frais mulai menyayat. Pada proses frais, pisau bermata jamak dapat memberi gaya periodik, sehingga benda kerja perlu benar benar tertahan. Kepala pembagi juga

memiliki alas atau dasar yang digunakan untuk memasangnya pada meja mesin frais. Alas ini harus duduk rata pada meja. Baut pengikat harus masuk pada alur T meja frais dengan ukuran yang sesuai. Jika kepala pembagi miring atau tidak kencang pada meja, sumbu pembagian tidak lagi sejajar dengan arah pemotongan. Kesalahan ini dapat muncul sebagai sisi yang tidak sama, alur yang melenceng, atau roda gigi yang tidak seragam.

Penyetelan sumbu kepala pembagi harus dilakukan sebelum pekerjaan dimulai. Untuk pekerjaan roda gigi, sumbu benda kerja perlu sejajar dengan arbor atau pisau frais sesuai jenis mesin yang digunakan. Untuk pekerjaan segi pada mesin frais vertikal, posisi benda kerja harus mendukung penyayatan bidang secara konsisten. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa proses milling dan gear machining perlu dipahami melalui prinsip kerja, penerapan, dan kondisi operasi yang sesuai. Pada kepala pembagi, kondisi operasi itu salah satunya adalah kesejajaran sumbu. Komponen kepala pembagi juga berhubungan dengan kualitas permukaan hasil frais. Piring pembagi dan engkol menentukan posisi sudut, tetapi pisau frais tetap menentukan tekstur sayatan. Jika pencekaman longgar, permukaan dapat bergetar. Jika pemakanan terlalu berat, pisau dapat meninggalkan bekas kasar. Trinh (2024) menekankan bahwa surface roughness dalam pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pada pekerjaan dengan kepala pembagi, kestabilan komponen pemegang ikut menjaga hubungan itu.

Kearifan pisau frais tetap perlu diperhatikan walaupun kepala pembagi bekerja dengan presisi. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa estimasi keausan pahat pada proses frais dapat dilakukan dengan analisis sinyal multi sensor dan algoritma machine learning. Temuan tersebut memberi gambaran bahwa proses frais modern tetap memerlukan pemantauan kondisi alat potong. Dalam praktik konvensional, operator membaca gejala ini dari suara, bentuk geram, dan kualitas permukaan. Komponen kepala pembagi mendukung ketelitian, tetapi tidak menggantikan pemeriksaan hasil. Setelah beberapa pembagian dilakukan, operator perlu memeriksa apakah jarak antarbidang atau antarlur masih konsisten. Pada pembuatan roda gigi, kesalahan pembagian biasanya semakin terasa ketika pola gigi hampir lengkap. Karena itu, lebih aman memeriksa sejak awal daripada menyadari kesalahan setelah seluruh keliling selesai dikerjakan.

Kesalahan umum pada penggunaan komponen kepala pembagi biasanya muncul dari langkah kecil yang terlewat. Pin tidak masuk penuh. Lengan sektor bergeser. Engkol diputar dari lubang yang salah. Spindel belum dikunci. Chuck tidak menjepit kuat. Kepala lepas tidak sejajar. Semua ini tampak seperti detail kecil, tetapi pada pembagian keliling, detail kecil menghasilkan kesalahan yang berulang. Dari sisi keselamatan, setiap komponen harus berada dalam posisi aman sebelum mesin frais dijalankan. Engkol tidak boleh berada pada posisi yang mudah tersangkut tangan atau pakaian. Kunci chuck harus dilepas. Baut pengikat kepala pembagi harus dikencangkan. Benda kerja harus dicekam kuat. Pisau frais harus memiliki jarak bebas dari chuck, senter, kepala lepas, dan perlengkapan pembagi lainnya.

Perawatan ringan juga penting. Piring pembagi perlu bersih. Pin harus bergerak lancar. Engkol tidak boleh longgar berlebihan. Roda gigi cacing memerlukan pelumasan yang sesuai agar gerakannya tidak berat dan tidak cepat aus. Kepala pembagi yang jarang dirawat dapat tetap terlihat baik dari luar, tetapi menghasilkan gerakan yang tidak halus ketika digunakan. Dalam pekerjaan pembagian, gerak yang tidak halus dapat mempersulit posisi berhenti. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan sebagai hubungan antara peralatan, proses, dan strategi. Kepala pembagi dapat dibaca dalam hubungan itu. Komponennya memperluas kemampuan mesin frais, mengurangi kebutuhan mesin khusus untuk beberapa pekerjaan, dan membantu operator mengerjakan bentuk berulang secara lebih terencana. Namun, manfaat tersebut hanya muncul jika komponen digunakan dengan benar.

Pemahaman komponen kepala pembagi membuat perhitungan pada subbab berikutnya lebih mudah diterima. Rasio 40:1 tidak lagi terasa sebagai angka lepas, karena kita sudah tahu bahwa angka itu berasal dari hubungan roda gigi cacing dengan spindel. Pembagian langsung juga lebih mudah dipahami karena lubang langsung pada spindel sudah dikenali. Piring pembagi tidak lagi terlihat seperti pelat berlubang biasa, melainkan alat acuan untuk mengubah pecahan putaran menjadi gerakan nyata. Dalam praktik frais, kepala pembagi bekerja seperti juru atur posisi. Badan menjaga kekakuan. Spindel membawa benda kerja. Roda gigi cacing mengubah putaran. Engkol memberi gerak dari operator. Piring pembagi dan pin membantu menghitung langkah.

Pengunci menahan posisi saat pemotongan. Perlengkapan pengecam menjaga benda kerja tetap sepusat. Ketika komponen ini dipahami, operator tidak hanya tahu cara memutar kepala pembagi, tetapi juga tahu mengapa setiap bagian harus diperiksa sebelum pisau frais mulai menyayat.

C. Rasio Roda Gigi Cacing dan Prinsip Pembagian

Rasio roda gigi cacing adalah kunci untuk memahami cara kerja kepala pembagi. Tanpa memahami rasio ini, kepala pembagi mudah terlihat seperti alat yang rumit: ada engkol, ada piring berlubang, ada pin, ada spindel, lalu semuanya harus diputar dengan hitungan tertentu. Namun, kalau dilihat pelan pelan, dasar kerjanya cukup masuk akal. Satu putaran penuh benda kerja diatur melalui sejumlah putaran engkol yang sudah ditentukan oleh mekanisme roda gigi cacing. Pada kepala pembagi konvensional yang umum dipakai dalam pekerjaan frais, rasio roda gigi cacing adalah 40:1. Artinya, untuk memutar benda kerja satu putaran penuh, engkol kepala pembagi harus diputar sebanyak 40 kali. Dengan kata lain, satu putaran engkol hanya memutar benda kerja sebesar $\frac{1}{40}$ putaran. Angka ini membuat putaran benda kerja menjadi lebih halus dan lebih mudah dibagi ke dalam banyak posisi.

Roda gigi cacing atau worm gear bekerja bersama ulir cacing atau worm. Ketika operator memutar engkol, ulir cacing ikut berputar. Putaran ini menggerakkan roda gigi cacing yang terhubung dengan spindel kepala pembagi. Karena roda gigi cacing memiliki 40 gigi, maka diperlukan 40 putaran engkol untuk membuat roda gigi tersebut menyelesaikan satu putaran penuh. Sederhana, tetapi dampaknya besar terhadap ketelitian pembagian. Rasio 40:1 memberi keuntungan mekanis karena perubahan posisi benda kerja dapat dikendalikan sedikit demi sedikit. Jika benda kerja langsung diputar dengan tangan tanpa mekanisme ini, pembagian kecil seperti 32, 40, 48, atau 64 bagian akan sulit dijaga. Kepala pembagi membuat gerakan itu menjadi lebih terukur. Operator tidak lagi menebak sudut, melainkan menghitung putaran engkol.

Prinsip pembagian kepala pembagi dimulai dari kebutuhan membagi satu putaran penuh benda kerja menjadi beberapa bagian yang sama. Misalnya, segi empat membutuhkan empat bagian sama. Segi enam membutuhkan enam bagian sama. Roda gigi 64 membutuhkan 64 bagian sama. Karena satu putaran benda kerja

setara dengan 40 putaran engkol, maka putaran engkol untuk setiap bagian dapat dihitung dari 40 dibagi jumlah pembagian yang diinginkan. Rumus dasarnya dapat ditulis secara sederhana: putaran engkol per bagian sama dengan 40 dibagi jumlah pembagian. Jika jumlah pembagian dilambangkan dengan Z, maka putaran engkol per bagian adalah $40 \div Z$. Rumus ini menjadi dasar pembagian tidak langsung pada kepala pembagi. Nilai yang diperoleh dapat berupa bilangan bulat, pecahan, atau campuran antara putaran penuh dan pecahan putaran.

Jika akan membuat segi empat, maka putaran engkol per sisi adalah $40 \div 4$, hasilnya 10 putaran. Artinya, setelah satu bidang disayat, engkol diputar 10 putaran penuh untuk memosisikan bidang berikutnya. Jika akan membuat segi delapan, hitungannya $40 \div 8$, hasilnya 5 putaran. Dua contoh ini mudah karena hasilnya bilangan bulat. Operator cukup memutar engkol sesuai jumlah putaran penuh. Masalah mulai terasa ketika hasil pembagian berupa pecahan. Misalnya, untuk segi enam, putaran engkol per sisi adalah $40 \div 6$, hasilnya $6 \frac{2}{3}$ putaran. Enam putaran penuh masih mudah, tetapi $\frac{2}{3}$ putaran perlu bantuan piring pembagi. Di sinilah piring berlubang pada kepala pembagi berfungsi. Lubang pada piring pembagi membantu operator menerjemahkan pecahan putaran menjadi jumlah lubang yang dapat dihitung.

Rasio 40:1 juga membantu menghindari pembacaan sudut secara langsung. Misalnya, segi enam secara geometri berarti setiap sisi berjarak 60 derajat. Namun, operator tidak perlu menyetel busur derajat setiap kali benda kerja diputar. Ia cukup memakai rumus pembagian kepala pembagi. Untuk segi enam, 40 dibagi 6 menghasilkan $6 \frac{2}{3}$ putaran engkol. Sudut 60 derajat diterjemahkan menjadi gerak mekanis pada engkol. Cara berpikir seperti ini sangat berguna dalam pekerjaan frais. Mesin frais bekerja dengan pisau bermata jamak atau multi point cutter yang menyayat benda kerja saat meja bergerak. Kepala pembagi menambah satu kemampuan: benda kerja dapat diputar pada posisi tertentu sebelum penyayatan. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa proses milling dan gear machining perlu dipahami melalui prinsip kerja, penerapan, dan kondisi operasi yang sesuai. Kepala pembagi berada tepat pada wilayah kondisi operasi itu.

Dalam pembagian roda gigi, ketelitian posisi menjadi sangat penting. Setiap celah gigi harus dibuat pada jarak yang sama. Jika satu kali putaran engkol salah, pola gigi berikutnya ikut terganggu.

Kesalahan itu tidak selalu langsung terlihat pada gigi pertama atau kedua. Kadang baru tampak ketika seluruh lingkaran hampir selesai. Karena itu, perhitungan dan disiplin memutar engkol harus dijaga sejak langkah awal. Contoh roda gigi 64 memberi gambaran yang baik. Jumlah pembagiannya adalah 64, sehingga putaran engkol per gigi adalah $40 \div 64$. Hasilnya $5/8$ putaran. Karena $5/8$ bukan putaran penuh, operator perlu memilih piring pembagi yang jumlah lubangnya dapat dibagi 8. Dalam bahan praktik, piring pembagi seri B 1 memiliki jumlah lubang 15, 16, 17, 18, 19, dan 20. Lingkaran 16 lubang dapat dipakai karena 16 dapat dibagi 8.

Pecahan $5/8$ pada lingkaran 16 lubang berubah menjadi 10 lubang. Perhitungannya sederhana: $5/8$ dikalikan 16 sama dengan 10. Jadi, setiap selesai menyayat satu celah gigi, engkol diputar sejauh 10 jarak lubang pada lingkaran 16 lubang. Jika lubang awal ikut dihitung sebagai posisi pertama, pin akan masuk pada lubang ke 11. Cara menghitung seperti ini harus dipahami agar operator tidak salah satu lubang. Kesalahan menghitung lubang sering terjadi karena operator menghitung lubang tujuan, bukan jarak antar lubang. Jika harus bergerak 10 lubang, yang dihitung adalah jarak dari lubang awal ke lubang berikutnya sebanyak 10 langkah. Lubang awal bukan langkah pertama. Inilah sebabnya beberapa instruksi bengkel menyebut “hingga lubang ke 11” ketika lubang awal ikut diberi nomor satu. Kelihatannya sepele, tetapi kesalahan satu lubang pada roda gigi 64 dapat merusak keteraturan gigi.

Pembagian dengan rasio 40:1 berbeda dari pembagian langsung melalui 24 lubang pada spindel utama. Pembagian langsung cocok untuk jumlah pembagian yang sederhana dan sesuai dengan 24 lubang, misalnya segi empat, segi enam, atau segi delapan. Pembagian melalui rasio 40:1 dan piring pembagi dipakai ketika jumlah pembagian membutuhkan perhitungan lebih luas. Dua cara ini tidak saling meniadakan. Keduanya dipilih sesuai kebutuhan pekerjaan. Rasio roda gigi cacing juga membuat kepala pembagi lebih stabil terhadap putaran balik yang tidak diinginkan. Mekanisme cacing cenderung tidak mudah diputar balik oleh gaya dari spindel, walaupun pengunci tetap harus dipakai saat penyayatan. Dalam pekerjaan frais, pisau dapat memberi gaya yang mendorong benda kerja. Jika spindel tidak dikunci, benda kerja dapat bergeser sedikit. Maka, setelah pembagian selesai, posisi harus dikunci sebelum pisau menyayat.

Istilah backlash perlu diperhatikan saat menggunakan kepala pembagi. Backlash adalah kelonggaran kecil pada pasangan roda gigi atau mekanisme putar. Pada kepala pembagi yang sudah lama digunakan, kelonggaran ini bisa terasa saat engkol digerakkan bolak balik. Operator sebaiknya selalu memutar engkol dalam satu arah yang sama saat melakukan pembagian. Jika terlanjur melewati lubang yang dituju, lebih aman memutar kembali lebih jauh lalu mendekati lagi dari arah yang sama, bukan hanya mundur sedikit. Prinsip satu arah ini membantu menjaga hasil pembagian. Ketika engkol selalu didekati dari arah yang sama, kelonggaran mekanisme cenderung berada pada sisi yang konsisten. Jika arah putaran sering dibalik, posisi berhenti bisa sedikit berbeda walaupun pin tampak masuk pada lubang yang benar. Dalam pekerjaan roda gigi, perbedaan kecil pada setiap langkah dapat menghasilkan jarak gigi yang tidak seragam.

Piring pembagi perlu dipilih berdasarkan pecahan hasil perhitungan. Jika hasil pembagian adalah $\frac{2}{3}$ putaran, operator perlu memilih lingkaran lubang yang dapat dibagi 3. Jika hasilnya $\frac{5}{8}$, pilih lingkaran lubang yang dapat dibagi 8. Jika piring yang tersedia tidak memiliki lubang yang cocok, diperlukan pendekatan lain, misalnya memilih piring seri berbeda atau memakai metode pembagian diferensial pada kepala pembagi yang mendukung. Untuk pembahasan dasar, cukup dipahami bahwa piring harus mampu menerjemahkan penyebut pecahan menjadi jumlah lubang. Ketelitian pembagian juga bergantung pada pencekaman benda kerja. Spindel kepala pembagi boleh saja berputar tepat, tetapi benda kerja bisa tetap salah jika pemasangannya tidak sepusat. Pada benda kerja roda gigi, sumbu bakal roda gigi harus sepusat dengan spindel kepala pembagi. Pada pembuatan segi enam, benda kerja harus dijepit kuat agar tidak bergeser setelah setiap sisi disayat. Kepala pembagi mengatur sudut, tetapi pencekaman menjaga sudut itu tetap berlaku pada benda kerja.

Parameter pemotongan mesin frais tetap perlu diperhatikan. Kepala pembagi hanya mengatur posisi. Kualitas bidang atau celah gigi tetap dipengaruhi oleh pisau frais, kecepatan potong, gerak makan, kedalaman potong, dan kekakuan pemasangan. Trinh (2024) menjelaskan bahwa surface roughness pada pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Dalam pekerjaan kepala pembagi, ketepatan pembagian dan kualitas sayatan harus dijaga bersama. Keausan

pisau frais juga dapat mengganggu hasil pembagian, walaupun hitungan engkol sudah benar. Jika pisau mulai aus, setiap celah atau bidang yang disayat dapat memiliki kualitas permukaan berbeda. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa keausan pahat pada proses milling dapat diperkirakan melalui analisis sinyal multi sensor dan algoritma machine learning. Pada bengkel konvensional, operator membaca gejala serupa dari suara potong, bentuk geram, dan perubahan permukaan.

Rasio 40:1 juga mengajarkan pentingnya urutan kerja. Setelah satu posisi selesai disayat, mesin dihentikan atau benda kerja dijauhkan dari pisau sesuai prosedur aman. Spindel kepala pembagi dibuka dari penguncinya. Engkol diputar sesuai hitungan. Pin dimasukkan ke lubang yang benar. Spindel dikunci kembali. Baru setelah itu penyayatan berikutnya dilakukan. Urutan ini perlu diulang dengan tenang sampai seluruh pembagian selesai. Kesalahan umum dalam prinsip pembagian biasanya muncul dari beberapa hal kecil. Salah menghitung $40 \div Z$. Salah menyederhanakan pecahan. Salah memilih lingkaran lubang. Salah menghitung jumlah lubang yang harus dilewati. Lupa mengunci spindel. Atau memutar engkol melewati lubang tujuan lalu mundur sedikit tanpa memperhatikan backlash. Semua kesalahan ini dapat membuat hasil akhir tidak simetris.

Pemeriksaan hasil perlu dilakukan sejak beberapa pembagian awal. Pada pembuatan segi, lebar bidang dapat diperiksa setelah dua atau tiga sisi dibuat. Pada pembuatan roda gigi, jarak dan kedalaman celah perlu diamati secara bertahap. Jangan menunggu seluruh keliling selesai. Jika kesalahan pembagian ditemukan lebih awal, benda kerja kadang masih dapat diselamatkan. Jika ditemukan setelah semua celah selesai, peluang perbaikannya jauh lebih kecil. Dalam perspektif efisiensi, kepala pembagi membantu mesin frais mengerjakan bentuk yang seharusnya memerlukan pengaturan sudut berulang. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan sebagai integrasi peralatan, proses, dan strategi. Pada penggunaan kepala pembagi, strategi itu terlihat dari pemilihan metode pembagian yang tepat, piring lubang yang sesuai, serta pemeriksaan yang mencegah benda kerja gagal.

Pembelajaran rasio roda gigi cacing tidak hanya berguna untuk menghitung putaran engkol. Ia membantu pembaca memahami bagaimana gerak mekanis kecil dapat menghasilkan pembagian geometri yang teliti. Satu lingkaran penuh benda kerja

tidak langsung dibagi dengan mata, tetapi melalui hubungan 40 putaran engkol, piring berlubang, pin, dan pengunci. Perhitungan menjadi tindakan mekanis.

D. Pembagian Secara Langsung

Pembagian secara langsung pada kepala pembagi dapat dipahami sebagai cara memutar benda kerja ke posisi tertentu dengan memanfaatkan lubang pembagi yang sudah tersedia. Cara ini dipakai ketika jumlah pembagian yang diinginkan dapat diperoleh dari jumlah lubang pada pelat atau spindel pembagi. Dalam pekerjaan frais, metode ini terasa praktis karena operator tidak selalu perlu melakukan perhitungan panjang seperti pada pembagian tidak langsung. Pada dasarnya, pembagian langsung digunakan untuk membagi keliling benda kerja menjadi beberapa bagian sama. Benda kerja dipasang pada kepala pembagi, lalu diputar dari satu posisi ke posisi berikutnya sesuai jumlah bagian yang dibutuhkan. Setelah satu sisi selesai difrais, benda kerja diputar lagi. Begitu seterusnya sampai seluruh keliling terbagi. Polanya sederhana, tetapi tetap menuntut ketelitian.

Metode ini banyak dipakai untuk bentuk yang jumlah pembagiannya sederhana, misalnya segi empat, segi enam, dan segi delapan. Bentuk tersebut sering dijumpai pada kepala baut, mur, poros bersisi, atau komponen kecil yang membutuhkan bidang pegangan. Jika dibuat tanpa kepala pembagi, operator harus memutar benda kerja secara manual dan risiko sudut tidak seragam menjadi besar. Keunggulan pembagian langsung terletak pada kecepatannya. Operator cukup menentukan jumlah lubang yang harus dilompati pada setiap langkah. Tidak perlu selalu mengubah piring pembagi, tidak perlu menghitung pecahan putaran engkol yang rumit, dan tidak perlu memakai kombinasi roda gigi tambahan. Untuk pekerjaan yang sesuai, cara ini lebih cepat dan lebih mudah diawasi.

Meski begitu, pembagian langsung bukan berarti bebas hitungan. Hitungannya memang lebih pendek, tetapi tetap harus benar. Jika spindel utama memiliki 24 lubang pembagi, maka jumlah lubang yang dipindahkan pada setiap langkah diperoleh dari 24 dibagi jumlah sisi atau jumlah bagian yang akan dibuat. Untuk segi enam, misalnya, 24 dibagi 6 menghasilkan 4 lubang. Artinya, setelah satu bidang selesai difrais, benda kerja diputar sejauh 4 lubang untuk membuat bidang berikutnya. Pada segi empat, 24 lubang dibagi 4 menghasilkan 6 lubang. Operator

memindahkan posisi pembagi sejauh 6 lubang setiap selesai satu penyayatan. Pada segi delapan, 24 lubang dibagi 8 menghasilkan 3 lubang. Dengan cara ini, satu putaran penuh benda kerja terbagi menjadi bagian yang sama. Pembagian menjadi lebih mudah karena jumlah 24 dapat dibagi oleh 4, 6, dan 8.

Pembagian langsung sangat cocok untuk pekerjaan yang jumlah bagiannya merupakan faktor dari 24. Faktor ini mencakup beberapa jumlah pembagian sederhana seperti 2, 3, 4, 6, 8, 12, dan 24. Jika jumlah pembagian tidak cocok dengan 24 lubang, metode ini tidak dapat digunakan secara langsung. Operator harus beralih ke piring pembagi atau metode pembagian lain yang sesuai. Pada proses frais, pembagian langsung biasanya dilakukan setelah benda kerja dicekam kuat pada spindle kepala pembagi. Benda kerja harus sepusat dengan sumbu putar. Jika benda kerja tidak sepusat, pembagian sudut bisa saja benar, tetapi bentuk hasil frais tetap tidak seragam. Contohnya, segi enam dapat memiliki sisi yang tidak sama lebar karena benda kerja tidak berputar tepat pada pusatnya.

Penguncian posisi juga sangat penting. Setelah lubang pembagi dipilih dan benda kerja diputar ke posisi berikutnya, kepala pembagi harus dikunci sebelum pisau frais menyayat. Jika pengunci tidak bekerja dengan baik, benda kerja dapat bergerak sedikit akibat gaya potong. Gerakan kecil itu cukup untuk membuat bidang hasil frais miring atau tidak sama dengan bidang sebelumnya. Pembagian langsung sering terasa lebih mudah bagi pemula karena gerak kerjanya terlihat nyata. Operator dapat melihat lubang, memindahkan pin, mengunci posisi, lalu menyayat. Namun, kemudahan ini kadang membuat orang kurang hati-hati. Salah menghitung lubang, melewati satu lubang, atau lupa mengunci posisi dapat merusak semua pembagian berikutnya. Pada bentuk segi sederhana pun, kesalahan satu langkah akan langsung tampak pada bentuk akhir.

Pada pembuatan kepala baut segi enam, benda kerja biasanya dipasang pada kepala pembagi dan difrais dengan mesin frais vertikal. Pisau frais menyayat satu bidang datar pada sisi benda kerja. Setelah bidang pertama selesai, benda diputar 4 lubang. Bidang kedua disayat. Proses ini diulang sampai enam bidang terbentuk mengelilingi benda kerja. Jika semua langkah benar, keenam bidang memiliki jarak sudut yang sama. Kesalahan dalam pembagian langsung sering muncul dari cara menghitung lubang.

Operator pemula kadang menghitung lubang awal sebagai satu langkah. Padahal yang dihitung adalah perpindahan jarak lubang dari posisi awal ke posisi berikutnya. Jika harus berpindah 4 lubang, maka jarak yang dilewati adalah empat sela lubang, bukan sekadar menunjuk lubang keempat dengan cara yang membingungkan. Kebiasaan menghitung harus dibuat konsisten sejak awal.

Agar tidak salah, operator dapat menentukan satu arah putaran dan selalu mengikuti arah itu. Putaran yang konsisten membantu mengurangi pengaruh kelonggaran mekanisme atau backlash. Jika operator melewati lubang yang dituju, sebaiknya posisi tidak langsung dimundurkan sedikit. Lebih aman memutar kembali melewati jarak tertentu lalu mendekati lubang dari arah yang sama. Cara ini membantu menjaga posisi berhenti lebih seragam. Pembagian langsung juga membutuhkan perhatian terhadap posisi pisau frais. Pada pembuatan segi, pisau harus menyayat bidang pada kedalaman yang sama untuk setiap sisi. Jika kedalaman berubah, sisi yang terbentuk tidak sama lebar. Jika benda kerja bergeser terhadap sumbu, satu sisi dapat tampak lebih panjang atau lebih pendek. Karena itu, pembagian sudut dan pengaturan kedalaman potong harus berjalan bersama.

Dalam proses milling, pisau frais memiliki beberapa mata potong yang bekerja secara berulang. Keadaan ini membuat benda kerja menerima gaya pemotongan berkala. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa milling dan gear machining merupakan bagian dari metode pemesinan yang harus dipahami melalui prinsip, aplikasi, dan kondisi kerja yang tepat. Pada pembagian langsung, kondisi kerja itu mencakup pemilihan pisau, pencekaman, penguncian kepala pembagi, dan kesesuaian jumlah lubang. Pencekaman benda kerja tidak boleh dianggap selesai hanya karena benda sudah dijepit pada chuck. Untuk benda pendek, chuck dapat memegang dengan cukup kuat. Untuk benda panjang, ujung benda mungkin perlu ditopang dengan kepala lepas atau tailstock. Jika benda panjang tidak ditopang, ujungnya dapat bergetar saat difrais. Getaran ini membuat bidang sisi tidak bersih dan ukuran menjadi sulit dijaga.

Pada benda yang akan dibuat segi empat, segi enam, atau segi delapan, bidang pertama sering menjadi acuan rasa bagi operator. Jika bidang pertama sudah terlalu dalam, semua sisi berikutnya harus mengikuti kedalaman itu agar bentuk tetap

simetris. Jika bidang pertama terlalu dangkal, bentuk akhir mungkin belum mencapai ukuran yang diminta. Karena itu, sentuhan awal dan kedalaman potong pertama perlu dibuat hati-hati. Kualitas permukaan hasil frais tetap perlu diperhatikan. Pembagian langsung hanya menjamin posisi sudut, bukan otomatis menjamin permukaan halus. Trinh (2024) menjelaskan bahwa surface roughness dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Dalam pembagian langsung, permukaan setiap sisi akan baik jika pisau frais tajam, gerak makan wajar, benda kerja stabil, dan kedalaman potong tidak berlebihan.

Keausan pisau frais dapat membuat sisi yang dikerjakan belakangan berbeda kualitasnya dari sisi awal. Pada pekerjaan segi enam, mungkin perbedaannya belum terlalu terlihat jika pemotongan ringan. Namun pada pekerjaan yang lebih banyak pembagiannya, keausan dapat memengaruhi kualitas permukaan secara bertahap. Karabacak (2024) membahas estimasi keausan pahat pada proses milling melalui sinyal multi sensor dan machine learning, yang menunjukkan bahwa kondisi pahat tetap menjadi faktor penting dalam proses frais modern maupun konvensional.

Pembagian langsung cocok untuk pekerjaan sederhana, tetapi bukan berarti hasilnya boleh dianggap sederhana. Kepala baut segi enam, misalnya, harus memiliki bidang yang cukup rata agar kunci dapat mencengkeram dengan baik. Jika salah satu sisi terlalu sempit atau sudutnya tidak seragam, kunci dapat slip saat digunakan. Dari contoh sehari-hari seperti ini terlihat bahwa pembagian yang tampak kecil punya akibat fungsional. Dalam pekerjaan segi empat pada poros, pembagian langsung membantu membuat empat bidang yang saling tegak lurus. Bentuk ini dapat digunakan sebagaiudukan kunci, bagian pengunci putaran, atau bidang pegangan. Jika pembagiannya tidak tepat, sisi yang saling berhadapan tidak sejajar sempurna. Benda mungkin masih dapat digunakan, tetapi kualitas geometrinya menurun.

Untuk segi delapan, pembagian langsung memberi langkah yang lebih rapat dibanding segi empat dan segi enam. Setiap langkah berpindah 3 lubang pada 24 lubang. Karena jarak perpindahannya lebih kecil, operator harus lebih teliti saat menghitung. Melewati satu lubang saja akan menghasilkan kesalahan sudut yang cukup terlihat. Pada bentuk segi delapan, kesalahan kecil mudah mengganggu kesan simetris. Pembagian langsung melalui 24 lubang juga dapat dipakai untuk membuat

tanda atau alur berulang sederhana. Misalnya, sebuah poros kecil memerlukan 12 tanda posisi di kelilingnya. Operator dapat menggunakan perpindahan 2 lubang. Namun, untuk alur yang membutuhkan ketelitian tinggi atau jumlah yang tidak cocok dengan 24 lubang, metode lain tetap lebih sesuai. Pemilihan metode harus mengikuti tuntutan gambar kerja, bukan sekadar mengikuti cara yang paling cepat.

Urutan kerja pembagian langsung sebaiknya dibuat tenang. Benda kerja dipasang. Sumbu diperiksa. Jumlah bagian ditentukan. Jumlah lubang per langkah dihitung. Pin diletakkan pada posisi awal. Bidang pertama difrais. Kepala pembagi dibuka dari pengunci. Benda diputar sesuai jumlah lubang. Pengunci dipasang kembali. Bidang berikutnya difrais. Urutan ini diulang sampai semua bidang selesai. Walaupun urutan itu terdengar mekanis, dalam praktiknya operator tetap perlu membaca keadaan. Jika suara pemotongan berubah, permukaan mulai kasar, atau benda tampak bergetar, proses perlu dihentikan. Kesalahan tidak selalu berasal dari pembagian. Bisa saja pisau mulai tumpul, benda kerja kurang kuat dicekam, atau kedalaman potong terlalu besar. Kepala pembagi hanya satu bagian dari sistem kerja frais.

Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan melalui hubungan peralatan, proses, dan strategi. Pembagian langsung dapat dilihat sebagai strategi sederhana yang membuat pekerjaan frais lebih efisien ketika jumlah pembagian cocok dengan lubang yang tersedia. Operator tidak membuang waktu memakai metode yang lebih rumit, tetapi tetap menjaga ketelitian melalui penguncian, perhitungan lubang, dan pemeriksaan hasil. Pemeriksaan hasil sebaiknya dilakukan sebelum seluruh sisi selesai. Pada segi enam, setelah dua atau tiga sisi dibuat, operator dapat memeriksa lebar bidang dan keseragaman posisinya. Pada segi empat, kesikuan antarbidang dapat diperiksa. Pada segi delapan, keseimbangan lebar sisi perlu diperhatikan. Pemeriksaan antara membantu mencegah kesalahan yang baru terlihat setelah benda kerja hampir selesai.

Keselamatan kerja juga dekat dengan pembagian langsung. Pin dan pengunci harus berada pada posisi aman. Kunci chuck tidak boleh tertinggal. Tangan tidak boleh berada dekat pisau frais saat mesin berjalan. Kepala pembagi harus terikat kuat pada meja mesin. Benda kerja harus dijepit dengan benar. Bentuk yang diputar bertahap tetap menerima gaya potong, sehingga risiko

gerak mendadak harus dikendalikan. Pembagian langsung mengajarkan bahwa ketelitian tidak selalu harus dimulai dari perhitungan yang rumit. Kadang, ketelitian datang dari cara sederhana yang dilakukan dengan disiplin. Dua puluh empat lubang pada spindel utama dapat menghasilkan segi empat, segi enam, segi delapan, dan beberapa pembagian sederhana lain. Syaratnya, operator memahami jumlah lubang, menghitung perpindahan dengan benar, mengunci posisi, dan menjaga proses frais tetap stabil.

Metode ini menjadi dasar yang baik sebelum kita masuk ke penggunaan piring pembagi. Setelah memahami pembagian langsung, kita akan lebih mudah menerima mengapa piring pembagi diperlukan untuk pembagian yang lebih banyak atau lebih rumit. Dari lubang langsung, logikanya bergerak ke lingkaran lubang yang lebih bervariasi. Dari bentuk segi sederhana, pembahasannya bergerak ke roda gigi dan pola keliling yang lebih teliti. Pembagian secara langsung pada kepala pembagi menempatkan benda kerja dalam beberapa kedudukan yang sama jaraknya pada satu putaran penuh. Untuk pekerjaan yang sesuai, cara ini cepat, jelas, dan mudah diawasi. Ia membantu mesin frais membuat bentuk bersisi dengan sudut yang lebih terkontrol. Dari segi empat sampai segi delapan, dari kepala baut sampai poros bersisi, pembagian langsung memberi contoh nyata bahwa lubang kecil pada kepala pembagi dapat menentukan bentuk besar pada benda kerja.

E. Penggunaan Piring Pembagi

Penggunaan piring pembagi merupakan bagian yang membuat kepala pembagi terasa benar benar “hidup” dalam pekerjaan frais. Kalau rasio roda gigi cacing 40:1 memberi dasar perhitungan, maka piring pembagi memberi cara nyata untuk menerapkan hasil perhitungan itu. Angka yang semula berupa pecahan putaran engkol diubah menjadi perpindahan lubang yang dapat dilihat, dihitung, dan dikunci oleh operator. Pada pekerjaan sederhana, pembagian langsung melalui lubang pada spindel utama sering sudah cukup. Segi empat, segi enam, dan segi delapan dapat dibuat dengan memanfaatkan 24 lubang pembagi langsung. Namun, ketika jumlah pembagian tidak cocok dengan lubang langsung, operator memerlukan piring pembagi. Di sinilah piring pembagi menjadi alat bantu yang sangat penting, terutama untuk

pembuatan roda gigi atau pola berulang dengan jumlah pembagian yang lebih banyak.

Piring pembagi atau index plate adalah pelat berlubang yang dipasang pada kepala pembagi. Lubang lubang tersebut tersusun dalam beberapa lingkaran. Setiap lingkaran memiliki jumlah lubang berbeda. Perbedaan jumlah lubang inilah yang memberi pilihan kepada operator saat harus menerjemahkan pecahan putaran engkol. Mungkin terdengar sederhana, tetapi dalam praktiknya inilah yang menjaga pembagian tetap teliti. Prinsip dasarnya tetap berangkat dari rasio 40:1. Satu putaran penuh benda kerja membutuhkan 40 putaran engkol. Jika benda kerja harus dibagi menjadi Z bagian, maka putaran engkol setiap bagian adalah 40 dibagi Z. Hasil hitungan itu bisa berupa bilangan bulat, bisa juga berupa pecahan. Jika hasilnya bilangan bulat, pekerjaan mudah. Jika hasilnya pecahan, piring pembagi diperlukan untuk membaca pecahan tersebut.

Misalnya, sebuah roda gigi akan dibuat dengan 64 gigi. Karena kepala pembagi memiliki rasio 40:1, putaran engkol setiap gigi adalah 40 dibagi 64. Hasilnya $\frac{5}{8}$ putaran. Pecahan $\frac{5}{8}$ tidak bisa diterapkan hanya dengan menebak posisi engkol. Operator perlu memilih lingkaran lubang yang jumlahnya dapat dibagi 8. Jika tersedia lingkaran 16 lubang, maka $\frac{5}{8}$ putaran sama dengan 10 lubang. Jadi, setiap selesai menyayat satu celah gigi, engkol dipindahkan sejauh 10 jarak lubang pada lingkaran 16 lubang. Contoh tersebut memperlihatkan fungsi paling praktis dari piring pembagi. Ia mengubah pecahan menjadi langkah fisik. Tanpa piring pembagi, pecahan $\frac{5}{8}$ hanya menjadi angka di atas kertas. Dengan piring pembagi, angka itu berubah menjadi perpindahan pin dari satu lubang ke lubang lain. Operator tidak lagi berhenti berdasarkan rasa, tetapi berdasarkan acuan mekanis.

Penggunaan piring pembagi dimulai dari membaca jumlah pembagian yang dibutuhkan. Jumlah ini biasanya berasal dari gambar kerja. Jika yang dibuat adalah roda gigi, jumlahnya adalah jumlah gigi. Jika yang dibuat alur berulang, jumlahnya adalah jumlah alur. Jika yang dibuat bidang bersisi tertentu, jumlahnya adalah jumlah sisi. Setelah jumlah pembagian diketahui, operator menghitung putaran engkol dengan rumus 40 dibagi jumlah pembagian. Setelah hasil hitungan diperoleh, bagian pecahan dari hasil tersebut dicocokkan dengan lubang pada piring pembagi. Jika hasilnya $6 \frac{2}{3}$ putaran, berarti operator memutar 6 putaran penuh,

lalu menambah $\frac{2}{3}$ putaran. Pecahan $\frac{2}{3}$ dapat diterjemahkan melalui lingkaran lubang yang habis dibagi 3, misalnya 15 lubang atau 18 lubang. Pada lingkaran 15 lubang, $\frac{2}{3}$ sama dengan 10 lubang. Pada lingkaran 18 lubang, $\frac{2}{3}$ sama dengan 12 lubang.

Piring pembagi yang tersedia di bengkel tidak selalu sama. Dalam bahan praktik, disebutkan seri B 1 dengan jumlah lubang 15, 16, 17, 18, 19, dan 20. Seri ini memberi beberapa pilihan untuk menerjemahkan pecahan putaran. Lingkaran 16 lubang cocok untuk pecahan setengah, seperempat, atau seperdelapan. Lingkaran 15 lubang cocok untuk pecahan sepertiga atau seperlima. Lingkaran 20 lubang cocok untuk pecahan seperdua, seperempat, seperlima, atau sepersepuluh. Pemilihan lubang tidak boleh dilakukan secara asal. Operator perlu memastikan bahwa pecahan putaran engkol dapat dikalikan dengan jumlah lubang dan menghasilkan bilangan bulat. Jika hasilnya masih pecahan, lingkaran lubang itu tidak cocok. Misalnya, $\frac{5}{8}$ putaran tidak cocok dengan lingkaran 15 lubang, karena $\frac{5}{8}$ dikalikan 15 menghasilkan $\frac{75}{8}$ atau $9 \frac{3}{8}$ lubang. Tidak mungkin pin berhenti di $\frac{3}{8}$ lubang. Karena itu, lingkaran 16 lubang lebih tepat.

Penggunaan piring pembagi akan lebih mudah jika operator memahami perbedaan antara putaran penuh dan pecahan putaran. Putaran penuh berarti engkol diputar satu lingkaran penuh kembali ke posisi awal. Pecahan putaran berarti engkol dipindahkan sebagian lingkaran melalui lubang yang tersedia. Jika hasil hitungan $2 \frac{3}{4}$ putaran, operator memutar engkol dua putaran penuh, lalu menambah $\frac{3}{4}$ putaran melalui piring pembagi. Bagian pecahan inilah yang paling sering menimbulkan kesalahan. Operator dapat salah menghitung jumlah lubang, salah memilih lingkaran, atau menghitung lubang awal sebagai langkah pertama. Dalam praktik yang aman, lubang awal tidak dihitung sebagai perpindahan. Yang dihitung adalah jarak dari lubang awal ke lubang tujuan. Jika harus bergerak 10 lubang, maka pin berpindah sejauh 10 jarak lubang. Jika lubang awal diberi nomor satu, pin dapat tampak berhenti pada lubang ke 11. Perbedaan cara menyebut ini harus dipahami agar tidak membingungkan.

Lengan sektor atau sector arms membantu operator menghindari kesalahan hitung berulang. Dua lengan sektor dapat diatur untuk mengapit jumlah lubang yang harus dilompati. Jika setiap langkah membutuhkan 10 lubang, lengan sektor diatur pada jarak tersebut. Setelah satu pembagian selesai, operator memutar

engkol sampai pin bertemu batas sektor berikutnya. Cara ini mengurangi kemungkinan salah hitung, terutama pada pekerjaan roda gigi dengan banyak gigi. Langkah penggunaan piring pembagi dapat dibayangkan melalui contoh roda gigi 64. Pertama, jumlah gigi diketahui, yaitu 64. Kedua, hitung putaran engkol dengan rumus $40 \text{ dibagi } 64$. Ketiga, hasilnya $5/8$ putaran. Keempat, pilih lingkaran lubang yang dapat dibagi 8, misalnya 16 lubang. Kelima, kalikan $5/8$ dengan 16, hasilnya 10 lubang. Keenam, setiap selesai penyayatatan satu celah gigi, engkol diputar sejauh 10 lubang pada lingkaran 16 lubang.

Contoh itu sengaja terlihat berulang karena memang pekerjaan kepala pembagi membutuhkan pola ulang yang disiplin. Satu kali salah memutar engkol dapat merusak keliling benda kerja. Pada roda gigi, kesalahan satu gigi tidak dapat disembunyikan. Jarak antar gigi harus seragam karena roda gigi akan bekerja berpasangan dengan roda gigi lain. Jika pembagiannya tidak seragam, putaran dapat berisik, tidak halus, atau cepat aus. Penggunaan piring pembagi juga perlu memperhatikan arah putaran engkol. Operator sebaiknya memutar engkol dalam satu arah yang konsisten. Jika engkol melewati lubang yang dituju, sebaiknya tidak langsung dimundurkan sedikit. Kelonggaran mekanisme atau backlash dapat membuat posisi berhenti berubah. Lebih aman memutar kembali melewati jarak tertentu, lalu mendekati lubang tujuan dari arah yang sama seperti sebelumnya.

Pin harus masuk penuh ke lubang piring pembagi. Jika pin hanya menyentuh tepi lubang atau masuk setengah, posisi engkol belum benar benar terkunci. Saat operator melepas tangan, engkol dapat bergeser sedikit. Dalam pekerjaan pembagian banyak, pergeseran kecil ini dapat menghasilkan kesalahan yang terasa besar pada hasil akhir. Karena itu, setelah setiap perpindahan, operator perlu memastikan pin duduk rapat. Piring pembagi juga harus bersih. Geram kecil yang menempel pada lubang dapat menghalangi pin masuk sempurna. Minyak terlalu kental juga dapat membuat lubang sulit dibaca atau membuat pin terasa masuk padahal belum penuh. Sebelum pekerjaan dimulai, piring pembagi sebaiknya dibersihkan dengan kuas. Kebersihan ini terlihat sederhana, tetapi sangat membantu menjaga ketelitian kerja.

Kepala pembagi perlu dikunci setelah posisi piring dan engkol selesai disetel. Piring pembagi membantu menentukan

posisi, tetapi saat proses frais berlangsung, gaya potong tetap dapat mendorong benda kerja. Pengunci spindel menahan benda agar tidak berubah posisi ketika pisau frais menyayat. Tanpa penguncian, hasil pembagian yang sudah dihitung bisa bergeser saat pemotongan dilakukan. Pada proses frais, gaya potong berasal dari pisau bermata jamak yang berputar. Pisau frais menyayat secara berkala, sehingga benda kerja menerima beban berulang. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa proses milling dan gear machining perlu dipahami dari prinsip, penerapan, dan kondisi kerja yang tepat. Dalam penggunaan piring pembagi, kondisi kerja itu mencakup kesesuaian lubang, kekakuan pencekaman, penguncian spindel, dan pemilihan pisau frais.

Kualitas permukaan tetap bergantung pada parameter pemotongan. Piring pembagi dapat membuat posisi sudut benar, tetapi tidak otomatis membuat permukaan halus. Jika feed terlalu besar atau depth of cut terlalu berat, permukaan dapat kasar dan pisau cepat aus. Trinh (2024) menjelaskan bahwa surface roughness dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pada pekerjaan roda gigi, kualitas permukaan celah gigi sama pentingnya dengan jarak pembagian. Keausan pisau frais juga perlu diawasi. Pada pekerjaan dengan banyak pembagian, pisau bekerja berulang dalam jumlah besar. Jika pisau mulai aus di tengah pekerjaan, celah atau bidang yang dikerjakan belakangan dapat berbeda kualitasnya dari bagian awal. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa keausan pahat pada proses milling dapat diperkirakan melalui analisis sinyal multi sensor dan pendekatan machine learning. Dalam praktik konvensional, operator membaca tanda keausan dari suara potong, geram, panas, dan perubahan permukaan.

Pemilihan piring pembagi juga berhubungan dengan efisiensi kerja. Jika ada beberapa lingkaran lubang yang sama sama cocok, operator dapat memilih yang paling mudah dihitung dan paling kecil risikonya. Misalnya, pecahan $\frac{2}{3}$ dapat memakai 15 lubang dengan perpindahan 10 lubang atau 18 lubang dengan perpindahan 12 lubang. Keduanya benar. Pilihan dapat ditentukan dari kenyamanan pembacaan, jarak sektor, dan kebiasaan bengkel. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan melalui integrasi peralatan, proses, dan strategi. Penggunaan piring pembagi dapat dibaca sebagai bagian dari strategi itu. Piring pembagi membuat mesin frais konvensional mampu mengerjakan

variasi bentuk yang lebih luas tanpa selalu memerlukan mesin khusus. Namun, efisiensi ini hanya muncul jika operator mengurangi kesalahan melalui perhitungan, pemilihan lubang, dan pemeriksaan yang rapi.

Pemeriksaan hasil sebaiknya dilakukan sejak awal. Pada roda gigi, beberapa celah pertama dapat diperiksa kedalaman dan jaraknya. Pada alur berulang, jarak antar alur dapat dicek sebelum seluruh keliling selesai. Jangan menunggu sampai semua pembagian selesai baru memeriksa. Jika kesalahan lubang ditemukan setelah satu putaran penuh hampir selesai, benda kerja mungkin sudah sulit diperbaiki. Kesalahan umum dalam penggunaan piring pembagi biasanya berasal dari hal kecil. Salah menyederhanakan pecahan. Salah memilih lingkaran lubang. Salah menghitung jumlah lubang. Lupa mengatur lengan sektor. Pin tidak masuk penuh. Spindel tidak dikunci. Engkol diputar berlawanan arah lalu langsung dihentikan pada lubang tujuan. Semua itu dapat merusak pembagian meskipun alatnya masih baik.

Keselamatan kerja juga tetap melekat pada penggunaan piring pembagi. Operator tidak boleh mengatur pin atau piring pembagi saat pisau frais masih berputar dekat benda kerja. Tangan harus jauh dari pisau. Kunci chuck tidak boleh tertinggal. Benda kerja harus dijepit kuat. Kepala pembagi harus terikat kuat pada meja frais. Piring pembagi memang alat hitung mekanis, tetapi ia digunakan di sekitar mesin yang memiliki gerakan dan gaya potong nyata. Penggunaan piring pembagi melatih operator menggabungkan angka dengan gerakan tangan. Rumus memberi hasil $5/8$, piring memberi 16 lubang, hitungan memberi 10 lubang, lengan sektor membantu pengulangan, dan pin mengunci posisi. Rangkaian ini menunjukkan bahwa presisi dalam mesin perkakas tidak hanya berasal dari alat yang mahal, tetapi juga dari kebiasaan kerja yang konsisten.

F. Pembagian Melalui Lubang

Pembagian melalui lubang merupakan salah satu cara paling praktis dalam penggunaan kepala pembagi pada mesin frais. Cara ini digunakan ketika keliling benda kerja perlu dibagi menjadi beberapa bagian yang sama, tetapi jumlah bagiannya masih sesuai dengan lubang pembagi yang tersedia pada kepala pembagi. Dalam praktik bengkel, metode ini banyak dipakai untuk membuat bentuk segi empat, segi enam, segi delapan, atau bentuk bersisi teratur lain yang tidak memerlukan perhitungan piring pembagi yang terlalu

rumit. Pada kepala pembagi konvensional, pembagian melalui lubang biasanya memanfaatkan lubang pembagi yang berada pada spindel utama atau pelat pembagi langsung. Materi ini menjelaskan adanya 24 lubang pembagi yang tersusun mengelilingi spindel utama kepala pembagi. Angka 24 menjadi penting karena dapat dibagi oleh beberapa jumlah sisi yang umum digunakan dalam pekerjaan frais, seperti 2, 3, 4, 6, 8, 12, dan 24. Dari sinilah operator dapat memutar benda kerja secara bertahap tanpa harus memakai perhitungan rumit seperti pada pembagian tidak langsung.

Secara sederhana, prinsipnya adalah satu putaran penuh benda kerja dibagi menjadi 24 posisi lubang. Jika benda kerja akan dibuat menjadi enam sisi, maka satu putaran penuh harus dibagi menjadi enam posisi. Karena tersedia 24 lubang, setiap langkah perpindahan adalah 24 dibagi 6, yaitu 4 lubang. Setelah satu bidang selesai difrais, kepala pembagi diputar sejauh 4 lubang, lalu bidang berikutnya disayat. Begitu seterusnya sampai keenam sisi terbentuk. Pembagian melalui lubang dapat dipahami sebagai bentuk pembagian langsung karena operator tidak perlu menghitung putaran engkol berdasarkan rasio roda gigi cacing 40:1. Pada pembagian tidak langsung, rasio 40:1 menjadi dasar utama untuk menentukan berapa putaran engkol pada setiap pembagian. Pada pembagian melalui lubang, operator langsung memakai jumlah lubang yang tersedia sebagai acuan perpindahan posisi. Cara ini lebih cepat, lebih mudah dipahami, dan sangat cocok untuk pekerjaan bentuk sederhana yang jumlah pembagiannya sesuai dengan 24 lubang tersebut.

Meskipun tampak mudah, pembagian melalui lubang tetap menuntut ketelitian. Kesalahan menghitung lubang, lupa mengunci spindel, atau memutar benda kerja melewati lubang tujuan dapat membuat sisi benda kerja tidak sama lebar. Pada bentuk segi enam, misalnya, satu kesalahan langkah dapat membuat kepala baut tampak tidak simetris. Secara fungsi, benda seperti itu mungkin masih dapat dipasang pada beberapa kasus, tetapi dari sisi kualitas pemesinan, hasilnya jelas tidak layak dijadikan contoh kerja yang baik. Kepala pembagi dalam proses ini berperan sebagai alat pengatur sudut benda kerja. Mesin frais tetap bertugas menyayat bidang menggunakan pisau frais, sedangkan kepala pembagi mengatur posisi benda kerja dari satu bidang ke bidang berikutnya. Hubungan ini penting untuk dipahami karena kepala pembagi

bukan alat pemotong. Ia tidak menggantikan pisau frais. Ia hanya memastikan benda kerja berada pada sudut yang tepat ketika penyayatan dilakukan.

Dalam pekerjaan frais konvensional, bentuk segi empat, segi enam, dan segi delapan sering muncul pada komponen seperti kepala baut, mur, poros bertapak, gagang penjepit,udukan kunci, atau bagian mesin yang memerlukan sisi bidang untuk pegangan alat. Bentuk tersebut tidak cukup dibuat berdasarkan perkiraan visual. Setiap sisi harus memiliki jarak sudut yang sama agar bentuknya seimbang. Di sinilah pembagian melalui lubang memberi cara kerja yang lebih pasti daripada sekadar menandai keliling benda kerja dengan garis manual. Rumus sederhana yang digunakan dalam pembagian melalui lubang adalah jumlah lubang tiap langkah sama dengan jumlah lubang tersedia dibagi jumlah bagian yang akan dibuat. Jika jumlah lubang tersedia adalah 24 dan jumlah bagian yang diinginkan adalah Z, maka perpindahan lubang tiap penyayatan dapat ditulis sebagai $24/Z$. Simbol Z menunjukkan jumlah sisi atau jumlah pembagian pada keliling benda kerja. Rumus ini hanya dapat digunakan secara langsung jika 24 dapat dibagi habis oleh Z.

Untuk membuat segi empat, jumlah pembagian adalah 4. Perpindahan lubang tiap langkah menjadi $24/4$, yaitu 6 lubang. Artinya, setelah satu sisi selesai difrais, benda kerja diputar sejauh 6 lubang sebelum sisi berikutnya dibuat. Karena satu putaran penuh terdiri dari 24 lubang, maka empat kali perpindahan 6 lubang akan mengembalikan benda kerja ke posisi awal. Perhitungan ini menunjukkan bahwa pembagian benar benar menutup satu lingkaran penuh. Untuk membuat segi enam, jumlah pembagian adalah 6. Perpindahan lubang tiap langkah menjadi $24/6$, yaitu 4 lubang. Inilah contoh yang sering digunakan pada pembuatan kepala baut atau mur segi enam. Setelah satu bidang difrais, operator memutar kepala pembagi sejauh 4 lubang, mengunci posisi, lalu melakukan penyayatan berikutnya. Enam kali langkah menghasilkan satu putaran penuh benda kerja.

Untuk membuat segi delapan, jumlah pembagian adalah 8. Perpindahan lubang tiap langkah menjadi $24/8$, yaitu 3 lubang. Bentuk segi delapan dapat digunakan pada bagian tertentu yang membutuhkan bidang pegangan lebih banyak daripada segi empat, tetapi tidak seumum segi enam pada kepala baut. Dengan perpindahan 3 lubang, delapan bidang dapat dibuat secara merata

di sekeliling benda kerja. Pada contoh segi enam, urutan posisi dapat dimulai dari lubang mana saja, selama perpindahannya selalu sama, yaitu 4 lubang. Jika dimulai dari lubang pertama, posisi berikutnya berada pada lubang kelima, lalu kesembilan, ketiga belas, ketujuh belas, dan kedua puluh satu. Setelah langkah keenam, benda kerja kembali ke posisi awal. Urutan ini memperlihatkan bahwa yang paling penting bukan nomor lubang awal, melainkan konsistensi jumlah perpindahan.

Dalam praktik kerja, operator perlu menentukan titik awal sebelum penyayatan pertama dilakukan. Titik awal ini menjadi acuan seluruh pembagian berikutnya. Setelah benda kerja dicekam pada kepala pembagi, pisau frais diatur untuk menyayat bidang pertama. Setelah bidang pertama selesai, mesin dihentikan atau meja digeser aman sesuai prosedur, kemudian pin pembagi dilepas, spindel diputar sesuai jumlah lubang yang dihitung, pin dimasukkan kembali, dan posisi dikunci sebelum penyayatan dilanjutkan. Penguncian posisi tidak boleh dianggap sebagai langkah tambahan yang boleh dilewati. Saat pisau frais menyayat benda kerja, gaya potong dapat menyebabkan benda kerja bergerak jika spindel kepala pembagi tidak terkunci dengan baik. Pada segi enam atau segi delapan, pergeseran kecil dapat membuat salah satu bidang lebih lebar atau lebih sempit daripada bidang lain. Hasilnya mungkin baru terlihat setelah beberapa sisi selesai. Pada saat itu, operator biasanya baru ingat bahwa ketelitian bukan hiasan di modul praktikum.

Pembagian melalui lubang juga berkaitan dengan pencekaman benda kerja. Benda kerja yang akan dibuat segi harus dipasang sepusat terhadap sumbu putar kepala pembagi. Jika benda kerja tidak sepusat, setiap sisi yang difrais dapat memiliki lebar berbeda walaupun perpindahan lubangnya benar. Kesalahan semacam ini menunjukkan bahwa perhitungan yang benar tidak cukup jika pemasangan benda kerja buruk. Dalam teknologi mesin perkakas, angka dan mekanik harus berjalan bersama. Selain kesepusatan, kekakuan pencekaman juga perlu diperhatikan. Benda kerja yang terlalu panjang tanpa penyangga dapat bergetar saat difrais. Benda kerja yang dijepit terlalu pendek dapat bergeser. Benda kerja yang bentuk awalnya tidak rata dapat menimbulkan bidang sayatan yang tidak seragam. Karena itu, sebelum menggunakan kepala pembagi, operator perlu memastikan bahwa

benda kerja, chuck, senter, atau perlengkapan pendukung lain telah terpasang dengan benar.

Pemilihan pisau frais ikut memengaruhi kualitas hasil pembagian. Untuk membuat bidang sisi pada segi empat, segi enam, atau segi delapan, pisau frais harus mampu menyayat permukaan dengan stabil. Jika pisau tumpul, gaya potong meningkat dan permukaan menjadi kasar. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa keausan pahat pada operasi milling dapat diperkirakan melalui analisis sinyal sensor dan algoritma machine learning. Meskipun pembahasan ini berada pada mesin frais konvensional, gagasan tersebut mengingatkan bahwa kondisi pahat tetap berperan besar terhadap kualitas hasil. Parameter pemotongan juga tidak boleh diabaikan. Kecepatan putar spindel mesin frais, gerak makan meja, kedalaman penyayatan, dan jenis material benda kerja perlu disesuaikan. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kekasaran permukaan dalam pemesinan dipengaruhi oleh kombinasi parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pada pembagian melalui lubang, kepala pembagi hanya menjamin posisi sudut. Kualitas permukaan bidang tetap ditentukan oleh proses frais itu sendiri.

Bila bahan yang difrais adalah baja karbon, parameter yang digunakan tentu berbeda dari aluminium. Aluminium dapat disayat dengan kecepatan lebih tinggi, tetapi tetap memerlukan perhatian terhadap pembentukan geram dan kemungkinan material menempel pada pisau. Baja membutuhkan pengaturan yang lebih hati-hati karena gaya potong lebih besar. Pada benda kerja kecil seperti kepala baut, kesalahan parameter mungkin tidak tampak dramatis, tetapi tetap dapat membuat permukaan kasar, tepi bidang tidak bersih, atau dimensi sisi menyimpang. Pembagian melalui lubang sering menjadi materi yang baik untuk melatih hubungan antara teori dan tindakan mekanis. Pembaca tidak hanya melihat rumus, tetapi juga menerapkan angka ke posisi lubang nyata. Ketika $24/6$ menghasilkan 4 lubang, angka itu langsung berubah menjadi gerakan memutar kepala pembagi. Perubahan dari hitungan menjadi tindakan inilah yang membuat pembelajaran mesin perkakas terasa konkret. Rumus tidak berhenti di papan tulis, melainkan berpindah ke benda kerja.

Pada pembuatan segi empat, langkah kerja yang baik dimulai dari pembentukan benda kerja silindris atau balok awal sesuai kebutuhan. Jika benda kerja berupa poros silindris, tahap awal

dapat dilakukan pada mesin bubut untuk mendapatkan diameter dan panjang yang benar. Setelah itu benda kerja dipindahkan ke kepala pembagi pada mesin frais. Setiap sisi kemudian difrais dengan perpindahan 6 lubang. Empat kali penyayatan menghasilkan empat bidang yang saling berjarak 90 derajat. Pada pembuatan segi enam, contoh yang paling mudah dibayangkan adalah kepala baut atau mur. Benda kerja dipasang pada kepala pembagi, lalu sisi pertama difrais sampai mencapai ukuran bidang yang direncanakan. Setelah itu spindel diputar 4 lubang. Sisi kedua disayat, lalu proses diulang sampai enam sisi selesai. Jika semua langkah dilakukan konsisten, hasilnya adalah bentuk segi enam yang simetris dan dapat digunakan sebagai bidang pegangan kunci.

Pada pembuatan segi delapan, prinsip yang sama digunakan dengan perpindahan 3 lubang. Bentuk ini membutuhkan penyayatan lebih banyak dibanding segi enam, sehingga risiko kelalaian juga meningkat. Operator perlu menjaga urutan kerja agar tidak salah posisi. Kesalahan satu langkah pada segi delapan dapat membuat pola sisi tidak seimbang. Karena jumlah bidang lebih banyak, pemeriksaan visual setelah beberapa sisi pertama menjadi lebih penting. Pemeriksaan hasil perlu dilakukan secara bertahap. Setelah dua atau tiga sisi selesai dibuat, operator dapat memeriksa lebar bidang, kesikuan, dan keseragaman permukaan. Pemeriksaan dapat menggunakan jangka sorong, mikrometer, siku, atau alat ukur lain sesuai bentuk benda kerja. Pemeriksaan awal membantu mendeteksi kesalahan sebelum seluruh keliling terlanjur selesai. Menunggu sampai semua sisi selesai baru memeriksa hasil adalah cara yang sangat manusiawi, dalam arti kurang bijak tetapi sering dilakukan.

Dalam konteks manufaktur modern, pembagian melalui lubang tampak sederhana, tetapi tetap sejalan dengan prinsip pemesinan yang lebih luas. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa metode pemesinan mencakup proses seperti turning, drilling, milling, grinding, dan pemesinan roda gigi, masing-masing dengan prinsip kerja dan kondisi proses berbeda. Kepala pembagi berada dalam wilayah proses frais karena membantu mengatur posisi benda kerja agar penyayatan dapat dilakukan pada sudut yang tepat. Wang et al. (2023) membahas pemesinan berkelanjutan melalui hubungan antara peralatan, proses, dan strategi. Pembagian melalui lubang dapat dibaca dalam kerangka tersebut. Peralatan yang digunakan adalah kepala pembagi dan

mesin frais. Prosesnya adalah penyayatan bidang secara berulang. Strateginya adalah memilih jumlah lubang yang tepat, mengunci posisi, mengatur parameter pemotongan, dan memeriksa hasil secara bertahap. Bila strategi ini diabaikan, alat yang benar tetap dapat menghasilkan benda kerja yang salah.

Keuntungan utama pembagian melalui lubang adalah kecepatan dan kemudahan. Operator tidak perlu menghitung pecahan putaran engkol yang rumit. Selama jumlah pembagian sesuai dengan 24 lubang, perpindahan dapat dihitung cepat dan diterapkan langsung. Cara ini sangat berguna dalam pekerjaan bengkel pendidikan karena membantu pembelajar memahami dasar pembagian sudut tanpa langsung terbebani oleh perhitungan piring pembagi yang lebih kompleks. Keterbatasannya juga jelas. Pembagian melalui lubang tidak fleksibel untuk semua jumlah bagian. Jumlah pembagian harus dapat membagi 24 secara bulat. Jika tidak, pembagian harus dilakukan dengan metode lain. Selain itu, akurasi tetap bergantung pada kondisi lubang pembagi, pin, pengunci, pencekaman, dan kebiasaan operator. Lubang pembagi yang aus atau pin yang tidak masuk penuh dapat menimbulkan penyimpangan posisi. Jadi, metode ini mudah, tetapi bukan berarti bebas risiko.

Kesalahan yang sering terjadi dalam pembagian melalui lubang biasanya sederhana. Operator salah menghitung langkah, salah menentukan apakah lubang awal dihitung atau tidak, lupa memasukkan pin sampai penuh, atau lupa mengunci spindel sebelum penyayatan. Kesalahan lain muncul ketika operator memutar melewati lubang tujuan lalu memundurkan sedikit tanpa memperhatikan celah gerak mekanis atau backlash. Kebiasaan yang lebih aman adalah mendekati posisi dari arah putaran yang sama secara konsisten. Pemahaman tentang backlash penting karena kepala pembagi tetap merupakan sistem mekanis. Di dalamnya terdapat roda gigi, poros, pin, dan pengunci. Setiap komponen memiliki celah gerak tertentu. Bila operator memutar maju lalu mundur sedikit, posisi akhir mungkin tidak sama dengan posisi yang dicapai melalui putaran maju langsung. Pada pekerjaan yang membutuhkan simetri, perbedaan kecil ini dapat memengaruhi hasil. Mesin tidak punya niat buruk; ia hanya patuh pada kelonggaran mekanisnya.

Untuk mengurangi kesalahan, operator dapat membuat catatan kecil sebelum mulai bekerja. Catatan itu berisi jumlah

pembagian, jumlah lubang tiap langkah, posisi awal, arah putaran, dan urutan posisi lubang. Pada segi enam, misalnya, jika mulai dari lubang 1, urutan dapat ditulis 1, 5, 9, 13, 17, 21, lalu kembali ke 1. Catatan sederhana seperti ini dapat mencegah kebingungan saat proses sudah berjalan. Kadang alat paling murah di bengkel adalah disiplin mencatat, sayangnya sering dianggap aksesori. Pembagian melalui lubang juga perlu dikaitkan dengan keselamatan kerja. Saat memindahkan posisi kepala pembagi, mesin frais harus berada dalam kondisi aman. Tangan operator tidak boleh berada dekat pisau yang masih berputar. Pin pembagi harus dipastikan masuk penuh sebelum penyayatan. Benda kerja harus terkunci, dan geram tidak boleh mengganggu kedudukan atau bidang ukur. Keselamatan dalam proses ini bukan hanya menghindari cedera, tetapi juga menjaga agar hasil pemesinan tidak rusak oleh langkah kerja yang terburu-buru.

Dalam pembelajaran, subbab ini menjadi jembatan antara pengenalan kepala pembagi dan aplikasi pembuatan bentuk keliling. Setelah memahami rasio roda gigi cacing 40:1 dan contoh pembagian roda gigi, kita dapat melihat bahwa tidak semua pekerjaan membutuhkan perhitungan engkol yang panjang. Untuk bentuk tertentu, lubang pembagi langsung memberi cara yang lebih ringkas. Namun, kita juga perlu memahami batasnya agar tidak memakai metode ini untuk jumlah pembagian yang tidak sesuai. Secara teknis, pembagian melalui lubang mengajarkan tiga hal penting. Pertama, bentuk keliling benda kerja dapat dikendalikan melalui pembagian sudut yang sama. Kedua, lubang pembagi mengubah sudut menjadi langkah mekanis yang dapat diulang. Ketiga, hasil yang baik hanya muncul jika perhitungan, pencekaman, penguncian, penyayatan, dan pemeriksaan dilakukan sebagai satu rangkaian kerja. Jika salah satu bagian diabaikan, bentuk yang seharusnya simetris dapat berubah menjadi latihan toleransi terhadap kekecewaan.

Pembagian melalui lubang memperlihatkan bahwa kepala pembagi bukan sekadar perlengkapan tambahan pada mesin frais. Alat ini memperluas kemampuan mesin frais untuk menghasilkan bentuk beraturan di sekeliling benda kerja. Segi empat, segi enam, dan segi delapan dapat dibuat dengan cara yang lebih terukur karena setiap sisi memiliki acuan posisi yang jelas. Dalam teknologi mesin perkakas, kemampuan seperti ini sangat penting

karena banyak komponen mesin membutuhkan bentuk yang tidak hanya bisa dipotong, tetapi juga harus dibagi secara tepat.

G. Integrasi Pemilihan Proses: Kapan Menggunakan Bubut, Frais, Sekrap, Gurdi, dan Kepala Pembagi

Pemilihan proses pemesinan tidak sebaiknya dipahami sebagai kegiatan memilih mesin secara terpisah pisah, seolah setiap mesin berdiri sendiri tanpa hubungan dengan bentuk komponen yang akan dibuat. Dalam bengkel mesin perkakas, keputusan memilih bubut, frais, sekrap, gurdi, atau kepala pembagi selalu berkaitan dengan geometri benda kerja, arah gerak pemotongan, cara pencekaman, toleransi, kualitas permukaan, ketersediaan alat, serta urutan pengerjaan. Di atas kertas, semua proses tampak rapi. Di bengkel, satu keputusan yang kurang tepat bisa membuat pekerjaan berputar lebih lama daripada spindel mesin itu sendiri. Integrasi pemilihan proses berarti membaca kebutuhan komponen sebagai satu rangkaian kerja. Sebuah benda kerja jarang hanya membutuhkan satu jenis proses. Poros bertingkat, misalnya, dapat diawali dengan pembubutan untuk membentuk diameter utama, kemudian digurdi pada ujungnya, diberi alur pasak melalui frais, dan diperiksa kembali menggunakan alat ukur presisi. Roda gigi juga tidak langsung muncul hanya dari proses frais. Bakal roda gigi perlu dibentuk lebih dahulu, biasanya melalui pembubutan, lalu celah giginya dibuat pada mesin frais dengan bantuan kepala pembagi.

Prinsip pertama dalam memilih proses adalah mengenali bentuk dominan benda kerja. Bila bentuk utama benda kerja berupa silinder, poros, tirus, ulir luar, alur melingkar, atau permukaan ujung benda silindris, mesin bubut menjadi pilihan yang paling wajar. Mesin bubut bekerja dengan gerak utama berupa putaran benda kerja, sementara pahat bergerak menyayat secara memanjang atau melintang. Karena itu, bentuk yang memiliki sumbu putar biasanya lebih mudah, lebih stabil, dan lebih logis dikerjakan pada mesin bubut.

Pada mesin bubut, benda kerja menjadi pusat gerak utama. Pahat bermata tunggal menyayat permukaan benda kerja yang berputar, sehingga proses ini sangat sesuai untuk menghasilkan diameter luar, diameter dalam melalui proses boring, muka rata melalui facing, serta ulir. Dalam pekerjaan perawatan industri, mesin bubut sering digunakan untuk memperbaiki poros aus, meratakan ujung komponen, membuat bushing, atau menyesuaikan

diameter agar sesuai dengan pasangan rakit. Pilihan ini bukan karena bubut lebih “hebat” daripada mesin lain, melainkan karena gerak putarnya memang sesuai dengan bentuk yang ingin dicapai. Mesin frais digunakan ketika bentuk yang dibutuhkan lebih banyak berupa bidang datar, alur, bidang bertingkat, sisi bersudut, permukaan profil, atau celah pada benda kerja. Berbeda dengan bubut, pada mesin frais gerak utama berasal dari putaran pisau frais atau cutter, sedangkan benda kerja biasanya digerakkan melalui meja mesin. Pisau frais memiliki beberapa mata potong, sehingga proses penyayatan terjadi secara berulang saat gigi pisau menyentuh benda kerja. Keadaan ini membuat frais sangat cocok untuk pekerjaan yang membutuhkan permukaan datar yang lebar, alur memanjang, atau bentuk bidang yang berulang.

Dalam proses frais, pemilihan parameter tidak boleh dilakukan secara sembarang. Kecepatan potong, gerak makan per gigi, kedalaman potong, jumlah mata potong, dan kekakuan mesin akan memengaruhi hasil akhir. Trinh (2024) menjelaskan bahwa kualitas kekasaran permukaan dalam proses pemesinan dipengaruhi oleh parameter pemotongan, sifat alat potong, dan sifat benda kerja. Pada pekerjaan frais, hubungan ini terasa langsung. Gerak makan yang terlalu besar dapat mempercepat pekerjaan, tetapi juga dapat meningkatkan kekasaran permukaan dan beban pada pisau frais. Metode frais juga perlu diperhatikan. Pada up milling, arah putaran pisau berlawanan dengan gerak meja. Tebal geram dimulai dari kecil lalu membesar, sehingga gaya potong cenderung mengangkat benda kerja dari ragum. Metode ini sering dianggap lebih aman pada mesin konvensional karena dapat mengurangi risiko tertariknya meja akibat celah gerak mekanik. Pada down milling, arah putaran pisau searah dengan gerak meja. Tebal geram dimulai dari besar lalu mengecil, sehingga hasil permukaan dapat lebih halus, tetapi mesin harus cukup kaku dan bebas dari kelonggaran berlebihan.

Mesin sekrap memiliki wilayah kerja yang berbeda. Proses sekrap menggunakan pahat bermata tunggal dengan gerak bolak balik. Pemotongan biasanya terjadi pada langkah maju, sedangkan langkah balik tidak menghasilkan penyayatan utama. Mesin ini lazim digunakan untuk membuat bidang datar, bidang tegak, bidang menyudut, serta alur tertentu. Walaupun di banyak bengkel modern sebagian peran sekrap telah digantikan oleh frais atau mesin CNC, pembahasan sekrap tetap penting karena

memperlihatkan prinsip pemotongan yang mudah diamati secara langsung. Sekrap sering cocok untuk pekerjaan bidang datar sederhana, terutama ketika mesin frais tidak tersedia atau ketika benda kerja berukuran tertentu lebih mudah diatur pada meja sekrap. Dalam konteks pendidikan, mesin sekrap membantu pembelajar memahami hubungan antara panjang langkah, gerak makan, kedalaman potong, bentuk pahat, dan bekas sayatan. Ritmenya memang lebih lambat, tetapi justru dari kelambatan itu proses penyayatan dapat dilihat dengan jelas. Kadang mesin yang lambat lebih jujur mengajarkan prinsip kerja daripada mesin cepat yang membuat kesalahan tampak seperti takdir.

Mesin gurdi dipilih ketika kebutuhan utama adalah membuat lubang. Pada proses gurdi, mata bor berputar dan bergerak masuk secara aksial ke benda kerja. Lubang yang dibuat dapat menjadi lubang akhir, dapat pula menjadi tahap awal sebelum proses lain seperti reaming, boring, atau pembuatan ulir dalam. Karena terlihat sederhana, proses gurdi sering diremehkan. Padahal lubang baut, lubang pin, lubang pelumas, dan lubangudukan komponen sangat menentukan keberhasilan perakitan. Ketepatan proses gurdi bergantung pada beberapa hal, antara lain penandaan titik lubang, kekakuan pencekaman, kecepatan putar, gerak makan, geometri mata bor, dan kemampuan geram keluar dari lubang. Pada lubang yang dangkal, kesalahan kecil mungkin masih mudah diperbaiki. Pada lubang dalam, geram yang tersumbat dapat meningkatkan panas dan mematahkan mata bor. Bila titik lubang bergeser, komponen bisa gagal dirakit meskipun permukaannya tampak rapi. Manufaktur kadang kejam dengan cara yang sangat sederhana: lubang meleset sedikit, seluruh komponen ikut dipertanyakan.

Kepala pembagi perlu ditempatkan secara tepat dalam integrasi proses. Kepala pembagi bukan mesin pemotong utama seperti bubut, frais, sekrap, atau gurdi. Ia adalah alat bantu pada mesin frais yang digunakan untuk membagi keliling benda kerja menjadi beberapa bagian yang sama atau sesuai perhitungan tertentu. Penggunaannya menjadi penting ketika benda kerja harus diputar bertahap dengan sudut yang konsisten, misalnya pada pembuatan roda gigi, segi empat, segi enam, segi delapan, alur keliling berulang, atau bentuk lain yang membutuhkan pembagian sudut. Pada kepala pembagi konvensional, mekanisme roda gigi cacing dengan rasio 40:1 membuat satu putaran penuh benda kerja membutuhkan empat puluh putaran engkol. Rasio ini memberi

keuntungan karena gerakan kecil pada engkol dapat diterjemahkan menjadi perubahan sudut yang lebih halus pada benda kerja. Dalam pembuatan roda gigi, setiap celah gigi harus dibuat pada posisi yang sama jaraknya terhadap celah lain. Jika pembagian keliling tidak tepat, roda gigi tidak hanya buruk secara bentuk, tetapi juga dapat menimbulkan getaran, bunyi, dan ketidaksesuaian pasangan kerja.

Contoh lain dapat dilihat pada pembuatan roda gigi sederhana. Tahap awal biasanya membentuk blank roda gigi melalui mesin bubut agar diameter luar, lubang tengah, dan permukaan samping sesuai ukuran. Setelah blank selesai, benda kerja dipasang pada kepala pembagi di mesin frais. Pisau roda gigi kemudian menyayat satu celah, kepala pembagi diputar sesuai hasil perhitungan, lalu celah berikutnya disayat. Proses ini diulang sampai jumlah gigi terpenuhi. Tanpa kepala pembagi, mesin frais tetap bisa menyayat, tetapi tidak memiliki acuan pembagian keliling yang cukup teliti. Pemilihan proses juga harus mempertimbangkan pencekaman. Benda kerja silindris panjang lebih aman dipasang pada mesin bubut dengan bantuan senter atau penyangga bila diperlukan. Benda kerja berbentuk balok lebih mudah dicekam pada ragam mesin frais atau sekrup. Pelat tipis yang akan digurdi perlu ditahan agar tidak ikut berputar bersama mata bor. Benda kerja yang akan dibagi kelilingnya harus terpasang sepusat pada kepala pembagi. Kesalahan pencekaman sering lebih berbahaya daripada kesalahan rumus, karena benda kerja dapat bergeser saat gaya potong bekerja.

Toleransi dan kualitas permukaan ikut menentukan pemilihan proses. Jika permukaan harus sangat rata dan ukuran harus terkendali, frais dapat lebih sesuai dibanding sekrup pada banyak kondisi modern. Jika lubang membutuhkan ketelitian lebih tinggi daripada hasil gurdi biasa, proses lanjutan seperti reaming atau boring mungkin diperlukan. Jika diameter luar poros harus presisi, pembubutan akhir dengan kedalaman potong kecil lebih masuk akal daripada memaksakan proses kasar. Kualitas bukan hanya soal mesin yang dipakai, tetapi juga bagaimana proses disusun. Karabacak (2024) menunjukkan bahwa keausan pahat pada proses milling dapat diperkirakan melalui analisis sinyal multi sensor dan algoritma machine learning. Temuan seperti ini memperluas cara melihat pemilihan proses. Pada bengkel konvensional, operator membaca kondisi pahat dari suara, geram,

getaran, dan hasil permukaan. Pada sistem modern, pembacaan itu dapat dibantu sensor. Meski begitu, data sensor tidak menghapus kebutuhan memahami proses dasar. Sensor hanya memberi tanda; manusia tetap harus tahu apa yang sedang terjadi.

Dalam pemesinan modern, pemilihan proses juga berhubungan dengan efisiensi energi, waktu, dan umur alat potong. Wang et al. (2023) menekankan pentingnya integrasi antara peralatan, proses, dan strategi dalam pemesinan berkelanjutan. Artinya, proses yang dipilih tidak cukup dinilai dari kemampuan membentuk benda kerja. Proses juga perlu dilihat dari stabilitas, konsumsi energi, jumlah langkah kerja, risiko benda gagal, dan kemudahan pemeriksaan. Di sinilah integrasi proses menjadi bagian dari pengambilan keputusan manufaktur, bukan sekadar urusan bengkel dasar. Dalam praktik, pemilihan antara frais dan sekrap sering bergantung pada tuntutan produksi. Frais biasanya lebih cepat dan lebih fleksibel untuk bidang datar, alur, dan pekerjaan bertingkat. Sekrap dapat digunakan untuk bidang datar sederhana, terutama pada lingkungan pembelajaran atau bengkel yang masih memakai mesin konvensional. Jika jumlah benda kerja banyak dan toleransi cukup ketat, frais lebih menguntungkan. Jika pekerjaan bersifat satuan, sederhana, dan fasilitas terbatas, sekrap masih dapat menjadi pilihan yang masuk akal.

Pemilihan antara gurdi dan proses lubang lain juga perlu cermat. Gurdi cocok untuk membuat lubang awal, tetapi tidak selalu cukup untuk menghasilkan lubang yang sangat presisi. Bila lubang harus memiliki diameter yang lebih akurat, permukaan lebih halus, atau posisi lebih terkendali, proses lanjutan dapat diperlukan. Dalam pembuatan komponen mesin, lubang sering berfungsi sebagai tempat baut, pin, poros, atau saluran fluida. Karena itu, memilih gurdi bukan berarti pekerjaan selesai tanpa pemeriksaan. Lubang tetap harus dicek diameter, posisi, kedalaman, dan kebersihannya. Pada pekerjaan yang melibatkan kepala pembagi, pertimbangan utamanya adalah jumlah pembagian dan bentuk yang diinginkan. Untuk bentuk sederhana seperti segi empat, segi enam, atau segi delapan, pembagian langsung dapat digunakan bila jumlah lubang pembagi mendukung. Untuk roda gigi dengan jumlah gigi tertentu, perhitungan putaran engkol diperlukan berdasarkan rasio 40:1. Kepala pembagi mengubah persoalan geometri menjadi langkah mekanis yang dapat diulang.

Inilah alasan alat ini sangat penting dalam pembelajaran frais konvensional.

Pekerjaan segi enam pada kepala baut dapat dijadikan contoh sederhana integrasi proses. Batang logam terlebih dahulu dibubut agar diameter dan panjangnya sesuai. Benda kerja kemudian dipindahkan ke mesin frais dan dipasang pada kepala pembagi. Karena segi enam membutuhkan enam sisi sama, keliling benda kerja dibagi menjadi enam bagian. Setelah satu sisi difrais, kepala pembagi diputar ke posisi berikutnya, lalu sisi berikutnya dikerjakan. Bila proses ini dilakukan dengan pencekaman yang tepat, keenam sisi akan memiliki jarak sudut yang sama. Roda gigi memberikan contoh integrasi yang lebih menuntut. Jumlah gigi menentukan jumlah pembagian, jenis pisau menentukan profil celah, pencekaman menentukan kesepusatan, dan parameter frais menentukan kualitas permukaan. Ivanov et al. (2025) menjelaskan bahwa metode pemesinan mencakup berbagai proses, termasuk turning, drilling, milling, dan pemesinan roda gigi, masing masing dengan prinsip dan kondisi kerja yang berbeda. Pada roda gigi, perbedaan proses itu bertemu dalam satu komponen yang sama.

Urutan proses harus memperhatikan datum atau acuan pengukuran. Permukaan yang dijadikan acuan sebaiknya dikerjakan lebih dahulu dan dijaga agar tidak rusak pada proses berikutnya. Pada poros, sumbu putar menjadi acuan penting. Pada blok, salah satu bidang rata dapat dijadikan acuan. Pada roda gigi, lubang tengah dan diameter luar perlu konsisten terhadap sumbu putar. Jika acuan berubah ubah, hasil akhir dapat terlihat benar di satu sisi tetapi gagal saat dirakit. Geometri mesin memang tidak punya rasa kasihan. Pemeriksaan ukuran perlu masuk dalam urutan proses, bukan hanya dilakukan setelah semua selesai. Setelah pembubutan awal, diameter dapat diperiksa sebelum dilanjutkan ke frais. Setelah proses gurdi, posisi dan diameter lubang dapat dicek sebelum proses berikutnya. Setelah beberapa celah roda gigi difrais, pembagian dapat diamati sebelum seluruh keliling dikerjakan. Pemeriksaan antara mengurangi risiko membuang waktu pada benda kerja yang sudah menyimpang sejak awal. Dalam produksi, mendeteksi kesalahan lebih cepat biasanya lebih murah daripada memperbaiki kesalahan yang sudah telanjur lengkap.

Parameter pemotongan perlu disesuaikan dengan proses yang dipilih. Pada bubut, perhatian utama dapat diarahkan pada

kecepatan potong, gerak makan, dan kedalaman potong. Pada frais, perlu ditambah pertimbangan jumlah mata potong, gerak makan per gigi, metode up milling atau down milling, serta kekakuan sistem. Pada gurdi, kecepatan putar, gerak makan aksial, pendinginan, dan pembuangan geram sangat penting. Pada sekrup, panjang langkah, kecepatan langkah, gerak makan, dan pengaturan pahat perlu diperhatikan. Kepala pembagi menambah syarat lain, yaitu ketepatan pembagian dan penguncian posisi. Keselamatan kerja harus dibaca sebagai bagian dari pemilihan proses. Benda kerja panjang pada bubut membutuhkan penyangga agar tidak melentur atau bergetar. Benda kerja pada frais harus dicekam kuat karena gaya potong dapat menarik atau mengangkat benda kerja, terutama pada metode tertentu. Pada gurdi, benda kerja tidak boleh dipegang dengan tangan telanjang karena dapat ikut berputar. Pada kepala pembagi, penguncian spindel sebelum penyayatan menjadi kebiasaan yang tidak boleh dilupakan. Keselamatan bukan bagian tambahan setelah proses dipilih, melainkan syarat agar proses tersebut layak dilakukan.

Ketersediaan mesin dan alat juga memengaruhi keputusan. Dalam bengkel pendidikan, tidak semua mesin tersedia dalam kondisi ideal. Kadang mesin frais terbatas, pahat tertentu tidak lengkap, atau kepala pembagi hanya tersedia satu unit. Keadaan seperti ini menuntut penyesuaian urutan kerja tanpa mengorbankan prinsip dasar. Jika alat tidak tersedia, proses alternatif dapat dipilih, tetapi alasannya harus teknis. Mengganti proses hanya karena ingin cepat biasanya mengundang masalah yang nanti berpura-pura disebut “kendala lapangan”. Dalam industri, pemilihan proses lebih dipengaruhi oleh produktivitas dan pengulangan. Proses yang baik bukan hanya menghasilkan satu benda kerja yang benar, tetapi mampu menghasilkan banyak benda kerja dengan variasi yang kecil. Mesin frais dengan perlengkapan bantu yang tepat dapat lebih produktif untuk alur berulang. Mesin bubut cocok untuk produksi poros dengan bentuk beragam. Gurdi dengan jig dapat mempercepat pembuatan lubang berulang. Kepala pembagi memungkinkan pembagian keliling yang konsisten, meskipun untuk produksi besar perannya dapat digantikan oleh mesin khusus atau CNC.

Sistem CNC memperluas pilihan proses, tetapi tidak menghilangkan dasar pemilihan. Mesin CNC dapat melakukan pembubutan, frais, pengeboran, dan pembagian sudut secara

terprogram. Namun, program tetap perlu disusun berdasarkan bentuk benda kerja, jenis pahat, pencekaman, parameter, dan urutan kerja. Kesalahan memilih proses pada mesin manual dapat menghasilkan satu benda kerja gagal. Kesalahan pada program CNC dapat menghasilkan banyak benda kerja gagal dalam waktu singkat. Teknologi tinggi ternyata tetap bisa mempercepat kebodohan bila prinsip dasarnya diabaikan. Dalam konteks pembelajaran teknologi mesin perkakas, integrasi pemilihan proses membantu mahasiswa atau kita memahami hubungan antar bab. Pembahasan mesin bubut tidak berhenti pada pahat bubut. Pembahasan frais tidak berhenti pada pisau frais. Pembahasan sekrap tidak berhenti pada gerak bolak balik. Pembahasan gurdi tidak berhenti pada mata bor. Kepala pembagi juga tidak berdiri sebagai aksesoris terpisah. Semua proses tersebut bertemu dalam satu kemampuan utama, yaitu menyusun langkah pemesinan agar benda kerja dapat dibuat secara rasional, aman, dan terukur.

Pemilihan proses yang baik dapat dirumuskan melalui beberapa pertanyaan teknis. Bentuk apa yang ingin dibuat. Bagian mana yang menjadi acuan. Mesin apa yang paling sesuai dengan bentuk dominan. Bagaimana benda kerja dicekam. Pahat apa yang dipakai. Parameter apa yang aman. Apakah dibutuhkan pembagian keliling. Bagaimana hasil akan diperiksa. Pertanyaan seperti ini membuat pekerjaan bengkel berubah dari sekadar mencoba menjadi proses berpikir. Tidak semua hal harus rumit, tetapi yang teknis memang perlu diputuskan dengan alasan. Pada pekerjaan nyata, urutan proses sering lebih penting daripada jenis proses secara terpisah. Membubut diameter luar sebelum membuat lubang tengah dapat tepat untuk kasus tertentu, tetapi pada kasus lain lubang tengah justru harus dibuat lebih dahulu sebagai acuan. Meratakan bidang sebelum mengebor lubang dapat membantu posisi lubang lebih terkendali. Membuat blank roda gigi sebelum memotong gigi adalah urutan yang masuk akal karena kepala pembagi membutuhkan benda kerja yang sudah siap diputar secara sepusat. Urutan kerja yang buruk dapat membuat proses yang benar menjadi sulit.

Integrasi pemilihan proses juga mengajarkan batas kemampuan mesin. Mesin bubut tidak ideal untuk membuat bidang datar lebar pada balok. Mesin gurdi tidak dirancang untuk memperbaiki semua kesalahan posisi lubang. Mesin sekrap tidak selalu efisien untuk produksi banyak. Mesin frais tanpa kepala

pembagi tidak cukup untuk pembagian keliling yang teliti. Kepala pembagi sendiri tidak menyayat material, sehingga tetap membutuhkan mesin frais dan pisau yang sesuai. Memahami batas ini membuat operator tidak memaksa mesin bekerja di luar karakter dasarnya. Secara konseptual, bubut, frais, sekrap, gurdi, dan kepala pembagi dapat dipandang sebagai perangkat keputusan. Bubut menjawab kebutuhan bentuk berputar. Frais menjawab kebutuhan bidang, alur, dan profil. Sekrap menjawab kebutuhan bidang sederhana dengan gerak pahat bolak balik. Gurdi menjawab kebutuhan lubang. Kepala pembagi menjawab kebutuhan pembagian sudut dan keliling pada mesin frais. Jika kelima fungsi ini dipahami sebagai satu sistem, kiat dapat menyusun proses pemesinan dengan lebih utuh.



DAFTAR PUSTAKA

- Aamir, M., Tolouei Rad, M., Giasin, K., Vafadar, A., & Safdar, S. (2023). Experimental assessment of hole quality and tool condition in the machining of an aerospace alloy. *Machines*, 11(7), Article 726. <https://doi.org/10.3390/machines11070726>
- Abbas, C. A., Singh, R. K., & Singh, J. (2023). Influence of cryogenic treatment duration of drills on drilling performance and hole quality of metal matrix composite materials. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 37, 4881–4890. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0913-8>
- Anwar, R. P., Kurniawan, A., Mulianti, & Abadi, Z. (2024). Analysis and control of occupational safety risks using the HIRARC method in the machining workshop. *Journal of Engineering Researcher and Lecturer*, 3(2), 86–97. <https://doi.org/10.58712/jerel.v3i2.142>
- ASME. (2024). *ASME B1.1-2024: Unified inch screw threads, UN, UNR, and UNJ thread forms*. ASME.
- Blecha, P., Bradáč, F., Tůma, J., & Blecha, R. (2022). Machine tool safety from research to practice. *MM Science Journal*, 2022(1), 5412–5418. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2022_03_2022001
- Blecha, P., Marek, J., Blecha, R., Rozehnalova, J., Heinrich, P., & Pacher, P. (2022). CNC machine tool safety from the aspect of hazard perception by operating personnel. *MM Science Journal*, 2022(October), 5721–5728. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2022_10_2021123
- Bolat, Ç., Karakılınç, U., Yalçın, B., Öz, Y., Yavaş, Ç., Ergene, B., Ercetin, A., & Akkoyun, F. (2023). Effect of drilling parameters and tool geometry on the thrust force and surface roughness of aerospace grade laminate composites. *Micromachines*, 14(7), Article 1427. <https://doi.org/10.3390/mi14071427>
- Costa, H. L., Rosenkranz, A., Profito, F. J., & Gachot, C. (2022). Tailored surface textures to increase friction: A review. *Friction*, 10, 1285–1304. <https://doi.org/10.1007/s40544-021-0589-y>
- Crăciun, R. S., Teodor, V. G., Baroiu, N., Păunoiu, V., & Moroșanu, G. A. (2024). Study of cutting forces in drilling of aluminum alloy

- 2024-T351. *Machines*, 12(12), Article 937.
<https://doi.org/10.3390/machines12120937>
- Das, A., Das, S. R., Panda, J. P., Dey, A., Gajrani, K. K., Somani, N., & Gupta, N. K. (2022). Machine learning-based modeling and optimization in hard turning of AISI D6 steel with advanced AlTiSiN-coated carbide inserts to predict surface roughness and other machining characteristics. *Surface Review and Letters*, 29(10), Article 2250137.
<https://doi.org/10.1142/S0218625X22501372>
- Demirpolat, H., Korkmaz, M. E., Günay, M., & Gupta, M. K. (2023). Comparison of tool wear, surface roughness, cutting forces, tool tip temperature, and energy consumption in machining of AISI 52100 low alloy hardened steel under dry and MQL turning conditions. *Materials*, 16(12), Article 4408.
<https://doi.org/10.3390/ma16124408>
- Hata, A., Widiatmoko, R. Y., Mulyana, D., & Azmy, I. (2023). Optimization of cutting parameter CNC wet milling process of austenitic stainless steel on surface roughness. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, 7(2), 55–62.
<https://doi.org/10.30588/jeemm.v7i2.1591>
- Ismartaya, K., Sulaeman, A., & Sarifudin, A. (2024). Design and manufacture of automatic collet clamping systems for sprocket CAM handling on CNC lathes. *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/publication/387971384_Design_and_Manufacture_of_Automatic_Collet_Clamping_Systems_for_Sprocket-CAM_Handling_on_CNC_Lathes
- ISO. (2023). *ISO 68-1:2023: ISO general purpose screw threads — Basic and design profiles — Part 1: Metric screw threads*. International Organization for Standardization.
- Ivanov, V., Evtuhov, A., Dehtiarov, I., & Trojanowska, J. (2025a). *Fundamentals of manufacturing engineering using digital visualization*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-74360-3>
- Ivanov, V., Evtuhov, A., Dehtiarov, I., & Trojanowska, J. (2025b). Introduction to manufacturing engineering. In *Fundamentals of manufacturing engineering using digital visualization* (pp. 1–14). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74360-3_1

- Ivanov, V., Evtuhov, A., Dehtiarov, I., & Trojanowska, J. (2025c). Machining methods. In *Fundamentals of manufacturing engineering using digital visualization* (pp. 91–110). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74360-3_6
- Ivanov, V., Evtuhov, A., Dehtiarov, I., & Trojanowska, J. (2025d). Product quality. In *Fundamentals of manufacturing engineering using digital visualization* (pp. 61–77). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74360-3_4
- Karabacak, Y. E. (2024). Intelligent milling tool wear estimation based on machine learning algorithms. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 38(2), 835–850. <https://doi.org/10.1007/s12206-024-0131-z>
- Krawczyk, B., Bembenek, M., & Żyłka, Ł. (2022). Surface topography description of threads made with turning on Inconel 718 shafts. *Materials*, 16(1), Article 80. <https://doi.org/10.3390/ma16010080>
- Li, C., Zhao, G., Ji, D., Zhang, G., Liu, L., Zeng, F., & Zhao, Z. (2024). Influence of tool wear and workpiece diameter on surface quality and prediction of surface roughness in turning. *Metals*, 14(11), Article 1205. <https://doi.org/10.3390/met14111205>
- Liu, H., Wang, C., Li, T., Bo, Q., Liu, K., & Wang, Y. (2022). Fixturing technology and system for thin-walled parts machining: A review. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 17(4), Article 55. <https://doi.org/10.1007/s11465-022-0711-5>
- Liu, R., Zhang, J., Liu, R., Chang, F., Cheng, L., & Zhang, L. (2025). A novel simultaneous monitoring method for surface roughness and tool wear in milling process. *Scientific Reports*, 15, Article 8599. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92178-3>
- Mathavan, J. J., Kannan, C., et al. (2025). Influence of drill geometry on adhesion layer formation and tool wear during drilling of AFRP/A17075 T6 stacked composites for aircraft industry applications. *Composites*, 9(12), Article 658. <https://doi.org/10.3390/composites9120658>
- Mitsubishi Materials. (n.d.). *Parts, properties and functions: Advanced drilling*. Mitsubishi Materials. <https://www.mmc-carbide.com/permanent/courses/68/parts%2C-properties---functions.html>

- Mubarok, K., Saputro, A., & Mustajib, M. I. (2023). Exploratory investigation on the influence of machining parameters on surface roughness and tool wear in the turning process of steel ST 42. *International Journal of Science, Engineering and Information Technology*, 8(1). <https://journal.trunojoyo.ac.id/ijseit/article/view/24559>
- Padhan, S., Wagri, N. K., Dash, L., Das, A., Das, S. R., Rafighi, M., & Sharma, P. (2023). Investigation on surface integrity in hard turning of AISI 4140 steel with SPPP-ALTiSiN coated carbide insert under Nano-MQL. *Lubricants*, 11(2), Article 49. <https://doi.org/10.3390/lubricants11020049>
- Pasandidehpour, M., Donegani, L., & Fumagalli, L. (2025). Survey on machine learning applied to CNC milling processes. *Advances in Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s40436-025-00564-x>
- Pasić, M., Marinković, D., Lukić, D., Begić Hajdarević, D., Živković, A., Milošević, M., & Muhamedagić, K. (2024). Prediction and optimization of surface roughness and cutting forces in turning process using ANN, SHAP analysis, and hybrid MCDM method. *Applied Sciences*, 14(23), Article 11386. <https://doi.org/10.3390/app142311386>
- Pawanr, S., & Gupta, K. (2024). A review on recent advances in the energy efficiency of machining processes for sustainability. *Energies*, 17(15), Article 3659. <https://doi.org/10.3390/en17153659>
- Pramanik, A., & Basak, A. K. (2024). Effects of input parameters on the hole quality during the drilling of Al metal matrix composites. *Designs*, 8(6), Article 111. <https://doi.org/10.3390/designs8060111>
- Sakamoto, R., Kono, D., & Sato, Y. (2024). Prediction of surface roughness components in turning process based on tool contour measurement. *International Journal of Automation Technology*, 18(3), 382–391. <https://doi.org/10.20965/ijat.2024.p0382>
- Sedlak, J., Zouhar, J., Kolomy, S., Slany, M., & Necesanek, E. (2023). Effect of high speed steel screw drill geometry on cutting performance when machining austenitic stainless steel. *Scientific Reports*, 13, Article 9233. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36448-y>

- Song, J., He, G., Zhang, X., & Zhang, J. (2023). Status and prospects of surface texturing: Design, manufacturing, and applications. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 5, Article 042003. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/acdc3f>
- Steckel, J., Aerts, A., Verreycken, E., Laurijssen, D., & Daems, W. (2024). Tool wear prediction in CNC turning operations using ultrasonic microphone arrays and CNNs. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2406.08957>
- Trinh, V. L. (2024). A review of the surface roughness prediction methods in finishing machining. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(4), 15297–15304. <https://doi.org/10.48084/etasr.7710>
- Wagri, N. K., Jain, N. K., Gupta, M. K., Mia, M., Song, Q., & Khan, A. M. (2023). Investigation on the performance of coated carbide tool during dry turning of AISI 4340 alloy steel. *Materials*, 16(2), Article 668. <https://doi.org/10.3390/ma16020668>
- Wagri, N. K., Kalita, K., & Murugesan, M. (2023). Investigation on the performance of coated carbide tool during dry machining of annealed AISI 4340 alloy steel. *Materials*, 16(2), Article 537. <https://doi.org/10.3390/ma16020537>
- Wang, L., Cai, W., He, Y., Peng, T., Xie, J., Hu, L., & Li, L. (2023). Equipment-process-strategy integration for sustainable machining: A review. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 18, Article 36. <https://doi.org/10.1007/s11465-023-0752-4>
- Xu, J. (2022). A review on tool wear issues in drilling CFRP laminates. *Frontiers in Materials*, 9, Article 990773. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.990773>
- Zeng, S., & Pi, D. (2023). Milling surface roughness prediction based on physics-informed machine learning. *Sensors*, 23(10), Article 4969. <https://doi.org/10.3390/s23104969>
- Zubir, B., Ghani, J. A., Juri, A. Z., Syed Mohd, S. A. F., Said, M. S., & Ahmad, M. N. (2025). Comparative analysis of up and down milling on surface quality and tool life in dry machining of hardened AISI 4340. *Jurnal Tribologi*, 47, 154–170. <https://jurnaltribologi.mytribos.org/v47/JTRIB-47-154-170.pdf>

GLOSARIUM

Teknologi mesin perkakas: Bidang pengetahuan dan praktik tentang penggunaan mesin untuk membentuk benda kerja secara presisi.

Mesin perkakas: Mesin yang digunakan untuk membentuk benda kerja melalui proses pemotongan, penyayatan, atau pembentukan geometris.

Pemesinan: Proses membuang sebagian material benda kerja menggunakan alat potong agar terbentuk komponen sesuai ukuran.

Benda kerja: Material yang diproses atau dibentuk pada mesin perkakas.

Alat potong: Peralatan tajam yang digunakan untuk menyayat atau memotong material benda kerja.

Pahat: Alat potong bermata tajam yang digunakan pada proses bubut, sekrap, atau pemesinan lainnya.

Parameter pemotongan: Nilai kerja pemesinan yang meliputi kecepatan potong, gerak makan, dan kedalaman potong.

Gerak utama: Gerakan pokok yang menghasilkan aksi pemotongan antara alat potong dan benda kerja.

Gerak makan: Gerakan pahat atau benda kerja secara bertahap selama proses penyayatan berlangsung.

Kedalaman potong: Tebal lapisan material yang dibuang dalam satu lintasan pemotongan.

Kecepatan potong: Kecepatan relatif antara mata potong dan permukaan benda kerja saat pemesinan.

Putaran spindel: Jumlah putaran spindel dalam satu menit yang menentukan kecepatan kerja mesin.

Spindel: Poros utama mesin yang berfungsi memutar benda kerja atau alat potong.

Geram: Sisa material yang terbuang akibat proses penyayatan.

Gaya potong: Gaya yang timbul saat alat potong menyayat benda kerja.

Panas pemotongan: Panas yang muncul akibat gesekan antara pahat, geram, dan benda kerja.

Gesekan: Hambatan kontak antara pahat dan benda kerja yang dapat memengaruhi panas serta keausan.

Getaran: Gerakan tidak stabil pada mesin, pahat, atau benda kerja yang dapat menurunkan kualitas hasil.

Keausan pahat: Penurunan ketajaman atau kerusakan pada pahat akibat proses pemotongan.

Umur pahat: Lama waktu pahat dapat digunakan secara efektif sebelum perlu diganti atau diasah.

Kekasaran permukaan: Tingkat halus atau kasarnya permukaan benda kerja setelah proses pemesinan.

Toleransi: Batas penyimpangan ukuran yang masih diperbolehkan pada benda kerja.

Ketelitian: Tingkat kesesuaian hasil pemesinan terhadap ukuran dan bentuk yang direncanakan.

Gambar kerja: Gambar teknik yang memuat ukuran, bentuk, toleransi, dan petunjuk pembuatan komponen.

Pencekaman: Proses menjepit benda kerja agar stabil selama pemesinan.

Chuck: Alat cekam pada mesin bubut yang digunakan untuk menjepit benda kerja.

Ragum: Alat penjepit benda kerja yang umum digunakan pada mesin frais, gurdi, atau sekrup.

Collet: Alat cekam berbentuk selongsong yang menjepit benda kerja atau alat potong dengan presisi.

Face plate: Pelat cekam pada mesin bubut untuk menjepit benda kerja yang bentuknya tidak beraturan.

Klem: Alat bantu penjepit untuk menahan benda kerja pada meja mesin.

Jangka sorong: Alat ukur untuk mengukur panjang, diameter luar, diameter dalam, dan kedalaman.

Mikrometer: Alat ukur presisi untuk mengukur diameter atau ketebalan benda kerja.

Dial indikator: Alat ukur untuk memeriksa penyimpangan, kerataan, atau keselarasan benda kerja.

Roughing: Proses pemesinan awal untuk membuang material dalam jumlah besar.

Finishing: Proses pemesinan akhir untuk memperoleh ukuran tepat dan permukaan lebih halus.

Mesin bubut: Mesin perkakas yang membentuk benda kerja melalui putaran benda kerja dan gerak pahat.

Pembubutan: Proses pemesinan pada mesin bubut untuk menghasilkan bentuk silindris, tirus, ulir, atau alur.

Pahat bubut: Pahat yang digunakan pada mesin bubut untuk menyayat benda kerja.

Bubut lurus: Proses pembubutan untuk menghasilkan diameter yang sama sepanjang benda kerja.

Bubut memanjang: Pembubutan dengan gerak pahat sejajar sumbu benda kerja.

Facing: Proses pembubutan permukaan ujung benda kerja agar rata dan tegak lurus terhadap sumbu.

Bubut tirus: Proses pembubutan untuk menghasilkan benda kerja berbentuk kerucut atau konis.

Bubut ulir: Proses pembuatan ulir pada benda kerja menggunakan mesin bubut.

Bubut alur: Proses pembuatan celah atau alur pada permukaan benda kerja.

Parting off: Proses pemotongan benda kerja pada mesin bubut untuk memisahkan bagian tertentu.

Kartel: Proses pembentukan pola kasar pada permukaan benda kerja agar tidak licin saat dipegang.

Poros: Komponen berbentuk silindris yang biasanya berfungsi meneruskan putaran atau menopang bagian mesin.

Benda silindris: Benda kerja berbentuk tabung dengan penampang lingkaran.

Benda konis: Benda kerja yang memiliki diameter berbeda pada kedua ujungnya.

Eksentris: Kondisi benda kerja yang memiliki sumbu putar tidak sama dengan sumbu geometrinya.

Senter: Alat penumpu benda kerja pada mesin bubut agar putaran lebih stabil.

Kepala tetap: Bagian mesin bubut yang memuat spindel dan sistem penggerak utama.

Kepala lepas: Bagian mesin bubut yang dapat digeser untuk menopang benda kerja atau memegang mata bor.

Eretan: Bagian mesin bubut yang mengatur gerakan pahat saat proses penyayatan.

Tool post: Dudukan pahat pada mesin bubut yang berfungsi menjepit dan mengatur posisi pahat.

Mesin frais: Mesin perkakas yang menggunakan pisau frais berputar untuk menyayat benda kerja.

Proses frais: Proses pemesinan untuk menghasilkan bidang datar, alur, slot, atau profil tertentu.

Pisau frais: Alat potong bermata jamak yang digunakan pada mesin frais.

Cutter: Istilah lain untuk alat potong pada proses frais.

Arbor: Poros pemegang pisau frais pada mesin frais horizontal.

Arbor support: Penyangga arbor agar putaran pisau frais tetap stabil.

Frais horizontal: Proses frais dengan posisi spindel mendatar.

Frais vertikal: Proses frais dengan posisi spindel tegak.

Sumbu X: Arah gerak meja mesin frais ke kiri dan ke kanan.

Sumbu Y: Arah gerak meja mesin frais maju dan mundur.

Sumbu Z: Arah gerak naik dan turun pada mesin frais untuk mengatur kedalaman potong.

Up milling: Metode frais ketika arah gerak benda kerja berlawanan dengan arah putaran cutter.

Down milling: Metode frais ketika arah gerak benda kerja searah dengan arah putaran cutter.

Alur: Celah memanjang pada benda kerja yang dibuat melalui proses pemesinan.

Slot: Lubang atau celah berbentuk memanjang yang dibuat pada permukaan benda kerja.

Bidang datar: Permukaan rata yang dihasilkan melalui proses frais, sekrap, atau pemesinan lain.

Meja mesin: Bagian mesin tempat benda kerja atau ragam dipasang.

Mesin sekrap: Mesin perkakas yang menyayat benda kerja menggunakan gerak bolak-balik pahat.

Proses sekrap: Proses pemesinan untuk membuat bidang datar, bidang tegak, bidang miring, atau alur.

Pahat sekrap: Pahat bermata tunggal yang digunakan pada mesin sekrap.

Gerak maju: Gerakan pahat sekrap saat melakukan penyayatan pada benda kerja.

Gerak balik: Gerakan pahat sekrap kembali ke posisi awal tanpa melakukan penyayatan utama.

Panjang langkah: Jarak gerak maju dan balik pahat pada mesin sekrap.

Rumah pahat: Dudukan yang menahan pahat agar posisinya tetap kuat selama penyayatan.

Ram: Bagian mesin sekrap yang bergerak bolak-balik membawa pahat.

Meja sekrap: Tempat pemasangan benda kerja pada mesin sekrap.

Mesin gurdi: Mesin perkakas yang digunakan untuk membuat lubang pada benda kerja.

Penggurdian: Proses pembuatan lubang menggunakan mata gurdi yang berputar.

Mata gurdi: Alat potong berbentuk spiral yang digunakan untuk membuat lubang.

Bor: Alat atau proses untuk membuat lubang pada benda kerja.

Sudut mata gurdi: Sudut pada ujung mata gurdi yang memengaruhi kemampuan pemotongan.

Pengasahan mata gurdi: Proses menajamkan kembali mata gurdi agar dapat memotong dengan baik.

Tool grinder: Mesin gerinda alat potong yang digunakan untuk mengasah pahat atau mata gurdi.

Lubang: Hasil pemotongan berbentuk rongga pada benda kerja.

Reaming: Proses penyempurnaan lubang agar ukurannya lebih presisi dan permukaannya lebih halus.

Boring: Proses memperbesar atau memperbaiki lubang yang sudah ada.

Kepala pembagi: Alat bantu pada mesin frais untuk membagi keliling benda kerja secara teratur.

Pembagian langsung: Metode pembagian benda kerja dengan memanfaatkan posisi tertentu pada kepala pembagi.

Piring pembagi: Pelat berlubang pada kepala pembagi yang membantu menentukan jumlah pembagian.

Lubang pembagi: Lubang pada piring pembagi yang digunakan sebagai acuan perputaran engkol.

Engkol pembagi: Tuas pemutar pada kepala pembagi untuk mengatur posisi sudut benda kerja.

Roda gigi cacing: Mekanisme roda gigi pada kepala pembagi yang mengubah putaran engkol menjadi putaran benda kerja.

Rasio 40:1: Perbandingan umum kepala pembagi, yaitu 40 putaran engkol menghasilkan satu putaran benda kerja.

Roda gigi: Komponen bergerigi yang berfungsi meneruskan putaran dan daya.

Spline: Alur sejajar pada poros yang digunakan untuk meneruskan putaran dengan pasangan komponen lain.

Segi enam: Bentuk benda kerja bersisi enam yang dapat dibuat dengan bantuan kepala pembagi.

Proses manufaktur: Rangkaian kegiatan untuk mengubah bahan mentah menjadi produk atau komponen siap pakai.

Material: Bahan benda kerja, seperti baja karbon, aluminium, atau besi tuang.

Baja karbon: Material logam berbasis besi dan karbon yang banyak digunakan dalam pemesinan.

Aluminium: Material logam ringan yang relatif mudah dikerjakan dengan mesin perkakas.

Besi tuang: Material logam hasil pengecoran yang memiliki karakter pemesinan tertentu.

Cairan pendingin: Cairan yang digunakan untuk mengurangi panas, gesekan, dan keausan saat pemesinan.

Keselamatan kerja: Upaya mencegah kecelakaan saat mengoperasikan mesin perkakas.

Kontrol kualitas: Pemeriksaan hasil pemesinan agar sesuai dengan ukuran, bentuk, dan toleransi yang ditentukan.

Operator: Orang yang mengoperasikan mesin perkakas dan mengendalikan jalannya proses pemesinan.



INDEKS

A

Alat potong, 32, 41, 152, 167, 240
Alur, vi, 36, 53, 121, 126, 127, 128, 130, 142, 147, 159, 160, 178, 181, 184, 185, 189, 226, 234, 250, 257, 264, 295, 298
Arbor support, 222, 224, 226

B

Baja karbon, 12, 52, 63, 73, 95, 100, 123, 131, 137, 146, 305
Benda kerja, 12, 13, 14, 18, 19, 21, 25, 26, 28, 29, 31, 35, 36, 38, 40, 43, 44, 46, 47, 50, 61, 70, 74, 76, 77, 80, 82, 84, 85, 87, 88, 89, 91, 92, 95, 98, 101, 103, 108, 109, 112, 114, 116, 125, 128, 130, 133, 135, 145, 146, 147, 149, 155, 159, 169, 170, 172, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 182, 189, 194, 197, 204, 207, 209, 210, 213, 214, 222, 230, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 239, 242, 244, 246, 251, 273, 281, 282, 284, 285, 287, 289, 293, 301, 309, 333, 334, 337, 338, 341, 343, 349, 350, 353, 359, 362, 364, 366, 370, 372, 373
Bubut alur, 126, 128, 134
Bubut lurus, 97, 98, 103, 104
Bubut penampang, 104, 111
Bubut tirus, 111, 118
Bubut ulir, 118, 123, 125, 143

C

Cairan pendingin, 28, 52, 66, 81, 109, 116, 129, 291, 313
Chuck, 12, 43, 85, 89, 94, 341, 343
Collet, 43, 86, 89
Cutter, vii, 188, 190, 199, 201, 203, 207, 210, 218

D

Depth of cut, 15

F

Face plate, 87, 89
Facing, vi, 104
Feed, 15
Frais horizontal, 167, 170, 172, 175, 180
Frais naik, 214, 220, 221
Frais turun, 216, 219, 220, 221
Frais vertikal, 167, 170, 172, 175, 183

G

Geometri pahat, 44, 56, 58, 59, 60, 66, 73, 121
Gerak balik, 240, 252, 253, 256
Gerak maju, 240, 245, 252, 258
Gerak makan, 11, 13, 17, 21, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 38, 41, 42, 44, 45, 49, 50, 58, 66, 69, 70, 71, 76, 83, 88, 90, 99, 106, 107, 127, 129, 136, 145, 150, 154, 156, 168, 173, 177,

- 180, 184, 185, 190, 191, 192,
193, 196, 197, 198, 201, 203,
205, 210, 211, 216, 217, 240,
241, 248, 252, 254, 255, 256,
257, 261, 265, 266, 269, 270,
271, 272, 273, 274, 275, 276,
277, 278, 279, 285, 290, 309,
311, 313, 314, 315, 368
Gerak utama, 11, 17, 23, 24, 40,
41, 151, 168, 253, 287
Geram, 23, 29, 40, 44, 59, 61,
72, 80, 102, 109, 131, 133,
147, 150, 173, 182, 187, 188,
202, 205, 207, 212, 219, 220,
223, 230, 234, 249, 251, 257,
271, 275, 277, 282, 285, 286,
287, 291, 292, 293, 299, 300,
301, 305, 311, 314, 327, 329,
357
Gurdi, vi, vii, viii, 31, 33, 35,
38, 281, 294, 301, 309, 315,
367, 371, 373, 375
- K**
- Kartel, vi, 134, 135, 136, 137,
139, 140, 141, 142, 144
Keausan pahat, 27, 60, 203
Kecepatan potong, 12, 18, 24,
26, 28, 43, 44, 58, 66, 69, 71,
76, 77, 78, 79, 80, 81, 90, 95,
99, 106, 114, 122, 129, 145,
154, 172, 180, 190, 191, 192,
196, 198, 200, 201, 205, 210,
218, 221, 241, 268, 272, 274,
277, 278, 279, 309, 310, 313,
315, 368
Kedalaman potong, 11, 13, 17,
21, 23, 25, 26, 27, 30, 38, 41,
42, 44, 45, 59, 66, 69, 71, 72,
76, 88, 90, 95, 99, 105, 106,
107, 115, 122, 123, 145, 150,
152, 154, 156, 160, 165, 168,
178, 180, 184, 190, 191, 194,
196, 198, 205, 210, 211, 218,
240, 241, 248, 250, 252, 255,
256, 257, 258, 262, 265, 266,
269, 270, 271, 272, 276, 278,
309, 312
Kekasaran permukaan, 71
Kepala pembagi, 14, 34, 35, 36,
37, 38, 179, 332, 333, 334,
335, 336, 337, 338, 341, 343,
344, 345, 347, 353, 357, 359,
360, 364, 369, 371, 373, 374,
375
Keselamatan kerja, 46, 147,
173, 181, 188, 286, 321, 353,
359, 373
Knurling, vi, 134
Kontrol kualitas, 104, 142, 145,
146
- L**
- Lubang, viii, 14, 18, 19, 33, 37,
53, 124, 157, 281, 282, 284,
287, 291, 292, 293, 296, 299,
300, 301, 307, 312, 313, 315,
316, 328, 329, 340, 341, 345,
346, 355, 359, 365, 369, 371
- M**
- Mata gurdi, 27, 35, 281, 282,
283, 284, 285, 287, 289, 291,

- 293, 294, 297, 299, 300, 301, 302, 304, 305, 306, 308, 309, 310, 312, 313, 314, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330
- Material benda kerja, 63, 78, 95, 123, 137, 146, 187, 193
- Mesin bubut, 9, 12, 17, 23, 30, 31, 37, 38, 40, 47, 54, 83, 118, 124, 148, 367, 373, 374
- Mesin frais, 9, 17, 22, 23, 32, 37, 38, 149, 150, 151, 153, 156, 157, 167, 173, 184, 199, 228, 229, 243, 332, 335, 345, 360, 368, 373, 374, 420
- Mesin gurdi, 9, 18, 23, 33, 37, 38, 281, 282, 284, 285, 286, 287, 308, 310, 369, 374, 420
- Mesin sekrap, 9, 18, 23, 33, 37, 38, 237, 238, 241, 242, 243, 244, 247, 251, 258, 264, 272, 368, 374, 420
- Mikrometer, 101, 139
- P**
- Pahat bubut, 12, 35, 41, 47, 54, 62, 98, 136
- Pahat karbida, 24, 51, 54, 58, 60, 69, 73, 262
- Parameter pemotongan, 12, 15, 18, 68, 69, 73, 76, 123, 145, 154, 172, 187, 190, 196, 198, 225, 240, 309, 314, 315, 347, 363, 372
- Parting off, 128, 132, 134, 142
- Pencekaman, vi, vii, 12, 14, 19, 20, 41, 44, 74, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 145, 155, 172, 182, 188, 197, 204, 210, 218, 229, 231, 233, 234, 235, 236, 240, 242, 284, 289, 313, 341, 351
- Pengasahan, vii, 263, 300, 301, 306, 315, 316, 317, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330
- Piring pembagi, 334, 340, 342, 343, 347, 355, 356, 357, 358, 359
- Poros, 31, 39, 42, 91, 94, 102, 142, 367
- Putaran spindel, 13, 41, 42, 45, 69, 70, 71, 74, 76, 108, 136, 290, 309, 311, 315
- R**
- Ragum, vii, 29, 152, 229, 232, 233, 234, 235, 236, 240, 279
- Roda gigi, 339, 343, 344, 367, 372
- S**
- Sekrap, vi, vii, viii, 31, 33, 35, 37, 237, 240, 244, 258, 264, 367, 369, 371, 375
- Spindel, vi, 40, 76, 124, 334, 338, 343, 347, 348, 359
- Sumbu y, 164
- T**
- Toleransi, 370

Tool grinder, 316, 323

U

Ulir, vi, 53, 92, 118, 119, 123,
124, 125, 142, 143, 146, 147,
339

Up milling, 187



TENTANG PENULIS



Dr. Ir. Eko Indrawan, ST, M.Pd, Laki-laki, lahir tanggal 14 Januari 1980. SDN 26 Tarok Lakitan, SMPN Lakitan (sekarang SMPN 3 Lengayang) dan SMU (SMAN 1 Lengayang) di selesaikan di Lakitan dan Kambang Pesisir Selatan. Pendidikan S1 Teknik Mesin (ITP) Institut Teknologi Padang selesai Tahun 2003, melanjutkan Kuliah S2 Tahun 2006 Program Pascasarjana Universitas Negeri Padang Program Studi Teknologi Pendidikan Konsentrasi Pendidikan Kejuruan selesai Tahun 2008 dan S3 program studi Pendidikan Teknologi dan Kejuruan Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang selesai Tahun 2020. Tahun 2010 sampai sekarang mengajar di Fakultas Teknik Departemen Teknik Mesin Universitas Negeri Padang. Mata kuliah yang diampu antara lain teknologi mesin perkakas, teknik kerja bangku, teknologi permesinan, teknologi produksi pemesinan, gambar teknik, gambar mesin, proses produksi, dan dasar-dasar pemrograman komputer. Selain aktif dalam kegiatan pendidikan dan pengajaran juga aktif melakukan penelitian, pengabdian kepada masyarakat, publikasi ilmiah, serta pengembangan pembelajaran berbasis teknologi, project based learning, dan artificial intelligence dalam pendidikan vokasional teknik mesin. Tahun 2026 menyelesaikan Pendidikan Profesi Insinyur. Email: ekoindrawan@ft.unp.ac.id.



Dr. Bulkia Rahim, S.Pd., M.Pd.T., laki-laki, lahir di Sumani pada tanggal 05 November 1987. Pendidikan dasar diselesaikan di Padang Belimbing pada tahun 2000, pendidikan SMP diselesaikan di Sumani pada tahun 2003, dan pendidikan SMA diselesaikan di Solok pada tahun 2006. Pendidikan Sarjana Muda atau D3 diselesaikan di Universitas Negeri Padang pada tahun 2010, kemudian melanjutkan pendidikan Sarjana atau S1 di Universitas Negeri Padang dan selesai pada tahun 2013. Selanjutnya, pendidikan Pascasarjana atau S2 juga diselesaikan di Universitas Negeri Padang pada tahun 2016. Saat ini beliau merupakan dosen di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri

Padang. Bidang keilmuan dan pengajaran yang ditekuni meliputi CAD dan basis data teknik, hidrolik dan pneumatik, teknik pembentukan logam, teknologi pengelasan logam, teknologi proses fabrikasi, metode penelitian, serta media pembelajaran. Selain aktif mengajar, beliau juga aktif melakukan penelitian, pengabdian kepada masyarakat, publikasi ilmiah, serta menghasilkan beberapa karya buku. Email: bulkiarahim@gmail.com.



RINGKASAN ISI BUKU

Buku Pengantar Teknologi Mesin Perkakas membahas dasar-dasar teknologi pemesian sebagai proses pembentukan benda kerja melalui pemotongan atau penyayatan material. Pada bagian awal, buku ini menjelaskan pengertian mesin perkakas, fungsi mesin dalam proses manufaktur, serta prinsip dasar pemotongan yang meliputi gerak utama, gerak makan, dan kedalaman potong. Pembahasan ini menjadi fondasi untuk memahami bagaimana alat potong, benda kerja, mesin, parameter pemotongan, dan pengukuran saling berkaitan dalam menghasilkan komponen yang presisi.

Bagian berikutnya membahas mesin bubut secara lebih rinci, mulai dari prinsip kerja, jenis pahat, geometri pahat, sudut pahat, parameter pemotongan, hubungan diameter benda kerja dengan putaran spindel, hingga metode pencekaman. Buku ini juga menjelaskan berbagai operasi bubut, seperti bubut lurus, facing, bubut tirus, bubut ulir, bubut alur, parting off, dan kartel. Selain itu, dibahas pula kesalahan umum dan kontrol kualitas agar hasil pembubutan sesuai dengan ukuran, bentuk, dan kualitas permukaan yang diharapkan.

Pada bagian akhir, buku ini menguraikan mesin frais, mesin sekrup, mesin gurdi, dan kepala pembagi. Mesin frais dibahas melalui prinsip kerja, sistem sumbu, variasi operasi, metode frais naik dan frais turun, serta pencekaman benda kerja pada ragam. Mesin sekrup dijelaskan dari aspek mekanisme kerja, gerak maju dan balik, profil pahat, serta elemen dasar pemotongan. Mesin gurdi dibahas melalui geometri mata gurdi, parameter pemotongan, dan pengasahan. Buku ini ditutup dengan pembahasan kepala pembagi dan integrasi pemilihan proses pemesian sesuai bentuk, fungsi, dan kebutuhan benda kerja.