

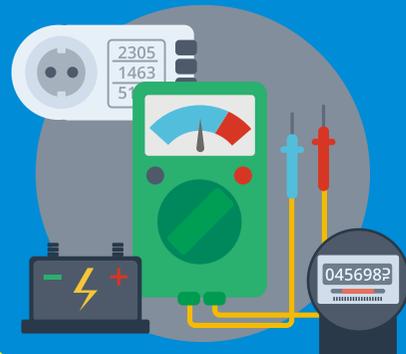
FISIKA TERAPAN

(Listrik dan Magnet)

Prof. Dr. Usmeldi, M.Pd



Buku Fisika Terapan dengan seri Listrik dan Magnet merupakan sarana untuk membantu mahasiswa dalam menemukan konsep, prinsip dan hukum-hukum fisika, mengembangkan kemampuan pemecahan masalah, sehingga diharapkan mahasiswa dapat mengimplementasi materi dalam buku ini dalam bidang teknologi dan kehidupan sehari-hari. Materi ajar yang dibahas dalam buku ini adalah listrik statis, gaya gerak listrik, arus listrik, tahanan konduktor, rangkaian tahanan, hukum dasar rangkaian, medan magnet, gaya gerak listrik induksi, dan gaya magnet. Contoh-contoh penerapan fisika dalam bidang teknologi dan kehidupan sehari-hari disajikan dalam buku ini. Buku ini disusun dengan mempertimbangkan keterkaitan antara sains dan teknologi. Konsep dan sub konsep disajikan dengan bahasa yang sederhana disertai contoh soal untuk memudahkan mahasiswa memahami materi ajar yang diberikan. Selain itu disajikan soal latihan pada tiap akhir bab yang bertujuan untuk mengukur kemampuan mahasiswa secara mandiri pada setiap bab yang dibahas.



ELECTRIC TOOLS



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



UNP PRESS

FISIKA TERAPAN
(Listrik dan Magnet)

Prof. Dr. Usmeldi, M.Pd

FISIKA TERAPAN LISTRIK DAN MAGNET

Penerbitan & Percetakan
UNP PRESS

Prof. Dr. Usmeldi, M.Pd.



FISIKA TERAPAN

(LISTRIK DAN MAGNET)

Prof. Dr. Usmeldi, M.Pd.

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).

FISIKA TERAPAN
(LISTRIK DAN MAGNET)

Prof. Dr. Usmeldi, M.Pd.



2023

**FISIKA TERAPAN
(LISTRIK DAN MAGNET)**

Editor, Tim Editor UNP Press
Penerbit UNP Press, Padang, 2023
1 (satu) jilid; 17.6 x 25 cm (B5)
xiii + 129

ISBN:

FISIKA TERAPAN (LISTRIK DAN MAGNET)

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang pada penulis
Hak penerbitan pada UNP Press

Penyusun: Prof. Dr. Usmeldi, M.Pd.
Editor Substansi: Prof. Dr. Ratnawulan, M.Si
Editor Bahasa: Prof. Dr. Harris Effendi Thahar, M.Pd
Desain Sampul & *Layout*: Dr. Asrul Huda, M.Kom & Syed Abdul
Qadir, S.Pd

KATA PENGANTAR

Tuntutan kurikulum pendidikan tinggi saat ini lebih menitik-beratkan pada proses pembekalan mahasiswa supaya mempunyai kemandirian dan daya saing pada era globalisasi. Dengan demikian perlu ada perubahan paradigma tentang pelaksanaan pembelajaran. Buku ini sebagai sarana untuk memproses mahasiswa dalam menemukan konsep, mengembangkan kemampuan pemecahan masalah, dan keterampilan berpikir kritis sehingga diharapkan mahasiswa dapat mengimplementasikannya dalam bidang teknologi dan kehidupan sehari-hari.

Syukur alhamdulillah penulis dapat memberikan contoh-contoh penerapan fisika dalam bidang teknologi dan kehidupan sehari-hari ke dalam buku ini. Buku ini disusun dengan mempertimbangkan keterkaitan antara sains dan teknologi. Konsep dan sub konsep disajikan dengan bahasa yang sederhana disertai contoh soal untuk memudahkan mahasiswa memahami materi ajar yang diberikan. Selain itu disajikan soal-soal latihan pada tiap akhir bab yang bertujuan untuk mengukur kemampuan mahasiswa secara mandiri pada setiap bab yang dibahas.

Penulis buku menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dalam penyusunan materi ajar dalam buku ini, untuk itu saran dan kritik yang bersifat membangun dari para pemakai buku ini sangat diharapkan. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi mahasiswa dan para pembaca semuanya.

Padang, 10 September 2023

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|---|-----------|
| KATA PENGANTAR | V |
| DAFTAR ISI | VI |
| DAFTAR TABEL | IX |
| DAFTAR GAMBAR | X |
| BAB 1 LISTRIK STATIS | 1 |
| A. PENDAHULUAN | 1 |
| B. MUATAN LISTRIK | 1 |
| 1. Muatan Listrik dalam Atom | 3 |
| 2. Muatan Konduksi dan Induksi | 6 |
| 3. Hukum Coulomb | 8 |
| 4. Contoh Penerapan Gaya Elektrostatis | 13 |
| C. MEDAN LISTRIK | 18 |
| D. ENERGI POTENSIAL DAN POTENSIAL LISTRIK | 22 |
| 1. Potensial Listrik dan Beda Potensial | 23 |
| 2. Potensial Oleh Sistem Muatan Titik | 25 |
| 3. Energi Potensial Elektrostatik | 28 |
| E. KAPASITOR | 30 |
| 1. Kapasitansi | 32 |
| 2. Nilai Kapasitor | 33 |
| 3. Jenis-jenis kapasitor | 34 |
| 4. Rangkaian Kapasitor | 35 |
| 5. Kapasitor dalam Rangkaian Arus Searah | 36 |
| 6. Rangkaian Pengisian dan Pemakaian Kapasitor | 38 |
| 7. Penggunaan Kapasitor | 40 |
| F. SOAL LATIHAN | 46 |
| BAB 2 GGL, ARUS LISTRIK, DAN TAHANAN KONDUKTOR | 48 |
| A. PENDAHULUAN | 48 |
| B. GAYA GERAK LISTRIK | 48 |
| C. ARUS LISTRIK DALAM KONDUKTOR | 50 |
| D. RESISTIVITAS DAN KONDUKTIVITAS | 51 |
| E. PENGARUH TEMPERATUR PADA RESISTIVITAS | 52 |

| | |
|---|-----------|
| F. SOAL LATIHAN | 55 |
| BAB 3 RANGKAIAN TAHANAN..... | 56 |
| A. PENDAHULUAN..... | 56 |
| B. RANGKAIAN SERI | 56 |
| C. RANGKAIAN PARALEL | 58 |
| D. RANGKAIAN CAMPURAN SERI DAN PARALEL..... | 59 |
| E. RANGKAIAN SEGITIGA DAN RANGKAIAN BINTANG..... | 61 |
| 1. Transformasi Rangkaian Segitiga ke Rangkaian Bintang | 62 |
| 2. Transformasi Rangkaian Bintang ke Rangkaian Segitiga | 64 |
| F. SOAL LATIHAN | 66 |
| BAB 4 HUKUM DASAR RANGKAIAN | 68 |
| A. PENDAHULUAN..... | 68 |
| B. HUKUM OHM..... | 68 |
| C. HUKUM KIRCHHOFF | 73 |
| 1. Hukum Arus Kirchhoff..... | 74 |
| 2. Hukum Tegangan Kirchhoff..... | 74 |
| D. SOAL LATIHAN | 78 |
| BAB 5 MEDAN MAGNET | 81 |
| A. PENDAHULUAN..... | 81 |
| B. BENTUK, SIFAT, DAN GAYA ANTARA DUA KUTUB MAGNET | 81 |
| C. MEDAN MAGNET | 83 |
| 1. Fluks Magnet | 84 |
| 2. Kuat Medan Magnet | 84 |
| 3. Induksi Magnet | 85 |
| 4. Permeabilitas Magnet..... | 85 |
| D. MEDAN MAGNET OLEH ARUS LISTRIK | 86 |
| 1. Penemuan Oersted | 87 |
| 2. Hukum Biot-Savart | 87 |
| 3. Induksi Magnet di Sekitar Kawat Lurus yang Panjang | 88 |
| 4. Induksi Magnet Pada Sumbu Solenoida | 90 |
| 5. Induksi Magnet Dalam Toroida..... | 92 |

| | |
|--|------------|
| 6. Penggunaan Solenoida dan Toroida dalam Teknik Otomotif..... | 93 |
| E. SOAL LATIHAN | 95 |
| BAB 6 GAYA GERAK LISTRIK INDUKSI..... | 97 |
| A. PENDAHULUAN..... | 97 |
| B. HUKUM INDUKSI FARADAY | 97 |
| C. HUKUM LENZ | 102 |
| D. PRINSIP KERJA GENERATOR LISTRIK..... | 104 |
| E. TRANSFORMATOR..... | 106 |
| 1. Efisiensi Transformator | 109 |
| 2. Daya yang hilang pada transformator..... | 109 |
| F. SOAL LATIHAN | 110 |
| BAB 7 GAYA MAGNET | 112 |
| A. PENDAHULUAN..... | 112 |
| B. GAYA MAGNET PADA MUATAN LISTRIK BERGERAK | 112 |
| C. GAYA MAGNET PADA KONDUKTOR BERARUS LISTRIK.... | 114 |
| D. PRINSIP KERJA MOTOR LISTRIK | 116 |
| E. PENGGUNAAN MOTOR LISTRIK DALAM TEKNIK | 120 |
| 1. <i>Tower Crane</i> | 120 |
| 2. <i>Escalator</i> | 121 |
| 3. <i>Moving walk</i> | 121 |
| 4. <i>Mobil listrik</i> | 122 |
| 5. <i>Sepeda listrik</i> | 123 |
| F. SOAL LATIHAN | 124 |
| DAFTAR PUSTAKA | 127 |
| TENTANG PENULIS | 128 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 1.Toleransi Kapasitansi Kapasitor..... | 34 |
|--|----|

DUMMMY

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 1. Proses Elektrifikasi | 2 |
| Gambar 2. Gaya Antara Dua Muatan Listrik | 3 |
| Gambar 3. Model atom sederhana..... | 4 |
| Gambar 4. Sebuah molekul polar H ₂ O | 6 |
| Gambar 5. Memberi Muatan Dengan Cara Konduksi..... | 7 |
| Gambar 6. Memberi Muatan Dengan Cara Induksi | 7 |
| Gambar 7. Menginduksi Muatan Ke Sebuah Benda Yang Terhubung Ke Tanah..... | 8 |
| Gambar 8. Dua buah muatan berjarak R | 9 |
| Gambar 9. Arah gaya pada muatan sejenis dan tidak sejenis..... | 10 |
| Gambar 10. Gaya Pada Elektron Oleh Proton..... | 11 |
| Gambar 11. Penguraian Gaya Terhadap Sumbu X Dan Y..... | 11 |
| Gambar 12. Gambar untuk contoh 2 | 13 |
| Gambar 13. Pengecatan Dengan Teknologi Elektrostatis | 14 |
| Gambar 14. Prinsip Pengecatan Secara Elektrostatis | 15 |
| Gambar 15. Ilustrasi Proses Cetak Menggunakan Printer Ink Jet. | 16 |
| Gambar 16. kawat yang bermuatan negatif dan pelat logam | 18 |
| Gambar 17. Layar Sentuh..... | 18 |
| Gambar 18. Arah Medan Listrik di Sekitar Muatan Q..... | 20 |
| Gambar 19. Gaya Yang Diberikan Oleh Muatan +Q Pada Sebuah Muatan Uji Q..... | 20 |
| Gambar 20. Gambar Untuk Contoh 3..... | 21 |
| Gambar 21. Kerja Yang Dilakukan Oleh Medan Gravitasi dan Medan Listrik | 24 |
| Gambar 22. Kerja yang diperlukan untuk membawa muatan uji q ₀ | 26 |
| Gambar 23. Dipol Listrik Pada Sumbu Z..... | 28 |
| Gambar 24. Bujur Sangkar Dengan Sisi a..... | 29 |
| Gambar 25. Contoh Kapasitor | 31 |
| Gambar 26. Kapasitor Dihubungkan Dengan Batrai..... | 31 |
| Gambar 27. Kapasitor Yang Memiliki Kode 104..... | 34 |
| Gambar 28. Rangkaian Seri Kapasitor | 35 |
| Gambar 29. Rangkaian Paralel Kapasitor..... | 36 |
| Gambar 30. Rangkaian Arus Searah Dengan Sebuah Kapasitor dan Dua Buah Resistor | 37 |

| | |
|---|----|
| Gambar 31. Pada Saat Awal Arus Lebih Memilih Melalui Kapasitor dan Keberadaan Kapasitor Dapat Dianggap Sebagai Kawat Terutup..... | 37 |
| Gambar 32. Rangkaian Pengisian Kapasitor | 38 |
| Gambar 33. Grafik Arus Sebagai Fungsi Tetapan Waktu..... | 39 |
| Gambar 34. Grafik Tegangan Sebagai Fungsi Tetapan Waktu..... | 39 |
| Gambar 35. Kapasitor <i>Coupling</i> | 41 |
| Gambar 36. Prinsip <i>Touch Screen</i> | 45 |
| Gambar 37. (a) Rangkaian Listrik Sederhana, (b) Analogi Aliran Air Dalam Pipa | 49 |
| Gambar 38. Konduktor Logam Berarus Listrik | 50 |
| Gambar 39. Resistivitas Sebagai Fungsi Temperatur Pada Suatu Konduktor..... | 52 |
| Gambar 40. Tiga Resistor Dihubungkan Secara Seri..... | 56 |
| Gambar 41. (a) Lampu Cermin Rian, (b) dan (c) Lampu LED Strip ... | 57 |
| Gambar 42. Tiga Resistor Dihubungkan Secara Paralel | 58 |
| Gambar 43. Rangkaian Paralel Dalam Kehidupan Sehari-Hari | 59 |
| Gambar 44. Gambar Untuk Contoh 1..... | 59 |
| Gambar 45. Gambar Untuk Contoh 2..... | 60 |
| Gambar 46. Gambar Untuk Contoh 3..... | 61 |
| Gambar 47. (a) Tiga Resistor Dalam Rangkaian Segitiga, (b) Tiga Resistor Dalam Rangkaian Bintang | 62 |
| Gambar 48. Gambar Untuk Contoh 4..... | 65 |
| Gambar 49. Perubahan Bentuk Rangkaian Gambar 48..... | 65 |
| Gambar 50. Rangkaian Satu Loop Yang Terdiri Atas Sebuah Sumber Ggl Dihubungkan Seri Dengan Sebuah Tahanan. | 70 |
| Gambar 51. Rangkaian Terbuka Dengan Dua Sumber dan Tegangan dan Sebuah Tahanan | 70 |
| Gambar 52. Rangkaian Satu Loop Untuk Contoh 1 | 72 |
| Gambar 53. Rangkaian Satu Loop Untuk Contoh 2..... | 73 |
| Gambar 54. Sebuah Simpul Yang Dilalui Oleh Arus I_1 , I_2 , I_3 , Dan I_4 | 74 |
| Gambar 55. Sebuah Loop Dengan Tiga Elemen Bertegangan V_1 , V_2 , dan V_3 | 75 |
| Gambar 56. Rangkaian Dua Loop Untuk Contoh 3 | 76 |
| Gambar 57. Rangkaian Tiga Loop Untuk Contoh 4..... | 77 |
| Gambar 58. Bentuk-Bentuk Magnet..... | 82 |

| | |
|---|-----|
| Gambar 59. Kereta Api Magnetik | 83 |
| Gambar 60. Garis Gaya Magnet | 84 |
| Gambar 61. Fluks Magnet Yang Menembus Permukaan..... | 84 |
| Gambar 62. Magnetisasi Sebagai Fungsi Dari Kuat Medan | 86 |
| Gambar 63. Magnet Jarum dan Konduktor Berarus..... | 87 |
| Gambar 64. Induksi magnet dB di sekitar elemen kawat dl yang berarus i..... | 88 |
| Gambar 65. Induksi magnet dB oleh arus dalam elemen kawat dl dari kawat lurus yang panjang..... | 88 |
| Gambar 66. Gambar Untuk Contoh 1..... | 89 |
| Gambar 67. Induksi magnet yang ditimbulkan oleh arus dalam solenoida..... | 90 |
| Gambar 68. Induksi magnet yang ditimbulkan oleh arus dalam toroida | 92 |
| Gambar 69. Solenoida Pada Karburator | 94 |
| Gambar 70. Magnetic Clutch Pada Kompresor AC | 95 |
| Gambar 71. Kawat berbentuk U dan batang logam ab berada dalam medan magnet B (Sutrisno, 1983)..... | 97 |
| Gambar 72. Kaidah Jari Tangan Kanan..... | 100 |
| Gambar 73. Proses Timbulnya Arus Induksi | 101 |
| Gambar 74. Loop Kawat Berbentuk Lingkaran Dalam Medan Magnet | 101 |
| Gambar 75. Gambar Untuk Menjelaskan Hukum Lenz | 102 |
| Gambar 76. Gambar Untuk Contoh 2..... | 103 |
| Gambar 77. Prinsip Kerja dan Konstruksi Generator Listrik..... | 105 |
| Gambar 78. Bagan Transformator | 107 |
| Gambar 79. Contoh Transformator <i>Step Down</i> | 108 |
| Gambar 80. Jenis-Jenis Transformator..... | 109 |
| Gambar 81. Muatan q bergerak dengan kecepatan v dalam medan magnet B | 113 |
| Gambar 82. Kawat ab berarus I berada dalam medan magnet B | 115 |
| Gambar 83. Gambar Untuk Contoh 2..... | 115 |
| Gambar 84. (a) Konstruksi Motor Listrik, (b) Rotor Sangkar..... | 116 |
| Gambar 85. Prinsip Kerja Motor Listrik | 117 |
| Gambar 86. Gambar untuk contoh 3 (Sutrisno, 1983) | 118 |
| Gambar 87. Gambar untuk contoh 4 (Sutrisno, 1983) | 119 |
| Gambar 88. <i>Tower Crane</i> | 120 |

| | |
|--|-----|
| Gambar 89. <i>Escalator</i> | 121 |
| Gambar 90. <i>Moving Walk</i> | 122 |
| Gambar 91. Mobil Listrik..... | 122 |
| Gambar 92. Baterai Mobil Listrik | 123 |
| Gambar 93. Komponen Sepeda Listrik | 124 |

DUMMMY

BAB 1

LISTRIK STATIS

A. Pendahuluan

Teknologi modern yang sangat kompleks yang dikembangkan oleh para ahli, seperti komputer, sumber cahaya yang sangat diperlukan bagi kehidupan manusia, motor listrik, generator listrik, dan transformator, semuanya menggunakan listrik. Studi awal mengenai kelistrikan telah dilakukan kira-kira 600 tahun sebelum masehi oleh orang Yunani, tetapi baru pada dua abad terakhir dilakukan studi lengkap mengenai gejala dan hal-hal yang berhubungan dengan kelistrikan. Pada bab ini dibahas secara rinci tentang muatan listrik, gaya tarik dan gaya tolak antara dua atau lebih partikel bermuatan listrik, kuat medan listrik oleh muatan listrik, energi potensial dan potensial listrik, kapasitas listrik dan rangkaian kapasitor.

B. Muatan Listrik

Kata listrik berasal dari bahasa Yunani yaitu elektron yang berarti ambar. Ambar adalah suatu buah damar yang telah membatu dan jika digosok dengan kain wol akan diperoleh sifat yang dapat menarik benda-benda ringan. Perilaku batu ambar seperti ini sekarang dapat dikatakan bahwa batu ambar terelektifikasi atau memperoleh muatan listrik atau secara listrik dimuati. Proses elektrifikasi ini sekarang kita sebut sebagai listrik statis, seperti yang ditunjukkan pada gambar 1. Untuk memberi muatan listrik pada benda padat, dapat dilakukan dengan menggosok benda tersebut pada benda lain. Sebuah mobil yang sedang melaju akan memperoleh muatan listrik akibat geraknya menembus udara sekelilingnya. Selembar kertas akan bermuatan listrik ketika bergerak dalam mesin cetak. Pada masing-masing kasus di atas sebuah benda menjadi bermuatan listrik karena proses penggosokan terhadap benda lain dan dikatakan memiliki muatan listrik total. Sesungguhnya persinggungan yang rapat saja sudah akan menimbulkan muatan listrik. Menggosok artinya

tidak lain adalah membuat persinggungan rapat antara permukaan dua benda.



Gambar 1. Proses Elektrifikasi

Apakah semua muatan listrik sama, atau mungkinkah ada lebih dari satu jenis muatan? Pada kenyataannya ada dua jenis muatan listrik berdasar kegiatan empiris, sebagaimana ditunjukkan oleh eksperimen seperti pada gambar 2. Sebuah penggaris plastik yang digantungkan dengan tali dan digosokkan dengan keras pada kain untuk membuatnya bermuatan. Ketika penggaris kedua yang juga telah dimuati dengan cara yang sama didekatkan ke penggaris yang pertama, terlihat bahwa satu penggaris menolak penggaris plastik yang lainnya, seperti ditunjukkan pada gambar 2.a. Dengan cara yang sama, jika sebuah batang kaca yang telah digosok dan kemudian didekatkan dengan batang kaca lain yang telah bermuatan kembali menunjukkan adanya gaya tolak-menolak, seperti gambar 2.b.

Sebaliknya jika batang kaca yang telah bermuatan didekatkan dengan penggaris plastik yang juga telah bermuatan (keduanya dimuati dengan cara menggosok), maka terlihat bahwa kedua benda saling tarik-menarik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.c. Kejadian menunjukkan bahwa ada perbedaan muatan listrik antara muatan pada plastik dan muatan yang dibawa oleh kaca, dengan kata lain bahwa ada dua jenis muatan yang terbentuk pada benda yang digosok. Dari ketiga kejadian sederhana tadi maka gaya interaksi antara dua benda bermuatan menunjukkan bahwa muatan sejenis akan tolak-menolak dan sebaliknya muatan yang tidak sejenis akan saling tarik-menarik.

Seorang ilmuwan Amerika Benjamin Franklin (1706-1790) mengajukan argumen bahwa ketika sejumlah muatan dihasilkan

pada suatu benda dalam satu proses, maka muatan yang berlawanan dengan jumlah yang sama dihasilkan pada benda yang lainnya. Positif dan negatif diperlakukan secara aljabar, sehingga pada setiap proses, perubahan total jumlah muatan yang dihasilkan selalu nol. Sebagai contoh, ketika penggaris plastic digosok dengan handuk kertas, maka penggaris plastic mendapatkan muatan negatif sedangkan handuk akan mendapatkan muatan positif dengan jumlah yang sama. Muatan-muatan tersebut terpisah, tetapi jumlah keduanya nol. Ini merupakan contoh hukum yang dikenal sebagai hukum kekekalan muatan listrik yang menyatakan bahwa: jumlah total muatan listrik yang dihasilkan pada setiap proses adalah nol. Jika suatu benda atau bagian ruang mendapatkan muatan positif, maka muatan negatif dengan jumlah yang sama akan ditemukan di daerah sekitarnya atau benda di dekatnya. Tidak pernah ditemukan penyimpangan dari hukum ini, dan hukum kekekalan ini sama kuatnya seperti hukum kekekalan energi dan momentum.



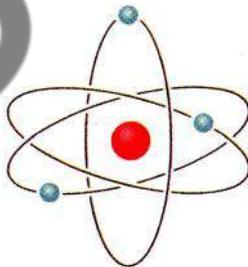
Gambar 2. Gaya Antara Dua Muatan Listrik

1. Muatan Listrik dalam Atom

Konsep kelistrikan semakin menunjukkan kemajuan ketika konsep kelistrikan dimulai dari dalam atom itu sendiri. Konsep ini berkembang baru pada dua abad terakhir. Pada bagian ini akan dibahas struktur atom dan gagasan-gagasan yang membawa kita terhadap pandangan atom yang saat ini lebih rinci. Perkataan atom berasal dari bahasa Yunani *atomos* yang berarti tak dapat dibagi. Partikel subatom yang membentuk atom ada tiga macam yakni elektron, proton dan

netron, dengan model atom seperti ditunjukkan pada gambar 3. Atom memiliki inti bermuatan positif yang berat, dan dikelilingi oleh satu atau lebih elektron bermuatan negatif. Inti terdiri dari proton yang bermuatan positif, dan netron tidak bermuatan (netral). Besarnya muatan negatif (elektron) sama dengan besarnya muatan positif (proton) dan tidak ada muatan yang lebih kecil dari kedua muatan partikel ini, sehingga seringkali disebut dengan satuan dasar muatan (e). Semua muatan benda merupakan kelipatan bilangan bulat dari satuan dasar muatan, dengan demikian muatan bersifat terkuantisasi (diskrit).

Setiap muatan Q yang ada di alam dapat dinyatakan dalam bentuk $Q = N e$. Kuantisasi muatan listrik kadang-kadang tidak teramati karena N memiliki harga yang sangat besar. Misal batang plastik yang digosok dengan kain wol maka akan berpindah sejumlah elektron sekitar 10^{10} buah. Proses berkurang atau bertambahnya elektron pada suatu benda disebut ionisasi. Muatan elektron adalah $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C. Massa proton dan netron besarnya hampir sama, massanya 1840 kali massa elektron. Jadi seluruh massa atom terpusat di intinya. Karena satu kilomol hidrogen beratom tunggal terdiri atas $6,02 \times 10^{26}$ partikel (bilangan Avogadro) dan massanya 1,008 kg, maka massa atom hidrogen adalah $1,008 / 6,02 \times 10^{26} = 1,67 \times 10^{-27}$ kg.



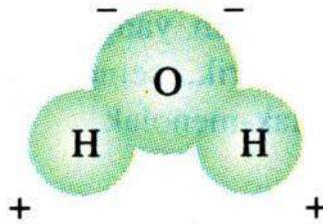
Gambar 3. Model atom sederhana

Atom hidrogen adalah satu-satunya pengecualian dari dalil bahwa setiap atom terdiri dari 3 macam partikel sub atom. Inti atom hidrogen hanya sebuah proton, dikitari oleh satu elektron dan selebihnya merupakan massa atom hidrogen, ($1/1840$) bagian adalah massa elektron dan selebihnya merupakan massa

proton. Dinyatakan dengan tiga angka penting maka massa elektron adalah $(1,67 \times 10^{-27} / 1840) = 9,11 \times 10^{-31}$ kg. Massa proton adalah $1,67 \times 10^{-27}$ kg. Karena massa proton dan massa neutron hampir sama, maka massa neutron adalah $1,67 \times 10^{-27}$ kg. Dalam susunan berkala atom (tabel periodik) setiap unsur ditulis dalam satu kotak dan di bagian bawahnya terdapat bilangan yang menyatakan nomor atom. Nomor atom menunjukkan banyaknya proton dalam inti, dalam keadaan tidak terusik, merupakan banyaknya elektron di luar inti. Bila jumlah total proton sama dengan jumlah total elektron, maka benda yang bersangkutan sebagai suatu keutuhan netral secara listrik.

Ketika kita ingin melebihi muatan negatif pada suatu benda, hal ini dapat dilakukan dengan dua cara, yakni cara pertama: tambahkan muatan negatif pada benda netral, atau cara kedua: mengambil sejumlah muatan positif pada benda tersebut. Begitu pula kalau muatan positif ditambahkan atau bila muatan negatif dikurangkan, maka akan terjadi kelebihan muatan positif. Dalam kebanyakan kejadian, muatan negatiflah (elektron) yang ditambahkan atau dikurangi, dan benda yang disebut bermuatan positif adalah benda yang jumlah normal muatan elektronnya berkurang. Muatan suatu benda adalah muatan lebihnya dibandingkan dengan jumlah muatan positif atau negatif dalam benda itu, muatan lebih tersebut jumlahnya jauh lebih sedikit.

Pada benda padat, inti cenderung berada pada posisi yang tetap, sementara elektron bergerak cukup bebas. Pemberian muatan pada benda padat dengan cara menggosok bisa dijelaskan sebagai perpindahan elektron dari satu benda ke benda yang lainnya. Penggaris plastik menjadi bermuatan negatif ketika digosok dengan handuk kertas, perpindahan elektron dari handuk ke plastik membuat handuk bermuatan positif yang sama besarnya dengan muatan negatif yang didapat oleh plastik. Biasanya muatan pada kedua benda hanya bertahan dalam waktu yang terbatas dan akhirnya kedua benda kembali ke keadaan netral.



Gambar 4. Sebuah molekul polar H₂O

Pertanyaan yang muncul adalah kemana muatan itu pergi? Dalam beberapa kasus, hal ini dinetralkan oleh ion-ion bermuatan di udara (misalnya, oleh tumbukan dengan partikel-partikel bermuatan, yang dikenal sebagai sinar kosmik dari ruang angkasa yang mencapai bumi). Hal yang penting diketahui, bahwa muatan dapat lepas ke inti air yang ada di udara. Ini karena molekul-molekul air adalah polar, sehingga elektron-elektron ekstra pada penggaris plastik, dapat lepas ke udara karena ditarik menuju molekul-molekul positif air, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 4. Di sisi yang lain benda-benda yang dimuati secara positif dapat dinetralkan oleh hilangnya elektron-elektron air dari molekul-molekul udara ke benda-benda bermuatan positif tersebut. Pada udara kering, listrik statis lebih mudah diperoleh karena udara berisi lebih sedikit molekul-molekul yang dapat berpindah. Pada udara lembab, lebih sulit untuk membuat benda bermuatan tahan lama.

2. Muatan Konduksi dan Induksi

Seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya cara memperoleh muatan listrik adalah dengan cara kelebihan salah satu muatan. Ada dua cara yaitu: (a) cara konduksi dan (b) cara induksi.

a. Cara Konduksi

Bila sebuah benda logam bermuatan positif disentuh dengan benda logam lain yang tidak bermuatan (netral), maka elektron-elektron bebas dalam logam yang netral

akan tertarik menuju logam yang bermuatan positif, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 5. Karena sekarang logam kedua tersebut kehilangan beberapa elektronnya, maka logam ini akan bermuatan positif. Proses demikian disebut memuati dengan cara konduksi atau dengan cara sentuhan, dan akhirnya kedua benda memiliki muatan dengan tanda yang sama.



Gambar 5. Memberi Muatan Dengan Cara Konduksi

b. Cara Induksi

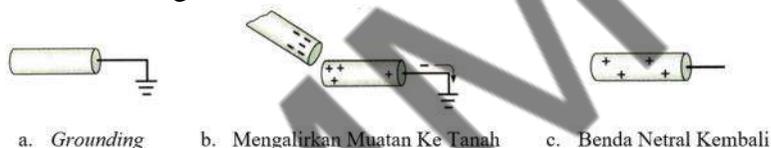
Bila benda bermuatan positif didekatkan pada batang logam yang netral, tetapi tidak disentuh, maka elektron-elektron batang logam tidak meninggalkan batang logam, namun elektron-elektron tersebut bergerak dalam batang logam menuju benda yang bermuatan, dan meninggalkan muatan positif pada ujung yang berlawanan, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 6. Proses seperti gambar 6 dikatakan, muatan diinduksikan pada kedua ujung batang logam. Pada proses ini tidak ada muatan total yang dihasilkan pada batang logam, muatan hanya dipisahkan, sehingga muatan batang logam tetap nol. Meskipun demikian, jika batang logam dipotong menjadi dua bagian, kita akan memiliki dua benda yang bermuatan, satu bermuatan positif dan yang satunya bermuatan negatif.



Gambar 6. Memberi Muatan Dengan Cara Induksi

Cara lain untuk menginduksi muatan total pada benda logam adalah dengan menghubungkannya dengan kawat penghantar ke tanah (*ground*) sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 7.a. Selanjutnya benda dikatakan di-

ground-kan atau dibumikan. Karena bumi sangat besar dan dapat menyalurkan elektron, maka bumi dengan mudah dapat menerima ataupun memberi elektron-elektron; oleh karena itu, bumi dapat bertindak sebagai penampung (*reservoir*) untuk muatan. Jika suatu benda bermuatan, misalnya muatan negatif didekatkan ke sebuah logam, maka elektron-elektron bebas dalam logam akan menolak dan beberapa elektron akan bergerak menuju bumi melalui kawat (gambar 7.b). Hal ini menyebabkan logam tersebut bermuatan positif. Jika kawat dipotong, logam akan memiliki muatan induksi positif (gambar 7.c) dan setelah benda negatif dijauhkan, elektron-elektron seluruhnya akan kembali ke logam dan benda akan netral.



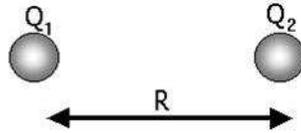
Gambar 7. Menginduksi Muatan Ke Sebuah Benda Yang Terhubung Ke Tanah

3. Hukum Coulomb

Pada pembahasan sebelumnya telah dijelaskan adanya gaya interaksi antara dua buah benda yang bermuatan listrik, terjadi gaya tarik-menarik antara dua buah muatan yang tidak sejenis, begitu juga sebaliknya. Pertanyaan adalah: faktor-faktor apa yang mempengaruhi besar gaya ini? Seorang fisikawan Perancis Charles Coulomb (1736 – 1806) menyelidiki adanya gaya listrik pada tahun 1780-an dengan menggunakan pengimbang torsi. Walaupun peralatan yang khusus yang mengukur muatan listrik tidak ada pada masa Coulomb, ia menyiapkan bola-bola kecil dengan muatan yang berbeda dan rasio kedua muatan diketahui. Hasil eksperimennya menyimpulkan bahwa:

- a. Gaya interaksi antara dua muatan sebanding dengan hasil kali dua muatan.

- b. Gaya interaksi antara dua muatan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan (gambar 8).



Gambar 8. Dua buah muatan berjarak R

Secara matematis hasil pengamatan secara eksperimen dapat dinyatakan dengan persamaan.

$$ZF = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Keterangan:

F = gaya coulomb (N)

q_1 = besar muatan pertama (C)

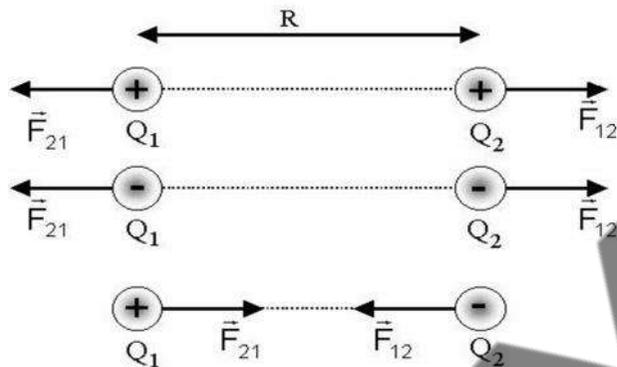
q_2 = besar muatan kedua (C)

r = jarak pisah muatan pertama dan kedua (m)

k adalah konstanta perbandingan yang besarnya ($8,988 \times 10^9$) Nm^2/C^2 (biasanya dibulatkan menjadi $9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$).

Jika diperlukan $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ dan $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

Gaya F pada hukum Coulomb menyatakan besar gaya listrik yang diberikan masing-masing benda bermuatan kepada yang lainnya, dan hukum ini hanya berlaku untuk muatan yang diam. Arah gaya listrik selalu sepanjang garis yang menghubungkan kedua benda tersebut. Jika kedua benda muatannya sejenis, maka gaya pada masing-masing benda berarah menjauhi muatan (tolak-menolak). Sebaliknya jika kedua benda muatannya tidak sejenis, maka gaya pada masing-masing benda mempunyai arah menuju benda yang lain (tarik-menarik), seperti yang ditunjukkan dalam gambar 9.



Gambar 9. Arah gaya pada muatan sejenis dan tidak sejenis

Gaya listrik seperti gaya-gaya yang lain adalah besaran vektor. Suatu besaran vektor mempunyai besar dan arah. Akan tetapi hukum Coulomb yang dituliskan dalam persamaan di atas hanya akan memberikan besarnya gaya. Untuk menentukan arah, perlu menggambar diagram dan menginterpretasikan hubungan dengan muatan secara hati-hati. Ketika menghitung dengan hukum Coulomb, kita biasanya mengabaikan tanda muatan dan menentukan arah berdasarkan pada gaya tersebut tarik-menarik atau tolak-menolak.

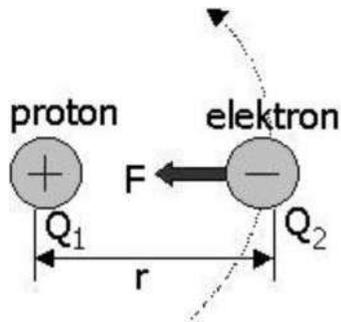
Contoh 1

Tentukan besar gaya listrik pada elektron dalam atom hidrogen yang diberikan oleh satu proton ($Q_1 = +e$) yang merupakan intinya. Anggap elektron mengorbit proton pada jarak rata-rata $r = 0,53 \times 10^{-10}$ m.

Solusi

Menggunakan hukum Coulomb, dengan $r = 0,53 \times 10^{-10}$ m, $Q_1 = Q_2 = 1,6 \times 10^{-19}$ C, dan dengan mengabaikan tanda-tanda muatan diperoleh,

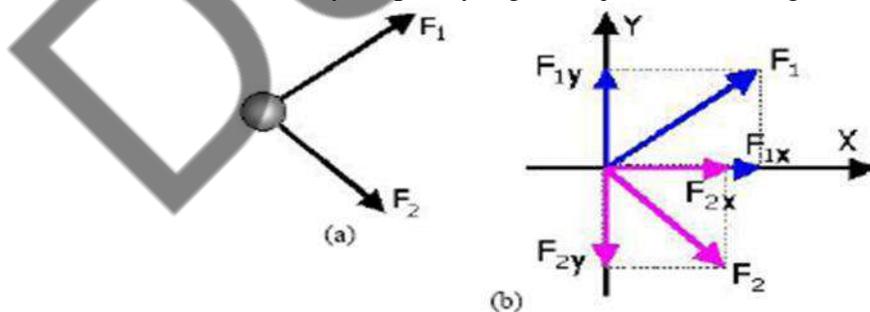
$$F = 9 \times 10^9 \frac{(1,6 \times 10^{-19})(1,6 \times 10^{-19})}{(0,53 \times 10^{-10})^2} = 8,2 \times 10^{-8} \text{ N}$$



Gambar 10. Gaya Pada Elektron Oleh Proton

Arah gaya pada elektron adalah menuju proton, karena muatan-muatan tersebut memiliki tanda yang berlawanan, sehingga gaya bersifat-tarik menarik.

Gaya listrik antara partikel-partikel yang bermuatan dalam keadaan diam, seperti halnya semua gaya merupakan besaran vektor, gaya ini memiliki besar dan arah. Ketika beberapa gaya bekerja pada sebuah benda, misalnya F_1 , F_2 , dan seterusnya, maka gaya total F_{net} pada benda merupakan jumlah vektor dari semua gaya yang bekerja padanya. Jika terdapat vektor gaya F_1 dan F_2 yang tidak segaris kerja, maka gaya total F_{net} tidak dapat dijumlahkan secara langsung, tetapi harus dijumlahkan secara vektor. Cara yang relatif mudah dapat dilakukan dengan metode analitik yakni dengan menguraikan masing-masing vektor kedalam dua sumbu yang saling tegak lurus. Dipilih penguraian vektor menjadi komponen sepanjang sumbu x dan y, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 11.



Gambar 11. Penguraian Gaya Terhadap Sumbu X Dan Y

Penguraian fungsi-fungsi trigonometri menurut gambar 11.b diperoleh:

$$\begin{aligned} F_{1x} &= F_1 \cos \theta_1 & F_{2x} &= F_2 \cos \theta_2 \\ F_{1y} &= F_1 \sin \theta_1 & F_{2y} &= F_2 \sin \theta_2 \end{aligned}$$

Penjumlahan komponen-komponen x dan y secara terpisah untuk mendapatkan komponen gaya resultan F, adalah

$$\begin{aligned} F_x &= F_1 + F_2 = F_1 \cos \theta_1 + F_2 \cos \theta_2 \\ F_y &= F_1 + F_2 = F_1 \sin \theta_1 - F_2 \sin \theta_2 \end{aligned}$$

Besar F adalah

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

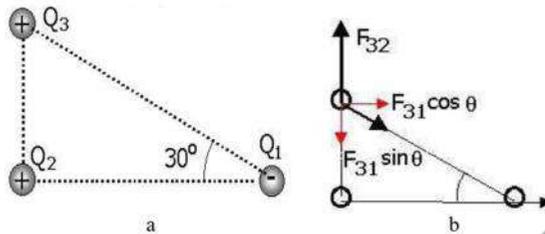
Arah F ditentukan oleh sudut yang dibuat F terhadap sumbu x yang dinyatakan dengan,

$$\tan \theta = \frac{F_y}{F_x}$$

Penggambaran diagram sangat penting untuk penyelesaian suatu masalah, terutama diagram benda bebas untuk setiap benda, yang menunjukkan semua gaya yang bekerja pada benda tersebut. Dalam menerapkan hukum Coulomb, biasanya hanya berhadapan dengan besar muatan saja (dengan mengabaikan tanda minus) untuk mendapatkan besar setiap gaya. Kemudian tentukan arah gaya secara fisik, muatan sejenis tolak-menolak dan muatan tak sejenis tarik-menarik selanjutnya gambarkan arah gaya-gaya tersebut pada diagram. Akhirnya jumlahkan gaya-gaya tersebut pada suatu benda secara vektor.

Contoh 2

Tiga muatan Q₁, Q₂, dan Q₃ tersusun seperti pada gambar 12. Tentukan gaya elektrostatis total pada muatan Q₃, bila r₂₃ = 30 cm, r₂₁ = 52 cm, Q₁ = 86 μC, Q₂ = 50 μC, Q₃ = 65 μC.



Gambar 12. Gambar untuk contoh 2

Solusi

Gaya-gaya F_{31} , F_{32} dan penguraian arahnya ditunjukkan dalam gambar 12.b.

$$F_{31} = k \frac{Q_3 Q_1}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{6,5 \times 10^{-5} \times 8,6 \times 10^{-5}}{(0,6)^2} = 140 \text{ N}$$

$$F_{32} = k \frac{Q_3 Q_2}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{6,5 \times 10^{-5} \times 5 \times 10^{-5}}{(0,3)^2} = 330 \text{ N}$$

Karena F_{31} berada pada bidang xy , maka F_{31} perlu diuraikan terhadap komponen-komponennya sepanjang sumbu x dan y , sehingga

$$F_{31x} = F_{31} \cos 30^\circ = 120 \text{ N}$$

$$F_{31y} = F_{31} \sin 30^\circ = -70 \text{ N}$$

Gaya F_{32} hanya mempunyai komponen y , sehingga gaya total pada muatan Q_3 mempunyai komponen-komponen,

$$F_{3x} = F_{31x} = 120 \text{ N}$$

$$F_{3y} = F_{32} + F_{31y} = 300 - 70 = 230 \text{ N}$$

Dengan demikian besar gaya total pada muatan Q_3 adalah

$$F_3 = \sqrt{(F_{3x})^2 + (F_{3y})^2} = 259,4 \text{ N}$$

Arah gayanya $= \tan^{-1}(F_{3y}/F_{3x}) = \tan^{-1}(230/120) = 62,4^\circ$.

Vektor gaya listrik dari hukum Coulomb dapat dinyatakan dalam bentuk vektor. Tinjau dua partikel bermuatan positif Q_1 dan Q_2 yang mempunyai vektor posisi r_1 dan r_2 terhadap pusat koordinat. Vektor gaya listrik yang dirasakan oleh muatan pertama karena muatan kedua dinyatakan sebagai,

$$\vec{F}_{12} = k \frac{Q_1 Q_2}{R_{12}^2} \hat{R}_{12}$$

4. Contoh Penerapan Gaya Elektrostatis

a. Pengecatan dengan Teknologi Elektrostatis

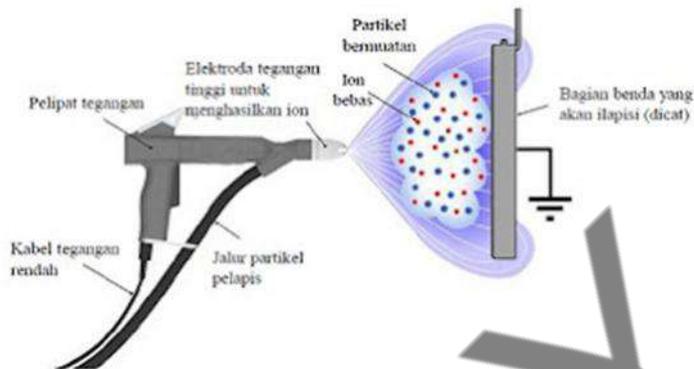
Saat ini teknologi pengecatan atau pelapisan sudah sangat maju. Kalau dulu pengecatan dilakukan dengan menggunakan kuas. Setelah itu berkembang teknologi penyemprotan yang dikenal dengan *air brush*. Namun, kedua cara tersebut masih memiliki kekurangan seperti proses pengecatan yang lambat dan hasil yang diperoleh tidak terlalu rata. Teknologi pengecatan atau pelapisan yang dikembangkan saat ini dan diterapkan di industri besar adalah teknologi elektrostatis, seperti gambar 13.



Gambar 13. Pengecatan Dengan Teknologi Elektrostatis

<https://www.guruamir.com/2017/05/mekanisme-pengecatan-secara.html>

Gambar 13 adalah contoh proses pengecatan mobil yang dilakukan dengan elektrostatis. Proses pengecatan dapat dilakukan oleh robot dan proses penyelesaian sangat cepat, hasil pengecatan sangat rata dan sangat terkontrol. Jumlah cat yang digunakan tidak berlebihan (sangat akurat) sehingga ekonomis dan limbah yang diproduksi pun menjadi sangat sedikit. Prinsip pengecatan atau pelapisan secara elektrostatis dapat dilihat pada gambar 14.



Gambar 14. Prinsip Pengecatan Secara Elektrostatis

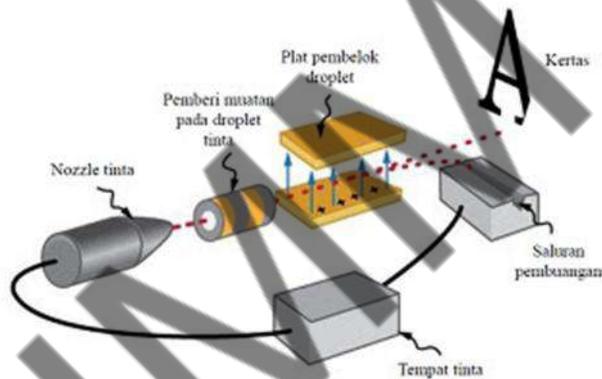
Gambar 14 adalah ilustrasi proses pengecatan atau pelapisan secara elektrostatis. Prinsip yang digunakan adalah gaya tarik antara muatan positif dan negatif. Material cat atau partikel pelapis disemprot dari ujung *nozzle* menggunakan dorongan udara. Di ujung alat penyemprot dihasilkan banyak muatan listrik dengan memberikan tegangan listrik yang sangat tinggi. Partikel yang keluar dari *nozzle* mengikat sebagian muatan tersebut sehingga keluar dari *nozzle* sebagai partikel bermuatan.

Benda yang dicat atau dilapisi umumnya berbentuk logam atau bahan konduktor lain diberi muatan listrik yang berlawanan. Karena bahan tersebut adalah logam maka muatan akan tersebar di permukaan logam. Muatan yang ada di permukaan bahan akan menarik partikel yang keluar dari *nozzle* yang memiliki muatan berlawanan sehingga bergerak ke arah benda yang akan dicat. Karena muatan yang ada di permukaan bahan tersebar merata di seluruh permukaan maka partikel pelapis akan menuju bahan secara merata pula. Dengan demikian, hasil pengecatan atau pelapisan menjadi rata.

b. *Printer Ink Jet*

Kita semua pasti sangat mengenal *printer ink jet*. *Printer* ini memiliki tinta berwarna hitam, *cyan*, *magenta*, dan *yellow*. Kombinasi empat warna tinta tersebut yang menghasilkan semua warna yang indah dilihat. Tinta-tinta

tersebut berbentuk cairan yang disimpan dalam *cartridge* atau dalam bentuk botol isi ulang. *Printer ink jet* menggunakan teknologi yang sama dengan pengecatan elektrostatis. Tinta dari *printer ink jet* dikeluarkan dalam bentuk *droplet* yang sangat kecil. Di ujung *nozzle*, *droplet* tersebut diberi muatan listrik sehingga dapat diarahkan untuk bergerak ke berbagai arah menggunakan medan listrik. Dengan demikian dapat dihasilkan huruf atau gambar yang sangat halus karena arah jatuhnya *droplet* di kertas dapat dikontrol dengan sangat akurat. Gambar 15 adalah ilustrasi proses cetak menggunakan *printer ink jet*.



Gambar 15. Ilustrasi Proses Cetak Menggunakan Printer Ink Jet.

<https://www.guruamir.com/2017/06/mekanisme-printer-ink-jet.html>

c. Mesin fotokopi

Mesin fotokopi bekerja berdasarkan prinsip gaya tarik-menarik antar muatan yang tidak sejenis. Muatan positif diberikan pada silinder aluminium berlapis selenium. Selanjutnya silinder disinari dengan proyeksi gambar/naskah yang akan difotokopi. Selenium merupakan foto konduktor, yaitu materi yang bersifat isolator dalam keadaan gelap dan bersifat konduktor jika mendapat cahaya. Bagian selenium yang terkena sinar akan bersifat konduktif dan akan menghantarkan elektron dari aluminium untuk

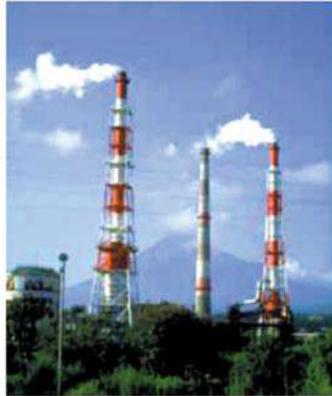
menetralkan muatan positif di bagian tersebut. Bagian selenium yang tidak mendapat sinar tetap bermuatan positif.

Partikel toner akan menempel pada lapisan selenium yang bermuatan positif. Selambar kertas diberi muatan positif dilewatkan pada silinder itu sehingga partikel toner yang bermuatan negatif akan ditarik menuju kertas yang bermuatan positif. Pola partikel toner pada kertas akan membentuk bayangan naskah/gambar yang difotokopi. Toner akan melekat pada kertas yang selanjutnya dilewatkan diantara pelat penggulung yang panas. Prinsip ini juga berlaku pada *printer* laser.

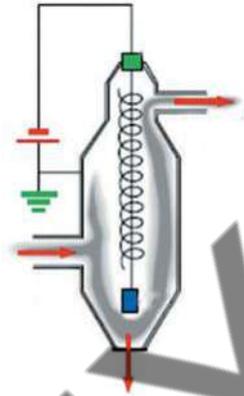
d. Filter elektrostatis

Filter elektrostatis banyak digunakan di industri untuk menyaring partikel-partikel gas yang tidak diinginkan sebelum dibuang ke atmosfer. Filter (pengendap) elektrostatis berfungsi untuk membersihkan gas buang yang keluar melalui cerobong asap agar tidak mengandung partikel-partikel kotor yang dapat mencemari udara. Di rumah, filter elektrostatis digunakan untuk menyaring debu agar tidak mengganggu pernapasan penghuninya.

Komponen utama yang ada pada alat ini adalah kawat yang bermuatan negatif dan pelat logam yang bermuatan positif seperti pada gambar 16. Gas yang akan disaring dimasukkan ke dalam tabung dengan peralatan yang dapat mengionisasi partikel gas. Pada saat asap kotor melewati kawat, beberapa partikel debu akan bermuatan negatif. Setelah itu, pelat logam yang bermuatan positif akan menarik partikel debu tersebut sehingga membentuk jelaga yang mudah dibersihkan.



a. Cerobong Asap Dengan Pengendap Elektrostatis



b. Skema Pengendap Elektrostatis

Gambar 16. kawat yang bermuatan negatif dan pelat logam

(Sumber: freedigitalphotos.net)

e. Teknologi Layar Sentuh

Tubuh kita mengandung listrik statis dan bersifat konduktor sehingga ketika kita menyentuh layar seperti gambar 17 akan diproses oleh konektor, untuk kemudian menghasilkan *output* yang dikehendaki.



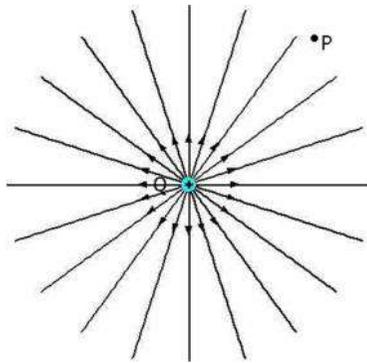
Gambar 17. Layar Sentuh

C. Medan Listrik

Pada pembahasan sebelumnya telah dijelaskan adanya gaya

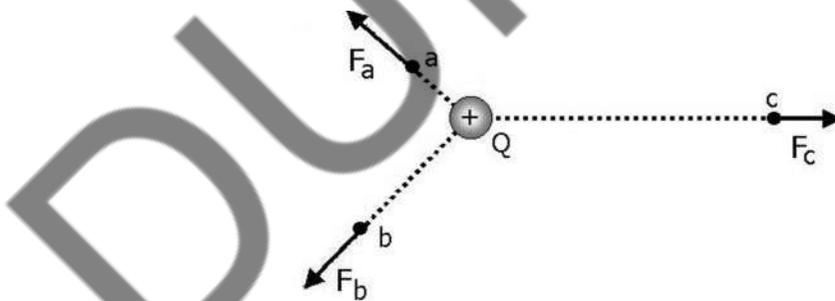
interaksi antara dua muatan baik yang sejenis maupun tidak sejenis. Pada bagian ini akan jelaskan hubungan antara kuat medan listrik dengan muatan pada suatu titik, serta menghitung kuat medan listriknya. Pada umumnya gaya bekerja karena adanya kontak antara dua benda, seperti gaya tekan atau gaya dorong yang diberikan pada suatu balok, gaya pada raket tenis ketika memukul bola tenis. Namun, sebaliknya gaya listrik timbul tanpa adanya persentuhan antara kedua benda, bahkan gaya listrik dapat dirasakan pada jarak tertentu, konsep gaya seperti ini relatif sukar untuk dimengerti sehingga perlu dikenalkan konsep medan (seperti halnya medan gravitasi Newton). Seorang fisikawan Inggris Michael Faraday (1791-1867) adalah orang yang pertama kali mengenalkan konsep medan listrik dengan menyatakan bahwa medan listrik keluar dari setiap muatan dan menyebar ke seluruh ruang, seperti gambar 18. Ketika muatan kedua diletakkan di dekat yang pertama, ia akan merasakan gaya yang disebabkan oleh adanya medan listrik di tempat itu, misalnya titik P. Medan listrik pada lokasi muatan ke dua dianggap berinteraksi langsung dengan muatan ini untuk menghasilkan gaya. Bagaimanapun harus ditekankan bahwa sebuah medan bukan merupakan sebuah zat.

Kuat medan listrik tidak dapat dihitung secara langsung tetapi dapat dihitung melalui gaya interaksi oleh dua muatan. Oleh karena itu, untuk menentukan berapa besarnya kuat medan listrik oleh suatu muatan di suatu titik, dapat dilakukan dengan cara meletakkan sebuah muatan uji, seperti yang ditunjukkan pada gambar 19. Muatan uji adalah partikel bermuatan yang sangat kecil (muatannya) dengan muatan positif q_0 , sehingga gaya yang diberikan tidak mengubah secara signifikan terhadap distribusi muatan terhadap medan yang diukur.



Gambar 18. Arah Medan Listrik di Sekitar Muatan Q

Gaya pada muatan penguji positif q_0 yang kecil, diletakkan pada beberapa titik di sekitar muatan positif Q, seperti yang gambar 19. Gaya pada titik b sedikit lebih kecil dari titik a karena jaraknya lebih besar, dan gaya pada titik c lebih kecil lagi. Pada setiap kasus, gaya mengarah secara radial keluar dari Q, demikian pula bila di setiap titik dalam ruang di sekitar muatan Q ditempatkan muatan uji q_0 maka gaya pada masing-masing titik mengarah secara radial keluar dari Q. Tetapi bila muatannya negatif, maka gaya-gaya yang dirasakan oleh muatan penguji positif q_0 mempunyai arah radial masuk kedalam muatan Q negatif.



Gambar 19. Gaya Yang Diberikan Oleh Muatan +Q Pada Sebuah Muatan Uji Q

Medan listrik merupakan daerah yang masih merasakan adanya pengaruh gaya listrik, yang disebabkan oleh suatu muatan. Medan listrik E pada setiap titik pada ruang didefinisikan sebagai vektor gaya F yang dirasakan oleh muatan uji positif pada titik tersebut dibagi dengan besar muatan uji q_0 ,

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = k \frac{Q}{R^2} \hat{R}$$

Karena kuat medan E seperti halnya gaya F merupakan besaran vektor, maka perhitungan kuat medan listrik harus diselesaikan secara vektor. Medan listrik di suatu titik yang disebabkan oleh sejumlah muatan titik dapat dihitung dari jumlah vektor medan listrik masing-masing muatan, yang secara matematis dinyatakan sebagai,

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n$$

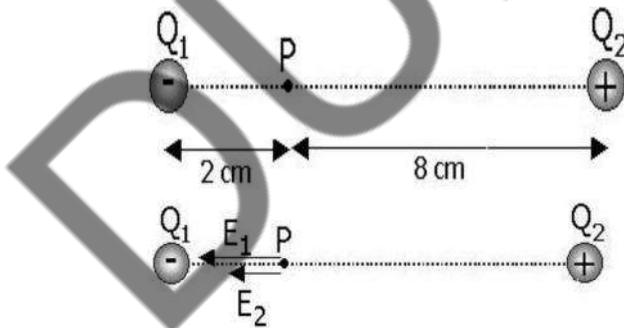
$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = \sum_{i=1}^n k \frac{Q_i}{R_i^2} \hat{R}_i$$

Contoh 3

Dua muatan titik masing-masing $-25 \mu\text{C}$ dan $+50 \mu\text{C}$ terpisah pada jarak 10 cm. Tentukan: (a) Besar dan arah medan listrik diantara kedua muatan pada jarak 2 cm dari muatan yang negatif. (b) Besar dan arah percepatan sebuah elektron jika diletakkan diantara kedua muatan pada jarak 2 cm dari muatan negatif.

Solusi

a)



Gambar 20. Gambar Untuk Contoh 3

Medan E_1 dan E_2 yang disebabkan oleh muatan Q_1 dan Q_2 arahnya sama-sama ke kiri. E_1 menunjuk ke arah Q_1 dan E_2 menunjuk ke arah menjauhi Q_2 , seperti yang ditunjukkan dalam

gambar 20. Kuat medan listrik pada titik P dapat dihitung dengan cara menjumlahkan secara aljabar dari kedua medan dengan mengabaikan tanda dari muatan tersebut.

$$E_p = k \frac{Q_1}{r_1^2} + k \frac{Q_2}{r_2^2} = k \frac{Q_1}{r_1^2} \left[1 + \frac{(Q_2/Q_1)}{(r_2^2/r_1^2)} \right]$$

$$E_p = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(25 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2 \times 10^{-2} \text{ m})^2} \left[1 + \frac{50/25}{(8/2)^2} \right]$$

$$= 5,6 \times 10^8 \left[1 + \frac{1}{8} \right] \text{ N/C} = 6,3 \times 10^8 \text{ N/C}$$

Pengeluaran faktor Q_1/r_1^2 pada baris pertama memungkinkan untuk melihat kekuatan relatif dari kedua medan yang terlibat, artinya medan Q_2 hanya $1/8$ dari medan Q_1 ($1/9$ dari medan totalnya).

b) Elektron akan merasakan gaya ke kanan karena ia bermuatan negatif, sehingga percepatannya juga akan mengarah ke kanan. Besar percepatan adalah,

$$a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m} = \frac{(1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) \cdot (6,3 \times 10^8 \text{ N/C})}{9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}} = 1,1 \times 10^{12} \text{ m/s}^2$$

D. Energi Potensial dan Potensial Listrik

Dalam pelajaran mekanika, kita mendapatkan bahwa konsep energi potensial sangat berguna. Ketika kita mengangkat sebuah benda dengan massa m setinggi h dekat permukaan bumi, kerja yang kita lakukan menjadi energi potensial mgh dari suatu sistem masa bumi. Jika kita kemudian menjatuhkan benda tersebut, energi potensial ini diubah menjadi energi kinetik. Gaya listrik antara dua muatan adalah searah sepanjang garis muatan-muatan dan berbanding terbalik terhadap kuadrat jaraknya, sama dengan gaya gravitasi antara dua massa. Seperti gaya gravitasi, gaya listrik adalah konservatif, sehingga ada hubungan fungsi energi potensial dengan gaya listrik. Seperti yang akan kita bahas, energi potensial partikel dalam suatu medan listrik sebanding dengan muatannya. Potensial diukur dalam volt dan sering disebut

tegangan. Dalam sub bab ini, kita akan mendefinisikan fungsi potensial listrik V dan menunjukkan bagaimana menghitung potensial dari distribusi muatan yang diberikan atau dari medan listrik yang diberikan, serta bagaimana potensial listrik dihubungkan dengan medan listrik E dan energi potensial listrik.

1. Potensial Listrik dan Beda Potensial

Secara umum ketika gaya konservatif F bekerja pada sebuah partikel yang mengalami perpindahan dl perubahan dalam fungsi energi potensial dU didefinisikan dengan persamaan,

$$dU = -F \cdot dl$$

Kerja yang dilakukan oleh gaya konservatif mengurangi energi potensial (gambar 22). Gaya yang digunakan medan listrik pada muatan q_0 adalah

$$F = q_0 E$$

Ketika muatan mengalami perpindahan dl dalam medan listrik E , perubahan energi potensial elektrostatik adalah,

$$dU = -q_0 E \cdot dl$$

Jika muatan dipindahkan dari satu titik awal a ke suatu titik akhir b , perubahan energi potensial elektrostatiknya adalah,

$$\Delta U = U_b - U_a = \int_a^b dU = -\int_a^b q_0 \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Perubahan energi potensial sebanding dengan muatan uji q_0 . Perubahan energi potensial per satuan muatan disebut beda potensial dV .

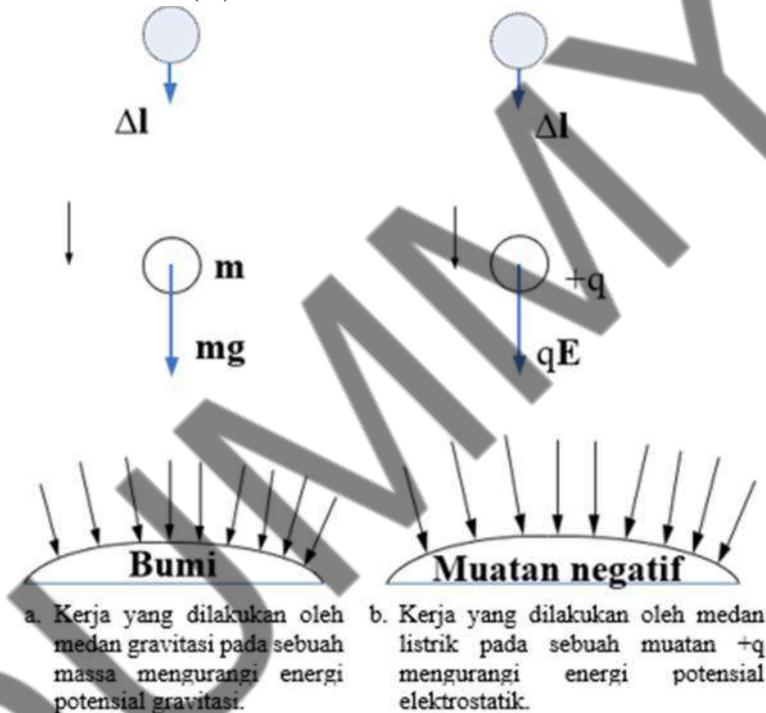
$$dV = \frac{dU}{q_0} = -\vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Untuk perpindahan berhingga dari titik a ke titik b , perubahan potensialnya adalah

$$\Delta V = V_b - V_a = \frac{\Delta U}{q_0} = -\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Beda potensial ($V_b - V_a$) adalah negatif dari kerja per satuan muatan yang dilakukan oleh medan listrik pada muatan

uji positif jika muatan pindah dari titik a ke b. Seperti dengan energi potensial U , hanya perubahan potensial V sajalah yang dianggap penting. Kita bebas memilih energi potensial atau potensial nol pada titik yang sesuai, seperti yang kita lakukan untuk energi potensial mekanik. Karena potensial listrik adalah energi potensial elektrostatik per satuan muatan, satuan SI untuk potensial dan beda potensial adalah joule per coulomb = volt (V).



Gambar 21. Kerja Yang Dilakukan Oleh Medan Gravitasi dan Medan Listrik

Contoh 4

Medan listrik menunjuk pada arah x positif dan mempunyai besar konstan $10 \text{ N/C} = 10 \text{ V/m}$. Tentukan potensial sebagai fungsi x , anggap bahwa $V = 0$ pada $x = 0$.

Solusi

Vektor medan listrik diberikan dengan $E = 10 \mathbf{i} \text{ N/C} = 10 \mathbf{i} \text{ V/m}$. Untuk suatu perpindahan sembarang $d\mathbf{l}$, perubahan potensial diberikan oleh persamaan,

$$dV = \frac{dU}{q_0} = -\vec{E} \cdot d\vec{l} = -(10 \text{ V/m}) \mathbf{i} \cdot (dx \mathbf{i} + dy \mathbf{j} + dz \mathbf{k})$$

$$dV = -(10 \text{ V/m}) dx$$

Dengan integrasi dari titik x_1 ke x_2 kita dapatkan beda potensial $V(x_2) - V(x_1)$,

$$\begin{aligned} V(x_2) - V(x_1) &= \int_{x_1}^{x_2} dV = \int_{x_1}^{x_2} -(10 \text{ V/m}) dx \\ &= -(10 \text{ V/m})(x_2 - x_1) = (10 \text{ V/m})(x_1 - x_2) \end{aligned}$$

Karena diketahui bahwa potensial nol pada $x = 0$, kita mempunyai $V(x_1) = 0$ pada $x_1 = 0$. Maka potensial pada x_2 relatif terhadap $V = 0$ pada $x = 0$ diberikan oleh, $V(x_2) - 0 = (10 \text{ V/m})(0 - x_2)$, atau $V(x_2) = -(10 \text{ V/m}) x_2$.

Pada titik sembarang x , potensialnya adalah

$$V(x) = -(10 \text{ V/m})x$$

Jadi potensial nol pada $x = 0$ dan berkurang 10 V/m dalam arah x .

2. Potensial Oleh Sistem Muatan Titik

Potensial listrik oleh muatan titik q di pusat dapat dihitung dari medan listrik, yang diberikan oleh

$$\vec{E} = \frac{kq}{r^2} \hat{r}$$

Jika muatan uji q_0 pada jarak r diberikan suatu perpindahan $d\vec{l} = dr$, perubahan energi potensialnya

$dU = -q_0 E dl$ dan perubahan potensial listrik adalah

$$dV = -\vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{kq}{r^2} \hat{r} \cdot dr \hat{r} = -\frac{kq}{r^2} dr$$

dengan integrasi kita dapatkan potensial oleh muatan titik,

$$V = +\frac{k}{r} + V_0$$

dengan V_0 adalah konstanta integral. Biasanya pendefinisian potensial nol ada pada jarak takhingga dari muatan titik (yaitu pada $r = \infty$). Kemudian konstanta V_0 sama

dengan nol, dan potensial pada jarak r dari muatan titik adalah

$$V = kq/r \text{ pada } r = \infty$$

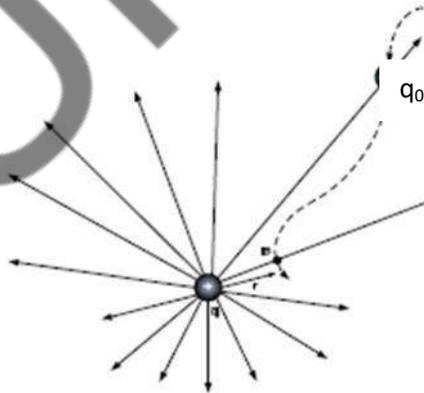
Potensial positif atau negatif bergantung pada tanda muatan q . Jika muatan uji q_0 dilepaskan dari satu titik pada jarak r dari muatan titik q yang terletak pada pusat, muatan uji akan dipercepat keluar dalam arah medan listrik. Kerja yang dilakukan oleh medan listrik saat muatan uji bergerak dari r ke ∞ adalah

$$W = \int_r^\infty q_0 \vec{E} \cdot d\vec{l} = q_0 \int_r^\infty E_r dr = q_0 \int_r^\infty \frac{kq}{r^2} dr = \frac{kqq_0}{r}$$

Kerja ini adalah energi potensial elektrostatik sistem dua muatan,

$$U = \frac{kqq_0}{r} = q_0 V$$

Energi potensial tersebut adalah kerja yang dilakukan oleh medan listrik saat muatan uji bergerak dari r ke ∞ . Kemungkinan lain, kita dapat menganggap energi potensial sebagai kerja yang harus dilakukan oleh gaya terpaksa $F_{app} = -q_0 E$ untuk membawa muatan uji positif q_0 dari jarak tak terhingga ke jarak r dari muatan titik q (Gambar 22).



Gambar 22. Kerja yang diperlukan untuk membawa muatan uji q_0

Contoh 5

- Berapakah potensial listrik pada jarak $r = 0.529 \times 10^{-10}$ m

dari proton?

- b. Berapakah energi potensial elektron dan proton pada pemisahan ini?

Solusi

- a. Muatan proton adalah $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

$$V = \frac{kq}{r} = \frac{(8,99 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})}{0,529 \times 10^{-10} \text{ m}} \\ = 27,2 \text{ J/C} = 27,2 \text{ V}$$

- b. Muatan elektron adalah $-e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Dalam elektron Volt, energi potensial elektron dan proton yang terpisah dengan jarak $0,529 \times 10^{-10} \text{ m}$ adalah

$$U = qV = -e(27,2 \text{ V}) = -27,2 \text{ eV}$$

dalam satuan SI, energi potensial adalah

$$U = qV = (-1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(27,2 \text{ V}) = -4,35 \times 10^{-18} \text{ J}$$

Untuk menentukan potensial pada satu titik oleh beberapa muatan titik, kita menentukan potensial pada titik tersebut oleh tiap muatan secara pemisahan dan penjumlahan. Hal ini mengikuti prinsip superposisi untuk medan listrik. Jika E adalah medan listrik pada suatu titik oleh q_i , medan bersih pada titik tersebut oleh semua muatan adalah $E = E_1 + E_2 + \dots = E_i$. Kemudian dari definisi beda potensial untuk perpindahan dl kita memiliki $dV = -E \cdot dl_1 - E \cdot dl_2 - \dots = dV_1 + dV_2 + \dots$. Jika distribusi muatan berhingga, yaitu tidak ada muatan di tak hingga, kita dapat memilih potensial nol pada tak hingga. Potensial akibat sistem muatan titik q_i diberikan oleh

$$V = \sum_i \frac{kq_i}{r_{i0}}$$

Dengan jumlah tersebut diambil dari seluruh muatan r_{i0} adalah jarak muatan ke- i titik P dimana potensial ditentukan.

Contoh 6

Sebuah dipol listrik **dari** sebuah muatan positif $+q$ pada sumbu z pada $z = +a$ dan sebuah muatan negatif $-q$ pada $z = -a$ (Gambar 23). Tentukan potensial pada sumbu z pada jarak yang jauh dari dipol.

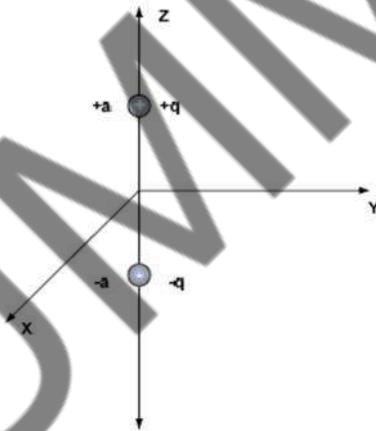
Solusi

$$V = \sum_i \frac{kq_i}{r_{i0}} = \frac{kq}{z-a} + \frac{k(-q)}{z+a} = \frac{2kqa}{z^2 - a^2}$$

Untuk $z \gg a$, kita dapat mengabaikan a^2 dibandingkan dengan z^2 pada pembagi, maka kita mempunyai

$$V = \frac{2kqa}{z^2} = \frac{kp}{z^2} \quad z \gg a$$

dengan $p = 2qa$ adalah jumlah momen dipol.



Gambar 23. Dipol Listrik Pada Sumbu Z

3. Energi Potensial Elektrostatik

Jika kita memiliki muatan titik q_1 , potensial pada jarak r_{12} dinyatakan dengan $V = k q_1/r_{12}$. Kerja yang diperlukan untuk membawa muatan uji kedua q_2 dari jarak sejauh tak hingga ke jarak r_{12} adalah $W_2 = q_2 V$. Untuk membawa muatan ketiga, kerja yang harus dilakukan melawan medan listrik yang dihasilkan oleh kedua muatan q_1 dan q_2 . Kerja yang

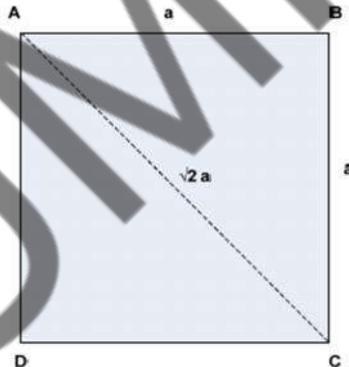
diperlukan untuk membawa muatan ketiga q_3 menuju jarak r_{13} dari q_1 dan r_{23} dari q_2 adalah $W_3 = (k q_3 q_1 / r_{13}) + (k q_3 q_2 / r_{23})$. Total kerja yang diperlukan untuk memasang tiga muatan adalah

$$W = \frac{kq_1q_2}{r_1} + \frac{kq_1q_3}{r_1} + \frac{kq_2q_3}{r_2}$$

Kerja ini adalah energi potensial elektrostatik sistem muatan tiga titik. Ini bergantung pada urutan muatan yang dibawa ke posisi akhirnya. Secara umum, energi potensial listrik sistem muatan titik adalah energi yang diperlukan untuk membawa muatan dari jarak takhingga ke posisi akhirnya.

Contoh 6

Titik A, B, C, dan D pada sudut bujur sangkar dengan sisi a seperti ditunjukkan pada gambar 24. Berapakah kerja yang diperlukan untuk meletakkan muatan positif q pada tiap sudut bujur sangkar?



Gambar 24. Bujur Sangkar Dengan Sisi a

Solusi

Tidak ada kerja yang diperlukan untuk meletakkan muatan lain berada pada jarak takhingga. Untuk membawa muatan kedua ke titik B pada jarak a diperlukan kerja

$$W_2 = kq^2/a$$

Titik C sejauh a dari titik B dan sejauh $\sqrt{2}a$ dari titik A. Potensial pada titik C menuju muatan-muatan pada A dan B adalah

$$V_c = \frac{kq}{a} + \frac{kq}{\sqrt{2}a}$$

Kerja yang diperlukan untuk membawa muatan ketiga q ke titik C adalah

$$W_3 = qV_c = \frac{kqq}{a} + \frac{kqq}{\sqrt{2}a}$$

Akhirnya kerja yang diperlukan untuk membawa muatan keempat ke titik D ketika ketiga muatan yang lain telah ada adalah

$$W = \frac{kqq}{a} + \frac{kqq}{a} + \frac{kqq}{\sqrt{2}a}$$

Total kerja yang diperlukan untuk memasang empat muatan tersebut adalah

$$W_{ti} = W_2 + W_3 + W_4 = \frac{4kqq}{a} + \frac{2kqq}{\sqrt{2}a} = \frac{(8 + 2\sqrt{2})kqq}{2a}$$

Kerja ini adalah energi elektrostatik total distribusi muatan.

E. Kapasitor

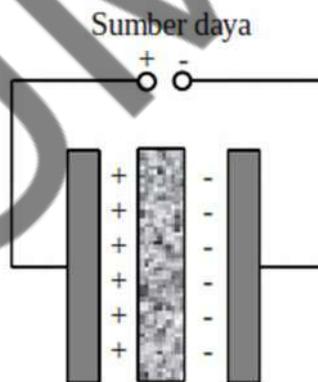
Kapasitor adalah piranti yang berguna untuk menyimpan muatan dan energi listrik. Kapasitor terdiri dari dua konduktor yang berdekatan tetapi terisolasi satu sama lain dan membawa muatan yang sama besar dan berlawanan. Kapasitor memiliki banyak kegunaan. Pemberi cahaya kilat pada kamera anda menggunakan suatu kapasitor untuk menyimpan energy listrik yang diperlukan untuk meberikan cahaya kilat secara tiba-tiba. Kapasitor juga digunakan untuk memperhalus riak yang timbul ketika arus bolak-balik dikonversi menjadi arus searah pada catu daya, sehingga dapat digunakan pada kalkulator atau radio anda ketika baterai tidak dapat digunakan.

Sebuah kapasitor terdiri dari dua pelat logam dengan sebuah lapisan isolator (penyekat) di antara kedua pelat tersebut. Lapisan isolator yang digunakan dapat berupa sebuah lempengan plastik tipis. Pada kapasitor variabel (*varco*) lapisan ini adalah udara.



Gambar 25. Contoh Kapasitor

Apabila sebuah kapasitor disambungkan ke sumber DC, elektron-elektron akan berkumpul pada pelat yang tersambung ke terminal negatif sumber. Elektron-elektron ini akan menolak elektron-elektron yang ada pada pelat di seberangnya. Elektron-elektron yang tertolak akan mengalir menuju terminal positif sumber.



Gambar 26. Kapasitor Dihubungkan Dengan Batrai

Sebuah kapasitor yang disambungkan dengan batrai seperti pada gambar 27 dengan seketika akan menjadi bermuatan. Tegangan antara kedua pelatnya adalah sama dengan tegangan sumber daya. Ketika kapasitor tersebut dilepaskan dari sumber daya, kapasitor tetap mempertahankan muatannya. Karena lapisan

isolator yang ada pada kapasitor, arus tidak dapat mengalir melewati kapasitor. Kapasitor akan tetap bermuatan hingga waktu yang tak terbatas. Dengan alasan ini, kapasitor sangat berguna untuk menyimpan muatan listrik.

1. Kapasitansi

Kemampuan sebuah kapasitor untuk menyimpan muatan listrik disebut sebagai kapasitansi kapasitor dan diberi simbol C . Satuan untuk kapasitansi adalah farad, yang disimbolkan dengan F . Satu farad didefinisikan sebagai jumlah muatan listrik yang dapat disimpan (dalam satuan coulomb) per satuan tegangan.

$$C = Q/V$$

Kapasitansi sebuah kapasitor dapat dikalkulasi dengan mengetahui geometri konduktor dan sifat dielektriknya penyekat di antara konduktor. Sebagai contoh, besar kapasitansi dari sebuah kapasitor pelat sejajar yang dibuat dari dua lempeng sejajar seluas A yang dipisahkan oleh jarak d adalah,

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

Keterangan:

C adalah kapasitansi dalam farad (F)

A adalah luas setiap lempeng, diukur dalam meter persegi

ϵ_r adalah konstanta dielektrik (yang juga disebut permitivitas listrik relatif) dari bahan di antara lempeng

ϵ_0 adalah permivisitas vakum, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m

d adalah jarak antar lempeng, diukur dalam meter

Contoh

Muatan yang tersimpan pada sebuah kapasitor adalah 6 coulomb. Tegangan antara kedua pelatnya adalah 2 V. Berapakah kapasitansinya?

Solusi

$$C = Q/V = 6/2 = 3F$$

2. Nilai Kapasitor

Kapasitor-kapasitor dibuat dengan suatu nilai yang mirip dengan nilai-nilai referensi bagi resistor. Kapasitor memiliki toleransi yang lebih tinggi dibandingkan dengan resistor, sehingga kita tidak merasa perlu untuk membuat sebanyak 24 buah nilai di dalam kisaran tersebut. Nilai-nilai kapasitansi di dalam kisaran ini adalah:

1,0 1,2 1,5 1,8 2,2
2,7 3,3 3,9 4,7 5,6 6,8 8,2

Nilai-nilai ini berulang kembali dengan kelipatan-kelipatan 10.

Untuk mengetahui nilai kapasitansi kapasitor, beberapa kapasitor memiliki nilai kapasitansi yang langsung tercetak pada komponennya. Kapasitor yang langsung tercetak nilai kapasitansinya biasanya memiliki ukuran yang besar sehingga terdapat tempat yang cukup untuk mencetak nilai kapasitor dan juga lengkap dengan nilai tegangan maksimum dan polaritasnya. Misalnya pada kapasitor elektrolit (*elco*), tertulis kapasitansinya sebesar 22 μ F/25v. Artinya nilai kapasitor ini adalah 25 mikro Farad dan bisa bekerja pada tegangan maksimum 25 V, jika melebihi 25 V maka kapasitor ini akan terbakar.

Kapasitor yang ukuran fisiknya kecil biasanya bertuliskan 2 atau 3 angka saja. Untuk kapasitor yang bertuliskan dua angka, satuan kapasitansinya adalah pF (pico Farad). Sebagai contoh, kapasitor yang bertuliskan dua angka 47, maka kapasitansi kapasitor tersebut adalah 47 pF. Untuk kapasitor yang bertuliskan 3 angka pada kapasitornya, maka angka pertama dan kedua menunjukkan nilai nominal, sedangkan angka ketiga adalah faktor pengali. Faktor pengali sesuai dengan angka nominalnya, berturut-turut 1 berarti kali 10, 2 berarti kali 100, 3 berarti kali 1000, dan seterusnya. Misalnya pada kapasitor keramik tertulis 104 seperti pada gambar 28, maka kapasitansinya adalah $10 \times 10.000 = 100.000$ pF atau = 100 nF.



Gambar 27. Kapasitor Yang Memiliki Kode 104

Pada beberapa jenis kapasitor ada yang menggunakan toleransi yang biasanya menggunakan kode huruf, seperti pada tabel 1.1.

Tabel 1. Toleransi Kapasitansi Kapasitor

| Simbol Huruf | Toleransi |
|--------------|-------------|
| D | +/- 0.5 pF |
| F | +/- 1% |
| G | +/- 2% |
| H | +/- 3% |
| J | +/- 5% |
| K | +/- 10% |
| M | +/- 20% |
| P | +100% , -0% |
| Z | +80%, -20% |

3. Jenis-jenis kapasitor

Jenis-jenis kapasitor ada berbagai macam, diantaranya adalah

a. Menurut polaritasnya

- 1) Kapasitor polar, memiliki polaritas (+) dan (-). Dalam pemasangannya harus diperhatikan polaritasnya dan tidak boleh dipasang terbalik. Pada kapasitor ini terdapat tanda polaritasnya untuk menandai kaki yang berpolaritas (+) atau (-).

- 2) Kapasitor non polar

Jenis kapasitor ini bisa dipasang bolak-balik.

b. Menurut bahan pembuatannya

Menurut bahan pembuatannya jenis-jenis kapasitor adalah:

- 1) Kapasitor Elektrolit, isolatornya adalah bahan elektrolit
- 2) Kapasitor Mika, bahan isolatornya adalah dari mika
- 3) Kapasitor Udara, bahan isolatornya adalah udara.

c. Menurut ketetapan nilainya

- 1) Kapasitor tetap
Nilai kapasitasnya tidak bisa diubah.
- 2) Kapasitor variabel atau *varco* (*variable condenser*)
Kapasitor jenis ini bisa kita ubah nilainya.

4. Rangkaian Kapasitor

Sebagaimana hambatan, rangkaian kapasitor dapat kita klasifikasikan menjadi dua jenis konfigurasi yakni, seri dan paralel, akan tetapi aturannya berbeda dan bahkan kebalikan dari aturan hambatan (resistor).

a. Rangkaian Seri



Gambar 28. Rangkaian Seri Kapasitor

Kapasitor ekuivalen (total/penggalnti dari sebuah rangkaian seri dapat dihitung sebagai berikut. Karena besarnya arus dalam sebuah rangkaian seri sama dalam setiap kapasitor sesuai dengan hukum Kirchoff, maka dengan demikian jumlah muatan yang mengalirpun sama sehingga muatan di C1, C2 dan seterusnya kita sebut saja dengan Q1, Q2, dan seterusnya akan sama besar.

$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$

beda potensial total pada keempat kapasitor pada gambar 28 tidak lain adalah jumlah beda potensial dari masing-masing kapasitor yaitu,

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$$

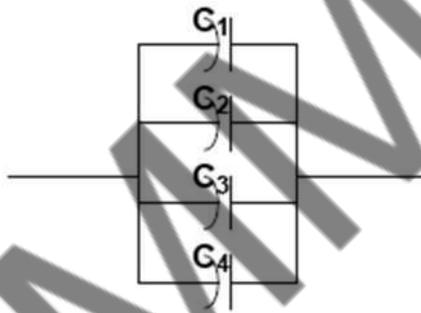
karena hubungan $V = Q/C$ sehingga tegangan total dapat dituliskan sebagai

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3} + \frac{Q_4}{C_4}$$

Karena muatan pada tiap kapasitor sama, maka diperoleh besarnya kapasitor ekivalen/total untuk rangkaian seri

$$\frac{1}{C_5} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} + \dots$$

b. Rangkaian Paralel



Gambar 29. Rangkaian Paralel Kapasitor

Untuk rangkaian paralel seperti gambar 29 diketahui bahwa beda potensial pada masing-masing kapasitor V_1 , V_2 , V_3 dan V_4 adalah sama besar $V_1 = V_2 = V_3 = V_4$. Karena arus total (atau muatan total) adalah jumlah dari masing-masing muatan yang mengalir pada kapasitor maka $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$

Karena $Q = CV$ maka total muatan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut,

$$CV = C_1 V_1 + C_2 V_2 + C_3 V_3 + C_4 V_4$$

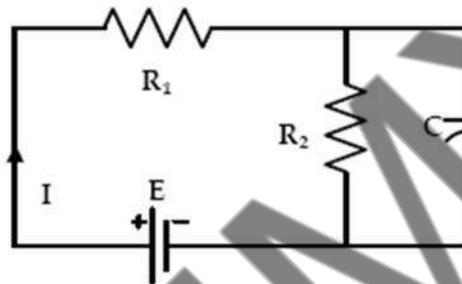
dan karena tegangan pada masing-masing kapasitor adalah sama, maka

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

5. Kapasitor dalam Rangkaian Arus Searah

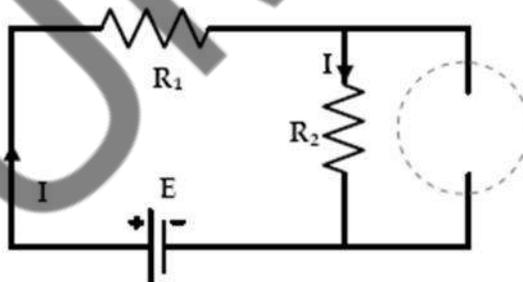
Dalam rangkaian arus searah, keberadaan kapasitor dalam

waktu yang lama biasanya dapat dianggap sebuah kawat yang putus (rangkaian terbuka). namun proses tersebut tidak terjadi dengan sendirinya, namun melalui proses pengisian muatan terlebih dahulu. Ilustrasi berikut akan memperjelas proses yang terjadi pada kapasitor dalam sebuah rangkaian arus searah. Pandanglah sebuah rangkaian sederhana dengan dua buah resistor dan sebuah kapasitor yang dilengkapi dengan sumber tegangan E seperti gambar 30.



Gambar 30. Rangkaian Arus Searah Dengan Sebuah Kapasitor dan Dua Buah Resistor

Pada saat awal, kapasitor belum terisi muatan sehingga dapat dianggap sebagai sebuah sirkuit tertutup (kawat terhubung) tanpa kapasitor seperti gambar 31.



Gambar 31. Pada Saat Awal Arus Lebih Memilih Melalui Kapasitor dan Keberadaan Kapasitor Dapat Dianggap Sebagai Kawat Tertutup

Arus akan memilih melalui kapasitor daripada melalui R2 karena hambatannya jauh lebih kecil. Dengan demikian tidak ada arus yang melalui R2. Sehingga jika diterapkan hukum Kirchoff akan menghasilkan

$$E - R_1 = 0$$

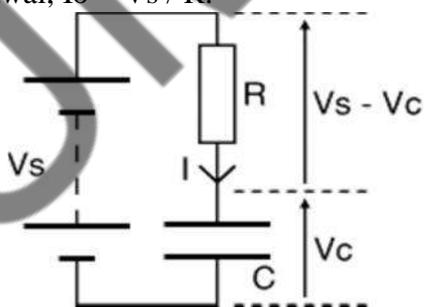
Namun setelah cukup lama dan kapasitor telah terisi, kapasitor menjadi terpolarisasi secara berlawanan dengan arah baterai dan melawan arus, sehingga kapasitor dapat dianggap sebagai kawat terbuka seperti pada gambar 31 dan arus I lebih memilih melalui R_2 daripada melalui kapasitor, sehingga hukum Kirchoff sekarang menjadi:

$$E - IR_1 - IR_2 = 0$$

Pada umumnya, jika kapasitor berada dalam rangkaian dc dalam waktu yang cukup lama, maka kapasitor dapat dianggap sebagai kawat terbuka (tak terhubung).

6. Rangkaian Pengisian dan Pemakaian Kapasitor

Kapasitor dalam gambar 33 sedang diisi dari tegangan suplai (V_s) dengan arus yang melalui resistor (R). Tegangan kapasitor (V_c) pada awalnya nol selanjutnya meningkatkan sebagai fungsi tetapan waktu. Kapasitor terisi penuh saat $V_c = V_s$. Arus pengisian (I) ditentukan oleh tegangan di resistor ($V_s - V_c$). Pada pengisian saat ini, $I = (V_s - V_c) / R$ (catatan bahwa V_c meningkat selama pengisian). Pada saat awal $V_c = 0$ sehingga arus awal, $I_0 = V_s / R$.



Gambar 32. Rangkaian Pengisian Kapasitor

Peningkatan V_c tergantung pada muatan (Q) sesuai dengan rumus $V_c = Q / C$). Hal ini mengurangi tegangan resistor dan karenanya mengurangi arus pengisian. Ini berarti bahwa tingkat pengisian menjadi semakin lambat. Tetapan waktu pengisian ditentukan dengan rumus,

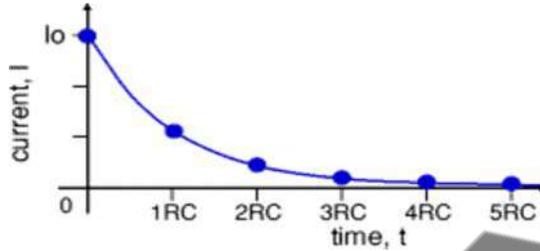
$$T = R C$$

Keterangan:

T = konstanta waktu dalam detik (s)

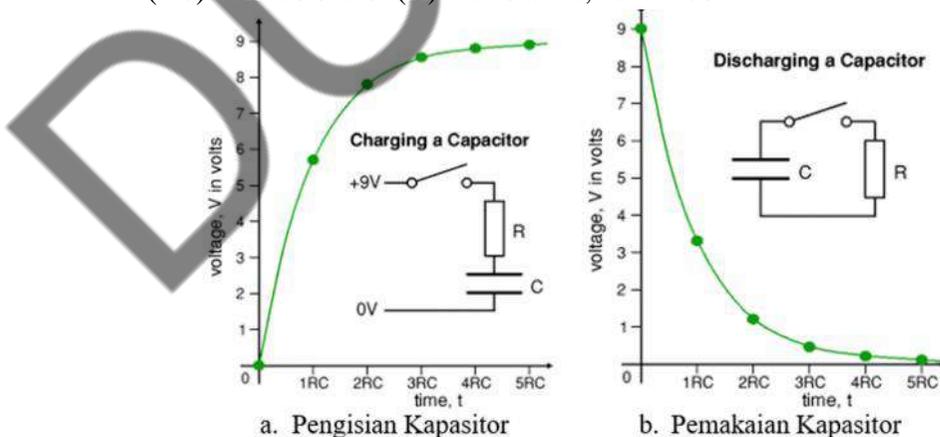
R = resistansi dalam ohm

C = kapasitansi dalam farad



Gambar 33. Grafik Arus Sebagai Fungsi Tetapan Waktu

Konstanta waktu adalah waktu yang diambil untuk pengisian (atau pemakaian) arus (I) berkurang menjadi $1/e$ dari nilai awalnya (I_0). Karena $e = 2,71828$ maka kita secara kasar dapat menyatakan bahwa konstanta waktu adalah waktu yang dibutuhkan untuk mencaapai arus $1/3$ dari nilai awalnya. Setiap waktu yang konstan arus berkurang $1/e$ (sekitar $1/3$). Setelah 5 konstanta waktu ($5RC$) arus saat ini telah menjadi kurang dari 1% dari nilai awal dan kita dapat menyatakan bahwa kapasitor terisi penuh, namun pada kenyataannya kapasitor mengambil arus selamanya untuk mengisi penuh. Pada pemakaian kapasitor arus menurun sebagai fungsi tetapan waktu seperti pada gambar 33. Arus awal (I_0) ditentukan oleh tegangan awal pada kapasitor (V_0) dan resistansi (R). Arus awal, $I_0 = V_0 / R$.



Gambar 34. Grafik Tegangan Sebagai Fungsi Tetapan Waktu.

Pada pengisian kapasitor, awalnya perubahan tegangan

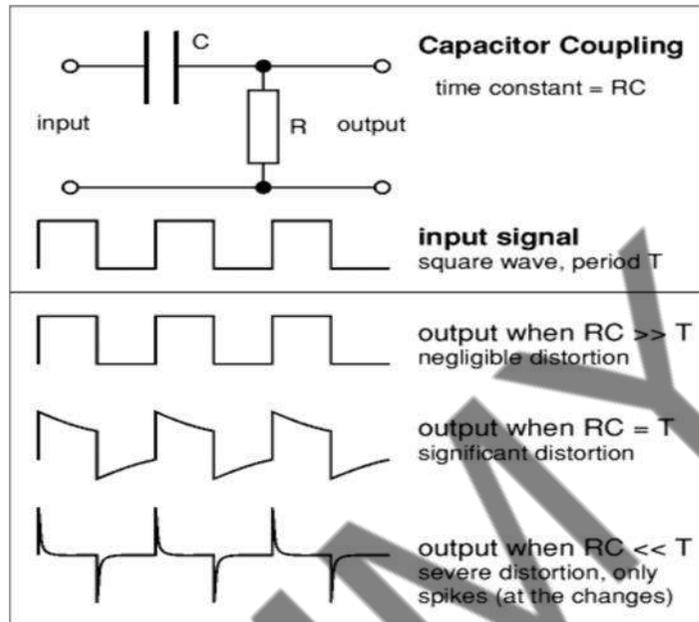
cepat karena arus besar, selanjutnya meningkat lebih lambat. Setelah 5 konstanta waktu ($5RC$) kapasitor hampir terisi penuh dengan tegangan yang hampir sama dengan tegangan sumber. Pada pemakaian kapasitor, awalnya arus besar karena tegangan yang besar, sehingga tegangan turun dengan cepat. Selanjutnya tegangan berkurang semakin lambat. Setelah $5RC$ tegangan kapasitor hampir nol dan kita dapat menyatakan bahwa kapasitor sepenuhnya habis.

7. Penggunaan Kapasitor

Kapasitor dapat digunakan untuk beberapa keperluan, misalnya untuk: (a) *Timing*, yaitu mengontrol pengisian dan pemakaian. (b) *Smoothing*, yaitu meratakan gelombang arus pada *power supply*. (c) *Coupling*, yaitu tahap sistem audio untuk menghubungkan *loudspeaker*. (d) Penyaringan dalam kontrol nada dari sebuah sistem audio. (e) *Tuning*, yaitu mencari gelombang pada radio. (f) Menyimpan energi pada lampu kilat kamera. (g) Memperbaiki faktor daya pada lampu TL. Selanjutnya dibahas penggunaan kapasitor untuk *coupling* dan perbaikan faktor daya lampu TL.

a. Kapasitor *Coupling*

Sifat arus bolak balik (AC) yang dapat melalui kapasitor dan arus searah (DC) tidak dapat melalui kapasitor, digunakan dalam rangkaian kapasitor *coupling*. Perilaku dari sebuah kapasitor *coupling* ditentukan oleh konstanta waktu (RC). Perhatikan bahwa resistansi (R) dapat berada di dalam bagian rangkaian berikutnya bukan sebuah resistor yang terpisah. Keberhasilan kapasitor *coupling* dalam sebuah sistem audio adalah sinyal audio tidak mengalami distorsi. Hal ini dapat dicapai jika konstanta waktu (RC) adalah lebih besar dari periode waktu (T) dari sinyal audio yang diperlukan oleh frekuensi terendah (biasanya 20 Hz, $T = 50$ ms).



Gambar 35. Kapasitor *Coupling*

Pada gambar 35 dapat dilihat ketika konstanta waktu jauh lebih besar daripada periode waktu ($RC \gg T$) dari sinyal input kapasitor sehingga sinyal dapat dihasilkan tanpa distorsi. Ketika konstanta waktu adalah sama dengan periode waktu kita dapat melihat bahwa kapasitor memiliki waktu untuk sebagian debit sebelum perubahan sinyal. Akibatnya ada distorsi signifikan dari sinyal saat melewati kapasitor *coupling*. Perhatikan bagaimana perubahan mendadak dari sinyal input langsung melalui kapasitor untuk sinyal output. Ketika konstanta waktu jauh lebih kecil daripada periode waktu kapasitor memiliki waktu untuk mengisi penuh atau melepaskan setelah setiap perubahan mendadak dalam sinyal input. Efektif hanya perubahan yang tiba-tiba melewati ke output dan mereka muncul sebagai puncak gelombang yang tajam bergantian positif dan negatif. Hal ini dapat berguna dalam suatu sistem yang harus mendeteksi ketika sinyal perubahan mendadak, tapi harus mengabaikan perubahan lambat.

b. Kapasitor untuk Memperbaiki Faktor Daya Listrik

Sebuah alat listrik induktif (misalnya motor listrik pompa air) diperoleh data sebagai berikut: Daya (P) = 600 Watt. Tegangan (V) = 220 Volt. Frekuensi (f) = 50 Hz. Arus (I) = 3,54 A. Kita mau menghitung nilai kapasitansi kapasitor yang harus dipasang pada motor listrik ini untuk memperoleh factor daya yang baik.

Langkah Penghitungan:

- 1) Menghitung daya semu (S)

$$S = V \times I$$

$$S = 3.54 \times 220$$

$$S = 778,8 \text{ Volt Ampere}$$

- 2) Menghitung faktor daya ($\cos \phi$) dan nilai ϕ

$$\cos \phi = \frac{\text{Daya Nyata}}{\text{Daya Semu}}$$

$$\cos \phi = \frac{P}{S}$$

$$\cos \phi = \frac{600}{778,8}$$

$$\cos \phi = 0,77$$

$$\phi = \cos^{-1} \times 0,77$$

$$\phi = 39,64$$

Dari perhitungan di atas daya listrik yang dikonsumsi unit lebih tinggi dari daya yang dikeluarkan oleh alat yang diakibatkan nilai faktor daya yang rendah, dengan kata lain alat tersebut memiliki efisiensi rendah. Untuk memperbaiki efisiensi alat dapat dilakukan dengan memperbaiki nilai $\cos \phi$ menjadi lebih baik. Pada kasus ini kita coba untuk memperbaiki nilai $\cos \phi$ menjadi 0,93

- 3) Melalui perhitungan berikut diperoleh nilai ϕ_2 , $\cos \phi_2$, dan I_2

$$\cos \phi_2 = 0,93$$

$$\phi_2 = \cos^{-1} \times 0,93$$

$$\phi_2 = 21,56$$

$$\cos\phi_2 = \frac{P_2}{S_2}$$

Atau

$$S_2 = \frac{P_2}{\cos\phi_2}$$

$$S_2 = \frac{600}{0,93}$$

$$S_2 = 645,16 \text{ Volt Ampere}$$

$$I_2 = \frac{S_2}{V}$$

$$I_2 = \frac{645,1}{220}$$

$$I_2 = 2,93 \text{ Ampere}$$

4) Untuk langkah berikutnya kita menghitung nilai arus yang mengalir pada kapasitor dengan menghitung arus reaktansi sebelum dan sesudah faktor daya diperbaiki.

a) Menghitung arus reaktif sebelum faktor daya diperbaiki (I_1) pada nilai $\cos\phi = 0,77$ dan setelah faktor daya diperbaiki (I_2) pada nilai $\cos\phi = 0,93$

$$I_{r1} = I_1 \times \sin\phi_1$$

$$I_{r1} = 3,54 \times \sin(39,64)$$

$$I_{r1} = 2,26 \text{ Ampere}$$

Sedangkan

$$I_{r2} = I_2 \times \sin\phi_2$$

$$I_{r2} = 2,93 \times \sin(21,56)$$

$$I_{r2} = 1,07 \text{ Ampere}$$

b) Menghitung nilai arus yang mengalir pada kapasitor. Mengingat kapasitor dipasang paralel terhadap beban yang faktor dayanya diperbaiki, maka arus yang mengalir pada kapasitor merupakan selisih dari nilai arus reaktif sebelum dan sesudah diperbaiki faktor dayanya.

$$I_c = I_{r1} - I_{r2}$$

$$I_c = 2,26 - 1,07$$

$$I_c = 1,19 \text{ Ampere}$$

- c) Langkah memperoleh nilai kapasitansi kapasitor yang akan digunakan untuk memperbaiki faktor daya dapat dilakukan dengan cara memperoleh nilai tahanan kapasitif terlebih dahulu.

$$X_c = \frac{V}{I_c}$$

$$X_c = \frac{220}{1,19}$$

$$X_c = 185\Omega$$

$$C = \frac{1}{2 f X_c}$$

d)
$$C = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 50 \times 185}$$

$$C = 17,21 \times 10^{-6} \text{ Farad}$$

$$C = 17,21 \mu\text{F}$$

Pertanyaan berikutnya adalah, jika faktor daya yang kita kehendaki ($\cos\phi_3$) bernilai 1, maka nilai kapasitansi kapasitornya adalah sebagai berikut.

$$\cos\phi_3 = 1$$

$$\phi_3 = \text{Cos}^{-1} \times 1$$

$$\phi_3 = 0$$

Karena nilai $\cos\phi_3 = 0$ dapat dipastikan bahwa nilai daya semu sama dengan daya nyatanya, atau dengan kata lain efisiensi alat menjadi 100%, sehingga nilai arus (I_3) arus reaktif (I_{r3}) dan tahanan kapasitif (X_c), serta nilai kapasitansi kapasitor (C) alat adalah,

$$I_3 = \frac{S_3}{V}$$

$$I_3 = \frac{600}{220}$$

$$I_3 = 2,7A$$

$$I_{r3} = I_3 \times S \phi_3$$

$$I_{r3} = 2,7 \times S (0)$$

$$I_{r3} = 0$$

$$I_{c2} = I_{r1} - I_{r3}$$

$$I_{c2} = 2,26 - 0$$

$$I_{c2} = 2,26A$$

$$X_{C_2} = \frac{V}{I_{C_2}}$$

$$X_{C_2} = \frac{220}{2,26}$$

$$X_{C_2} = 97,35\Omega$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi \cdot c_2}$$

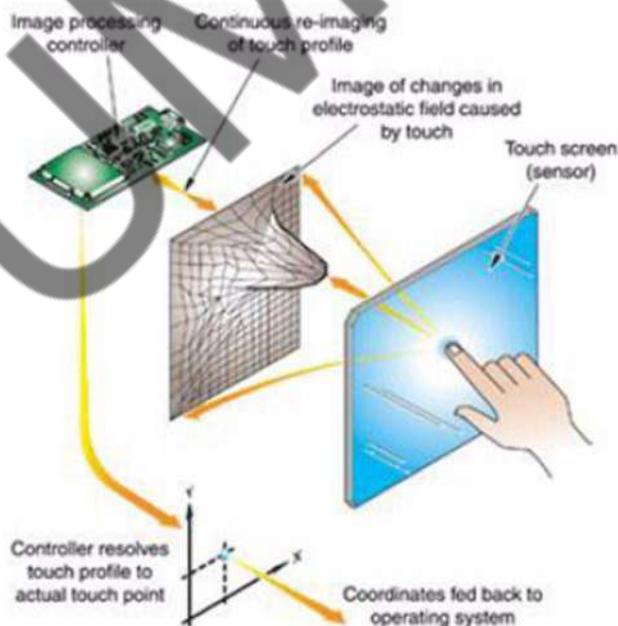
$$C_2 = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 50 \times 97,35}$$

$$C_2 = 32,70 \times 10^{-6}F$$

$$C_2 = 32,7 \mu$$

c. Kapasitor pada *touch screen*

Pada gambar 36 layar monitor bertindak sebagai dielektrik. Di bawahnya ada lapisan konduktor. Karena konduktivitas jari dan udara berbeda, ketika disentuh maka layar monitor *smartphone* akan mendeteksi adanya perubahan kapasitansi di area yang disentuh. Informasi ini yang akan diolah oleh prosesor.

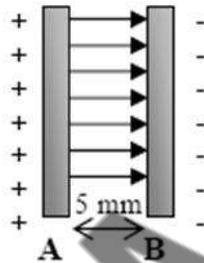


Basic principles of a capacitive touch screen.

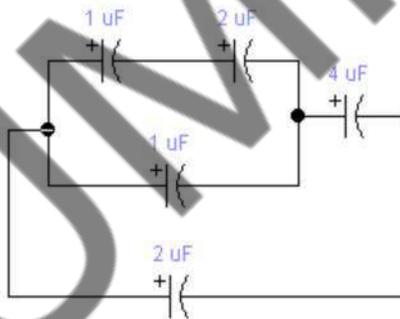
Gambar 36. Prinsip *Touch Screen*

F. Soal Latihan

1. Pada gambar di bawah beda potensial antar pelat adalah 40 V.
 - a. Manakah yang memiliki potensial lebih tinggi ?
 - b. Berapakah usaha yang diperlukan untuk membawa suatu muatan $+3C$ dari B ke A dan dari A ke B
 - c. Bila jarak antar pelat 5 mm, berapakah besarnya medan antar pelat ?

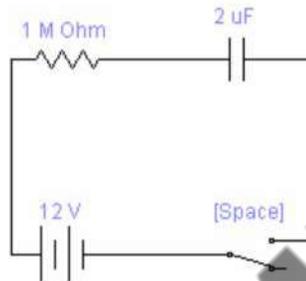


2. Hitung kapasitansi ekivalen dari rangkaian kapasitor di bawah ini.



3. Kapasitor keping terdiri dari dua keping sejajar, masing-masing luasnya 200 cm^2 , berjarak $0,4 \text{ cm}$ dalam udara.
 - a. Berapakah kapasitansinya ?
 - b. Jika kapasitor dihubungkan dengan sumber 500 V , berapakah muatan yang terhimpun di dalamnya
 - c. Berapa energi di dalamnya
 - d. Berapa medan listrik diantara pelat
4. Sebuah rangkaian RC dengan $R = 1 \text{ M}_\Omega$ dan $C = 2 \mu\text{F}$ seperti pada gambar di bawah. Jika saklar dihubungkan, hitunglah :
 - a. Arus awal (sebelum terjadi penurunan secara transien)

- b. Konstanta waktu
- c. Hitung arus setelah 2 detik kemudian
- d. Muatan yang terkumpul pada kapasitor saat kapasitor penuh



5. Sebuah baterai 10 volt digunakan untuk mengisi kapasitor dalam suatu rangkaian RC, dengan $C = 2\mu\text{F}$ dan $R = 100\text{ ohm}$, hitunglah:
 - a. Konstanta waktu dari rangkaian RC
 - b. Arus mula-mula
 - c. Besarnya muatan akhir yang terisi pada kapasitor

6. Suatu rangkaian seri terdiri dari baterai 12 volt, resistor 1 M_ dan sebuah kapasitor $4\mu\text{F}$ serta sebuah sakelar. Ketika sakelar ditutup, hitunglah:
 - a. Arus mula-mula
 - b. Konstanta waktu
 - c. Muatan dalam kapasitor saat $t =$
 - d. Muatan akhir kapasitor

BAB 2

GGL, ARUS LISTRIK, DAN TAHANAN KONDUKTOR

A. Pendahuluan

Dalam bab ini dibahas konsep gaya gerak listrik (ggl), arus listrik, resistivitas (hambat jenis), dan koefisien temperatur. Gaya gerak listrik disebut juga beda potensial atau tegangan antara kedua kutub sumber ggl dalam keadaan bebas dari rangkaian (rangkaiannya terbuka). Gaya gerak listrik dihasilkan oleh sumber ggl yaitu suatu alat yang mampu untuk mempertahankan beda potensial antara dua titik atau kutub (kutub positif dan kutub negatif). Arus listrik merupakan gerak semu dari gerak elektron bebas, dan mengalir dari tempat yang berpotensi tinggi ke tempat yang berpotensi rendah. Banyaknya muatan yang mengalir melalui suatu penampang tiap satuan waktu disebut kuat arus listrik. Resistivitas merupakan sifat atau karakteristik suatu bahan (misalnya konduktor). Resistivitas dipengaruhi oleh temperatur. Untuk konduktor, dalam batas-batas tertentu hubungan antara temperatur dan resistivitas adalah linear.

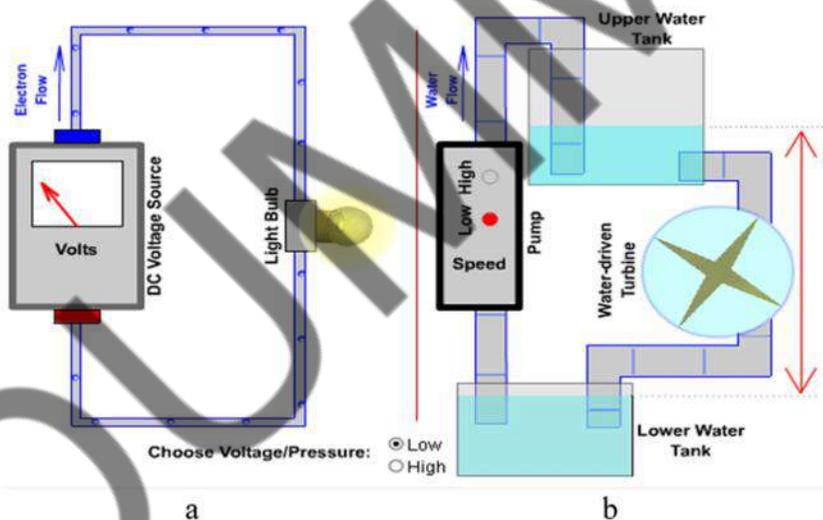
B. Gaya Gerak Listrik

Sejumlah elektron di dalam konduktor padat tidak terikat pada atom tetapi bergerak bebas dalam bahan seperti molekul-molekul gas dalam ruangan tertutup. Elektron yang bergerak bebas ini disebut elektron bebas. Dalam bahan isolator tiap elektron terikat erat pada masing-masing atom, sehingga bahan isolator tidak mempunyai elektron bebas. Apabila ada medan listrik dalam bahan konduktor padat maka elektron bebas akan bergerak di bawah pengaruh gaya medan listrik, sehingga dalam konduktor timbul arus listrik. Bahan konduktor tidak hanya bahan padat tetapi juga berupa bahan cair seperti elektrolit.

Gaya gerak listrik (ggl) disebut juga beda potensial atau tegangan antara kedua kutub sumber ggl dalam keadaan bebas dari rangkaian (rangkaiannya terbuka). GGL dihasilkan oleh sumber ggl

yaitu suatu alat yang mampu untuk mempertahankan beda potensial antara dua titik atau terminal. Sumber ggl misalnya elemen Volta, elemen Daniell, elemen Weston, elemen Leclanche, dan baterai, yang disebut sebagai elemen primer. Elemen primer adalah elemen elektrokimia yang bahan pereaksinya perlu penggantian setelah energi kimia berubah menjadi energi listrik. Elemen sekunder adalah elemen elektrokimia yang bahan pereaksinya dapat diperbarui dengan cara memberikan arus listrik dari sumber lain yang arahnya berlawanan dengan arah arus yang dihasilkan oleh elemen tersebut. Contoh elemen ini adalah akumulator (accu). Sumber-sumber ggl yang lain adalah generator listrik, termo elemen, elemen bahan bakar, dan sebagainya.

Untuk lebih mudah memahami konsep ggl, arus listrik, dan tahanan, perhatikan gambar 37.

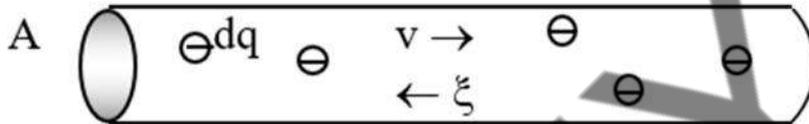


Gambar 37. (a) Rangkaian Listrik Sederhana, (b) Analogi Aliran Air Dalam Pipa

Gambar 37.a memperlihatkan rangkaian tertutup yang terdiri atas sumber ggl dan lampu pijar yang memiliki tahanan R . Dari kutub positif sumber ggl mengalir arus listrik menuju lampu dan kembali ke kutub negatif sumber ggl. Demikian seterusnya selama ada ggl yang dihasilkan oleh sumbernya. Gambar 37.b memperlihatkan analogi dari gambar 37.a. Pompa menaikkan air

dari tangki bawah ke tangki atas. Perbedaan ketinggian air di tangki atas dan bawah analog dengan sumber ggl. Dari tangki atas air masuk ke turbin dan memutar turbin. Aliran air ini analog dengan arus listrik. Turbin analog dengan lampu.

C. Arus Listrik dalam Konduktor



Gambar 38. Konduktor Logam Berarus Listrik

Gambar 38 melukiskan kawat logam dengan medan listrik ξ di dalamnya. Di dalam logam mengalir elektron bebas yang bermuatan negatif. Arus listrik merupakan gerak semu dari gerak elektron bebas, dan mengalir dari tempat yang berpotensi tinggi ke tempat yang berpotensi rendah. Muatan positif dq melalui penampang A, arah gerak dq menyatakan arah arus dalam kawat. Muatan dq membutuhkan waktu dt untuk melalui penampang A. Banyaknya muatan yang mengalir melalui suatu penampang tiap satuan waktu disebut arus listrik dan dinyatakan dengan,

$$i = dq/dt$$

Bila jumlah pembawa muatan tiap satuan volume adalah n dan muatannya e , maka rapat muatan bebas dalam logam adalah $\rho = n e$. Misalkan kecepatan rata-rata pembawa muatan adalah v , maka dalam waktu dt muatan akan bergerak sejauh $v dt$. Volume yang dilalui oleh pembawa muatan dalam waktu dt adalah $dV = A v dt$.

Diperoleh muatan $dq = \rho dV = n e A v dt$, sedangkan $i = dq/dt = n e A v$.

$n e v$ disebut rapat arus (j), sehingga diperoleh,

$$j = i/A$$

Arus i merupakan sebuah kuantitas makroskopis, seperti massa, volume, atau panjang. Sebuah kuantitas mikroskopis yang berhubungan dengan arus adalah rapat arus. Rapat arus adalah

sebuah vektor yang merupakan ciri sebuah titik dalam konduktor, bukan ciri konduktor secara keseluruhan.

D. Resistivitas dan Konduktivitas

Dalam banyak pemakaian arus listrik mempunyai harga konstan, berarti rapat arus juga konstan. Kecepatan rata-rata pembawa muatan juga konstan, walaupun muatan mengalami gaya $q\xi$. Dalam logam, kecepatan elektron bebas dihalangi oleh peristiwa tumbukan dengan atom logam, sehingga tercapai kecepatan rata-rata yang konstan. Kecepatan rata-rata ini berkaitan dengan mobilitas elektron (μ_e) dalam logam dan dinyatakan dengan,

$$v = -\mu_e \xi \text{ sehingga rapat arus } j = \rho_e v = -\rho_e \mu_e \xi$$

- $\rho_e \mu_e$ disebut konduktivitas (σ), ρ_e menyatakan rapat muatan bebas.

Konduktivitas dinyatakan dalam satuan mho/meter (Ω^{-1}/m). Suatu bahan dengan konduktivitas yang besar akan mengalirkan arus yang besar pula untuk suatu harga kuat medan listrik ξ , bahan seperti ini disebut konduktor yang baik.

Bila dalam rangkaian tertutup ada sumber ggl dengan tegangan E , muatan listrik q mendapat tambahan energi sebesar qE , sehingga usaha yang dilakukan oleh medan listrik untuk menggerakkan muatan q dalam rangkaian tersebut adalah

$$W = qE = \int q \xi \cdot dl \quad \text{atau} \quad E = \int \xi \cdot dl$$

dl adalah elemen panjang kawat, ξ adalah medan listrik.

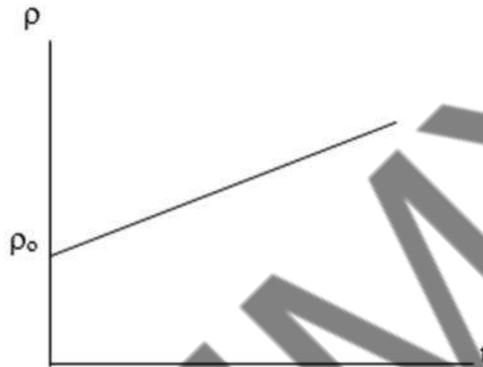
Untuk kawat logam yang panjangnya l persamaan di atas menjadi $E = \xi l$. Rapat muatan bebas $j = -\rho_e \mu_e \xi = \sigma \xi = \sigma E / l$ sehingga arus $i = jA = \sigma E A / l$ atau $E / i = l / (\sigma A)$, karena E / i adalah tahanan konduktor (R) maka

$$R = l / (\sigma A) \quad \text{atau} \quad R = \rho l / A$$

$\rho = 1/\sigma$ disebut resistivitas atau tahanan jenis. Resistivitas

merupakan karakteristik suatu bahan dan didefinisikan sebagai perbandingan antara intensitas listrik dengan arus listrik per satuan luas penampang.

E. Pengaruh Temperatur pada Resistivitas



Gambar 39. Resistivitas Sebagai Fungsi Temperatur Pada Suatu Konduktor

Resistivitas dipengaruhi oleh temperatur (t). Untuk batas-batas tertentu, kenaikan temperatur mengakibatkan kenaikan resistivitas secara linear seperti pada gambar 39. Kurva ini dapat dinyatakan dengan persamaan,

$$\rho = \rho_0 + at + bt^2 + \dots$$

ρ_0 adalah resistivitas pada temperatur 0°C , a , b , dan seterusnya menyatakan konstanta-konstanta karakteristik bahan. Untuk temperatur yang tidak terlalu besar, suku t^2 dan t dengan pangkat yang lebih tinggi dapat diabaikan, sehingga persamaan di atas menjadi,

$$\rho = \rho_0 + at$$

$$\text{atau } \rho = \rho_0 + \rho_0 \frac{at}{\rho_0}$$

$$\text{atau } \rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

dengan $\alpha = a / \rho_0$ yang disebut koefisien temperatur, harganya tergantung pada jenis bahan. Koefisien temperatur suatu bahan

didefinisikan sebagai kenaikan tahanan per ohm tahanan semula per derajat Celcius kenaikan temperatur. Karena tahanan konduktor sebanding dengan resistivitasnya maka diperoleh,

$$R = R_0 (1 + \alpha t)$$

R_0 adalah tahanan pada temperatur 0°C , R adalah tahanan pada temperatur $t^\circ\text{C}$, dan t adalah kenaikan temperatur dari 0°C sampai $t^\circ\text{C}$.

Koefisien temperatur ternyata juga dipengaruhi oleh temperatur, sehingga koefisien temperatur dapat berubah. Hubungan antara koefisien temperatur dengan temperatur dapat dijelaskan sebagai berikut. Jika pengukuran tahanan dilakukan pada temperatur 0°C maka tahanannya disebut R_0 dan koefisien temperaturnya adalah α_0 , dinyatakan sebagai dasar perhitungan tahanan pada temperatur $t^\circ\text{C}$, maka berlaku

$$R = R_0 (1 + \alpha_0 t) \dots\dots\dots (1)$$

Selanjutnya bila pengukuran tahanan dilakukan pada temperatur $t^\circ\text{C}$ maka tahanannya disebut R dan koefisien temperaturnya adalah α_t . R dan t dijadikan sebagai dasar perhitungan tahanan pada temperatur 0°C maka persamaannya menjadi

$$R_0 = R (1 - \alpha_t t) \dots\dots\dots(2)$$

Dalam persamaan ini digunakan tanda negatif karena tahanan yang dihitung (R_0) lebih kecil daripada tahanan dasar (R) atau temperatur 0°C lebih rendah daripada $t^\circ\text{C}$. Dengan cara eliminasi atau substitusi kedua persamaan di atas (persamaan 1 dan persamaan 2) diperoleh

$$\alpha_t = \alpha_0 / (1 + \alpha_0 t)$$

Keterangan: α_t adalah koefisien temperatur pada temperatur $t^\circ\text{C}$
 α_0 adalah koefisien temperatur pada temperatur 0°C

Contoh 1

Sebuah kumparan kawat nikel dengan diameter 5 cm, jumlah lilitan 100 dan tahanan jenis kawat nikel $7,8 \times 10^{-8}$ ohm.meter pada temperatur 20°C . Koefisien temperatur nikel $54 \times 10^{-4} / ^{\circ}\text{C}$ pada temperatur 20°C , diameter kawat 1 mm. Hitunglah tahanan kumparan itu pada temperatur 80°C .

Solusi

Panjang kawat nikel adalah

$$l = 100 \times 2 \pi R = 100 \times 2 \pi \times 0,025 = 5 \pi \text{ m}$$

Luas penampang kawat adalah

$$A = \pi R^2 = \pi (0,5 \times 10^{-3})^2 = 0,25 \pi \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Tahanan kumparan pada temperatur 20°C adalah

$$R = \rho l / A = 7,8 \times 10^{-8} \times (5 \pi) / (0,25 \pi \times 10^{-6}) = 156 \times 10^{-2} \text{ ohm}$$

Tahanan kumparan pada temperatur 80°C adalah

$$\begin{aligned} R_{80} &= R_{20} (1 + \alpha_{20} \Delta t) \\ &= 156 \times 10^{-2} \{1 + 54 \times 10^{-4} (80 - 20)\} \\ &= 156 \times 10^{-2} \{1 + 54 \times 10^{-4} (60)\} \\ &= 156 \times 10^{-2} (1 + 32,4 \times 10^{-2}) \\ &= 2,07 \text{ ohm} \end{aligned}$$

Contoh 2

Sebuah kumparan kawat mempunyai tahanan 3,146 ohm pada temperatur 40°C sedangkan pada temperatur 100°C tahanannya 3,767 ohm. Hitunglah tahanan kawat itu pada temperatur 0°C .

Solusi

Terlebih dahulu ditentukan koefisien temperatur dengan rumus berikut.

$$\begin{aligned} R_{100} &= R_{40} (1 + \alpha_{40} \Delta t) \\ 3,767 &= 3,146 \{1 + \alpha_{40} (100 - 40)\} \end{aligned}$$

$$3,767 = 3,146 + 3,146 \times 60 \alpha_{40}$$

$$\alpha_{40} = 0,00328 / ^\circ\text{C}$$

$$\alpha_{40} = \alpha_0 / (1 + 40 \alpha_0)$$

$$0,00328 = \alpha_0 / (1 + 40 \alpha_0)$$

$$0,00328 + 0,1312 \alpha_0 = \alpha_0$$

$$\alpha_0 = 0,00377 / ^\circ\text{C}$$

Tahanan kumparan pada temperatur 0°C adalah

$$R_{40} = R_0 (1 + \alpha_0 \Delta t)$$

$$3,146 = R_0 \{1 + 0,00377 (40 - 0)\}$$

$$R_0 = 2,73 \text{ ohm}$$

F. Soal Latihan

1. Sepotong kawat yang panjangnya 100 m, diameter 2 mm, dan tahanan jenis $4,8 \times 10^{-8}$ ohm.m.
 - a. Berapa besar tahanan kawat tersebut?
 - b. Kawat lain yang sejenis dan berukuran sama tetapi diameternya dua kali semula. Berapa tahanannya?
2. Sepotong kawat aluminium panjangnya 2,5 m dan luas penampang 5 cm^2 , tahanan jenisnya $2,63 \times 10^{-8}$ ohm.m.
 - a. Berapa tahanan kawat aluminium itu?
 - b. Berapa panjang suatu kawat besi (tahanan jenisnya 10^{-8} ohm.m) yang diameternya 15 mm dan mempunyai tahanan yang sama dengan tahanan kawat aluminium di atas?
3. Berapa tahanan sebatang karbon pada temperatur 30°C , jika pada temperatur 0°C mempunyai tahanan 0,015 ohm? ($\alpha = -0,0005/^\circ\text{C}$)
4. Kawat tembaga mempunyai tahanan sebesar 200 ohm pada temperatur 20°C . Berapakah tahanannya pada temperatur 50°C ?

BAB 3 RANGKAIAN TAHANAN

A. Pendahuluan

Dalam bab ini dibahas beberapa macam bentuk rangkaian yang hanya mengandung komponen resistor (tahanan atau hambatan). Beberapa buah resistor dapat dihubungkan dengan cara tertentu. Rangkaian seperti ini dikatakan membentuk suatu jaringan atau rangkaian tahanan. Banyak macam rangkaian tahanan yang kita temukan, misalnya rangkaian tahanan seri, rangkaian tahanan paralel, dan rangkaian tahanan campuran seri dan paralel (kombinasi seri paralel).

Dalam menyelesaikan suatu rangkaian tahanan yang komplis, kadang-kadang mengalami kesulitan bila hanya menggunakan prinsip rangkaian tahanan seri dan paralel. Kesulitan ini ditemui bila dalam suatu rangkaian tahanan terdapat beberapa tahanan yang merupakan hubungan segitiga atau hubungan bintang, sehingga rangkaian tidak dapat direduksi menjadi lebih sederhana. Jalan keluar untuk mengatasi kesulitan ini dapat dilakukan dengan mentransformasikan rangkaian tersebut ke dalam rangkaian bintang atau rangkaian segitiga.

B. Rangkaian Seri



Gambar 40. Tiga Resistor Dihubungkan Secara Seri

Tahanan R_1 , R_2 , dan R_3 dihubungkan secara seri. Tiap muatan listrik yang sampai di R_1 akan melalui R_2 dan seterusnya melalui R_3 sehingga arus yang melalui setiap tahanan adalah sama yaitu I . Ketiga tahanan ini dapat diganti dengan sebuah tahanan tunggal yang disebut tahanan ekivalen atau tahanan pengganti. Tahanan ekivalen ini jika digunakan untuk mengganti kombinasi seri diantara terminal a dan b , tidak akan mengubah arus dalam rangkaian tersebut.

Dengan menggunakan hukum Ohm dapat diperoleh nilai tahanan ekivalen. Pada gambar di atas, tegangan antara a dan b disebut V , tegangan pada tahanan R_1 disebut V_1 , tegangan pada tahanan R_2 disebut V_2 , dan tegangan pada tahanan R_3 disebut V_3 , sehingga diperoleh persamaan,

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

$$V = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

Jika ketiga tahanan di atas diganti dengan sebuah tahanan ekivalen (R_s) maka,

$$V = IR_s$$

$$\text{Jadi } R_s = R_1 + R_2 + R_3$$

Apabila ada n buah tahanan yang dihubungkan seri maka diperoleh,

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

$$\text{atau } R_s = \Sigma R$$

Nilai tahanan pengganti (ekivalen) untuk rangkaian seri sama dengan jumlah semua nilai tahanan yang ada dalam rangkaian seri itu. Dapat disimpulkan bahwa pada rangkaian seri, nilai tahanan pengganti lebih besar daripada nilai masing-masing tahanan.

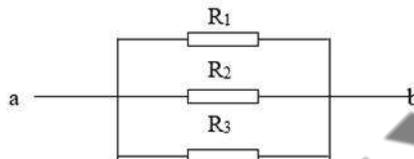
Contoh penerapan rangkaian seri dalam kehidupan sehari-hari dapat dilihat pada gambar 41.



Gambar 41. (a) Lampu Cermin Rian, (b) dan (c) Lampu LED Strip

Gambar 3.2. (a) Lampu cermin rias, (b) dan (c) Lampu LED strip

C. Rangkaian Paralel



Gambar 42. Tiga Resistor Dihubungkan Secara Paralel

Tahanan R_1 , R_2 , dan R_3 dihubungkan secara paralel. Bila rangkaian ini dihubungkan dengan sumber tegangan maka tiap tahanan mempunyai tegangan yang sama yaitu V . Sedangkan arus yang melalui masing-masing tahanan tergantung pada nilai tahanannya. Ketiga tahanan ini dapat diganti dengan sebuah tahanan tunggal yang disebut tahanan ekivalen atau tahanan pengganti. Tahanan ekivalen ini jika digunakan untuk mengganti kombinasi paralel diantara terminal a dan b, tidak akan mengubah arus total dalam rangkaian tersebut. Menurut hukum arus Kirchhoff

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

I adalah arus total, I_1 adalah arus yang melalui R_1 , I_2 adalah arus yang melalui R_2 dan I_3 adalah arus yang melalui R_3 . Dengan menggunakan hukum Ohm diperoleh persamaan,

$$\begin{aligned} I &= V/R_1 + V/R_2 + V/R_3 \\ &= V (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3) \end{aligned}$$

Jika tahanan ekivalen tersebut (R_p) digunakan sebagai pengganti ketiga tahanan di atas maka,

$$I = V (1/R_p)$$

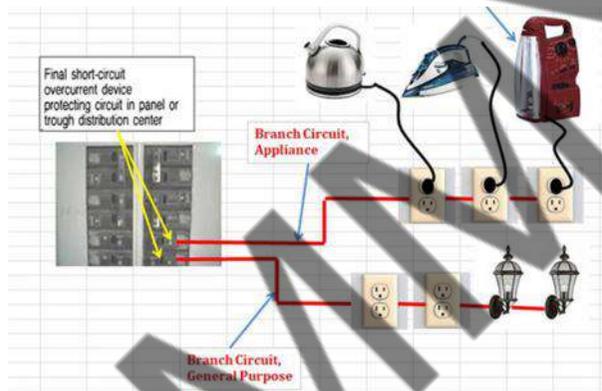
$$\text{Jadi } 1/R_p = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$$

Jika ada n buah tahanan yang dihubungkan paralel maka diperoleh,

$$1/R_p = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots + 1/R_n \quad \text{atau} \quad 1/R_p = \Sigma (1/R)$$

Dapat disimpulkan bahwa kebalikan nilai tahanan pengganti (ekivalen) untuk rangkaian paralel sama dengan jumlah kebalikan dari semua nilai tahanan yang ada dalam rangkaian paralel itu. Nilai tahanan pengganti pada rangkaian paralel lebih kecil daripada nilai masing-masing tahanan.

Contoh penerapan rangkaian paralel dalam kehidupan sehari-hari dapat dilihat pada gambar 43.



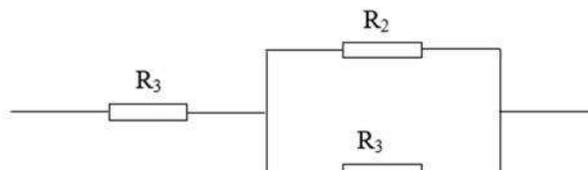
Gambar 43. Rangkaian Paralel Dalam Kehidupan Sehari-Hari

<https://skemaku.com/contoh-penerapan-rangkaian-listrik-paralel-dalam-kehidupan-sehari-hari/>

D. Rangkaian Campuran Seri dan Paralel

Nilai tahanan ekivalen pada rangkaian campuran seri dan paralel ditentukan berdasarkan bentuk rangkaian seri dan bentuk rangkaian paralel.

Contoh 1



Gambar 44. Gambar Untuk Contoh 1

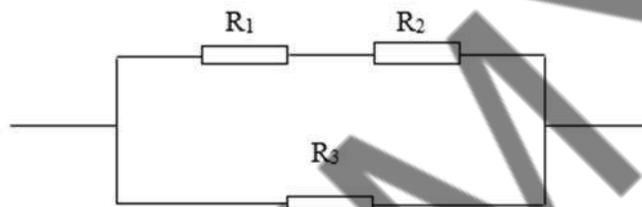
Tahanan R_1 , R_2 , dan R_3 dihubungkan secara campuran seri dan paralel. Tahanan R_2 dan R_3 adalah paralel, maka

$$1/R_p = 1/R_2 + 1/R_3$$

R_1 dan R_p adalah seri maka tahanan pengganti untuk semua tahanan dalam rangkaian ini adalah

$$R_t = R_1 + R_p$$

Contoh 2



Gambar 45. Gambar Untuk Contoh 2

Tahanan R_1 , R_2 , dan R_3 dihubungkan secara campuran seri dan paralel. Tahanan R_1 dan R_2 adalah seri, maka

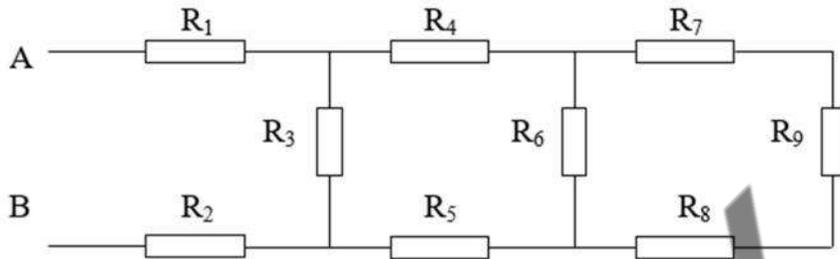
$$R_s = R_1 + R_2$$

R_s dan R_3 adalah paralel maka tahanan pengganti untuk semua tahanan dalam rangkaian ini adalah

$$1/R_t = 1/R_s + 1/R_3$$

Masih banyak lagi contoh dari rangkaian campuran seri dan paralel ini, yang terdiri dari sekian banyak tahanan. Walaupun bentuk rangkaian campuran ini banyak macamnya, namun cara penentuan nilai totalnya tidaklah sulit, bila prinsip rangkaian seri dan rangkaian paralel telah dipahami. Karena penyelesaian nilai tahanan total untuk rangkaian campuran ini dikembalikan pada bentuk rangkaian seri dan rangkaian paralel secara bertahap.

Contoh 3



Gambar 46. Gambar Untuk Contoh 3

Suatu rangkaian seperti pada gambar 3.7, diketahui tahanan $R_1 = 12$ ohm, $R_2 = 9$ ohm, $R_3 = 6$ ohm, $R_4 = 4$ ohm, $R_5 = 2$ ohm, $R_6 = 9$ ohm, $R_7 = 10$ ohm, $R_8 = 3$ ohm, dan $R_9 = 5$ ohm. Hitunglah nilai tahanan R_{AB} .

Solusi:

Pada gambar dapat dilihat bahwa tahanan R_7 , R_8 dan R_9 dihubungkan secara seri.

$$R_{s1} = R_7 + R_8 + R_9 = 10 + 3 + 5 = 18 \text{ ohm}$$

Tahanan R_{s1} dan R_6 dihubungkan paralel

$$1/R_{p1} = 1/R_{s1} + 1/R_6 = 27/162 \text{ ohm atau } R_{p1} = 6 \text{ ohm}$$

Tahanan R_4 , R_{p1} , dan R_5 dihubungkan seri

$$R_{s2} = R_4 + R_{p1} + R_5 = 12 \text{ ohm}$$

Tahanan R_{s2} dan R_3 dihubungkan paralel

$$1/R_{p2} = 1/R_{s2} + 1/R_3 = 18/72 \text{ ohm atau } R_{p2} = 4 \text{ ohm}$$

Tahanan R_1 , R_{p2} , dan R_2 dihubungkan seri

$$R_{s3} = R_1 + R_{p2} + R_2 = 25 \text{ ohm}$$

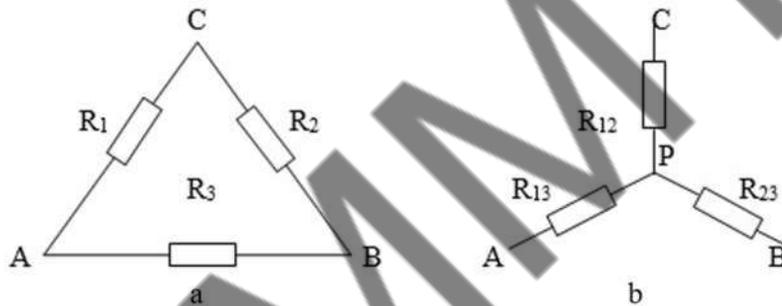
Jadi nilai tahanan total $R_{AB} = 25$ ohm

E. Rangkaian Segitiga dan Rangkaian Bintang

Dalam menyelesaikan suatu rangkaian tahanan yang

kompleks, kadang-kadang kita mengalami kesulitan bila hanya menggunakan prinsip rangkaian tahanan seri dan paralel. Kesulitan ini ditemui bila dalam suatu rangkaian tahanan terdapat beberapa tahanan yang merupakan hubungan segitiga atau hubungan bintang, sehingga rangkaian tidak dapat direduksi menjadi lebih sederhana. Jalan keluar untuk mengatasi kesulitan ini dapat dilakukan dengan mentransformasikan rangkaian tersebut ke dalam rangkaian bintang atau rangkaian segitiga atau sebaliknya.

1. Transformasi Rangkaian Segitiga ke Rangkaian Bintang



Gambar 47. (a) Tiga Resistor Dalam Rangkaian Segitiga, (b) Tiga Resistor Dalam Rangkaian Bintang

Pada gambar 47.a. dapat dilihat bahwa tahanan R_1 , R_2 , dan R_3 merupakan rangkaian segitiga. Sedangkan pada gambar 47.b. terdapat tahanan R_{12} , R_{13} , dan R_{23} yang merupakan rangkaian bintang. Rangkaian segitiga ini dapat ditransformasikan (diubah) menjadi rangkaian bintang. Caranya adalah: tentukan sembarang titik P di dalam segitiga ABC tersebut, tetapkan tahanan-tahanan pada rangkaian ini. Misalkan pada PA terdapat tahanan R_{13} , pada PB terdapat tahanan R_{23} , dan pada PC terdapat tahanan R_{12} . Dalam hal ini rangkaian tahanan R_{12} , R_{13} , R_{23} yang berhubungan dengan titik P berbentuk rangkaian bintang.

Kedua rangkaian tahanan ini dikatakan ekuivalen jika dilakukan pengukuran tahanan pada dua titik yang sama akan menghasilkan nilai yang sama pula untuk kedua rangkaian tersebut. Misalnya dilakukan pengukuran di titik A dan B pada rangkaian segitiga akan diperoleh nilai yang sama bila

dilakukan pengukuran di titik A dan B pada rangkaian bintang. Keadaan ini dapat terjadi bila nilai-nilai tahanan pada rangkaian bintang diperoleh dari nilai-nilai tahanan pada rangkaian segitiga.

Pada rangkaian segitiga dapat ditentukan nilai tahanan antara titik A dan B dengan menggunakan prinsip rangkaian seri dan parallel sehingga diperoleh,

$$R_{AB} = \frac{R_3(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Sedangkan tahanan antara A dan B pada rangkaian bintang adalah

$$R_{AB} = R_{13} + R_{23}$$

karena R_{12} tidak berfungsi bila pengukuran dilakukan pada titik A dan B. Dengan demikian dari kedua persamaan di atas diperoleh

$$R_{13} + R_{23} = \frac{R_3(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3} \dots\dots\dots (1)$$

Denga cara yang sama dapat pula diperoleh persamaan (2) untuk pengukuran pada titik B dan C, selanjutnya persamaan (3) diperoleh pada titik A dan C .

$$R_{12} + R_{23} = \frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} \dots\dots\dots (2)$$

$$R_{12} + R_{13} = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} \dots\dots\dots (3)$$

Dengan cara mensubstitusikan persamaan (1), (2), dan (3), yaitu dengan mengurangkan dua persamaan dan hasilnya dijumlahkan dengan persamaan yang ketiga, diperoleh:

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_{13} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Ada cara yang mudah untuk mengingat ketiga rumus ini yaitu tahanan pada titik tertentu dalam rangkaian bintang dapat diperoleh dari hasil kali dua tahanan pada rangkaian segitiga pada titik yang sama dan dibagi dengan jumlah dari ketiga

tahanan dalam rangkaian segitiga.

2. Transformasi Rangkaian Bintang ke Rangkaian Segitiga

Tinjau kembali gambar 47, misalkan kita ingin mentransformasikan rangkaian bintang (gambar 47.b.) ke rangkaian segitiga (gambar 47.a.). Nilai-nilai tahanan dalam rangkaian segitiga dapat diperoleh dari nilai-nilai tahanan dalam rangkaian bintang. Adapun nilai-nilai tahanan dalam rangkaian segitiga dapat diperoleh dengan cara menggunakan persamaan (1), (2), dan (3) yang terdapat pada transformasi rangkaian segitiga ke rangkaian bintang. Caranya adalah dengan mengalikan persamaan (1) dan (2), persamaan (2) dan (3), persamaan (1) dan (3). Hasil yang diperoleh dari perkalian persamaan ini (sebanyak tiga persamaan yang baru) disubstitusikan satu sama lainnya dan desederhanakan sehingga diperoleh:

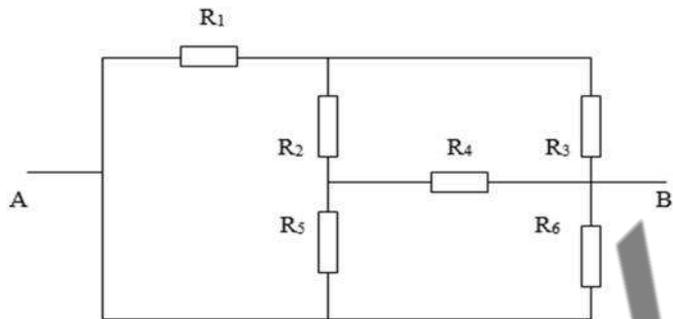
$$R_1 = R_{12} + R_{13} + \frac{R_{12} R_{13}}{R_{23}}$$

$$R_2 = R_{12} + R_{23} + \frac{R_{12} R_{23}}{R_{13}}$$

$$R_3 = R_{13} + R_{23} + \frac{R_{13} R_{23}}{R_{12}}$$

Ada cara yang mudah untuk mengingat ketiga rumus ini yaitu tahanan pada masing-masing sisi dalam rangkaian segitiga dapat diperoleh dari penjumlahan dua tahanan pada titik yang sama ditambah dengan hasil kali kedua tahanan itu sendiri setelah dibagi dengan tahanan ketiga dalam rangkaian bintang.

Contoh 4

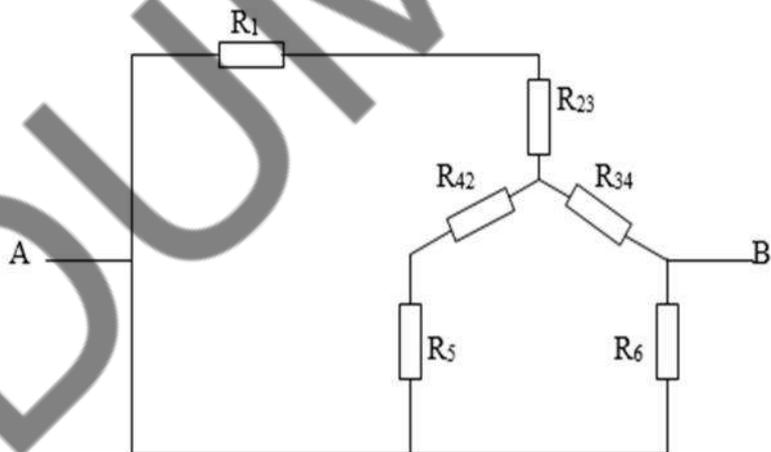


Gambar 48. Gambar Untuk Contoh 4

Diketahui nilai-nilai $R_1 = 6,75$ ohm, $R_2 = 2$ ohm, $R_3 = 6$ ohm, $R_4 = 8$ ohm, $R_5 = 4$ ohm, $R_6 = 9$ ohm. Tentukan nilai tahanan antara A dan B pada rangkaian di atas.

Solusi

Tahanan R_2 , R_3 , dan R_4 adalah rangkaian bintang. Rangkaian ini ditransformasikan ke rangkaian bintang sehingga rangkaian pada gambar 48 dapat diubah menjadi rangkaian seperti pada gambar 49.



Gambar 49. Perubahan Bentuk Rangkaian Gambar 48.

Dengan menggunakan rumus transformasi rangkaian segitiga ke rangkaian bintang diperoleh,

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{2 \times 6}{2 + 6 + 8} = 0,75 \text{ ohm}$$

$$R_{34} = \frac{R_3 R_4}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{6 \times 8}{2 + 6 + 8} = 3 \text{ ohm}$$

$$R_{42} = \frac{R_4 R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{8 \times 2}{2 + 6 + 8} = 1 \text{ ohm}$$

Tahanan R_1 dan R_{23} adalah seri:

$$R_{s1} = R_1 + R_{23} = 7,5 \text{ ohm}$$

Tahanan R_{42} dan R_5 adalah seri:

$$R_{s2} = R_{42} + R_5 = 5 \text{ ohm}$$

Tahanan R_{s1} dan R_{s2} adalah paralel

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_{s1}} + \frac{1}{R_{s2}} = \frac{1}{3} \text{ ohm}$$

atau $R_p = 3 \text{ ohm}$

Tahanan R_p dan R_{34} adalah seri:

$$R_{s3} = R_p + R_{34} = 6 \text{ ohm}$$

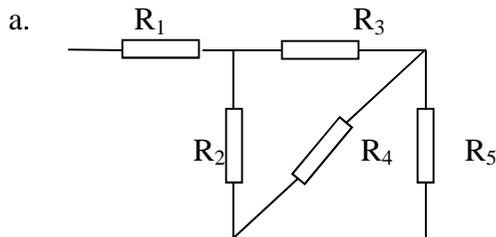
Tahanan R_{s3} dan R_6 adalah paralel

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_{s3}} + \frac{1}{R_6} = \frac{15}{54} \text{ ohm}$$

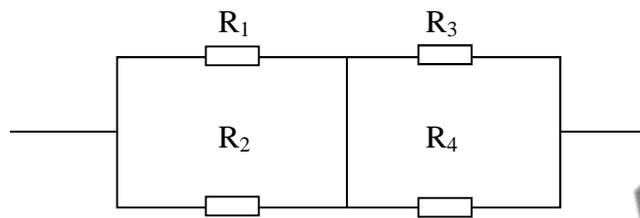
atau $R_{AB} = 3,6 \text{ ohm}$

F. Soal Latihan

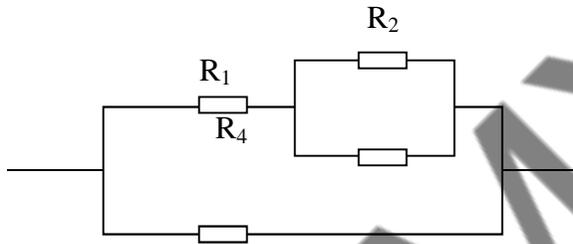
1. Kita ingin menghubungkan tahanan 1000 ohm pada tegangan 200 volt. Kita mempunyai beberapa buah tahanan 1000 ohm dengan daya maksimum 10 watt. Bagaimana cara menghubungkan tahanan ini?
2. Bagaimana bentuk rangkaian untuk memperoleh nilai tahanan ekuivalen yang lebih kecil daripada nilai tahanan dalam rangkaian tersebut?
3. Bagaimana bentuk rangkaian untuk memperoleh nilai tahanan ekuivalen yang lebih besar daripada nilai tahanan dalam rangkaian tersebut?
4. Tentukan nilai tahanan total untuk rangkaian di bawah ini, bila diketahui nilai tahanan masing-masing adalah sama yaitu 100 ohm.



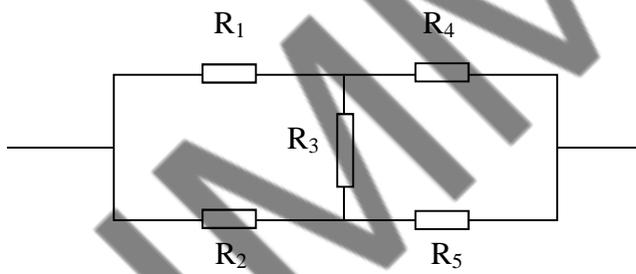
b.



c.



d.



BAB 4

HUKUM DASAR RANGKAIAN

A. Pendahuluan

Dalam banyak pemakaian, kita jumpai sumber tegangan dan beberapa resistor yang dihubungkan dengan cara tertentu. Rangkaian seperti ini dikatakan membentuk suatu rangkaian listrik. Banyak macam rangkaian listrik yang kita temukan. Untuk membahas rangkaian listrik ini kita perlu memahami hukum dasar rangkaian, yaitu; hukum Ohm, hukum Arus Kirchhoff (KCL), dan hukum Tegangan Kirchhoff (KVL). Pernyataan hukum Ohm adalah perbandingan beda potensial antara dua titik pada sebuah konduktor dengan arus yang melalui konduktor tersebut merupakan bilangan konstan jika temperatur tidak berubah. Bilangan konstan ini maksudnya adalah tahanan konduktor.

Bila beberapa tahanan yang tidak tersusun dalam kelompok rangkaian seri, paralel, atau campuran seri paralel pada umumnya tidak dapat dianalisis dengan hanya menggunakan hukum Ohm. Untuk menganalisis rangkaian tersebut secara sistematis dapat digunakan hukum Arus Kirchhoff dan hukum Tegangan Kirchhoff. Hukum Arus Kirchhoff menyatakan bahwa jumlah aljabar semua arus yang memasuki sebuah simpul (titik cabang) adalah nol. Hukum Tegangan Kirchhoff menyatakan bahwa jumlah aljabar ggl dalam sebuah loop dalam rangkaian sama dengan jumlah aljabar hasil kali arus dan tahanan.

B. Hukum Ohm

Pada bab II telah diuraikan bahwa untuk mendapatkan arus dalam suatu konduktor harus ada medan listrik dalam konduktor itu. Arus I dalam konduktor tergantung pada medan listrik ξ dalam konduktor itu. Dalam logam murni arus sebanding dengan medan listrik. Medan listrik dalam konduktor dapat timbul karena adanya beda potensial listrik antara dua titik pada konduktor tersebut. Misalkan V_a dan V_b adalah potensial pada ujung-ujung suatu konduktor yang panjangnya l . Medan listrik yang timbul adalah,

$$\xi = (V_a - V_b) / l = V_{ab} / l$$

Arah ξ ditentukan oleh besarnya V_a dan V_b , yaitu dari potensial tinggi ke potensial rendah, atau searah dengan arah arus yang ditimbulkannya.

Besarnya medan listrik menentukan banyaknya muatan listrik yang bergerak melalui suatu penampang tertentu per satuan waktu, atau menentukan besar arus listrik yang terjadi. Hubungan antara ξ dan I dinyatakan dengan rumus,

$$I = \frac{q}{t} = \frac{V_{ab}}{R}$$

Besaran $\rho l / A$ dinyatakan sebagai tahanan (R) konduktor itu.

$$R = \rho l / A$$

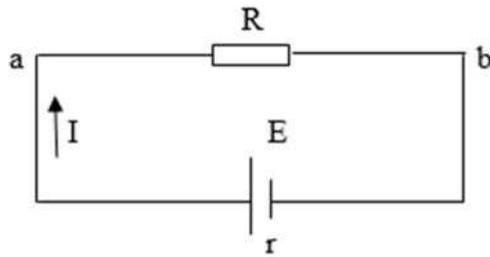
Konduktor logam disebut sebagai penghantar linear karena R dari rumus di atas adalah konstan, sehingga hubungan antara I dan V_{ab} merupakan hubungan linear.

$$I = V_{ab} / R$$

$$\text{atau } V = I R$$

Hubungan ini pertama kali ditemukan oleh bangsa Jerman yang bernama George Simon Ohm (1787 – 1854) dan persamaan di atas dikenal sebagai hukum Ohm yang berlaku pada konduktor. Pernyataan hukum Ohm adalah perbandingan beda potensial antara dua titik pada sebuah konduktor dengan arus yang melalui konduktor tersebut merupakan bilangan konstan jika temperatur tidak berubah. Bilangan konstan ini maksudnya adalah tahanan konduktor.

Grafik hubungan antara V dan I berupa garis lurus yang melalui titik pusat koordinat (0,0). R merupakan koefisien arah atau kemiringan garis. Penghantar yang berupa elektrolit cair dan gas di dalam tabung elektron adalah penghantar non linear, oleh karena itu tidak memenuhi hukum Ohm. Penggunaan hukum Ohm dalam rangkaian satu loop dapat dilihat pada uraian berikut ini.



Gambar 50. Rangkaian Satu Loop Yang Terdiri Atas Sebuah Sumber Ggl Dihubungkan Seri Dengan Sebuah Tahanan.

Pada rangkaian gambar 50 sumber ggl E yang tahanan dalamnya r dihubungkan dengan tahanan R . Besar arus dalam rangkaian ini dapat ditentukan dengan menggunakan hukum Ohm, yaitu

$$I = E / (R + r)$$

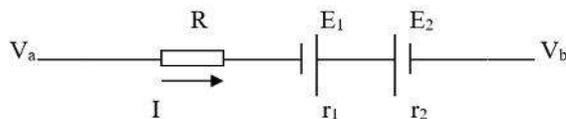
Tegangan pada tahanan R adalah,

Pada persamaan ini dapat dilihat bahwa V_{ab} lebih kecil dari pada E ,

$$V_{ab} = \frac{R}{R + r} E$$

kecuali bila $r = 0$. Jika rangkaian pada gambar 50 adalah rangkaian terbuka maka ($R = \infty$) maka $V_{ab} = E$. Jadi ggl sebuah sumber tegangan sama dengan beda potensial kutub-kutubnya bila berada pada rangkaian terbuka.

Apabila antara dua titik dalam rangkaian terdapat lebih dari satu sumber ggl yang mempunyai tahanan dalam dan beberapa buah tahanan, bagaimanakah hubungan antara beda potensial antara kedua ujung rangkaian dengan ggl, arus, dan tahananannya? Marilah kita tinjau rangkaian berikut.



Gambar 51. Rangkaian Terbuka Dengan Dua Sumber dan Tegangan dan Sebuah Tahanan

Sebelum membahas rangkaian ini terlebih dahulu kita tinjau daya listrik dari sumber ggl yang merupakan besar perubahan energi per satuan waktu. Daya listrik dari sumber ggl dinyatakan dengan,

$$P = E I$$

Keterangan: P = daya listrik, dengan satuan watt
 E = ggl sumber tegangan, dengan satuan volt
 I = arus listrik, dengan satuan ampere

Daya listrik dari sumber ggl dapat diubah menjadi energi panas oleh tahanan. Energi panas yang timbul per satuan waktu adalah,

$$P = I^2 R$$

Daya P dinyatakan dalam watt, E adalah volt, I dalam ampere, dan R dalam ohm.

Misalkan arah arus I dari a ke b . Pada saat arus melalui titik a , daya yang dimiliki adalah $I V_a$. Selanjutnya terjadi kehilangan daya sebesar $I^2 (R + r_1 + r_2)$ sebagai kalor dalam tahanan R dan tahanan dalam sumber ggl antara a dan b . Daya yang diperoleh dari sumber ggl yang pertama adalah $I E_1$ dan terjadi pula kehilangan energi untuk mengisi sumber ggl kedua sebesar $I E_2$. Pada saat arus sampai di titik b daya yang tinggal adalah $I V_b$. Jika daya yang diperoleh diberi tanda positif dan daya yang hilang diberi tanda negatif maka didapat persamaan:

$$I V_a - I^2 (R + r_1 + r_2) + I E_1 - I E_2 = I V_b$$

$$\text{atau } V_a - V_b = I (R + r_1 + r_2) - (E_1 - E_2)$$

Secara umum dapat ditulis,

$$V_{ab} = \Sigma I R - \Sigma E$$

$$V_{ab} = V_a - V_b$$

Dalam menggunakan persamaan ini harus diingat bahwa:

1. Arah positif adalah arah dari a ke b .
2. Arus I yang searah dengan arah ab diberi tanda positif dan yang berlawanan diberi tanda negatif.

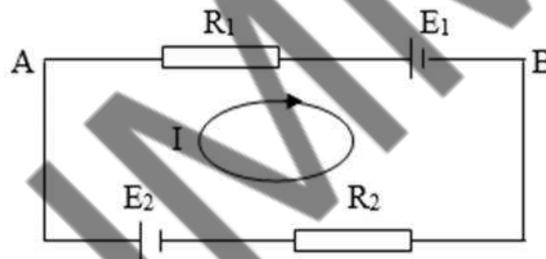
3. Ggl E yang searah dengan arah ab diberi tanda positif dan yang berlawanan diberi tanda negatif.
4. Tahanan R dan r selalu bertanda positif.
 V_{ab} bernilai positif bila potensial titik a lebih tinggi daripada potensial titik b, V_{ab} bernilai negatif bila potensial titik a lebih rendah daripada potensial b.

Jika titik a dan b dihubung singkat sehingga rangkaian di atas menjadi rangkaian tertutup (loop) maka $V_{ab} = 0$ dan diperoleh,

$$\Sigma E = \Sigma I R$$

Sebelum menggunakan rumus ini perlu ditetapkan arah arus dalam rangkaian. E diberi tanda positif jika arahnya sama dengan arah arus I dan sebaliknya. R selalu positif.

Contoh 1.



Gambar 52. Rangkaian Satu Loop Untuk Contoh 1

Pada gambar 52 diketahui dua sumber tegangan $E_1 = 30$ volt, $E_2 = 120$ volt, tahanan dalamnya diabaikan, tahanan $R_1 = 30$ ohm, $R_2 = 15$ ohm. Tentukan arus, tegangan pada masing-masing tahanan, dan tegangan antara A dan B.

Solusi

Terlebih dahulu tentukan arah arus dalam rangkaian, misalkan searah dengan putaran jarum jam. Dengan menggunakan hukum Ohm diperoleh besar arus dalam rangkaian.

$$\Sigma E = \Sigma I R$$

$$- E_1 + E_2 = I R_1 + I R_2 \text{ (} E_1 \text{ negatif karena berlawanan dengan arah I)}$$

$$- 30 + 120 = I (30 + 15) \text{ jadi } I = 2 \text{ A}$$

Tegangan pada masing-masing tahanan adalah,

$$V_{R1} = I R_1 = 2 \times 30 = 60 \text{ volt}$$

$$V_{R2} = I R_2 = 2 \times 15 = 30 \text{ volt}$$

Tegangan antara titik A dan B dihitung sebagai berikut:

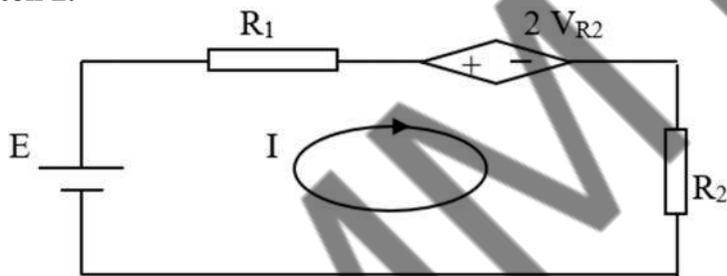
Arah positif adalah dari titik A ke B yang melalui R_1 dan E_1 .

$$V_{AB} = \Sigma I R - \Sigma E$$

$$= I R_1 - (-E_1) \quad (E_1 \text{ negatif karena melawan arah positif})$$

$$= 2 \times 30 + 30 = 90 \text{ volt}$$

Contoh 2.



Gambar 53. Rangkaian Satu Loop Untuk Contoh 2

Pada gambar 53 diketahui $E = 12$ volt, tahanan dalamnya diabaikan, sumber tegangan tak bebas $2 V_{R2}$, tahanan $R_1 = 30$ ohm, dan tahanan $R_2 = 15$ ohm. Tentukan besar arus dalam rangkaian. (Sumber tegangan tak bebas adalah sumber tegangan dimana tegangannya tergantung pada tegangan setiap bagian rangkaian).

Solusi

Misalkan arah arus searah dengan putaran jarum jam. Tegangan $V_{R2} = I R_2 = 15 I$. Dengan menggunakan hukum Ohm diperoleh besar arus dalam rangkaian.

$$\Sigma E = \Sigma I R$$

$$E - 2 V_{R2} = I R_1 + I R_2$$

$$12 - 2 \times 15 I = 30 I + 15 I$$

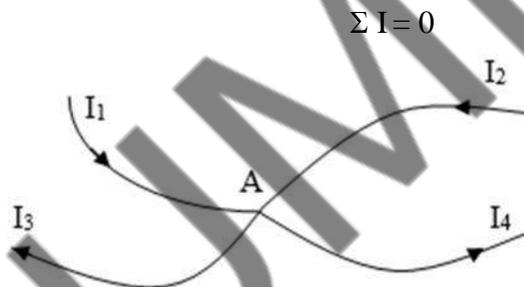
$$\text{jadi } I = 12/75 \text{ A}$$

C. Hukum Kirchoff

Suatu rangkaian listrik yang kompleks terdiri atas beberapa tahanan, sumber tegangan, atau komponen lainnya. Beberapa tahanan yang tidak tersusun dalam kelompok rangkaian seri, paralel, atau campuran seri paralel pada umumnya tidak dapat dianalisis dengan hanya menggunakan hukum Ohm. Untuk menganalisis rangkaian tersebut secara sistematis dapat digunakan hukum yang dikemukakan oleh guru besar berkebangsaan Jerman yang bernama Gustav Robert Kirchhoff yaitu hukum Kirchhoff. Ada dua hukum Kirchhoff yaitu Hukum Arus Kirchhoff dan Hukum Tegangan Kirchhoff.

1. Hukum Arus Kirchhoff

Hukum Arus Kirchhoff menyatakan bahwa jumlah aljabar semua arus yang memasuki sebuah simpul (titik cabang) adalah nol.



Gambar 54. Sebuah Simpul Yang Dilalui Oleh Arus I_1 , I_2 , I_3 , Dan I_4

Misalkan arus I_1 dan I_2 memasuki simpul A, arus I_3 dan I_4 meninggalkan simpul tersebut. Berdasarkan hukum Arus Kirchhoff diperoleh persamaan $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$.

Arus yang menuju titik A diberi tanda positif dan yang meninggalkan A diberi tanda negatif.

2. Hukum Tegangan Kirchhoff

Hukum Tegangan Kirchhoff menyatakan bahwa jumlah aljabar ggl dalam sebuah loop dalam rangkaian sama dengan jumlah aljabar

hasil kali arus dan tahanan.

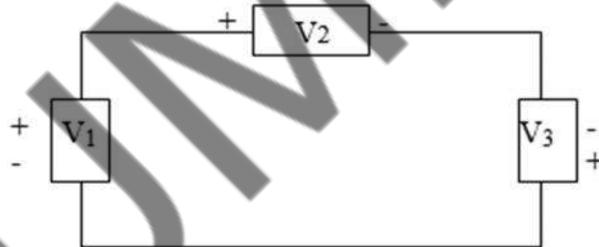
$$\Sigma E = \Sigma I R$$

Sebagai referensi dalam menentukan tanda E dan I, digunakan arah arus loop. Arah arus loop dapat dinyatakan searah dengan putaran jarum jam atau sebaliknya. E diberi tanda positif bila searah dengan arah arus loop dan sebaliknya. I diberi tanda positif bila searah dengan arah arus loop dan sebaliknya. R selalu diberi tanda positif.

Hukum Tegangan Kirchhoff dapat dinyatakan dengan cara lain, yaitu jumlah aljabar seluruh tegangan yang mengelilingi sebuah loop dalam sebuah rangkaian adalah nol.

$$\Sigma V = 0$$

Dengan ketentuan bahwa setiap elemen akan dimasuki pada referensi tegangan positifnya dalam arah tertentu, searah putaran jarum jam atau berlawanan dengan arah putaran jarum jam dalam rangkaian tersebut.



Gambar 55. Sebuah Loop Dengan Tiga Elemen Bertegangan V1, V2, dan V3

Misalkan dalam rangkaian seperti pada gambar 4.6 perjalanan dalam arah putaran jarum jam mengitari rangkaian, menemui satu tanda (+) dan dua tanda (-) sehingga diperoleh persamaan,

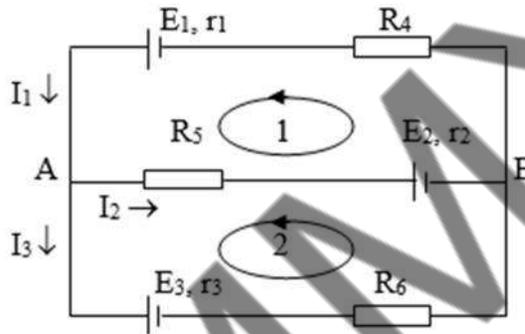
$$(-V_1) + V_2 + (-V_3) = 0$$

Sebaliknya kita dapat membalikkan tanda-tanda referensi tegangan dengan perjalanan yang berlawanan dengan putaran jarum jam, akan memberikan persamaan,

$$V_1 + (-V_2) + V_3 = 0$$

Untuk lebih mudah dalam menentukan tanda tegangan tiap elemen adalah dengan memperhatikan tanda-tanda setiap tegangan elemen yang mula-mula ditemui, dalam perjalanan searah dengan putaran jarum jam atau berlawanan dengan putaran jarum jam sebagai referensinya.

Contoh 3.



Gambar 56. Rangkaian Dua Loop Untuk Contoh 3

Perhatikan gambar 56 diketahui $E_1 = 20 \text{ V}$, $r_1 = r_2 = r_3 = 1 \text{ ohm}$, $R_4 = 6 \text{ ohm}$, $R_5 = 4 \text{ ohm}$, $R_6 = 2 \text{ ohm}$, $I_1 = 1 \text{ A}$, dan $I_3 = 2 \text{ A}$. Kita diminta untuk menentukan I_2 , E_2 , E_3 , dan beda potensial antara titik A dan B.

Solusi

Arah arus I_1 , I_2 , dan I_3 dapat kita ambil sembarang. Pada titik A berlaku hubungan,

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$I_2 = I_1 - I_3 = 1 - 2 = -1 \text{ A (berarti arah yang diambil terbalik)}$$

Hal ini tidak menjadi masalah, asal kita mempertahankan tanda negatifnya.

Untuk menentukan E_1 dan E_2 pada loop 1 digunakan rumus,

$$\Sigma E = \Sigma I R$$

$$\Sigma E = E_1 - E_2$$

$$\Sigma I R = I_2 r_3 + I_2 r_2 + I_1 R_4 + I_1 r_1$$

Perhatikan bahwa E_2 diberi tanda negatif karena melawan

arah loop.

$$E_1 - E_2 = I_2 R_5 + I_2 r_2 + I_1 R_4 + I_1 r_1$$

$$20 - E_2 = -1(4 + 1) + 1(6 + 1)$$

$$E_2 = 20 - 2 = 18 \text{ volt}$$

Untuk loop 2 digunakan rumus,

$$\Sigma E = \Sigma I R$$

$$\Sigma E = E_2 - E_3$$

$$\Sigma I R = I_3 R_5 + I_3 R_6 - I_2 r_2 - I_2 R_5$$

Perhatikan bahwa E_3 dan I_2 diberi tanda negatif karena berlawanan dengan arah loop 2.

$$E_2 - E_3 = I_3 (r_3 + R_6) - I_2 (r_2 + R_5)$$

$$18 - E_3 = 2(1 + 2) - (-1)(1 + 4)$$

$$E_3 = 18 - 11 = 7 \text{ volt}$$

Selanjutnya kita hitung V_{AB} dengan menggunakan hukum Ohm.

$$V_{AB} = \Sigma I R - \Sigma E$$

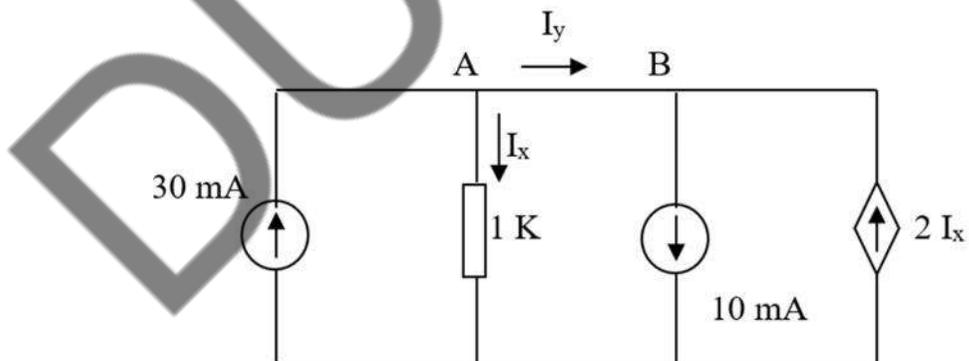
Untuk bagian rangkaian AB,

$$\Sigma I R = I_2 R_5 + I_2 r_2 = I_2 (R_5 + r_2)$$

$$\Sigma E = -E_2$$

$$V_{AB} = I_2 (R_5 + r_2) + E_2 = (-1)(4 + 1) + 18 = 13 \text{ volt}$$

Contoh 4.



Gambar 57. Rangkaian Tiga Loop Untuk Contoh 4

Dalam rangkaian seperti pada gambar 57 terdapat dua sumber arus bebas sebesar 30 mA dan 10 mA, dan sebuah sumber arus tak bebas atau sumber arus terkontrol sebesar $2 I_x$.

Sumber arus tak bebas adalah suatu sumber arus dimana arusnya ditentukan oleh arus yang terdapat di setiap bagian rangkaian. Tentukan besar arus I_x dan I_y dalam rangkaian tersebut.

Solusi

Dengan menggunakan hukum arus Kirchhoff pada masing-masing titik cabang dalam rangkaian kita peroleh dua persamaan.

Untuk titik cabang A, $30 = I_x + I_y$ (1)

Untuk titik cabang B, $2 I_x + I_y = 10$ (2)

Kedua persamaan ini diselesaikan dengan cara eliminasi,

$$I_x + I_y = 30$$

$$\underline{2I_x + I_y = 10} \quad -$$

$$-I_x = 20 \quad \text{atau } I_x = -20 \text{ mA}$$

Harga i_x dimasukkan ke dalam persamaan (1) sehingga diperoleh i_y .

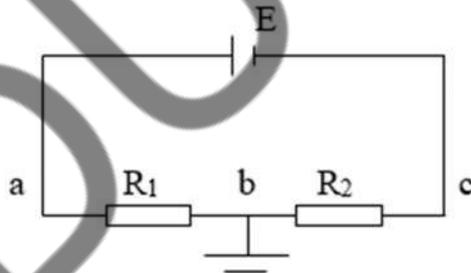
$$I_x + I_y = 30$$

$$-20 + I_y = 30$$

$$I_y = 50 \text{ mA}$$

D. Soal Latihan

1.



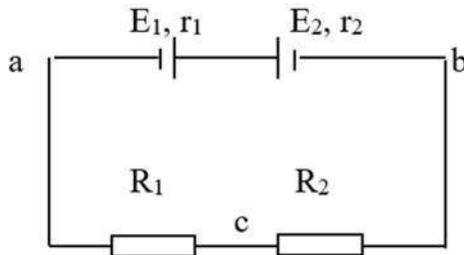
Sebuah rangkaian seperti pada gambar, diketahui $E = 18 \text{ V}$, $R_1 = 6 \text{ ohm}$, $R_2 = 3 \text{ ohm}$.

Hitunglah:

- a. Tegangan pada titik a
- b. Besar tahanan yang harus dipasang pada titik c agar tegangan.

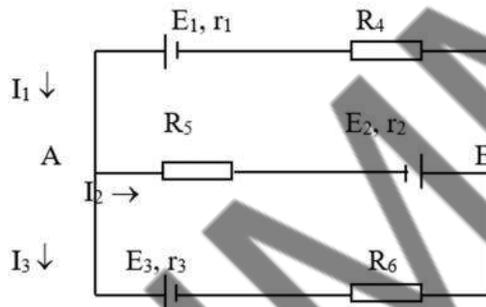
$$V_a = 7,5 \text{ volt.}$$

2.



Sebuah rangkaian seperti pada gambar, diketahui $E_1 = 12$ V, $E_2 = 6$ V, $r_1 = r_2 = 0,1$ ohm, $R_1 = 2,4$ ohm, dan $R_2 = 1,4$ ohm. Hitunglah tegangan V_{ab} , V_{bc} , dan V_{ac} .

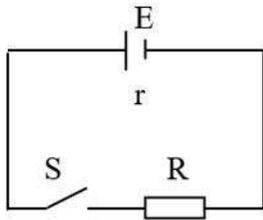
3.



Pada gambar terdapat tiga sumber ggl masing-masing $E_1 = 10$ V, $E_2 = 15$ V, $E_3 = 25$ V, dengan tahanan dalamnya $r_1 = r_2 = r_3 = 1$ ohm, dan empat tahanan masing-masing $R_4 = 4$ ohm, $R_5 = 9$ ohm, dan $R_6 = 3$ ohm. Hitunglah besar arus yang melalui masing-masing tahanan dan tegangan antara titik A dan B.

4. Sebuah tahanan menggunakan daya 40 watt pada tegangan 60 volt. Berapa besar tahanan tersebut?
5. Suatu alat listrik 660 watt bekerja pada tegangan 120 V.
 - a. Berapakah tahanan alat itu?
 - b. Berapa besar arus yang digunakan?
 - c. Jika tegangan turun sampai 110 V berapa daya yang digunakan alat itu?

6.

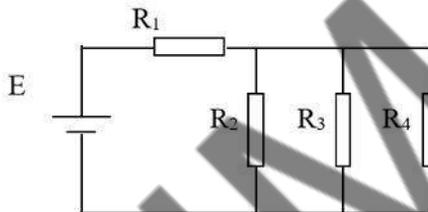


Baterai dengan $E = 12 \text{ V}$, tahanan dalam $r = 0,3 \text{ ohm}$, dan $R = 3,7$ seperti pada gambar. $S =$ saklar. Bila saklar dibuka berapa pembacaan voltmeter bila dipasang:

- antara ujung-ujung baterai
- antara tahanan
- antara saklar.

Bila saklar ditutup, hitung kembali pertanyaan a, b, dan c di atas.

7.



Sebuah rangkaian seperti pada gambar, diketahui $E = 6 \text{ V}$, $R_1 = 7 \text{ } \Omega$, $R_2 = 12 \text{ } \Omega$, $R_3 = 6 \text{ } \Omega$, dan $R_4 = 12 \text{ } \Omega$. Hitunglah tahanan total dan tegangan dan arus yang melalui masing-masing tahanan.

BAB 5

MEDAN MAGNET

A. Pendahuluan

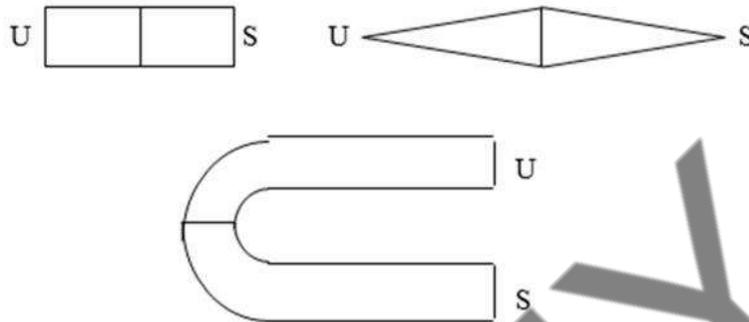
Pada zaman sekarang banyak peralatan yang bekerja menggunakan medan magnet. Kita mengetahui bahwa magnet dapat menarik besi dan beberapa macam logam lainnya. Magnet menghasilkan suatu medan yang berbeda dengan medan listrik. Medan ini melakukan gaya pada muatan bergerak, pada kawat berarus, atau momen gaya pada batang magnet. Suatu muatan listrik yang diam terhadap medan magnet tidak mendapat gaya di dalam medan magnet. Gaya magnet digunakan dalam motor listrik, meter kumparan putar, alat pemercepat partikel (aselerator), spektrometer massa, mikroskop elektron, dan sebagainya.

Dalam berbagai penelitian orang menggunakan medan magnet untuk menyelidiki bagaimana atom dan molekul tersusun di dalam bahan, bagaimana molekul bergerak, dan sebagainya. Suatu aspek lagi yang penting dari medan magnet adalah bahwa medan magnet yang berubah dengan waktu dapat menimbulkan gaya gerak listrik (ggl) induksi. Hal ini merupakan dasar kerja generator listrik. Pengertian ggl induksi juga penting untuk memahami induktor dan transformator yang banyak dijumpai dalam rangkaian arus bolak balik.

B. Bentuk, Sifat, dan Gaya Antara Dua Kutub Magnet

Peristiwa magnetis pertama kali terlihat pada magnet alam, yaitu sejenis logam yang dapat menarik potongan-potongan besi kecil. Magnet alam ini merupakan besi oksida dengan rumus molekulnya adalah Fe_3O_4 . Perkataan magnesia berasal dari daerah Magnesia yakni tempat ditemukannya magnet tersebut. Benda yang terbuat dari besi atau baja dapat juga memperoleh sifat kemagnetan, bila digosok berulang-ulang dalam satu arah dengan sebatang magnet. Magnet ini disebut magnet buatan. Pada umumnya magnet buatan dibuat dalam tiga bentuk, sehingga dikenal tiga macam magnet buatan yaitu magnet batang, magnet U,

dan magnet jarum.



Gambar 58. Bentuk-Bentuk Magnet

Gaya tarik magnet terletak pada ujung-ujungnya yang disebut dengan kutub magnet. Ada dua kutub magnet yaitu kutub utara dan kutub selatan. Apabila sebuah magnet batang digantung dengan benang pada bagian tengahnya dan bebas berputar, maka magnet itu akan berada pada posisi arah utara-selatan. Kutub utara magnet selalu menunjuk arah utara dan kutub selatannya menunjuk arah selatan. Apabila kutub utara sebuah magnet didekatkan pada kutub utara magnet lain maka kedua kutub ini akan saling menolak. Tetapi apabila kutub selatan sebuah magnet didekatkan dengan kutub utara magnet lain maka kedua kutub ini akan saling menarik. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kutub magnet yang senama saling tolak-menolak, dan kutub magnet yang berlainan akan saling tarik-menarik.

Gaya tarik-menarik atau tolak-menolak antara dua kutub magnet dapat ditentukan dengan menggunakan hukum Coulomb tentang kemagnetan, yakni: gaya antara dua kutub magnet berbanding lurus dengan kuat kutub magnet dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua kutub. Hukum Coulomb ini dapat dinyatakan dengan rumus,

$$F = k \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Keterangan:

F = gaya antara dua kutub magnet (dengan satuan newton)

k = konstanta pembanding ($k = 10^{-7}$ weber/ ampere.meter)

m_1 dan m_2 = kuat kutub magnet (dengan satuan ampere.meter)
 r = jarak antara kedua kutub (dengan satuan meter)

Penerapan gaya magnet dalam transportasi adalah pada kereta api magnetik seperti pada gambar 59. Kereta api ini menggunakan gaya magnet sebagai tenaga pengangkat dan pendorong kereta. Dengan memanfaatkan gaya tolak magnet, kereta akan terangkat dan tidak menyentuh rel sehingga gaya gesek dapat dikurangi. Dengan demikian kereta ini dapat melaju dengan kecepatan sampai 600 km/jam.



Gambar 59. Kereta Api Magnetik

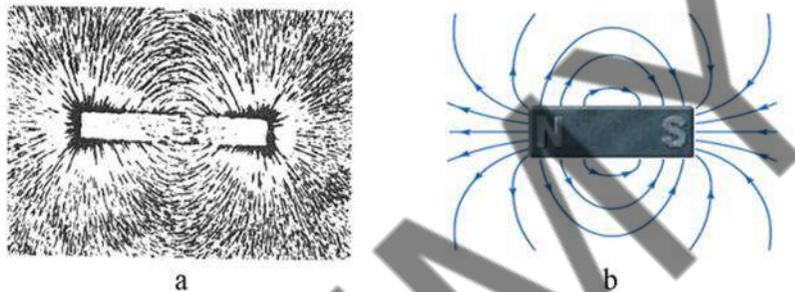
<https://www.fisika.co.id/2019/12/peran-fisika-dalam-kehidupan.html>

C. Medan Magnet

Ruang di sekitar sebuah magnet disebut medan magnet. Medan magnet dapat dinyatakan dengan garis-garis yang disebut garis gaya magnet yang arahnya pada setiap titik merupakan arah vektor medan magnet. Di dalam medan magnet homogen, vektor medan magnet mempunyai besar dan arah yang tetap pada semua titik. Garis gaya magnet ini semuanya lurus dan berjarak sama satu sama lain. Medan magnet homogen terdapat pada magnet berbentuk U dan daerah antara dua kutub magnet berlainan yang didekatkan.

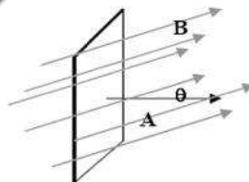
1. Fluks Magnet

Gambar 60.a menunjukkan garis gaya magnet yang dibentuk oleh serbuk besi yang disebar merata di atas kertas. Jumlah garis gaya magnet disebut fluks magnet. Arah fluks magnet adalah dari kutub utara magnet ke kutub selatan magnet (gambar 60.b).



Gambar 60. Garis Gaya Magnet

Jika induksi magnet B homogen dan tegak lurus pada penampang seluas A yang terbatas maka fluks magnet Φ adalah, $\Phi = B A$. Secara umum, besar dan arah medan magnet dapat berubah dari suatu titik ke titik lain pada permukaan. Jumlah garis gaya magnet sebesar $\Delta\Phi$ yang menembus permukaan seluas ΔA adalah $\Delta\Phi = B \Delta A \cos \varphi = B_n \Delta A$. Jumlah fluks yang menembus permukaan dengan luas yang terbatas adalah, $\Phi = \int B_n dA$



Gambar 61. Fluks Magnet Yang Menembus Permukaan

2. Kuat Medan Magnet

Kuat medan magnet (intensitas magnet) adalah besarnya fluks magnet dalam ruang hampa udara pada luas penampang

tertentu, dengan kedudukan secara tegak lurus terhadap arah aliran fluks magnet. Kuat medan magnet ini dapat dinyatakan dengan rumus

$$H = \Phi / A$$

Keterangan:

H = kuat medan magnet (dengan satuan maxwell/cm² atau gauss atau oersted)

Φ = fluks magnet (dengan satuan maxwell)

A = luas penampang ruangan yang dilalui oleh fluks magnet (dengan satuan cm²)

Satuan gauss khusus untuk satuan medan magnet yang disebabkan oleh magnet permanen, sedangkan satuan oersted khusus untuk satuan medan magnet yang disebabkan oleh arus listrik.

3. Induksi Magnet

Jika sebuah benda (logam) diletakkan antara kutub-kutub magnet maka fluks magnet mengalir pada benda tersebut. Banyaknya fluks magnet yang mengalir pada benda tersebut dengan luas penampang tertentu dan dengan kedudukan tegak lurus terhadap arah aliran fluks disebut induksi magnet. Induksi magnet dapat dinyatakan dengan rumus

$$B = \Phi / A$$

Keterangan:

B = induksi magnet (dengan satuan maxwell/cm²)

Φ = fluks magnet yang mengalir pada benda (dengan satuan maxwell)

A = luas penampang benda yang dilalui oleh fluks magnet (dengan satuan cm²)

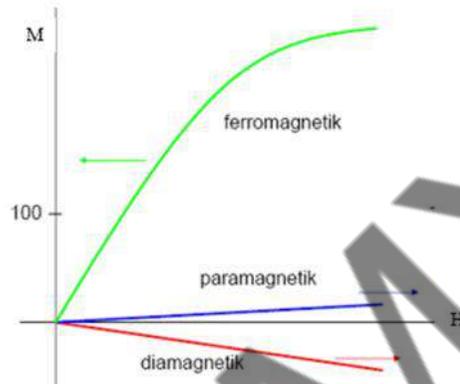
4. Permeabilitas Magnet

Permeabilitas magnet adalah perbandingan antara induksi magnet dengan medan magnet dan dinyatakan sebagai berikut:

$$\mu = B / H$$

Berdasarkan permeabilitas magnet, bahan-bahan dapat

dibedakan atas tiga kelompok, yaitu ferromagnetik, paramagnetik, dan diamagnetik. Hubungan magnetisasi dan kuat medan magnet untuk bahan ferromagnetik, paramagnetik, dan diamagnetik ditunjukkan pada gambar 62.



Gambar 62. Magnetisasi Sebagai Fungsi Dari Kuat Medan

a. Ferromagnetik

Ferromagnetik adalah bahan-bahan yang kuat sekali menarik garis-garis gaya magnet. Bahan ini cenderung dilalui oleh seluruh fluks magnet. Contohnya adalah baja dan besi.

b. Paramagnetik

Paramagnetik adalah bahan-bahan yang kurang kuat menarik garis gaya magnet. Bahan ini tidak ditarik oleh magnet, kecuali kalau kuat kutub magnetnya sangat besar. Contoh bahan ini adalah nikel, platina, dan cobalt.

c. Diamagnetik

Diamagnetik adalah bahan-bahan yang sedikit menolak garis gaya magnet. Bahan ini sangat sukar dilalui oleh fluks magnet. Contohnya adalah tembaga, timah, aluminium, seng, dan sebagainya.

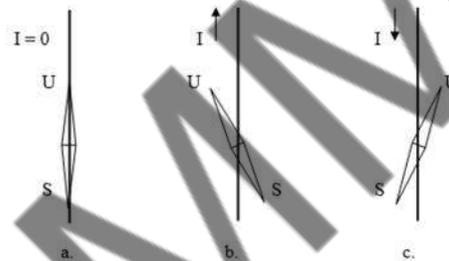
D. Medan Magnet oleh Arus Listrik

Kita telah menggunakan medan magnet tanpa mengetahui bagaimana membuat medan magnet tersebut. Dari percobaan, orang mendapatkan bahwa arus listrik dapat menimbulkan medan magnet. Muatan listrik yang bergerak dapat menimbulkan medan

magnet. Peristiwa ini dimanfaatkan untuk membuat elektromagnet, yaitu magnet yang bekerja bila dialiri arus listrik. Elektromagnet digunakan dalam motor listrik, bel listrik, dan generator listrik.

1. Penemuan Oersted

Pertama kali pada tahun 1819 seorang sarjana bangsa Denmark yang bernama Hans Christian Oersted (1770-1851) menemukan bahwa arus listrik dapat menghasilkan medan magnet. Penemuannya ini berdasarkan hasil penelitian bahwa sebuah magnet jarum yang dapat bergerak bebas pada porosnya akan menyimpang ke arah tertentu bila berada dekat kawat yang berarus listrik, seperti diperlihatkan pada gambar 61.



Gambar 63. Magnet Jarum dan Konduktor Berarus

Pada gambar 63.a. konduktor yang tidak berarus diletakkan lurus di atas magnet jarum. Bila konduktor diberi arus listrik dengan arah seperti pada gambar 63.b. maka kutub utara magnet jarum menyimpang ke arah kiri dari posisi semula. Sebaliknya bila arah arus seperti pada gambar 63.c. maka kutub utara magnet jarum bergerak ke arah kanan. Gejala ini menunjukkan bahwa di sekitar kawat berarus ada medan magnet. Arah garis gaya medan magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik ini ditentukan oleh Ampere.

2. Hukum Biot-Savart

Kuat medan magnet di suatu titik dalam medan magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik disebut juga induksi magnet. Besar induksi magnet itu oleh Biot-Savart dinyatakan dengan rumus,

$$dB = k \frac{i \sin \theta}{r^2}$$

Keterangan:

dB = induksi magnet di titik P yang ditimbulkan oleh arus i dalam kawat sepanjang dl .

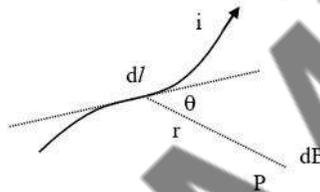
$k = \mu_0 / 4\pi$

i = arus

dl = elemen panjang kawat

r = jarak elemen kawat ke titik P

θ = sudut antara arah arus dalam kawat sepanjang dl terhadap r



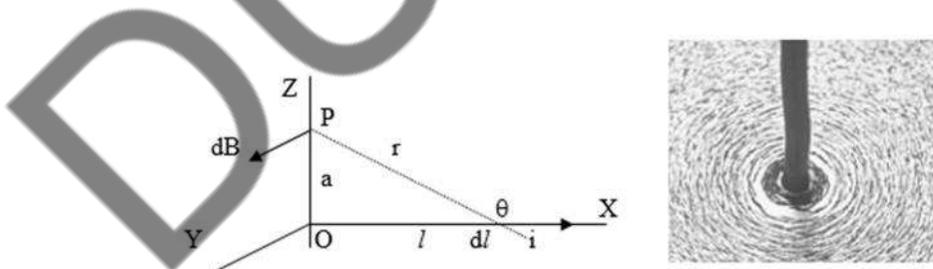
Gambar 64. Induksi magnet dB di sekitar elemen kawat dl yang berarus i

Induksi magnet B pada titik P dapat dihitung dengan mengintegrasikan kontribusi-kontribusi induksi magnet untuk seluruh distribusi.

$$B = \int dB$$

B merupakan induksi magnet oleh arus di sepanjang kawat.

3. Induksi Magnet di Sekitar Kawat Lurus yang Panjang



Gambar 65. Induksi magnet dB oleh arus dalam elemen kawat dl dari kawat lurus yang panjang

Dengan menggunakan hukum Biot-Savart kita akan menghitung induksi magnet di titik P yang berada pada jarak a dari kawat lurus yang panjang. Misalkan kawat berada pada

sumbu X, titik P pada sumbu Z, dan arah arus i seperti pada gambar 65, maka dB sejajar dengan sumbu Y. Elemen panjang kawat dl berjarak l dari O dan berjarak r dari P. Induksi magnet yang ditimbulkan oleh arus sepanjang kawat l diperoleh dengan mengintegrasikan dB . Integral dB dapat dilakukan bila θ dipilih sebagai variabel bebas.

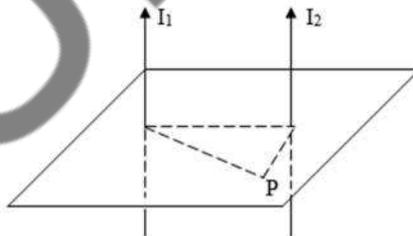
Pada gambar dapat dilihat bahwa, $r = a \operatorname{cosec} \theta$, $l = a \cot \theta$, maka $dl = -a \operatorname{cosec}^2 \theta d\theta$. Jika kawat itu panjang tak terbatas atau panjang sekali dibandingkan dengan jarak a maka batas-batas integrasi variabel asal dl ialah $-\infty$ sampai $+\infty$. Batas-batas tersebut untuk sudut θ ialah dari π sampai 0 . a adalah jarak titik yang ingin diketahui medan magnetnya ke kawat berarus listrik i . Arah B sama dengan perpindahan sekrup bila diputar dari dl ke r .

$$dB = -\frac{\mu_0 i}{4\pi a} \sin \theta d\theta$$

$$B = \int dB = -\frac{\mu_0 i}{4\pi a} \int_{\pi}^0 \sin \theta d\theta = -\frac{\mu_0 i}{4\pi a} [-\cos \theta]_{\pi}^0$$

atau $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi a}$

Contoh 1



Gambar 66. Gambar Untuk Contoh 1

Pada gambar 66 dapat dilihat dua konduktor yang berarus $I_1 = 4 \text{ A}$ dan $I_2 = 3 \text{ A}$ dengan arah yang sama. Konduktor terletak tegak lurus pada bidang datar. Jarak kedua konduktor adalah 5 cm . Sebuah titik P terletak pada jarak 4 cm dari konduktor 1 dan 3 cm dari konduktor 2. Tentukan arah dan besar medan magnet di titik P yang ditimbulkan oleh kedua konduktor tersebut.

Solusi

Terlebih dahulu kita harus menggambarkan fluks magnet yang melalui titik P yang ditimbulkan oleh kedua konduktor dan tetapkan arah medannya, misalnya B_1 dan B_2 . Selanjutnya hitung besar kedua medan magnet ini.

Karena B_1 dan B_2 membentuk sudut 90° (panjang sisi segitiga 3, 4, 5 cm menunjukkan bahwa segitiga ini adalah segitiga siku-siku), maka medan magnet total di titik P adalah penjumlahan vektor B_1 dan B_2 .

$$B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{2 \pi a_1} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 4}{2\pi \times 0,04} = 2 \times 10^{-5} \text{ w /m}^2$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 i_2}{2 \pi a_2} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 3}{2\pi \times 0,03} = 2 \times 10^{-5} \text{ w /m}^2$$

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = \sqrt{(2 \times 10^{-5})^2 + (2 \times 10^{-5})^2} = 2 \times 10^{-5} \sqrt{2} \text{ w /m}^2$$

4. Induksi Magnet Pada Sumbu Solenoida



Gambar 67. Induksi magnet yang ditimbulkan oleh arus dalam solenoida

Sebuah solenoida adalah sebuah gulungan kawat yang panjang, sering disebut kumparan. Misalkan l adalah panjang solenoida yang terdiri atas N lilitan kawat melingkar yang berjari-jari a . Jumlah lilitan tiap satuan panjang ialah $n = N / l$. Tinjau sejumlah lilitan dari elemen panjang dx yang sangat kecil dengan jumlah lilitan sebesar $n dx$. Titik P berada pada sumbu solenoida dan berjarak r dari dx . Dengan menggunakan hukum Biot-Savart dapat dihitung induksi magnet di titik P yang ditimbulkan oleh arus dalam solenoida sepanjang dx .

$$r = a \operatorname{cosec} \alpha$$

$$x = a \cotg \alpha$$

$$\text{maka } dx = -a \operatorname{cosec}^2 \alpha d\alpha$$

sehingga

$$d = \frac{\mu_0 n}{2r^2} \sin \alpha \, d \qquad d = -\frac{\mu_0 i}{2} \sin \alpha \, d\alpha$$

Apabila titik P berada di pertengahan sumbu solenoida dan solenoida itu sangat panjang dibandingkan dengan diameternya maka dapat dianggap besar sudut $\alpha_1 = 0^\circ$ dan $\alpha_2 = 180^\circ$. Induksi magnet di pertengahan sumbu solenoida yang ditimbulkan oleh arus dalam seluruh panjang solenoida adalah,

$$B = -\frac{\tilde{o}i}{2} \int_{180}^0 \sin r \, dr = -\frac{\tilde{o}ni}{2} [-\cos r]_{180}^0 = \tilde{o}ni$$

$$\text{atau } B = \frac{\tilde{o}Ni}{l}$$

Apabila titik P berada di ujung kiri sumbu solenoida tersebut maka dapat dianggap bahwa $\alpha_1 = 0^\circ$ dan $\alpha_2 = 90^\circ$. Sehingga induksi magnet di salah satu ujung sumbu solenoida yang ditimbulkan oleh arus dalam seluruh panjang solenoida adalah,

$$B = -\frac{\tilde{o}i}{2} \int_{90}^0 \sin r \, dr = -\frac{\tilde{o}ni}{2} [-\cos r]_{90}^0 = \frac{\tilde{o}ni}{2}$$

$$\text{atau } B = \frac{\tilde{o}Ni}{2l}$$

Setiap lilitan kawat menimbulkan induksi magnet yang arahnya sama dengan perpindahan sekrup bila diputar menurut arah arus dalam lilitan kawat.

Contoh 2

Sebuah kumparan yang panjangnya 5 cm terdiri atas dua lapis kawat konduktor (1000 lilitan dan 500 lilitan), masing-masing dialiri arus yang sama besarnya (0,5A) tetapi berlawanan arah. Tentukan besar dan arah medan magnet di tengah sumbu kumparan.

Solusi

Setiap kumparan yang berarus menimbulkan medan magnet yang arahnya dapat ditentukan berdasarkan arah arus yang melalui kawat kumparan. Sebelum menyelesaikan soal ini, terlebih dahulu tetapkan arah medan magnet yang timbul pada masing-masing kumparan seperti pada gambar. Selanjutnya hitung besar medan magnet di tengah sumbu kumparan dari kawat lilitan 1 dan kemudian lilitan kawat kumparan kedua, misalnya B_1 dan B_2 .

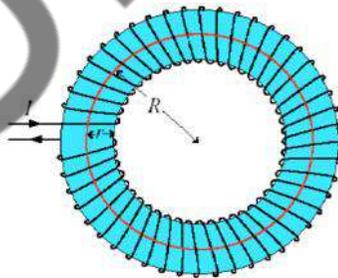
Jadi medan magnet di tengah sumbu kumparan adalah,

$$B = B_1 - B_2 = 2\pi \times 10^{-3} \text{ wb} / \text{m}^2 \text{ dengan arah seperti pada gambar.}$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 N_2 i}{l} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 500 \times 0,5}{0,05} = 2\pi \times 10^{-3} \text{ w} / \text{m}^2$$

$$B_1 = \frac{\mu_0 N_1 i}{l} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 1000 \times 0,5}{0,05} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ w} / \text{m}^2$$

5. Induksi Magnet Dalam Toroida



Gambar 68. Induksi magnet yang ditimbulkan oleh arus dalam toroida

Toroida adalah sebuah solenoida yang intinya berbentuk lingkaran. Garis-garis gaya magnet membentuk lingkaran-lingkaran konsentris di dalam toroida tersebut, seperti yang diperlihatkan pada gambar 68. Misalkan toroida mempunyai lilitan kawat yang berarus I . Untuk dapat menggunakan hukum

Ampere, kita ambil lengkungan tertutup yang berupa lingkaran dengan jari-jari r , atau lingkaran sumbu toroida. Menurut hukum Ampere,

$$\int B \cdot dl = \mu_0 i$$

i adalah arus yang ada dalam lingkaran sumbu toroida. Jadi $i = NI$, karena tiap lingkaran kawat dilalui arus I dan ada N lilitan pada lingkaran sumbu. Karena garis induksi magnet berupa lingkaran, maka induksi magnet B selalu sejajar dl sepanjang lingkaran sumbu toroida. Di samping itu harga induksi magnet B tidak tergantung pada letak dl pada lingkaran sumbu, sehingga integral garis

$$\int B \cdot dl = B (2\pi r)$$

$\int dl$ merupakan keliling lingkaran sumbu. Maka dari hukum Ampere diperoleh,

$$\int B \cdot dl = \mu_0 i,$$

atau $B (2\pi r) = \mu_0 N I$, sehingga

$$B = \frac{\mu_0 N i}{2 \pi r}$$

Induksi magnet di luar toroida adalah nol. Hal ini dapat dijelaskan dengan menggunakan hukum Ampere, dengan mengambil lengkungan integrasi di luar toroida. Karena arus yang terkandung dalam lengkungan integrasi ini adalah nol maka induksi magnet di luar toroida juga sama dengan nol.

6. Penggunaan Solenoida dan Toroida dalam Teknik Otomotif

a. Solenoida pada karburator

Solenoida pada karburator berfungsi untuk memutuskan aliran bahan bakar yang menuju ke *idle port* dan *slow port* agar tidak terjadi *dieseling* (mesin masih menyala ketika kunci kontak *off* karena bahan bakar masih mengalir ke ruang bakar dan masih dapat terbakar sendiri karena panasnya ruang bakar. Solenoida bekerja dengan memanfaatkan medan elektromagnet untuk menarik *plunger* untuk membuka saluran. Ketika kunci kontak *on* maka akan ada aliran listrik ke solenoida, sehingga kumparan pada solenoida akan menjadi magnet dan akan menarik *plunger*

sehingga saluran bahan bakar terbuka. Ketika tidak ada aliran listrik ke solenoida yaitu pada saat kunci kontak *off* maka *plunger* akan menutup saluran bahan bakar yang menuju *idle port* dan *slow port* (gambar 69).



Gambar 69. Solenoida Pada Karburator

<https://www.teknik-otomotif.com/2017/11/aplikasi-penggunaan-magnet-dan.html>

b. *Magnetic clutch* pada kompresor AC

Magnetic clutch pada kompresor AC berfungsi untuk menghubungkan dan memutuskan putaran mesin dengan kompresor (gambar 70). Ketika saklar AC *on* maka ada aliran listrik ke *magnetic clutch* sehingga *magnetic clutch* akan menjadi magnet dan menghubungkan putaran dari *pully* ke kompresor AC. Namun ketika saklar AC *off* maka tidak ada aliran ke *magnetic clutch* sehingga kemagnetan pada *magnetic clutch* akan menghilang dan mengakibatkan putaran dari *pully* tidak diteruskan ke kompresor AC.



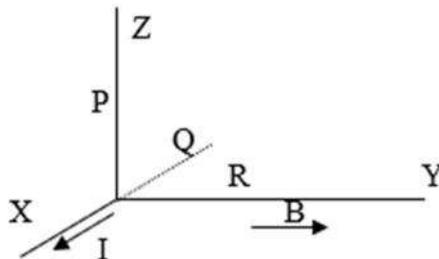
Gambar 70. Magnetic Clutch Pada Kompresor AC

E. Soal Latihan

1.



- a. Sebuah kumparan berarus I dengan arah seperti pada gambar. Kutub magnet apakah yang terbentuk pada ujung A? Bagaimana cara menentukan kutub tersebut?
 - b. Jelaskan dengan menggunakan aturan tangan kanan dan lukis garis-garis gaya magnet yang terbentuk beserta arah garis gayanya.
2. Kemana arah medan magnet di dalam kumparan pada soal nomor 1 di atas?
- 3.

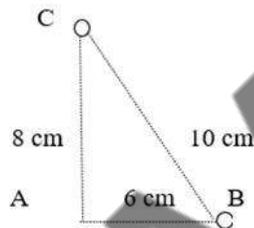


Kawat lurus yang panjang berarus listrik $I = 10 \text{ A}$ sepanjang sumbu X, berada dalam medan magnet $B = 10^{-8} \text{ Wb/m}^2$ searah sumbu Y.

Berapa perpaduan medan magnet pada:

- titik P yang terletak 2 m pada sumbu Z.
- titik Q yang terletak 2 m pada sumbu X (-).
- titik R yang terletak 2 m pada sumbu Y.

4.



Konduktor B dan C terpisah sejauh 10 cm dan tegak lurus pada bidang gambar. Konduktor B berarus 6 A dengan arah menjauhi pembaca.

Hitunglah:

- Besar dan arah arus dalam konduktor C bila perpaduan medan magnet di titik A sama dengan $10^{-5} \sqrt{2} \text{ T}$.
 - Besar dan arah medan magnet di titik B.
 - Besar dan arah medan magnet di titik C.
5. Sebuah solenoida yang panjangnya 10 cm, dililit dengan dua lapisan kawat, yang sebelah dalam terdiri atas 50 lilitan dan yang sebelah luar 40 lilitan. Arus sebesar 3 A melalui kedua lilitan tersebut dengan arah yang sama. Berapa induksi magnet pada pertengahan sumbu dan di ujung sumbu solenoida?

BAB 6

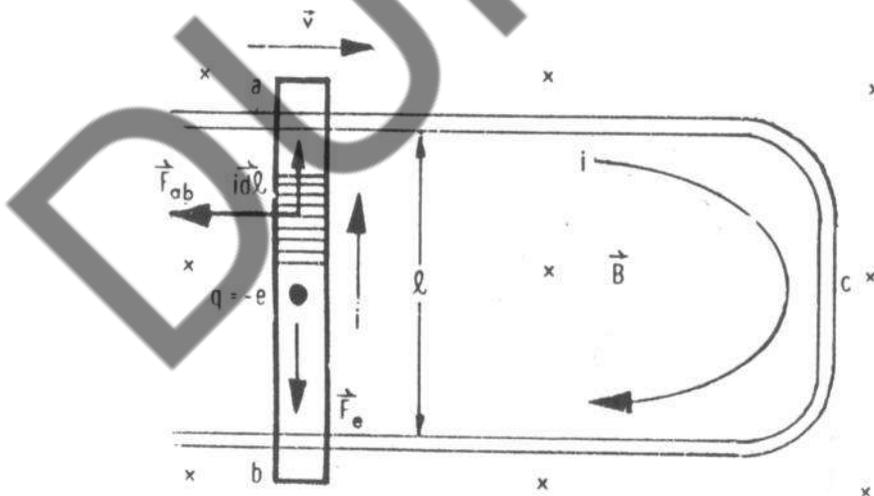
GAYA GERAK LISTRIK INDUKSI

A. Pendahuluan

Dalam bab ini kita akan membahas apa yang akan terjadi bila fluks atau garis gaya induksi medan magnet berubah dengan waktu. Ternyata bahwa bila fluks magnet yang menembus suatu loop kawat konduktor berubah dengan waktu, akan terjadilah gaya gerak listrik induksi pada loop kawat itu dan menyebabkan arus listrik induksi. Peristiwa ini dinyatakan secara kuantitatif dengan hukum induksi Faraday.

Terjadinya ggl induksi merupakan dasar kerja generator listrik, dimana energi dari suatu bentuk (misalnya energi potensial air) diubah menjadi energi listrik. Penggunaan lain dari peristiwa ini ialah pada induktor dan transformator. Induktor terdiri dari kumparan kawat dan merupakan komponen penting pada rangkaian listrik arus bolak balik (AC).

B. Hukum Induksi Faraday



Gambar 71. Kawat berbentuk U dan batang logam ab berada dalam medan magnet B (Sutrisno, 1983).

Hukum induksi Faraday dapat dijelaskan dengan cara seperti berikut: Misalkan ada sebuah kawat yang berbentuk seperti U dan sebuah batang logam yang ditempelkan pada kedua kaki kawat U tersebut, seperti pada gambar. Sistem ini, kawat U dan batang logam ab, diletakkan dalam medan magnet homogen dengan bidang kawat tegak lurus pada medan magnet B. Selanjutnya batang logam digerakkan ke arah kanan dengan kecepatan v.

Di dalam batang logam ab banyak terdapat elektron bebas. Bila batang logam ini digerakkan maka elektron bebas yang ada dalam batang ikut bergerak. Batang berada dalam medan magnet, berarti elektron bergerak dalam medan magnet. Akibatnya elektron mendapat gaya ke arah tertentu. Arah gaya ini dapat ditentukan dengan kaidah tangan kiri, yaitu dengan menggunakan tiga jari tangan kiri yang disusun saling tegak lurus satu sama lain. Ibu jari menunjukkan arah gaya, telunjuk menunjukkan arah medan magnet, dan jari tengah menunjukkan arah gerak. Arah medan magnet adalah menembus bidang gambar, arah gerak adalah ke kanan, maka arah gaya adalah dari titik b ke a. Karena elektron bermuatan negatif maka elektron mendapat gaya dengan arah dari a ke b.

Elektron dalam batang logam bergerak dari a ke b karena adanya gaya seperti yang dijelaskan di atas. Ini berarti bahwa ada arus sebesar i dalam batang dengan arah dari b ke a. Arah arus merupakan kebalikan dari arah gerak elektron bebas. Adanya arus i dalam batang logam yang berada dalam medan magnet B menyebabkan batang mendapat gaya sebesar,

$$F = ilB \quad (\text{gaya Lorentz})$$

l adalah panjang batang logam. Dengan menggunakan kaidah tangan kiri seperti di atas diperoleh arah gaya F yaitu ke kiri, berlawanan dengan arah gerak batang.

Untuk menggerakkan batang ab dengan kecepatan konstan diperlukan kerja (usaha), atau diberikan energi pada sistem. Besar energi yang diberikan pada sistem adalah

$$W = F x$$

x adalah perpindahan batang ab ke arah kanan dengan kecepatan v dalam waktu t . Besar perpindahan adalah $x = vt$. Daya (P') yang diberikan pada sistem adalah,

$$P' = \frac{W}{t} = \frac{Fx}{t} = \frac{Fvt}{t} = Fv = ilBv$$

Dengan adanya arus i dalam kawat U berarti bahwa gerak batang ab menimbulkan ggl sebesar E . Bila ggl E menyebabkan arus i maka sumber ggl harus mentransfer energi ke dalam rangkaian dengan daya sebesar

$$P = E i$$

Daya untuk keperluan ini berasal dari energi yang diberikan untuk menggerakkan batang ab , yaitu P' . Sesuai dengan hukum kekekalan energi maka daya P' yang diberikan sama dengan daya P yang digunakan untuk menimbulkan arus i .

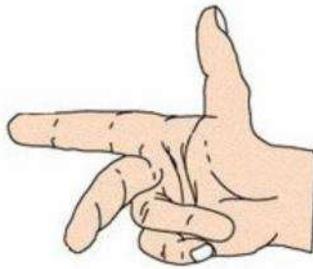
Diperoleh $E i = ilBv$

atau $E = lBv$

Gaya gerak listrik ini disebut ggl induksi karena ggl terinduksi oleh medan magnet. Tanda ggl E adalah positif karena arus dalam loop kawat menimbulkan induksi magnet baru yang searah dengan induksi magnet B yang sudah ada. Perhatikan kembali gambar. Arus dalam loop kawat searah dengan putaran jarum jam. Arus ini menimbulkan induksi magnet yang berarah masuk menembus bidang gambar, searah dengan induksi magnet yang sudah ada. Cara untuk menentukan arah induksi magnet ini adalah dengan aturan putaran sekrup. Arah putaran sekrup menunjukkan arah arus, arah perpindahan sekrup menunjukkan arah induksi magnet.

Cara lain untuk menentukan arah arus induksi, yaitu dengan menggunakan tiga jari tangan kanan yang disusun saling tegak lurus, dengan ketentuan sebagai berikut:

1. Ibu jari sebagai penunjuk arah gerakan.
2. Telunjuk sebagai penunjuk arah medan magnet.
3. Jari tengah sebagai penunjuk arah arus induksi.



Gambar 72. Kaidah Jari Tangan Kanan

Perubahan luas loop akibat pergerakan batang ab dapat ditentukan sebagai berikut: Misalkan batang ab berpindah sejauh dx dalam waktu dt , maka $v = dx / dt$

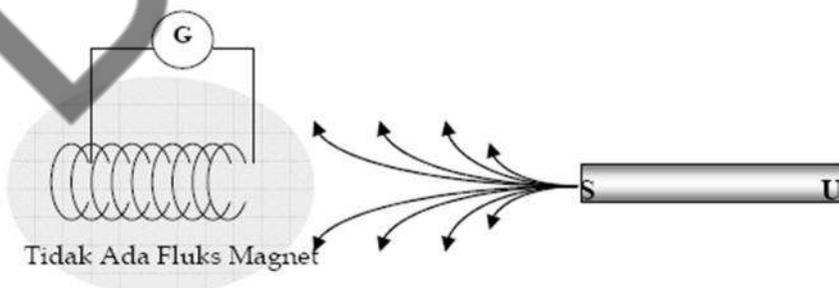
Dari persamaan $E = IBv$ diperoleh $E = IB dx / dt$ atau $E = B dA / dt$ $dx = dA / dt$ adalah perubahan luas loop.

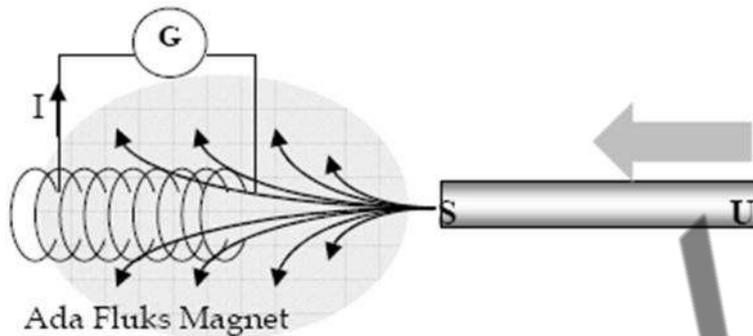
Bila batang bergerak ke kanan maka luas loop berkurang, sehingga dA/dt bertanda negatif, jadi

$$E = - B dA/dt \quad B dA \text{ merupakan perubahan fluks } d\phi$$

$$E = - d\phi / dt$$

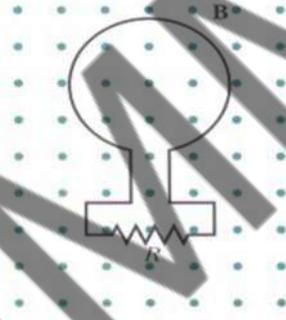
Persamaan ini disebut hukum induksi Faraday. Hukum induksi Faraday menyatakan bahwa ggl induksi di dalam sebuah rangkaian adalah sama dengan kecepatan perubahan fluks yang melalui rangkaian tersebut. Tanda negatif dalam hukum induksi Faraday dapat dijelaskan dengan hukum Lenz, yang menyatakan bahwa arus induksi akan timbul dalam arah yang sedemikian rupa sehingga arah tersebut melawan perubahan yang menghasilkannya.





Gambar 73. Proses Timbulnya Arus Induksi

Contoh 1



Gambar 74. Loop Kawat Berbentuk Lingkaran Dalam Medan Magnet

Dalam gambar 74. fluks magnet yang melalui loop yang tegak lurus pada bidang loop adalah berubah menurut persamaan $\phi = 6 t^2 + 7 t + 1$, dimana ϕ dalam miliweber dan t dalam detik. Arah fluks menembus bidang gambar. Berapa besar ggl induksi di dalam loop pada saat $t = 2$ detik dan kemanakah arah arus yang melalui R?

Solusi:

Menurut hukum induksi Faraday,

$$\begin{aligned}
 E &= - d\phi / dt \\
 &= - d(6 t^2 + 7 t + 1) / dt \\
 &= -(12 t + 7) \\
 &= -12 t - 7
 \end{aligned}$$

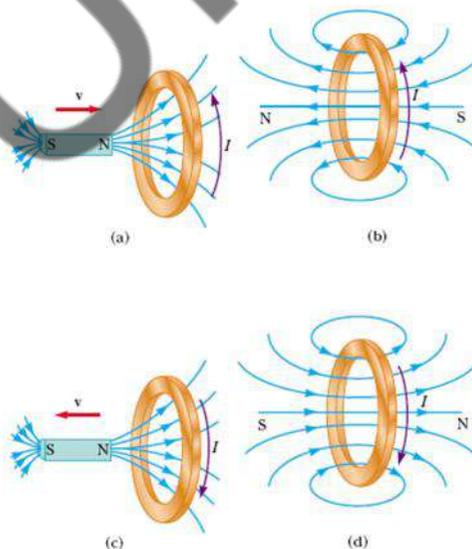
Untuk $t = 2$ maka $E = -12(2) - 7 = -31 \text{ mV}$

E bertanda negatif, berarti arus induksi menimbulkan medan magnet yang berlawanan dengan medan yang sudah ada. Medan magnet yang baru ini berarah keluar bidang gambar. Berarti arah arus dalam loop adalah berlawanan dengan arah putaran jarum jam. Dengan menggunakan aturan putaran sekrup, dapat ditentukan bahwa arah induksi magnet yang ditimbulkan oleh arus ini adalah keluar bidang gambar, yaitu arah perpindahan sekrup karena diputar ke kiri. Jadi arah arus induksi yang melalui R adalah dari titik a ke b.

C. Hukum Lenz

Tanda negatif di dalam hukum induksi Faraday dapat dijelaskan dengan hukum Lenz. Pada tahun 1834, Heinrich Friedrich Lenz menyatakan bahwa arus induksi akan timbul dalam arah yang sedemikian rupa sehingga menimbulkan sesuatu yang arahnya melawan perubahan yang menghasilkannya. Pernyataan ini dikenal dengan hukum Lenz.

Untuk lebih mudah memahami hukum Lenz, tinjau sebuah loop dan magnet batang seperti pada gambar 75.

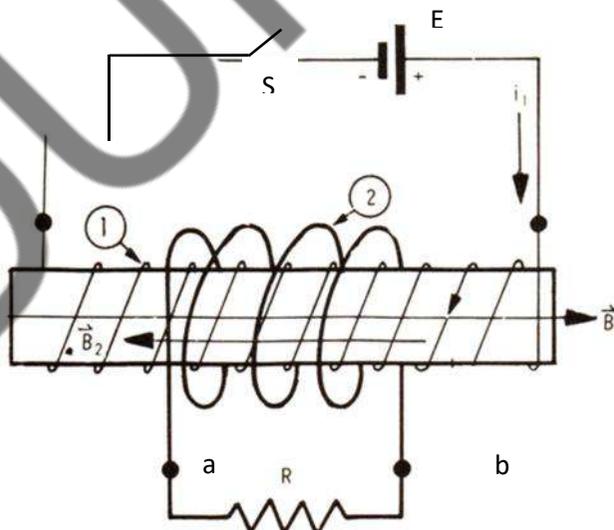


Gambar 75. Gambar Untuk Menjelaskan Hukum Lenz

Bila kutub U magnet batang digerakkan menuju loop kawat, maka fluks magnet yang menembus loop kawat bertambah. Menurut hukum Lenz, arus induksi dalam loop harus menimbulkan medan magnet yang arahnya berlawanan dengan pertambahan fluks magnet dalam loop yang disebabkan oleh magnet batang yang bergerak menuju loop. Jadi medan yang ditimbulkan oleh arus induksi harus berarah ke kanan, melawan arah gerak magnet. Dengan menggunakan aturan putaran sekrup, dapat ditentukan arah arus dalam loop kawat. Dilihat dari kutub U magnet, arah medan adalah menuju kutub U, berarti arah arus dalam loop berlawanan dengan arah putaran jarum jam.

Sebaliknya bila magnet batang digerakkan menjauhi loop maka fluks yang menembus loop akan berkurang. Arus induksi dalam loop haruslah menimbulkan medan magnet yang melawan berkurangnya fluks tersebut. Jadi medan ini berarah ke kiri, berlawanan dengan arah gerak magnet. Dengan cara yang sama seperti di atas, diperoleh arah arus induksi dalam kawat, yaitu searah dengan arah putaran jarum jam.

Contoh 2.



Gambar 76. Gambar Untuk Contoh 2

Pada gambar 76. terlihat bahwa dua kumparan berada pada satu inti. Kumparan pertama dihubungkan dengan baterai E dan saklar S. Kumparan kedua dihubungkan dengan tahanan R. Kemanakah arah arus induksi, jika ada, yang melalui tahanan R:

1. Segera setelah saklar S ditutup (ON).
2. Beberapa waktu setelah saklar S ditutup.
3. Segera setelah saklar S dibuka (OFF).

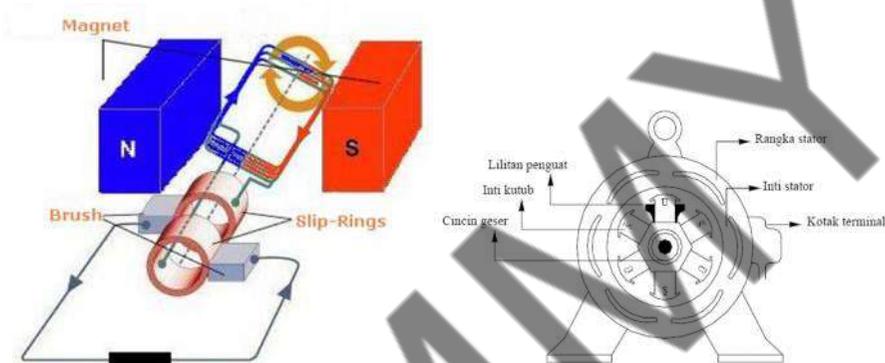
Solusi

1. Pada saat saklar terbuka tidak ada medan magnet dalam kumparan. Segera setelah saklar ditutup, medan magnet B_1 timbul dalam kumparan 1 dengan arah ke kanan (gunakan aturan putaran sekrup). Berarti dalam kumparan timbul perubahan medan magnet dari tidak ada menjadi ada. Akibatnya pada kumparan kedua timbul arus induksi. Arus induksi ini menimbulkan medan magnet yang baru (B_2) dengan arah ke kiri, berlawanan dengan penambahan (munculnya) medan magnet dalam kumparan pertama. Hal ini berdasarkan hukum Lenz, medan magnet dalam kumparan kedua berarah ke kiri, maka arah arus dalam tahanan R adalah dari titik b ke titik a.
2. Beberapa saat setelah saklar ditutup, ternyata tidak terjadi perubahan fluks magnet, karena arus yang melalui kumparan 1 adalah konstan. Dengan kata lain, medan magnet pada kumparan adalah tetap. Menurut hukum induksi Faraday, dalam kumparan kedua tidak ada arus induksi.
3. Segera setelah saklar dibuka, medan magnet dalam kumparan hilang. Berarti dalam kumparan terdapat perubahan medan magnet dari ada menjadi tidak ada, sehingga pada kumparan kedua timbul arus induksi. Arus induksi ini menimbulkan medan magnet yang baru dengan arah ke kanan, melawan kehilangan medan magnet dalam kumparan 1. Hal ini berdasarkan hukum Lenz, medan magnet dalam kumparan 2 berarah ke kanan, maka arah arus dalam tahanan R adalah dari titik a ke titik b.

D. Prinsip Kerja Generator Listrik

Prinsip kerja sebuah generator atau pembangkit tenaga listrik

adalah penggunaan hukum induksi Faraday. Menurut hukum induksi Faraday, gaya gerak listrik (ggl) induksi dalam loop kawat atau konduktor akan timbul bila ada gerakan relatif antara loop kawat dengan medan magnet. Untuk mendapatkan ggl induksi yang lebih besar dan kontinu maka dibuatlah suatu alat yang dinamakan generator listrik. Konstruksi sebuah generator listrik sederhana dapat dilihat pada gambar 77.



Gambar 77. Prinsip Kerja dan Konstruksi Generator Listrik

Pada gambar 77 dapat dilihat bahwa loop kawat (persegi panjang) diletakkan pada poros yang tegak lurus pada fluks magnet, mewakili lilitan kumparan yang disebut juga sebagai rotor. Dalam praktiknya, kumparan ini dililitkan pada sebuah silinder besi yang disebut armatur. Medan magnet dapat berasal dari magnet permanen atau elektromagnet. Perubahan fluks magnet yang menembus bidang loop abcd diperoleh dengan cara memutar loop pada porosnya. Bila rotor diputar maka terjadi perubahan fluks magnet yang menembus bidang loop kawat menurut persamaan, $\phi = \phi_m \cos \theta$. ϕ_m adalah fluks maksimum, θ adalah sudut antara normal bidang loop dengan arah medan magnet. Bila loop diputar dengan kecepatan sudut tetap sebesar ω , maka $\theta = \omega t$ sehingga fluks magnet berubah dengan waktu, $\phi = \phi_m \cos \omega t$.

Menurut hukum induksi Faraday, di dalam loop kawat terjadi

$$E = - \frac{dW}{dt} = - \frac{d(W_m \cos \omega t)}{dt}$$

ggl induksi yang besarnya adalah,

$$\begin{aligned} &= - (-\phi_m \omega \sin \omega t) \\ &= \phi_m \omega \sin \omega t \\ &= E_m \sin \omega t \end{aligned}$$

E maksimum akan dicapai bila $\omega t = 90^\circ$ atau $\sin \omega t = 1$, sehingga $E_m = \phi_m \omega$. Untuk N lilitan kumparan diperoleh, $E_m = N \phi_m \omega$ atau $E_m = N B A \omega$, karena $\phi_m = B A$. Jadi ggl induksi ini akan menghasilkan arus induksi bila ujung-ujung loop dihubungkan dengan rangkaian luar melalui terminal generator. Terminal generator berupa sikat yang selalu bergeser dengan cincin C_1 dan C_2 (*slip-ring*) pada saat kumparan berputar.

Contoh 3

1200 rpm dalam medan magnet homogen sebesar 0,05 T dengan sumbu yang tegak lurus pada arah medan magnet. Bila luas rata-rata bidang kumparan adalah 5000 mm, tentukanlah:

1. frekuensi
2. periode
3. ggl maksimum

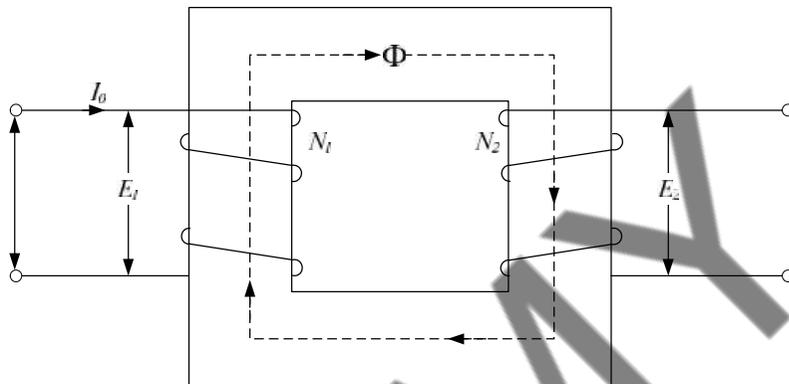
Solusi

1. Frekuensi = jumlah putaran / detik
 $= 1200 / 60$ rps
 $= 20$ Hz
2. Periode dapat dihitung dengan rumus,
 $T = 1/f = 1/20 = 0,05$ detik
3. Gaya gerak listrik maksimum dapat dihitung dengan rumus,
 $E_m = N B A \omega$
 $= 500 \times 0,05 \times 0,005 \times 2 \times 3,14 \times 20 = 15,71$ volt

E. Transformator

Transformator digunakan untuk mengubah nilai tegangan dan arus bolak balik (AC) berdasarkan induksi elektromagnetik. Transformator terdiri atas dua kumparan yang disebut sebagai kumparan primer dan kumparan sekunder. Kedua

kumparan ditempatkan pada inti yang terbuat dari plat besi yang berlapis. Bagan dari sebuah transformator dapat dilihat pada gambar 78.



Gambar 78. Bagan Transformator

Tegangan input diberikan pada kumparan primer terbentuk fluks magnet $\phi(t)$. Fluks magnet ini merupakan fluks yang berubah terhadap waktu, karena tegangan input berupa tegangan sinusoida. Tegangan primer sama dengan ggl induksi E_1 yang timbul karena perubahan fluks magnet dalam kumparan.

$$E_1 = - N_1 d\phi / dt$$

Jika inti transformator terbuat dari bahan magnet dengan permeabilitas yang tinggi maka sebagian besar fluks akan terkumpul pada inti transformator. Akibatnya fluks yang masuk pada kumparan sekunder sama dengan fluks pada kumparan primer. Jika jumlah lilitan kumparan sekunder adalah N_2 maka ggl induksinya,

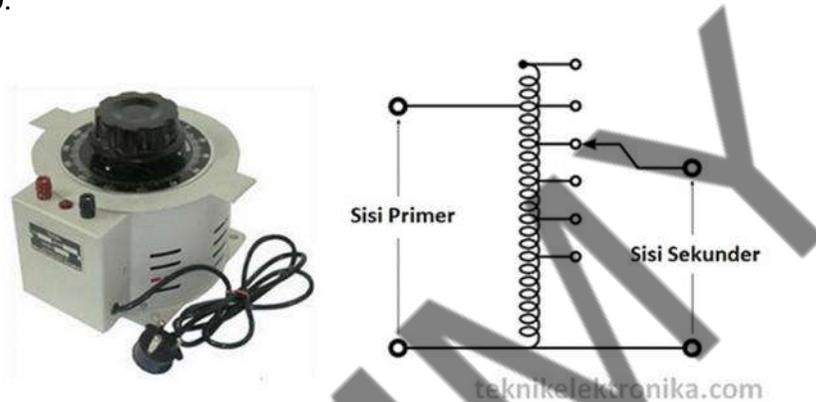
$$E_2 = - N_2 d\phi / dt$$

Dari kedua persamaan di atas diperoleh,

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Perbandingan jumlah lilitan kumparan sekunder dan primer N_2 / N_1 disebut perbandingan transformasi (n).

Jika $n > 1$ maka tegangan sekunder lebih besar dari tegangan primer, transformator ini disebut transformator *step up*. Jika $n < 1$ maka tegangan sekunder lebih kecil dari tegangan primer, transformator ini disebut transformator *step down* seperti pada gambar 79. Berbagai jenis transformator dapat dilihat pada gambar 80.



Gambar 79. Contoh Transformator *Step Down*





Gambar 80. Jenis-Jenis Transformator

1. Efisiensi Transformator

Daya yang diberikan pada kumparan primer adalah $P_1 = E_1 I_1$, pada kumparan sekunder adalah $P_2 = E_2 I_2$. Jika daya yang hilang dari sebuah transformator diabaikan maka daya primer sama dengan daya sekunder. Dengan kata lain, efisiensi transformator adalah 100%. Efisiensi transformator dapat ditentukan dengan persamaan,

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

2. Daya yang hilang pada transformator

Daya hilang pada inti transformator ada dua macam, yaitu:

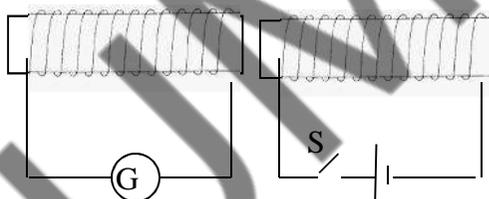
- a. Daya hilang histeris
- b. Daya hilang oleh arus pusar.

Daya hilang histeresis disebabkan oleh sinusoida, hingga dalam kurva $B(H)$ medan H berubah dalam siklus. Karena inti bersifat ferromagnetik, rapat fluks B akan berubah sesuai dengan kurva histeresis. Untuk perubahan H dalam satu siklus, daya yang hilang sebanding dengan luas kurva histeresis. Agar daya hilang histeresis sekecil mungkin harus digunakan inti transformator dengan kurva histeresis sekurus mungkin. Daya

hilang oleh arus pusar terjadi karena inti bersifat konduktor, dengan suatu tahanan. Arus pusar yang terjadi mengakibatkan daya hilang pada inti transformator sebesar $i^2 R$. Arus pusar terjadi karena fluks induksi magnet yang berubah dengan waktu. Sesuai dengan hukum induksi Faraday dan hukum Lenz, dalam logam terjadi arus yang berputar sehingga melawan perubahan fluks. Arus ini disebut arus pusar. Daya hilang oleh arus pusar diatasi dengan membuat inti transformator dari susunan plat tipis. Setiap plat dibatasi dengan isolator agar arus pusar terbatas pada plat.

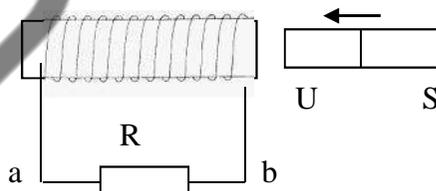
F. Soal Latihan

1.



Galvanometer G akan menunjukkan adanya arus induksi hanya pada saat saklar S ditutup (ON) atau dibuka (OFF), mengapa demikian? Jelaskan dengan menggunakan hukum Faraday.

2.



Kutub U magnet digerakkan menuju salah satu ujung kumparan. Arah arus induksi yang melalui tahanan R adalah

dari titik a ke b atau dari titik b ke a? Jelaskan dengan menggunakan hukum Lenz.

3. Jelaskan prinsip kerja generator listrik.
4. Jelaskan prinsip kerja transformator.
5. Transformator hanya dapat bekerja pada listrik AC, tidak dapat digunakan untuk listrik DC, mengapa demikian?
Jelaskan dengan menggunakan hukum induksi Faraday. (Tegangan atau arus AC berubah setiap saat, tegangan atau arus DC tetap/ konstan).
6. Sebuah loop kawat logam yang jari-jarinya 1 m diputar pada sumbu yang tegak lurus medan magnet. Kecepatan sudut putaran adalah 2 putaran / detik. Bidang putaran tegak lurus pada medan magnet homogen 0,5 T . Berapa besar ggl induksi yang timbul?
7. Kumbaran berbentuk persegi panjang berukuran 12 x 25 cm terdiri atas 50 lilitan dan berada dalam medan magnet sebesar 2 T. Kumbaran diputar dari posisi 45° sampai 90° dalam waktu 0,1 detik. Berapa ggl induksi rata-rata yang timbul pada kumbaran?
8. Sebuah loop kawat berbentuk persegi panjang dengan ukuran 15 cm x 10 cm, berputar dengan kecepatan sudut 900 rpm pada sumbu panjangnya yang tegak lurus pada medan magnet homogen 5 wb/m^2 . Tentukan persamaan ggl induksi dan ggl induksi pada saat $t = 5$ detik.

BAB 7

GAYA MAGNET

A. Pendahuluan

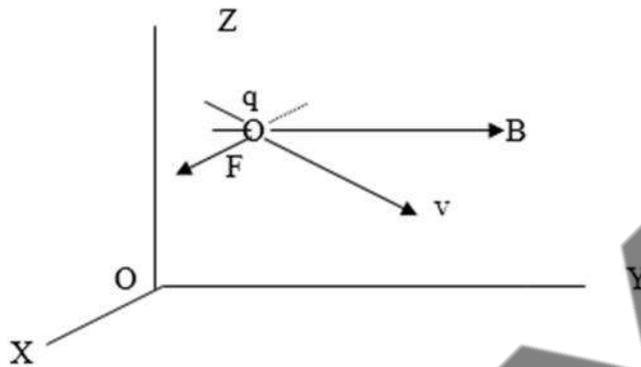
Dalam bab ini akan dibahas gaya magnet pada muatan yang bergerak, gaya magnet pada kawat yang berarus listrik, dan gaya pada kumparan berarus yang merupakan prinsip kerja motor listrik. Medan magnet melakukan gaya pada muatan bergerak, pada kawat berarus, atau momen gaya pada batang magnet. Suatu muatan listrik yang diam terhadap medan magnet tidak mendapat gaya di dalam medan magnet. Gaya magnet digunakan dalam motor listrik, meter kumparan putar, alat pemercepat partikel (aselerator), spektrometer massa, mikroskop elektron, dan sebagainya.

B. Gaya Magnet Pada Muatan Listrik Bergerak

Muatan listrik yang bergerak dalam medan magnet akan mendapat gaya yang disebut dengan gaya Lorentz. Peristiwa ini dimanfaatkan orang untuk membuat berbagai macam alat, misalnya alat untuk menggerakkan elektron pada layar TV, alat untuk mengukur massa atom berbagai isotop, alat untuk mempercepat partikel bermuatan (siklotron) dan sebagainya.

Partikel bermuatan yang bergerak dalam medan magnet dengan kerapatan fluks B , diperoleh secara eksperimental, mengalami gaya yang besarnya berbanding lurus dengan perkalian dari besar muatan q , kecepatan v , kerapatan fluks B dan sinus sudut antara v dengan B . Arah gayanya tegak lurus pada v dan B dan dinyatakan oleh vektor satuan dari $v \times B$. Gaya tersebut dapat dinyatakan sebagai,

$$F = qv \times B.$$



Gambar 81. Muatan q bergerak dengan kecepatan v dalam medan magnet B

Sebuah muatan q bergerak dengan kecepatan v dalam medan magnet B dengan arah seperti pada gambar. Arah v membentuk sudut θ terhadap arah B . Gaya yang bekerja pada muatan q adalah,

$$F = qv \times B$$

atau $F = qvB \sin \theta$

Arah F sama dengan arah gerak perpindahan sekrup bila diputar dari v ke B . Ada cara lain untuk menentukan arah gaya F ini, yaitu dengan menggunakan tiga jari tangan kiri yang disusun saling tegak lurus, dengan ketentuan sebagai berikut:

1. Ibu jari sebagai penunjuk arah gaya F .
2. Telunjuk sebagai penunjuk arah medan magnet B .
3. Jari tengah sebagai penunjuk arah kecepatan v .

Gaya pada partikel yang ditimbulkan oleh kombinasi medan listrik dan medan magnet dapat diperoleh dengan superposisi, $F = q(E + v \times B)$. Persamaan ini dikenal sebagai persamaan gaya Lorentz dan pemecahannya diperlukan untuk menentukan orbit elektron dalam magnetron, lintasan proton dalam siklotron, karakteristik plasma dalam generator magneto hidro dinamik (MHD), atau pada umumnya dalam persoalan gerak partikel dalam kombinasi medan listrik dan medan magnet.

Contoh 1

Sebuah partikel bermuatan $q = -2 e$ masuk dengan kecepatan $v = 10^8 (i + j) \text{ m/s}$ ke dalam medan magnet $B = i 0,5 \text{ T}$. Tentukan gaya yang bekerja pada muatan tersebut. Vektor satuan i adalah

pada arah sumbu X, dan \hat{j} adalah vektor satuan pada arah sumbu Y.

Solusi

Gaya yang bekerja pada muatan q yang bergerak dengan kecepatan v dalam medan magnet B adalah,

$$\begin{aligned} F &= q v \times B \\ &= (-2 e) (\hat{i} + \hat{j}) 10^8 \times (\hat{i} 0,5) N \quad (N = \text{newton}) \\ &= -e 10^8 (\hat{i} \times \hat{i} + \hat{j} \times \hat{i}) N = k 10^8 e N \end{aligned}$$

k merupakan vektor satuan pada arah sumbu Z.

Aturan perkalian silang: $\hat{i} \times \hat{i} = 0$ $\hat{j} \times \hat{i} = -\hat{k}$

C. Gaya Magnet Pada Konduktor Berarus Listrik

Kerapatan arus (J) yang melalui suatu konduktor dinyatakan dalam kecepatan (v) dari kerapatan ruang (ρ),

$$J = \rho v \quad \text{maka } dq = \rho dv$$

$$\text{sehingga } dF = \rho dV v \times B$$

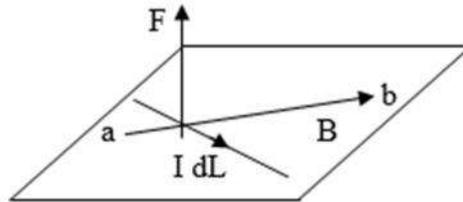
$$\text{atau } dF = J \times B dV$$

$J dV$ dapat ditafsirkan sebagai unsur arus diferensial, yaitu $J dV = I dL$.

$$\text{Jadi } dF = I dL \times B \quad \text{atau } F = \int I dL \times B = -I \int dL \times B$$

Untuk konduktor lurus yang berarus dan berada dalam medan magnet homogen diperoleh, $F = I L \times B$ atau $F = ILB \sin \theta$

θ menyatakan sudut antara arah arus dan arah kerapatan fluks magnet.



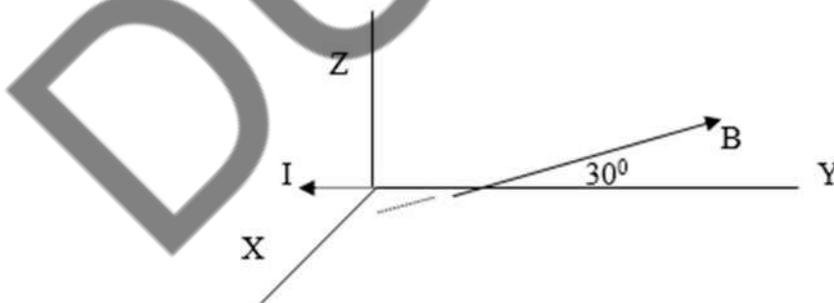
Gambar 82. Kawat ab berarus I berada dalam medan magnet B

Arus I melalui sebuah kawat lurus ab dan berada dalam medan magnet homogen B dengan arah seperti pada gambar. Arah arus dalam kawat ab membentuk sudut θ terhadap arah medan magnet B. Unsur arus diferensial $I dL$, atau arus yang melalui sebagian kecil panjang kawat (elemen panjang kawat) akan mengalami gaya sebesar dF . Dengan menggunakan persamaan Lorentz dapat dihitung besar gaya yang bekerja pada kawat ab. Arah gaya sama dengan arah perpindahan sekrup bila diputar dari $I dL$ ke B.

Ada cara lain untuk menentukan arah gaya F ini, yaitu dengan menggunakan tiga jari tangan kiri yang disusun saling tegak lurus, dengan ketentuan sebagai berikut:

1. Ibu jari sebagai penunjuk arah gaya F.
2. Telunjuk sebagai penunjuk arah medan magnet B.
3. Jari tengah sebagai penunjuk arah arus listrik I.

Contoh 2



Gambar 83. Gambar Untuk Contoh 2

Suatu kawat yang panjang berarus 2 A dengan arah seperti pada gambar dan terletak pada sumbu Y. Kawat berada dalam medan magnet dengan rapat fluks $B = 3T$ dan membentuk sudut

30° dengan sumbu Y positif. Bila medan magnet hanya berpengaruh pada kawat sepanjang 20 cm, hitunglah gaya pada kawat. Misalkan arah medan magnet B ada pada bidang YZ.

Solusi:

Karena kawat lurus dan medan magnet B homogen maka besar gaya magnet adalah,

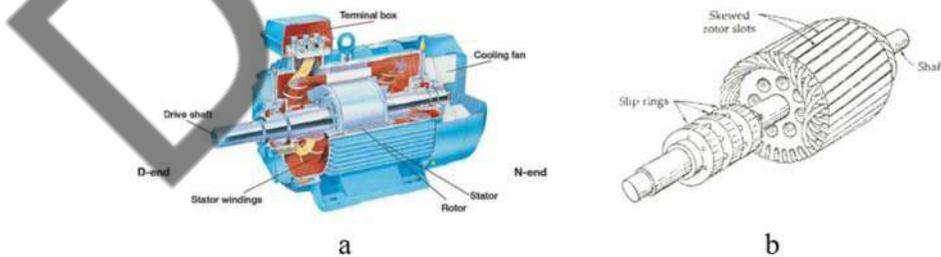
$$F = ILB \sin \theta \quad (\theta \text{ adalah sudut antara arah I dan arah B})$$

$$= 2 \times 0,2 \times 3 \sin 150^\circ = 0,6 \text{ N}$$

Arah gaya F adalah searah perpindahan sekrup bila diputar dari arah I ke B, yaitu pada arah sumbu X negatif. Jadi gaya pada kawat $F = -i 0,6 \text{ N}$.

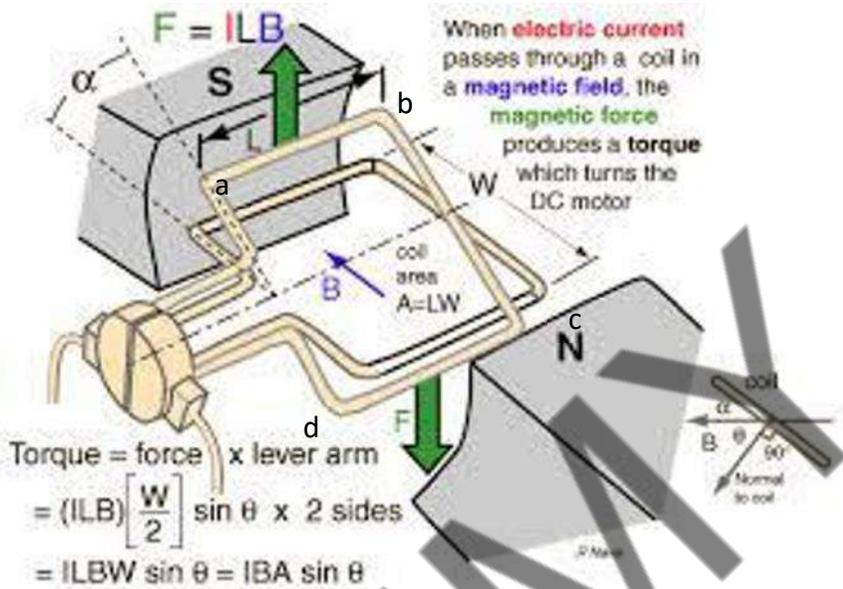
D. Prinsip Kerja Motor Listrik

Sebuah loop kawat yang dapat berputar pada sumbunya diberi arus dan berada dalam medan magnet. Sisi-sisi loop kawat akan mengalami gaya yang akan mengakibatkan loop kawat berputar pada sumbunya. Gaya ini akan lebih besar bila dibuat beberapa lilitan loop kawat sehingga membentuk sebuah kumparan. Sistem seperti ini digunakan pada motor listrik. Motor listrik digunakan secara luas, mulai dari motor untuk mainan anak, untuk mesin jahit, kipas angin, dan sebagainya, sampai pada alat untuk menggerakkan mesin di pabrik.



Gambar 84. (a) Konstruksi Motor Listrik, (b) Rotor Sangkar

<https://www.plcdroid.com/2019/03/motor-induksi.html>



Gambar 85. Prinsip Kerja Motor Listrik

www.railelectrica.com

Untuk lebih sederhana kita tinjau sebuah lilitan kumparan saja dari rotor sangkar (gambar 84.b) yang digambarkan dengan sebuah loop kawat abcd dalam gambar 85. Loop kawat dapat berputar pada sumbu yang tegak lurus pada medan magnet B dan diberi arus melalui a, b, c, dan d. Sisi ab dan sisi cd mengalami gaya yang sama besarnya yaitu,

$$F_{ab} = F_{cd} = ILB \sin \theta$$

Karena $L = ab = cd$ dan $\theta = 90^\circ$ maka

$$F_{ab} = F_{cd} = I(ab) B$$

Sedangkan arah gaya F_{ab} dan F_{cd} berlawanan. Akibatnya kedua gaya ini membentuk momen gaya yang akan memutar loop kawat pada sumbu S. Besar momen gaya adalah

$$\tau = F_{ab} (bc) \sin \alpha$$

α menyatakan sudut antara arah normal bidang loop kawat dan medan magnet B. Bila kita masukkan harga F_{ab} ke dalam persamaan di atas diperoleh momen gaya,

$$\tau = I (ab) B (bc) \sin \alpha$$

$$\tau = IAB \sin \alpha$$

$A = (ab)(bc)$ yaitu luas loop kawat abcd.

Bila loop kawat berbentuk sebuah kumparan yang terdiri atas N lilitan kawat maka

$$\tau = NIAB \sin \alpha$$

atau

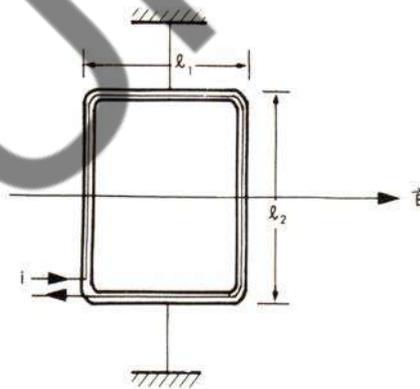
$$\tau = NIA \times B$$

Arah vektor momen gaya ialah dari a ke b . A adalah vektor luas loop yang mempunyai arah normal bidang loop sama dengan perpindahan sekrup bila diputar menurut arah arus dalam loop. Persamaan momen gaya ternyata berlaku umum, tidak tergantung pada bentuk loop kawat. Besaran NIA disebut momen dipol magnet dan ditulis sebagai

$$m = NIA \text{ sehingga } \tau = m \times B$$

Rumus momen gaya ini juga berlaku pada sebatang magnet permanen, misalnya jarum kompas di dalam suatu medan magnet.

Contoh 3



Gambar 86. Gambar untuk contoh 3 (Sutrisno, 1983)

Sebuah kumparan berbentuk segi empat ($l_1 = 10$ cm dan $l_2 = 20$ cm) dipasang vertikal dengan tali tegang, seperti pada gambar. Elastisitas tali diabaikan. Medan magnet B sebesar $0,05$ T mempunyai arah sumbu X positif. Kumparan terdiri atas 20 lilitan

dan berarus $I = 10 \text{ A}$.

Hitunglah:

1. momen dipol magnet kumparan
2. momen gaya pada kumparan, bila bidang kumparan sejajar dengan B
3. momen gaya pada kumparan, bila bidang kumparan membentuk sudut 60° terhadap arah B .

Solusi:

1. Bila ada N lilitan kawat dialiri arus I maka momen dipol magnet adalah,

$$\begin{aligned} m &= NIA \\ &= 20 \times 10 \times (0,1 \times 0,2) = 4 \text{ Am}^2. \end{aligned}$$

2. b. Momen gaya,

$$\begin{aligned} \tau &= m B \sin \theta \\ &= 4 \times 0,05 \sin 90^\circ \\ &= 0,2 \text{ Nm} \end{aligned}$$

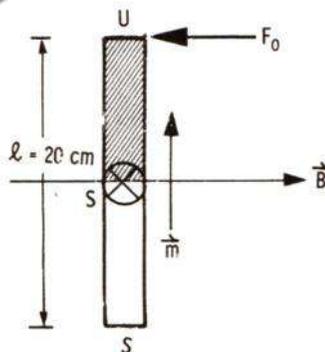
θ adalah sudut antara normal (tegak lurus) bidang kumparan dengan arah B . Bila bidang kumparan searah B maka normal bidang kumparan haruslah tegak lurus pada B , sehingga $\theta = 90^\circ$.

3. Bila bidang kumparan membentuk sudut 60° terhadap arah B maka sudut antara m dan B adalah 30° .

Jadi momen gayanya,

$$\begin{aligned} \tau &= m B \sin \theta \\ &= 4 \times 0,05 \sin 30^\circ = 0,1 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Contoh 4



Gambar 87. Gambar untuk contoh 4 (Sutrisno, 1983)

Sebuah magnet batang sepanjang 20 cm berada dalam medan magnet 0,5 T. Magnet batang tersebut dipasang tegak lurus pada arah medan magnet dan dapat berputar pada sumbu S yang tegak lurus bidang gambar. Untuk mempertahankan magnet pada posisi ini, pada kutub U harus diberi gaya $F_0 = 0,5$ N. Hitunglah momen dipol magnet batang ini.

Solusi:

Bila momen dipol magnet batang adalah m , momen gaya yang disebabkan oleh medan magnet ialah,

$$\tau = m B \sin \theta \quad (\theta = 90^\circ)$$

Momen gaya ini harus sama dengan momen oleh gaya F_0 yaitu τ_0 .

$$\text{Jadi } \tau_0 = F_0 (l / 2) = 0,5 \text{ N} \times 0,1 \text{ m} = 0,05 \text{ Nm.}$$

$$\tau = m B$$

$$0,05 = m \times 0,5$$

$$m = 0,1 \text{ Am}^2$$

E. Penggunaan Motor Listrik dalam Teknik

1. Tower Crane

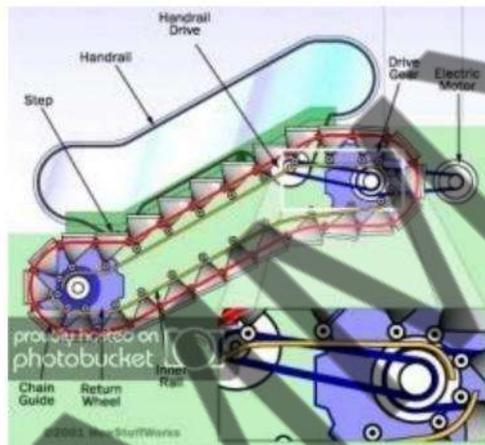
Tower Crane adalah alat modern yang digunakan untuk mengangkat material konstruksi pada pembangunan gedung tinggi. *Tower Crane* ditanam dalam tanah sehingga dapat berdiri dengan kokoh. Pergerakan *Tower Crane* untuk mengangkat material konstruksi menggunakan motor listrik.



Gambar 88. *Tower Crane*

2. Escalator

Escalator adalah alat transportasi vertikal untuk mengangkut orang dari lantai dasar ke lantai yang lebih tinggi dalam bangunan bertingkat. *Escalator* terdiri atas anak tangga terpisah yang dapat bergerak ke atas dan ke bawah mengikuti rel atau rantai yang digerakkan oleh motor listrik.



Gambar 89. *Escalator*

3. Moving walk

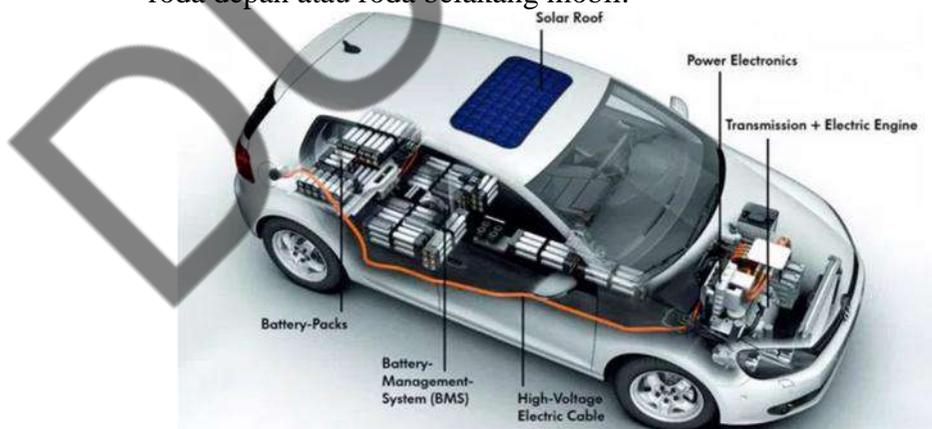
Moving walk adalah alat angkut orang dan barang dari suatu tempat ke tempat yang lain pada satu lantai atau beda level dan bergerak sesuai dengan prinsip *escalator*. *Moving walk* adalah pengembangan dari *escalator*, bisa dipasang pada posisi horizontal atau miring dengan kemiringan maksimum 20° . *Moving walk* dijumpai dalam bandara internasional yang luas untuk meringankan beban orang yang membawa barang dengan jarak yang cukup jauh. *Moving walk* digerakkan oleh motor listrik.



Gambar 90. *Moving Walk*

4. Mobil listrik

Salah satu mobil listrik adalah mobil Tesla yang cukup populer dalam beberapa tahun terakhir ini. Komponen penting dari mobil listrik dapat dilihat pada gambar 91. Baterai mobil listrik (gambar 92.) disebut juga baterai Tesla (nama penemunya) dapat digunakan untuk menempuh perjalanan sampai 500 Km sekali pengisian baterai penuh. Mobil listrik Tesla menggunakan sistem pengereman regeneratif yang mengubah energi kinetik mobil menjadi energi kimia yang disimpan dalam baterai. Motor induksi berfungsi sebagai generator pada saat pengereman. Motor listrik dipasang pada roda depan atau roda belakang mobil.



Gambar 91. Mobil Listrik

<https://meisetio.com/2019/02/18/kupas-tuntas-cara-kerja-mobil-listrik/>



Gambar 92. Baterai Mobil Listrik

<https://meisetio.com/2019/02/18/kupas-tuntas-cara-kerja-mobil-listrik/>

5. Sepeda listrik

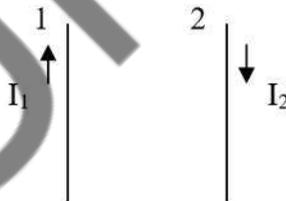
Sepeda listrik untuk aktivitas sehari-hari saat ini banyak digunakan. Sepeda listrik masih bisa dikayuh layaknya sepeda konvensional. Ketika malas mengayuh maka pengemudi bisa menggunakan *mode e-bike*. Sementara itu, jika ingin berolahraga maka bisa beralih ke *mode* konvensional. Komponen utama sepeda listrik adalah motor listrik dan baterai. Motor listrik untuk mengubah energi listrik menjadi tenaga kinetik sehingga sepeda mampu melaju sesuai dengan arahan pengemudinya. Baterai yang terdapat pada sepeda listrik menggunakan baterai lithium yang beraneka macam kapasitasnya.



Gambar 93. Komponen Sepeda Listrik
<https://kelistrikan.com/cara-kerja-sepeda-listrik/>

F. Soal Latihan

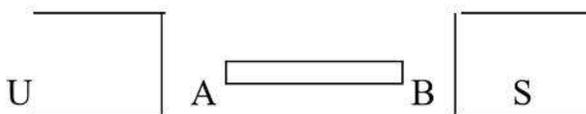
1.



Apakah kedua kawat konduktor (nomor 1 dan 2) yang berarus I_1 dan I_2 ini akan saling tarik menarik atau tolak menolak? Jelaskan dengan menggunakan hukum Biot-Savart untuk kawat lurus dan gaya Lorentz.

2. Jelaskan prinsip kerja motor listrik.

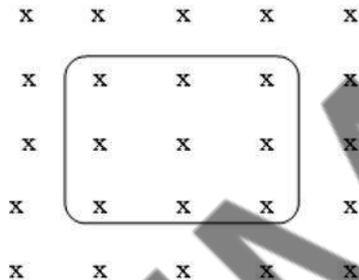
3.



Kemana arah gaya yang dialami oleh sisi loop kawat A?

4. Sebuah partikel bermassa 0,5 gram membawa muatan sebesar $2,5 \times 10^{-8}$ Coulomb. Kecepatan awal partikel 6×10^4 m/s. Berapakah besar dan arah medan magnet minimum yang dapat membuat partikel tersebut tetap bergerak dengan arah horizontal?
5. Elektron bergerak dalam lintasan berbentuk lingkaran dengan jari-jari 1,2 cm tegak lurus terhadap medan magnet yang homogen. Kecepatan elektron 10^6 m/s. Berapakah jumlah fluks magnet yang dilingkupi lintasan tersebut?

6.



Sebuah loop kawat berbentuk persegi panjang dengan ukuran 8×5 cm berarus 10 A dan berada dalam medan magnet homogen $0,15 \text{ Wb/m}^2$ dengan arah menembus bidang gambar. Bidang loop membentuk sudut 30° dengan arah medan magnet.

Hitunglah:

- a. Gaya pada masing-masing sisi yang panjang.
 - b. Momen gaya pada loop.
7. Kumparan motor listrik, bidangnya berbentuk persegi panjang yang berukuran $40 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$, terdiri atas 4000 lilitan, dan terletak dalam medan magnet homogen $4 \times 10^{-3} \text{ T}$. Pada saat bidang kumparan sejajar dengan medan magnet, terjadi momen gaya sebesar $8 \times 10^{-2} \text{ Nm}$.

Hitunglah:

- a. Arus listrik yang melalui kumparan
- b. Momen gaya pada saat bidang kumparan membentuk sudut 30° dengan medan magnet.

8. Sebuah elektron bergerak dengan kecepatan $V = (2 \times 10^6 i + 3 \times 10^6 j)$ m/s, memasuki medan magnet $B = (0,03 i - 0,15 j)$ T. Tentukan gaya yang bekerja pada elektron. (muatan elektron $q = -1,6 \times 10^{-19}$ C)
9. Sepotong kawat yang panjangnya 50 cm berarus listrik 0,5 i A, berada dalam medan magnet $B = (0,03 j + 0,01 k)$ T. Tentukan gaya yang bekerja pada kawat.

DAFTAR PUSTAKA

- Crowell, B. (1999). *Electricity and Magnetism*. California: Light and Matter.
- Crowell, B. (2006). *Conceptual Physics*. California: Light and Matter.
- Ezrailson, C., Margaret K. Zorn, Dinah Zike (2005). *Electricity and Magnetism*. Columbus: McGraw-Hill.
- Fishbane, P.M., Gasiorowicz, S., Thornton, S.T. (1993). *Physics for Scientists and Engineers*. New Jersey: Prentice Hall International, Inc.
- Giancoli, D.C. (1998). *Physics: Principles With Applications*. Fifth Edition. New Jersey: Prentice-Hall International, Inc.
- Gussow, M. (1983). *Schaum's Outline of Theory and Problems of Basic Electricity*. Columbus: McGraw-Hill.
- Halliday, D., Resnick, R., Silaban, P., Sucipto, E. (1991). *Fisika*. Jilid 2. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Serway, R.A., John W. Jewett (2004). *Physics for Scientists and Engineers*. California: Thomson Brooks.
- Sutrisno (1983). *Fisika Dasar: Listrik, Magnet, dan Termofisika*. Bandung: Penerbit ITB.
- Tipler, P.A., Prasetio, L., Adi, R.W. (1998). *Fisika untuk Sains dan Teknik*. Edisi ketiga. Jilid II. Jakarta: Erlangga.

TENTANG PENULIS



Prof. Dr. Usmeldi, M.Pd. adalah dosen Fisika di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang. Ia lahir di Kapau-Agam pada tanggal 10 September 1960. Setelah menamatkan pendidikannya di SMA Negeri 1 Bukittinggi pada tahun 1979 ia melanjutkan studi di IKIP Padang dan pada tahun 1983 ia memperoleh gelar Sarjana Pendidikan. Pada tahun 1995 ia memperoleh gelar Magister Pendidikan di IKIP Bandung. Pada tahun 2008 ia memperoleh gelar Doktor Pendidikan di Universitas Pendidikan Indonesia Bandung. Pada tahun 2021 ia memperoleh gelar Profesor dalam bidang ilmu Pendidikan Fisika di Universitas Negeri Padang. Sampai saat ini ia menjabat sebagai Kepala Laboratorium Fisika Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang. Berbagai penelitian dalam bidang pendidikan Fisika dan pendidikan IPA sudah ia laksanakan sejak tahun 2010 sampai sekarang yang didanai oleh PNBP Universitas Negeri Padang dan DRTPM Dikti. Buku yang pernah dihasilkan adalah Hukum Ohm pada tahun 1989 dan Metodologi Penelitian pada tahun 2017 yang diterbitkan dalam lingkungan sendiri.

RINGKASAN ISI BUKU

Buku Fisika Terapan dengan seri Listrik dan Magnet merupakan sarana untuk membantu mahasiswa dalam menemukan konsep, prinsip dan hukum-hukum fisika, mengembangkan kemampuan pemecahan masalah, sehingga diharapkan mahasiswa dapat mengimplementasi materi dalam buku ini dalam bidang teknologi dan kehidupan sehari-hari. Materi ajar yang dibahas dalam buku ini adalah listrik statis, gaya gerak listrik, arus listrik, tahanan konduktor, rangkaian tahanan, hukum dasar rangkaian, medan magnet, gaya gerak listrik induksi, dan gaya magnet.

Contoh-contoh penerapan fisika dalam bidang teknologi dan kehidupan sehari-hari disajikan dalam buku ini. Buku ini disusun dengan mempertimbangkan keterkaitan antara sains dan teknologi. Konsep dan sub konsep disajikan dengan bahasa yang sederhana disertai contoh soal untuk memudahkan mahasiswa memahami materi ajar yang diberikan. Selain itu disajikan soal latihan pada tiap akhir bab yang bertujuan untuk mengukur kemampuan mahasiswa secara mandiri pada setiap bab yang dibahas.

GLOSARIUM

| | |
|--------------------------------|--|
| Arus pusar | : Arus pusar yang terjadi pada inti transformator |
| Arus listrik | : Aliran muatan listrik (elektron) |
| Biot-Savart | : Ahli fisika yang menemukan besar medan magnet di sekitar kawat berarus listrik |
| Diamagnetik | : Bahan-bahan yang sedikit menolak garis gaya magnet |
| Efisiensi transformator | : Perbandingan daya <i>output</i> dan daya <i>input</i> pada sebuah transformator |
| Energi potensial elektrostatik | : Energi yang diperlukan untuk membawa muatan dari jarak tak hingga ke posisi akhirnya |
| Faraday | : Ahli fisika yang menemukan bahwa perubahan fluks magnet yang menembus loop kawat konduktor dapat menghasilkan arus listrik induksi |
| Ferromagnetik | : Bahan-bahan yang kuat sekali menarik garis-garis gaya magnet. |
| Fluks magnet | : Jumlah garis gaya magnet |
| Gaya elektrostatik | : Gaya interaksi antara dua buah benda yang bermuatan listrik |
| Gaya gerak listrik | : Tegangan antara kedua kutub sumber gaya gerak listrik dalam keadaan bebas dari rangkaian (rangkaiannya terbuka) |
| Gaya Lorentz | : Gaya yang dialami oleh muatan listrik yang bergerak dalam medan magnet |
| Gaya magnet | : Gaya tarik-menarik atau tolak-menolak antara dua kutub magnet |
| Generator listrik | : Alat untuk menghasilkan arus listrik |
| Histeresis | : Kurva yang menunjukkan kerugian daya pada transformator |
| Oersted | : Ahli fisika yang menemukan bahwa di sekitar konduktor yang berarus listrik terdapat medan magnet |
| Ohm | : Ahli fisika yang menemukan bahwa perbandingan tegangan listrik dan arus listrik yang melalui konduktor adalah tetap. |
| Kirchhoff | : Ahli fisika yang menemukan bahwa; (1) jumlah aljabar arus listrik pada satu titik percabangan sama dengan nol, (2) jumlah aljabar beda |

| | |
|------------------------|---|
| | potensial (tegangan listrik) dalam satu rangkaian tertutup sama dengan nol |
| Induksi magnet | : Banyaknya fluks magnet yang mengalir pada konduktor dengan luas penampang tertentu, dengan kedudukan tegak lurus terhadap arah aliran fluks magnet |
| Intensitas magnet | : Besarnya fluks magnet dalam ruang hampa udara pada luas penampang tertentu, dengan kedudukan tegak lurus terhadap arah aliran fluks magnet |
| Kapasitansi | : Kemampuan sebuah kapasitor untuk menyimpan muatan listrik |
| Koefisien temperatur | : Kenaikan tahanan per derajat Celcius kenaikan temperatur |
| Konduktivitas | : Kemampuan material untuk menghantarkan listrik |
| Lenz | : Ahli fisika yang menemukan bahwa arus induksi akan timbul dalam arah yang sedemikian rupa sehingga arah tersebut melawan perubahan yang menghasilkannya |
| Magnet | : Benda/material yang mampu untuk menarik atau menolak material lain di sekitarnya. |
| <i>Magnetic clutch</i> | : Alat pada kompresor AC berfungsi untuk menghubungkan dan memutuskan putaran mesin dengan kompresor |
| Medan listrik | : Ruang di sekitar sebuah muatan listrik. |
| Medan magnet | : Ruang di sekitar sebuah magnet |
| Momen dipol magnet | : Ukuran kekuatan dan arah medan magnet yang dihasilkan oleh sebuah magnet |
| Momen gaya | : Gaya yang bekerja pada sebuah benda sehingga mengakibatkan benda tersebut berotasi pada sumbu tertentu |
| Motor listrik | : Alat untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik |
| Muatan listrik | : Sifat dasar dari partikel penyusun atom, kecuali neutron. |
| Oersted | : Ahli fisika yang menemukan bahwa di sekitar kawat berarus listrik ada medan magnet |
| Paramagnetik | : Bahan-bahan yang kurang kuat menarik garis gaya magnet |

| | |
|--------------------------------|--|
| Permeabilitas magnet | : Perbandingan antara induksi magnet dengan intensitas magnet |
| Potensial listrik | : Energi potensial elektrostatik per satuan muatan |
| Rangkaian bintang | : Konfigurasi dari 3 komponen yang dihubungkan sehingga membentuk pola bintang |
| Rangkaian paralel | : Susunan komponen listrik dimana masing masing komponen dihubungkan secara langsung pada 2 titik yang sama |
| Rangkaian segitiga | : Konfigurasi dari 3 komponen yang dihubungkan sehingga membentuk pola segitiga |
| Rangkaian seri | : Susunan komponen listrik dimana arus mengalir melalui satu jalur yang sama |
| Resistivitas | : Karakteristik suatu bahan dan didefinisikan sebagai perbandingan antara intensitas listrik dengan arus listrik per satuan luas penampang |
| Solenioda | : Sebuah gulungan kawat yang panjang, sering disebut kumparan |
| Toroida | : Sebuah solenoida yang intinya berbentuk lingkaran |
| Transformasi rangkaian | : Proses mengubah konfigurasi rangkaian komponen menjadi konfigurasi yang berbeda dan memerlukan penyesuaian agar fungsinya tetap |
| Transformator | : Alat untuk mengubah nilai tegangan dan arus bolak balik |
| Transformator <i>step down</i> | : Alat yang berfungsi untuk menurunkan tegangan listrik bolak-balik (AC) |
| Transformator <i>step up</i> | : Alat yang berfungsi untuk menaikkan tegangan listrik bolak-balik (AC) |