

MEDIA PEMBELAJARAN BERBASIS AUGMENTED REALITY

Prof. Dr. Asrul Huda, S.Kom., M.Kom. | Firdaus, S.Pd., M.Pd.T.
Dr. Murni Sukmawati, S.Kom., M.Pd. | Ferdiansyah Gubang.

Mengatasi tantangan media pembelajaran konvensional dan keterbatasan praktik langsung, buku ini menyajikan Augmented Reality (AR) sebagai solusi pedagogis yang inovatif. Implementasi AR didasarkan pada landasan teoretis yang kuat, terutama Konstruktivisme (belajar melalui interaksi aktif) dan Teori Beban Kognitif (mengurangi beban mental dengan menyajikan info kontekstual), yang terbukti efektif meningkatkan motivasi dan pemahaman konsep siswa.

Buku ini memandu pembaca melalui siklus hidup lengkap perancangan dan pengembangan media AR. Proses ini dimulai secara sistematis dari analisis kebutuhan, penetapan tujuan pembelajaran, perancangan storyboard, hingga alur kerja teknis. Pengembangan mencakup penyiapan aset (terutama optimasi model 3D untuk seluler), integrasi menggunakan engine seperti Unity dan SDK (Vuforia/ARCore), serta siklus pengujian fungsional dan usability untuk menjamin kualitas.

Lebih dari sekadar alat, adopsi AR menuntut strategi implementasi yang matang, termasuk pergeseran fundamental peran guru dari instruktur menjadi fasilitator. Efektivitas pembelajaran kemudian divalidasi melalui metode evaluasi formal, seperti analisis perbandingan pre-test/post-test.

Terakhir, buku ini mengkaji secara mendalam aspek kritis etika dan keamanan, mencakup kepatuhan hak cipta aset digital, urgensi perlindungan privasi data siswa (mengingat AR menggunakan kamera), serta kewajiban untuk memastikan keadilan (equity) dan aksesibilitas bagi semua peserta didik, termasuk penyediaan jalur pembelajaran alternatif. Buku ini ditutup dengan visi masa depan, memprediksi bagaimana konvergensi AR+AI akan menciptakan sistem pembelajaran adaptif yang personal dan bagaimana AR akan menjadi gerbang utama menuju ruang belajar kolaboratif di dalam Metaverse.

ISBN 978-634-7173-23-2



9

786347

173232

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

UNP PRESS



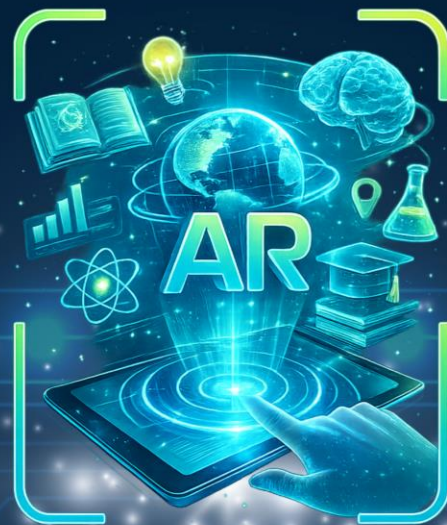
Universitas Negeri Padang Press
024/Anggota Luar Biasa/SBA/2021

UNP PRESS

MEDIA PEMBELAJARAN BERBASIS
AUGMENTED REALITY

Prof. Dr. Asrul Huda, S.Kom., M.Kom. | Firdaus, S.Pd., M.Pd.T.
Dr. Murni Sukmawati, S.Kom., M.Pd. | Ferdiansyah Gubang.

MEDIA PEMBELAJARAN BERBASIS AUGMENTED REALITY



Penerbitan & Percetakan
UNP PRESS
024 634 7173

Prof. Dr. Asrul Huda, S.Kom., M.Kom.
Firdaus, S.Pd., M.Pd.T.
Dr. Murni Sukmawati, S.Kom., M.Pd.
Ferdiansyah Gubang.

MEDIA PEMBELAJARAN BERBASIS AUGMENTED REALITY

**Prof. Dr. Asrul Huda, S.Kom., M.Kom., Firdaus, S.Pd., M.Pd.T.,
Dr. Murni Sukmawati, S.Kom., M.Pd. Ferdiansyah Gubang.**

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).

MEDIA PEMBELAJARAN BERBASIS AUGMENTED REALITY

**Prof. Dr. Asrul Huda, S.Kom., M.Kom., Firdaus, S.Pd., M.Pd.T.,
Dr. Murni Sukmawati, S.Kom., M.Pd. Ferdiansyah Gubang.**



2026

**MEDIA PEMBELAJARAN BERBASIS
AUGMENTED REALITY**

editor, Tim editor UNP Press

Penerbit UNP Press, Padang, 2026

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

Jumlah Halaman xi + 394 Halaman Buku

ISBN : 978-634-7173-23-2

MEDIA PEMBELAJARAN BERBASIS AUGMENTED REALITY

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang pada penulis

Hak penerbitan pada UNP Press

Penyusun: Prof. Dr. Asrul Huda, S.Kom., M.Kom., Firdaus, S.Pd.,
M.Pd.T., Dr. Murni Sukmawati, S.Kom., M.Pd. Ferdiansyah Gubang.

Editor Substansi: TIM UNP Press

Editor Bahasa: Prof. Dr. Harris Effendi Thahar, M.Pd.

Desain Sampul & Layout: Firdaus, S.Pd., M.Pd.T.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas terselesaikannya buku "Media Pembelajaran Berbasis *Augmented Reality*". Buku ini hadir sebagai panduan komprehensif untuk menjawab tantangan pendidikan di era digital, di mana AR menawarkan solusi belajar yang interaktif, visual, dan kontekstual. Pembahasan dimulai dari landasan teoretis (*Konstruktivisme* dan Teori Beban Kognitif) hingga panduan perancangan sistematis, pengembangan teknis (termasuk optimasi *aset 3D* untuk Unity), dan metodologi pengujian.

Lebih dari sekadar panduan teknis, buku ini menekankan strategi implementasi praktis yang berpusat pada pergeseran krusial peran guru menjadi fasilitator, serta metode evaluasi formal untuk mengukur efektivitasnya. Kami juga mengkaji secara mendalam aspek kritis etika dan keamanan, mencakup kepatuhan Hak Cipta *aset digital*, urgensi perlindungan Privasi Data Siswa, dan prinsip fundamental Keadilan (*Equity*) untuk menjamin aksesibilitas yang inklusif bagi semua peserta didik.

Buku ini ditutup dengan visi masa depan, mengeksplorasi bagaimana integrasi AR dengan AI akan menciptakan sistem pembelajaran adaptif yang cerdas dan bagaimana teknologi ini akan berevolusi menjadi ruang belajar kolaboratif *Metaverse*. Penulis menyadari buku ini jauh dari sempurna dan mengharapkan kritik membangun. Semoga buku ini bermanfaat bagi kemajuan pendidikan di Indonesia.

Padang, Juni 2026

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	V
DAFTAR ISI	VI
DAFTAR GAMBAR	IX
DAFTAR TABEL	XI
BAB 1. KONSEP DASAR MEDIA PEMBELAJARAN	1
A. PENGERTIAN MEDIA PEMBELAJARAN	1
B. FUNGSI DAN PERAN MEDIA DALAM PENDIDIKAN	9
C. KLASIFIKASI MEDIA PEMBELAJARAN	14
D. PRINSIP PEMILIHAN MEDIA YANG EFEKTIF	22
E. TREN TEKNOLOGI DALAM MEDIA PEMBELAJARAN	31
BAB 2. PENGENALAN <i>AUGMENTED REALITY</i> (AR)	38
A. DEFINISI DAN KONSEP AR	38
B. PERBEDAAN AR, <i>VIRTUAL REALITY</i> (VR), DAN MIXED REALITY (MR)	48
C. KOMPONEN UTAMA AR (<i>HARDWARE, SOFTWARE,</i> CONTENT)	53
D. SEJARAH PERKEMBANGAN AR	61
E. TREN DAN PROSPEK AR DI BIDANG PENDIDIKAN	67
BAB 3. MEDIA PEMBELAJARAN BERBASIS AR	76
A. PENGERTIAN MEDIA PEMBELAJARAN BERBASIS AR	76
B. KARAKTERISTIK DAN KEUNGGULAN AR DALAM PEMBELAJARAN	84
C. KETERBATASAN DAN TANTANGAN IMPELEMENTASI AR ..	89

D. MODEL-MODEL PENGGUNAAN AR DI KELAS	96
E. STUDI KASUS SUKSES PENGGUNAAN AR DI PENDIDIKAN	103
BAB 4. TEORI DAN LANDASAN PEMBELAJARAN	109
A. LANDASAN PSIKOLOGIS (TEORI KOGNITIF, KONSTRUKTIVISME, TEORI BEBAN KOGNITIF)	109
B. LANDASAN PEDAGOGIS (PRINSIP PEMBELAJARAN AKTIF, KONTEKSTUAL, KOLABORATIF)	119
C. INTEGRASI AR DALAM KURIKULUM	125
D. KESESUAIAN AR UNTUK BERBAGAI GAYA BELAJAR.....	133
BAB 5. PERANCANGAN MEDIA PEMBELAJARAN BERBASIS AR.....	140
A. ANALISIS KEBUTUHAN PEMBELAJARAN	140
B. PENENTUAN TUJUAN PEMBELAJARAN.....	151
C. PEMILIHAN PLATFORM DAN TEKNOLOGI AR.....	157
D. PERANCANGAN <i>STORYBOARD</i> DAN SKENARIO AR.....	168
E. PENYIAPAN MATERI (3D MODEL, AUDIO, TEKS, ANIMASI)	177
BAB 6. PENGEMBANGAN MEDIA PEMBELAJARAN BERBASIS AR.....	189
A. PERANGKAT DAN <i>SOFTWARE</i> PENGEMBANGAN AR	189
B. PROSES PEMBUATAN OBJEK 3D	204
C. INTEGRASI OBJEK KE DALAM APLIKASI AR	218
D. PENGUJIAN FUNGSIONAL DAN <i>USABILITY</i>	225
E. OPTIMASI UNTUK PERANGKAT MOBILE DAN DESKTOP ..	234
BAB 7. IMPLEMENTASI DAN EVALUASI MEDIA AR.....	245

A. STRATEGI IMPLEMENTASI AR DI KELAS DAN PEMBELAJARAN DARING.....	245
B. PERSIAPAN GURU DAN SISWA	257
C. TEKNIK FASILITASI PEMBELAJARAN BERBASIS AR	262
D. EVALUASI EFEKTIVITAS MEDIA PEMBELAJARAN AR	268
E. PENGUKURAN HASIL BELAJAR DAN UMPAN BALIK	276
BAB 8. ETIKA DAN KEAMANAN PENGGUNAAN AR DALAM PENDIDIKAN.....	284
A. HAK CIPTA DAN LISENSI KONTEN 3D	284
B. PRIVASI DAN KEAMANAN DATA SISWA	293
C. BATASAN PENGGUNAAN AR DI LINGKUNGAN PENDIDIKAN	302
D. AKSESIBILITAS UNTUK SEMUA PESERTA DIDIK.....	311
BAB 9. INOVASI DAN MASA DEPAN AR DI PENDIDIKAN	321
A. INTEGRASI AR DENGAN <i>ARTIFICIAL INTELLIGENCE</i> (AI) .	321
B. AR DALAM PEMBELAJARAN <i>METaverse</i>	330
C. POTENSI AR DALAM PEMBELAJARAN ADAPTIF.....	338
D. PREDIKSI PERKEMBANGAN AR 5–10 TAHUN KE DEPAN	346
BAB 10. PANDUAN PENGGUNAAN APLIKASI AR KOMPUTERKU	354
DAFTAR PUSTAKA	366
GLOSARIUM.....	378
INDEKS	387
TENTANG PENULIS	392
RINGKASAN ISI BUKU	394

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Awali Dengan Sebuah Kubus	209
Gambar 2. Membuat Sebuah Objek Nyata	209
Gambar 3. Proses Pemberian Texture Warna.....	211
Gambar 4. Optimasi Texture	213
Gambar 5. Pilihan Eksport Objek.....	217
Gambar 6. Import Objek 3D Ke Scene	219
Gambar 7. Mengatur skala objek 3D.....	220
Gambar 8. Penambahan Script Interaksi	221
Gambar 9. Pemberian Penanda (Marker)	223
Gambar 10. Postur Tubuh yang Baik Saat Menggunakan Gadget	304
Gambar 11. Fitur Chat Ai Dalam Aplikasi Pembelajaran	325
Gambar 12. QR Code Aplikasi AR Komputerku	356
Gambar 13. Tampilan Spalsh Screen Aplikasi.....	357
Gambar 14. Tampilan Main Menu	357
Gambar 15. Halaman Materi	358
Gambar 16. Halaman Capaian Pembelajaran	358
Gambar 17. Halaman Perangkat Keras.....	359
Gambar 18. Tampilan Popup Materi	359
Gambar 19. Pengenalan fungsi TTS.....	360
Gambar 20. Tampilan Kamera AR.....	360
Gambar 21. Penjelasan Fungsi Chat AI.....	361
Gambar 22. Tampilan Halaman Tahapan Rakit	361

Gambar 23. Tampilan Kamera Ayo Rakit.....	362
Gambar 24. Tampilan Halaman Kuis	362
Gambar 25. Tampilan Halaman Quiziz	363
Gambar 26. Tampilan Halaman Petunjuk	363
Gambar 27. Tampilan Halaman Informasi(Tentang)	364
Gambar 28. Popup Pengaturan Volume dan Tutup Aplikasi	364

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Tabel Perbedaan Media Pembelajaran, Alat Peraga, dan Sumber Belajar.....	7
Tabel 2. Tabel Pendapat Para Ahli.....	43
Tabel 3. Tabel Perbedaan AR, VR dan MR.....	52

BAB

1

KONSEP DASAR MEDIA PEMBELAJARAN



Bab ini membahas konsep dasar media pembelajaran sebagai sarana yang membantu penyampaian materi agar proses belajar lebih efektif, menarik, dan bermakna. Pembahasan meliputi pengertian, fungsi, peran, karakteristik, klasifikasi, serta prinsip pemilihan media yang sesuai dengan tujuan pembelajaran dan karakteristik peserta didik. Selain itu, bab ini mengulas perkembangan teknologi pendidikan seperti AR, VR, LMS, dan AI yang mendukung pembelajaran yang lebih interaktif, fleksibel, dan relevan dengan kebutuhan pendidikan di era digital.

A. Pengertian Media Pembelajaran

Dalam proses pembelajaran, keberhasilan penyampaian materi tidak hanya ditentukan oleh penguasaan materi oleh guru, tetapi juga oleh kemampuan guru dalam memilih dan memanfaatkan media pembelajaran yang sesuai. Pada kenyataannya, banyak materi pelajaran yang memiliki karakteristik abstrak, kompleks, dan sulit dipahami apabila hanya disampaikan melalui metode ceramah atau penjelasan verbal. Kondisi ini sering menjadi tantangan bagi guru dalam membantu siswa memahami konsep secara utuh dan mendalam.

Sebagai contoh, pada mata pelajaran Informatika atau Teknik Komputer dan Jaringan, siswa dituntut untuk memahami berbagai

konsep yang berkaitan dengan perangkat keras komputer, arsitektur sistem komputer, jaringan komputer, maupun proses komunikasi data. Sebagian besar konsep tersebut tidak dapat diamati secara langsung oleh siswa sehingga membutuhkan visualisasi yang jelas agar lebih mudah dipahami. Demikian pula pada bidang sains, seperti Biologi, Fisika, dan Kimia, banyak konsep yang melibatkan proses, struktur, atau fenomena yang tidak dapat dilihat secara kasat mata. Ketika guru hanya mengandalkan penjelasan lisan atau teks dalam buku, siswa sering mengalami kesulitan dalam membangun gambaran mental yang tepat mengenai materi yang dipelajari.

Kondisi tersebut sering berdampak pada rendahnya tingkat pemahaman siswa, berkurangnya minat belajar, serta menurunnya keterlibatan siswa selama proses pembelajaran berlangsung. Tidak sedikit siswa yang merasa bosan, kehilangan fokus, atau bahkan mengalami miskonsepsi karena informasi yang diterima tidak dapat divisualisasikan dengan baik. Akibatnya, tujuan pembelajaran yang telah direncanakan tidak dapat tercapai secara optimal. Oleh karena itu, diperlukan suatu sarana yang dapat membantu guru menyampaikan pesan pembelajaran secara lebih efektif, menarik, dan mudah dipahami oleh peserta didik.

Media pembelajaran hadir sebagai salah satu solusi untuk mengatasi berbagai permasalahan tersebut. Media pembelajaran berfungsi sebagai perantara yang membantu menyampaikan informasi, pengetahuan, keterampilan, maupun pengalaman belajar dari guru kepada siswa. Dengan bantuan media, materi yang semula bersifat abstrak dapat diubah menjadi lebih konkret melalui penggunaan gambar, grafik, animasi, video, simulasi, maupun objek tiga dimensi. Kehadiran media juga memungkinkan siswa memperoleh pengalaman belajar yang lebih kaya karena melibatkan berbagai indera dalam proses menerima informasi.

Penggunaan media pembelajaran yang tepat dapat meningkatkan efektivitas komunikasi antara guru dan siswa. Informasi yang disampaikan menjadi lebih jelas, sistematis, dan mudah dipahami. Selain itu, media pembelajaran mampu menarik perhatian siswa sehingga mereka lebih fokus terhadap materi yang sedang dipelajari.

Berbagai penelitian juga menunjukkan bahwa pembelajaran yang didukung oleh media yang sesuai dapat meningkatkan motivasi belajar, daya ingat, partisipasi aktif, serta hasil belajar siswa dibandingkan dengan pembelajaran yang hanya menggunakan metode konvensional.

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi turut mendorong munculnya berbagai inovasi media pembelajaran yang semakin interaktif dan adaptif. Saat ini, media pembelajaran tidak lagi terbatas pada media cetak atau alat peraga sederhana, tetapi telah berkembang menjadi media digital yang mampu menghadirkan pengalaman belajar yang lebih menarik dan imersif. Teknologi seperti multimedia interaktif, simulasi komputer, *virtual reality* (VR), dan *Augmented Reality* (AR) memberikan kesempatan kepada siswa untuk berinteraksi secara langsung dengan materi pembelajaran sehingga proses belajar menjadi lebih bermakna.

Dengan demikian, media pembelajaran tidak dapat lagi dipandang hanya sebagai alat bantu atau pelengkap dalam kegiatan belajar mengajar. Media pembelajaran merupakan salah satu komponen penting yang memiliki peran strategis dalam menciptakan pembelajaran yang efektif, efisien, dan berpusat pada siswa. Pemilihan media yang tepat dapat membantu guru mencapai tujuan pembelajaran sekaligus membantu siswa memahami materi dengan lebih mudah dan menyenangkan. Oleh karena itu, sebelum membahas lebih lanjut mengenai jenis, fungsi, dan pemanfaatan media pembelajaran, penting untuk memahami terlebih dahulu konsep dasar media pembelajaran, baik dari perspektif umum maupun berdasarkan pandangan para ahli pendidikan.

1. Definisi Media Pembelajaran

Media pembelajaran merupakan salah satu unsur penting dalam proses pendidikan yang berfungsi sebagai perantara untuk menyampaikan materi pembelajaran dari pendidik kepada peserta didik. Secara etimologis, istilah media berasal dari bahasa Latin *medium* yang berarti perantara atau penghubung. Dalam konteks pendidikan, media pembelajaran bukan hanya sekadar alat bantu, melainkan komponen strategis yang dapat merangsang minat,

perhatian, dan pemahaman siswa agar proses belajar menjadi lebih efektif dan efisien.

Menurut (Heinich 2002) media adalah perantara yang menghubungkan sumber pesan dengan penerima pesan. Sedangkan (Sadiman 1986) memperluas pengertian tersebut dengan menegaskan bahwa media pembelajaran mencakup segala sesuatu yang dapat menyalurkan pesan dari pengirim ke penerima sehingga dapat merangsang pikiran, perasaan, perhatian, dan minat peserta didik sehingga proses belajar terjadi.

Lebih jauh, (Gagné, Briggs, and Wager 1992) menekankan bahwa media pembelajaran meliputi berbagai bentuk sarana fisik, mulai dari buku, gambar, audio, hingga teknologi digital seperti komputer dan aplikasi berbasis *Augmented Reality* (AR). Media tersebut harus dirancang sedemikian rupa agar dapat menyampaikan pesan secara sistematis dan menarik, sehingga memudahkan siswa dalam memahami materi pembelajaran yang terkadang bersifat abstrak dan kompleks. (Dr. Siti Nurhasanah et al. 2019) juga mengemukakan bahwa media pembelajaran tidak hanya sekadar alat penyampai pesan, tetapi juga harus mampu merangsang perasaan dan kemauan belajar siswa agar tercipta proses pembelajaran yang bermakna.

Dalam Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI), media diartikan sebagai alat atau sarana komunikasi yang digunakan untuk menyampaikan informasi. Dalam ranah pendidikan, media pembelajaran berfungsi sebagai jembatan komunikasi antara guru dan siswa yang dapat berupa berbagai bentuk, mulai dari media cetak, audio visual, hingga media interaktif berbasis teknologi (Kamus Besar Bahasa Indonesia n.d.). Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi telah mendorong lahirnya berbagai inovasi media pembelajaran digital seperti video interaktif, simulasi komputer, serta teknologi terkini seperti *Virtual Reality* (VR) dan *Augmented Reality* (AR), yang memberikan pengalaman belajar lebih imersif dan kontekstual.

Berdasarkan berbagai definisi tersebut, dalam konteks buku ini, media pembelajaran dipahami sebagai segala bentuk sarana atau

perantara baik fisik maupun digital yang dirancang untuk menyalurkan materi pembelajaran secara efektif, interaktif, dan menarik, guna meningkatkan pemahaman serta minat belajar peserta didik sehingga tujuan pembelajaran dapat tercapai secara optimal.

2. Komponen Media Pembelajaran

Media pembelajaran terdiri atas beberapa komponen utama yang saling berinteraksi untuk mendukung kelancaran proses penyampaian materi dari pendidik kepada peserta didik. Menurut (Sadiman 1986), komponen-komponen tersebut meliputi pesan, sumber pesan, saluran, dan penerima pesan yang merupakan elemen penting dalam komunikasi pembelajaran.

- a. Pesan adalah isi atau materi pembelajaran yang ingin disampaikan. Pesan ini harus dirancang dengan jelas, menarik, dan sesuai dengan tujuan pembelajaran agar dapat merangsang pemahaman siswa (Heinich 2002). Contohnya, dalam pembelajaran matematika, pesan bisa berupa konsep rumus atau langkah-langkah penyelesaian soal.
- b. Sumber pesan adalah pihak atau media yang mengirimkan pesan tersebut. Dalam konteks pembelajaran, sumber pesan biasanya adalah guru, modul pembelajaran, video tutorial, atau aplikasi AR yang berisi materi pembelajaran (Sadiman 1986). Misalnya, aplikasi *Augmented Reality* (AR) yang menampilkan model 3D perangkat komputer sebagai sumber pesan visual dan audio.
- c. Saluran adalah media atau alat yang digunakan untuk menyalurkan pesan dari sumber ke penerima. Saluran ini dapat berupa papan tulis, buku, proyektor, video pembelajaran, atau perangkat digital seperti tablet dan smartphone (Heinich 2002). Contoh sederhana adalah penggunaan papan tulis dalam kelas untuk menulis materi pelajaran, atau video pembelajaran yang ditayangkan melalui komputer.
- d. Penerima pesan adalah peserta didik yang menerima dan memproses pesan tersebut. Keberhasilan pembelajaran sangat bergantung pada bagaimana penerima pesan dapat memahami

dan menginternalisasi materi yang disampaikan melalui media pembelajaran (Sadiman 1986).

Interaksi efektif antar komponen ini menjadi kunci dalam menciptakan proses belajar yang bermakna dan menyenangkan. Sebagai contoh, (Mayer 2009) menyatakan bahwa penggunaan video pembelajaran yang memuat animasi konsep sains dapat meningkatkan perhatian dan minat siswa sehingga pesan tersampaikan dengan lebih optimal.

3. Perbedaan Media Pembelajaran dengan Alat Peraga dan Sumber Belajar

Dalam dunia pendidikan, sering terjadi kerancuan antara media pembelajaran, alat peraga, dan sumber belajar, padahal ketiganya memiliki fungsi berbeda. Sumber belajar adalah konsep terluas, mencakup segala bahan atau rujukan informasi (seperti buku, internet, lingkungan, narasumber) yang dapat diakses siswa untuk belajar. Media pembelajaran adalah saluran atau perantara yang dirancang secara sistematis (seperti video, presentasi PowerPoint, atau *software* simulasi) yang berfungsi spesifik untuk menyampaikan pesan atau materi dari sumber tersebut kepada siswa. Sementara itu, alat peraga (seperti globe, torso, atau model bangun ruang) memiliki fungsi lebih spesifik lagi, yaitu untuk memvisualisasikan atau mengkonkretkan konsep yang abstrak agar mudah dipahami, dan seringkali digunakan sebagai pendukung atau menjadi bagian dari media pembelajaran. Pemahaman yang jelas atas perbedaan ini krusial bagi pendidik agar dapat memilih, merancang, dan memadukan ketiganya secara tepat guna untuk menciptakan proses pembelajaran yang efektif dan variatif..

Untuk memudahkan pemahaman, berikut ini disajikan tabel perbandingan yang menggambarkan perbedaan aspek-aspek utama dari ketiga istilah tersebut:

Tabel 1. Tabel Perbedaan Media Pembelajaran, Alat Peraga, dan Sumber Belajar

Aspek	Media Pembelajaran	Alat Peraga	Sumber Belajar
Definisi	Sarana atau perantara penyampaian pesan pembelajaran	Alat yang digunakan untuk memperjelas materi	Segala bahan yang dapat digunakan untuk belajar
Fungsi Utama	Menyalurkan pesan secara sistematis dan terstruktur	Memperjelas konsep atau objek tertentu	Menyediakan informasi untuk dipelajari
Contoh	Video pembelajaran, aplikasi <i>Augmented Reality</i> (AR)	Model rangka manusia, globe	Buku teks, internet, museum

4. Karakteristik Media Pembelajaran

Media pembelajaran merupakan salah satu komponen penting dalam proses pendidikan yang berperan sebagai perantara penyampaian materi dari guru kepada siswa. Agar media pembelajaran dapat berfungsi secara optimal, media tersebut harus memiliki karakteristik tertentu yang sesuai dengan tujuan pembelajaran dan kebutuhan peserta didik. Beberapa ahli telah mengemukakan karakteristik penting yang harus dimiliki oleh media pembelajaran agar dapat mendukung efektivitas dan efisiensi proses belajar mengajar.

Menurut (Smaldino, Lowther, and Russell 2014) menyebutkan beberapa karakteristik utama media pembelajaran, yaitu:

- Memiliki tujuan yang jelas sesuai dengan kurikulum dan tujuan pembelajaran yang ingin dicapai. Media harus dirancang agar mampu menyampaikan pesan secara terarah dan fokus pada kompetensi yang akan dibentuk.
- Memfasilitasi interaksi antara guru dan siswa, serta antara siswa dengan materi pembelajaran itu sendiri. Media yang mendukung interaktivitas akan meningkatkan keterlibatan siswa dan mempermudah proses pembelajaran yang aktif.
- Dapat merangsang minat dan motivasi belajar, sehingga siswa terdorong untuk lebih aktif dan antusias dalam

mengikuti pembelajaran. Media yang menarik akan membuat proses belajar lebih menyenangkan dan tidak membosankan.

- d. Mampu menyajikan materi secara menarik dan realistis, dengan tampilan visual, audio, dan fitur multimedia yang sesuai agar siswa dapat memahami konsep secara lebih mudah dan mendalam.

Lebih jauh, (Gerlach, Ely, and Melnick 1980) menambahkan bahwa media pembelajaran harus memenuhi karakteristik berikut:

- a. Mudah diakses dan digunakan oleh pendidik maupun peserta didik. Media yang sulit dioperasikan atau tidak tersedia secara memadai justru akan menghambat proses pembelajaran.
- b. Memiliki kemampuan adaptasi terhadap berbagai kebutuhan dan konteks pembelajaran, termasuk variasi gaya belajar dan tingkat kemampuan siswa yang berbeda-beda.
- c. Efektif dalam menyampaikan pesan, yaitu mampu meminimalkan kesalahan interpretasi dan memungkinkan pesan tersampaikan dengan jelas dan akurat.
- d. Efisien dalam penggunaan sumber daya, baik waktu, biaya, maupun tenaga, sehingga media dapat digunakan secara optimal tanpa pemborosan.

Dalam era digital saat ini, karakteristik media pembelajaran semakin berkembang dan harus menyesuaikan dengan kemajuan teknologi informasi dan komunikasi. Media pembelajaran tidak hanya sekadar menyajikan informasi secara statis, tetapi juga harus bersifat interaktif, mudah diakses melalui berbagai perangkat digital (mobile, desktop), dan mampu memberikan pengalaman belajar yang personalisasi. Penggunaan teknologi seperti *Augmented Reality* (AR), *Virtual Reality* (VR), simulasi, dan video interaktif memungkinkan media pembelajaran menghadirkan pengalaman belajar yang lebih imersif dan kontekstual, sehingga membantu siswa memahami materi dengan cara yang lebih nyata dan menarik (Sanjaya 2011).

Selain itu, media pembelajaran di era digital harus mampu mendukung pembelajaran jarak jauh (*remote Learning*) dan

pembelajaran mandiri (*self-directed Learning*) yang semakin dibutuhkan terutama di masa pandemi dan era pasca-pandemi. Media yang fleksibel dan adaptif menjadi sangat penting agar proses pembelajaran tidak terganggu oleh keterbatasan ruang dan waktu.

Dengan demikian, media pembelajaran yang ideal adalah media yang tidak hanya memenuhi karakteristik klasik menurut Smaldino dan Gerlach & Ely, tetapi juga yang mampu berinovasi dan beradaptasi dengan perkembangan teknologi serta kebutuhan zaman. Pendidik perlu selektif dalam memilih dan mengembangkan media pembelajaran agar tetap relevan dan efektif di tengah tantangan dan peluang era digital.

5. Peran Media dalam Proses Pembelajaran

Media pembelajaran memiliki peran yang esensial dalam menunjang efektivitas proses pendidikan. Selain berfungsi sebagai alat bantu visual atau audio, media berperan sebagai perantara komunikasi yang memfasilitasi interaksi antara guru dan peserta didik. Pemanfaatan media yang tepat memungkinkan guru menyampaikan materi secara lebih sistematis dan kontekstual, sehingga konsep-konsep yang diajarkan menjadi lebih mudah dipahami.

Selain itu, media pembelajaran berkontribusi dalam meningkatkan motivasi dan keterlibatan peserta didik. Media yang bersifat interaktif, informatif, dan menarik mampu merangsang minat belajar, memperkuat daya ingat, serta memfasilitasi pemahaman terhadap materi yang bersifat abstrak atau kompleks. Dengan demikian, media pembelajaran tidak hanya mendukung penyampaian informasi, tetapi juga mendorong pembelajaran yang lebih partisipatif dan bermakna bagi siswa.

B. Fungsi dan Peran Media dalam Pendidikan

Media pembelajaran tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu dalam proses penyampaian materi, tetapi juga memiliki peran strategis dalam meningkatkan efektivitas dan kualitas pendidikan. Dengan memanfaatkan media secara tepat, guru dapat menyampaikan

konsep secara lebih jelas, menarik, dan kontekstual, sementara peserta didik memperoleh pengalaman belajar yang lebih aktif, interaktif, dan bermakna. Pada bagian ini, akan dijelaskan secara sistematis bagaimana media berfungsi dalam pendidikan, peranannya bagi guru dan siswa, serta kontribusinya terhadap proses pembelajaran yang lebih efektif dan bermakna.

1. Fungsi Media dalam Pendidikan

Media pembelajaran memiliki peran sentral sebagai sarana komunikasi pembelajaran, yang memungkinkan guru menyampaikan materi secara lebih jelas, sistematis, dan terstruktur. Menurut (Heinich 2002), media berfungsi sebagai perantara antara sumber pesan dan peserta didik, sehingga pesan dapat diterima secara akurat dan mudah dipahami. Penggunaan media visual, audio, maupun digital dapat memfasilitasi penyampaian materi yang kompleks dan abstrak. Sebagai contoh, animasi interaktif tentang siklus air atau video tutorial tentang prosedur perakitan komputer membantu siswa memahami konsep yang sulit hanya melalui penjelasan verbal.

Selain itu, media pembelajaran juga berfungsi untuk meningkatkan motivasi dan minat belajar siswa. (Sadiman 1986) menekankan bahwa media yang dirancang secara menarik dan interaktif dapat merangsang perhatian, minat, serta keterlibatan peserta didik dalam proses belajar. Contohnya, penggunaan aplikasi *Augmented Reality* (AR) untuk menampilkan model 3D perangkat keras komputer memungkinkan siswa belajar secara imersif, sehingga proses pembelajaran menjadi lebih menyenangkan dan memotivasi siswa untuk aktif berpartisipasi.

Fungsi berikutnya adalah menyederhanakan penyajian konsep yang kompleks. Materi yang bersifat abstrak atau sulit dijelaskan dapat divisualisasikan melalui media pembelajaran, sehingga siswa dapat mengaitkan teori dengan pengalaman nyata. (Mayer 2009) menyatakan bahwa penggunaan multimedia dalam pembelajaran meningkatkan pemahaman konsep dan kemampuan retensi siswa. Sebagai ilustrasi, animasi interaktif tentang aliran listrik dalam rangkaian elektronik membantu siswa memahami

hubungan antar komponen, yang sulit dicapai hanya melalui penjelasan lisan atau gambar statis.

Selain itu, media pembelajaran berperan dalam memfasilitasi pembelajaran yang fleksibel dan adaptif, terutama di era digital. Media berbasis teknologi memungkinkan siswa untuk belajar secara mandiri sesuai dengan kecepatan dan gaya belajar masing-masing. (Smaldino et al. 2014) menekankan bahwa media pembelajaran yang adaptif dapat meningkatkan efektivitas belajar, karena materi dapat diakses kapan saja dan di mana saja, baik melalui *Learning Management System* (LMS), video tutorial, maupun aplikasi mobile. Misalnya, siswa dapat mengulang materi video atau simulasi AR sesuai kebutuhan, sehingga pembelajaran menjadi lebih personal dan efektif.

Dengan demikian, media pembelajaran tidak hanya sekadar alat bantu penyampaian materi, tetapi juga memainkan peran penting dalam meningkatkan kualitas interaksi, motivasi, dan pemahaman siswa. Pemilihan dan penggunaan media yang tepat menjadi faktor kunci untuk menciptakan pembelajaran yang efektif, efisien, dan relevan dengan tuntutan pendidikan abad 21.

2. Peran Media dalam Pendidikan

Media pembelajaran memainkan peran penting bagi guru dalam proses pendidikan. Media mempermudah guru dalam menyampaikan materi secara sistematis, jelas, dan menarik, sekaligus membantu merancang strategi pembelajaran yang bervariasi dan kontekstual. Menurut (Heinich 2002) pemilihan media yang tepat memungkinkan guru untuk menyesuaikan metode penyampaian materi dengan karakteristik peserta didik dan kompleksitas materi. Sebagai contoh, guru dapat menggunakan animasi interaktif atau simulasi digital untuk menjelaskan konsep ilmiah yang sulit dipahami melalui metode ceramah tradisional. Dengan demikian, media berfungsi sebagai alat bantu yang memperkuat efektivitas pengajaran dan memfasilitasi pencapaian tujuan pembelajaran.

Bagi siswa, media berperan dalam mempermudah pemahaman dan meningkatkan keterlibatan selama proses belajar. Media yang bersifat visual, audio, atau interaktif dapat membantu peserta didik menginternalisasi konsep-konsep yang abstrak, sekaligus meningkatkan minat dan motivasi belajar. (Mayer 2009) menegaskan bahwa penggunaan multimedia dalam pembelajaran dapat meningkatkan pemahaman dan retensi materi. Contohnya, penggunaan *Augmented Reality* (AR) untuk menampilkan model 3D perangkat keras komputer memungkinkan siswa belajar secara imersif, aktif, dan partisipatif, sehingga keterlibatan mereka dalam proses belajar meningkat.

Selain peran bagi guru dan siswa, media juga memiliki peran bagi proses pendidikan secara umum. Media mendukung tercapainya kompetensi abad 21, termasuk berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, dan komunikasi. (Smaldino et al. 2014) menyatakan bahwa media pembelajaran interaktif dan berbasis teknologi digital memungkinkan pengalaman belajar yang lebih imersif, realistis, dan relevan dengan tuntutan dunia modern. Misalnya, LMS, video interaktif, dan simulasi 3D tidak hanya menyampaikan informasi, tetapi juga menghadirkan pengalaman belajar yang menstimulasi keterampilan praktis, problem solving, dan pemikiran analitis peserta didik.

Dengan berbagai peran tersebut, media pembelajaran bukan sekadar alat tambahan, tetapi menjadi komponen integral yang memperkuat kualitas proses pendidikan, meningkatkan efektivitas pengajaran, dan memperkaya pengalaman belajar peserta didik di era digital.

3. Relevansi Media dalam Era Digital

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi (TIK) telah membawa transformasi signifikan dalam dunia pendidikan, khususnya dalam pemanfaatan media pembelajaran. Media digital seperti *Augmented Reality* (AR), *Virtual Reality* (VR), video interaktif, dan *Learning Management System* (LMS) tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu, tetapi juga menjadi sarana strategis untuk meningkatkan kualitas proses belajar mengajar. Media

berbasis teknologi memungkinkan penyampaian materi yang lebih imersif, realistis, dan kontekstual, sehingga siswa dapat memahami konsep secara lebih mendalam dibandingkan dengan metode konvensional.

Menurut (Sadiman 1986), media digital mendukung pendekatan pembelajaran yang fleksibel dan adaptif. Dengan AR, misalnya, guru dapat menampilkan model 3D perangkat keras komputer atau struktur anatomi manusia, yang memungkinkan siswa belajar secara interaktif dan eksploratif. Sementara LMS menyediakan akses materi secara daring sehingga siswa dapat belajar kapan saja dan di mana saja, menyesuaikan dengan kecepatan dan gaya belajar masing-masing individu. Hal ini meningkatkan kemandirian belajar sekaligus mendukung pembelajaran yang lebih personal.

Selain mempermudah penyampaian materi, media berbasis teknologi juga berdampak positif terhadap motivasi, keterlibatan, dan minat belajar siswa. (Mayer 2009) menekankan bahwa multimedia yang dirancang secara efektif dapat mengintegrasikan informasi visual dan verbal sehingga proses kognitif lebih cepat dan pemahaman konsep kompleks menjadi lebih mudah. Video interaktif atau simulasi digital dapat membuat siswa lebih aktif dalam proses belajar, karena mereka tidak hanya menerima informasi secara pasif, tetapi juga terlibat dalam eksplorasi dan latihan praktis.

Relevansi media digital dalam konteks pendidikan abad 21 juga terkait dengan kebutuhan untuk mengembangkan keterampilan kognitif dan non-kognitif, seperti berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, dan komunikasi. Media interaktif memungkinkan siswa belajar melalui pengalaman nyata atau simulasi, sehingga mereka dapat mengembangkan keterampilan praktis dan problem solving secara lebih efektif. Misalnya, penggunaan VR dalam pembelajaran sejarah atau laboratorium sains virtual memungkinkan siswa mengalami simulasi kondisi nyata tanpa batasan ruang dan waktu.

Dengan demikian, pemanfaatan media berbasis teknologi tidak hanya memperkaya metode pengajaran, tetapi juga memperkuat efektivitas pembelajaran dan pengalaman belajar siswa secara keseluruhan. Guru perlu memilih dan merancang media yang sesuai dengan karakteristik materi, tujuan pembelajaran, dan kebutuhan peserta didik agar pembelajaran menjadi lebih menarik, bermakna, dan relevan dengan tuntutan pendidikan modern.

C. Klasifikasi Media Pembelajaran

Pemahaman mengenai klasifikasi media pembelajaran merupakan aspek penting dalam perencanaan dan pelaksanaan proses belajar mengajar. Dengan mengetahui kategori dan jenis media yang tersedia, guru dapat menyesuaikan media dengan karakteristik materi, tujuan pembelajaran, serta kebutuhan peserta didik. Klasifikasi media membantu guru dalam membuat keputusan yang lebih tepat, sehingga media yang digunakan dapat meningkatkan efektivitas penyampaian materi dan memaksimalkan keterlibatan siswa dalam proses pembelajaran (Heinich 2002).

Selain itu, klasifikasi media memungkinkan pendidik untuk mengidentifikasi kekuatan dan keterbatasan masing-masing media. Misalnya, media visual dapat menyederhanakan konsep abstrak, sedangkan media interaktif atau digital seperti AR dan VR mampu memberikan pengalaman belajar yang lebih imersif. Pemilihan media yang tepat akan menyesuaikan kompleksitas materi dengan kemampuan siswa dalam menerima dan memahami informasi, sehingga pembelajaran menjadi lebih efektif, efisien, dan menarik.

Dalam konteks pendidikan modern, klasifikasi media juga berfungsi sebagai landasan bagi pengembangan media inovatif. Guru dapat mengombinasikan berbagai jenis media untuk menciptakan strategi pembelajaran yang holistik, memfasilitasi berbagai gaya belajar, dan mendukung pencapaian kompetensi abad 21, termasuk berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, dan komunikasi. Dengan demikian, pemahaman terhadap klasifikasi media menjadi langkah awal yang krusial sebelum memilih dan menerapkan media pembelajaran secara optimal.

1. Klasifikasi Berdasarkan Sifat Media

Media pembelajaran dapat diklasifikasikan berdasarkan sifat atau karakteristik penyampaian, yang membantu guru memilih media yang paling tepat untuk materi, tujuan pembelajaran, dan karakteristik peserta didik. Menurut (Heinich 2002), dan (Prof. Dr. Yusufhadi Miarso 2004), klasifikasi ini penting untuk memaksimalkan efektivitas komunikasi pendidikan dan meningkatkan keterlibatan siswa dalam proses belajar.

a. Media Visual

Media visual menyampaikan informasi secara grafis atau gambar, seperti gambar, diagram, slide presentasi, dan poster. Media ini efektif untuk mempermudah pemahaman konsep yang abstrak atau kompleks, karena siswa dapat melihat representasi visual dari materi. Contohnya, diagram alur proses fotosintesis pada tumbuhan atau ilustrasi bagian-bagian tubuh manusia membantu siswa memahami materi lebih cepat dibandingkan penjelasan verbal semata. Media visual juga dapat digunakan dalam kombinasi dengan media lain, misalnya video pembelajaran yang menampilkan gambar dan teks sekaligus, untuk meningkatkan daya tarik dan pemahaman siswa (Mayer 2009; Prof. Dr. Yusufhadi Miarso 2004).

b. Media Audio

Media audio menyampaikan informasi melalui suara, baik berupa rekaman, radio pembelajaran, podcast, maupun instruksi lisan. Media ini sangat berguna untuk melatih kemampuan mendengar, meningkatkan konsentrasi, dan mempermudah pemahaman verbal siswa. Contohnya, guru bahasa asing dapat menggunakan rekaman dialog untuk melatih kemampuan listening siswa, sedangkan radio pembelajaran atau rekaman naratif dapat menyampaikan cerita sejarah atau sains secara lebih hidup. Media audio juga dapat dikombinasikan dengan media visual untuk membentuk media audiovisual yang lebih efektif (Sadiman 1986).

c. Media Audiovisual

Media audiovisual menggabungkan elemen visual dan audio, seperti video pembelajaran, animasi, film edukatif, atau slide presentasi dengan narasi. Media ini meningkatkan keterlibatan siswa karena mereka dapat melihat dan mendengar informasi secara bersamaan. Animasi interaktif yang menjelaskan proses sirkulasi darah atau perubahan iklim dapat mempermudah pemahaman konsep kompleks, meningkatkan retensi, dan membuat proses belajar lebih menyenangkan. (Mayer 2009) menyebutkan bahwa penggunaan multimedia yang tepat dapat mempercepat proses kognitif dan mempermudah pemahaman konsep abstrak.

d. Media Interaktif/Digital

Media interaktif dan digital mencakup *Augmented Reality* (AR), *Virtual Reality* (VR), *Learning Management System* (LMS), aplikasi interaktif, dan simulasi komputer. Media ini memungkinkan siswa berpartisipasi aktif dalam proses belajar, misalnya melalui manipulasi objek virtual, eksplorasi, atau simulasi situasi nyata. Contohnya, AR dapat menampilkan model 3D perangkat keras komputer sehingga siswa dapat melihat dan memanipulasi komponen secara virtual. LMS memungkinkan siswa mengakses materi, kuis, dan forum diskusi secara daring, mendukung pembelajaran mandiri, fleksibel, dan personal. Media digital sangat relevan dalam pendidikan abad 21 karena dapat mengembangkan keterampilan berpikir kritis, kolaborasi, kreativitas, dan komunikasi.

e. Integrasi dan Relevansi dalam Pembelajaran Modern

Penggunaan kombinasi berbagai jenis media dapat meningkatkan efektivitas pembelajaran. Misalnya, guru dapat mengombinasikan media visual (diagram), audio (narasi), dan digital interaktif (AR/VR) untuk menjelaskan konsep sains yang kompleks. Hal ini memungkinkan siswa belajar secara multi-sensorial, meningkatkan pemahaman dan retensi, serta

menyesuaikan dengan berbagai gaya belajar, seperti visual, auditori, dan kinestetik (Gagné et al. 1992). Dengan demikian, klasifikasi media berdasarkan sifat menjadi landasan penting bagi guru untuk merancang pembelajaran yang efektif, menarik, dan relevan dengan kebutuhan siswa serta tuntutan pendidikan modern.

Klasifikasi berdasarkan sifat media ini menjadi dasar penting bagi guru untuk memilih media yang paling sesuai dengan tujuan pembelajaran dan karakteristik peserta didik, sekaligus memaksimalkan efektivitas dan pengalaman belajar siswa.

2. Klasifikasi Berdasarkan Fungsi atau Tujuan

Selain diklasifikasikan berdasarkan sifat atau media, media pembelajaran juga dapat dikategorikan berdasarkan fungsi atau tujuan penggunaannya dalam proses belajar mengajar. Klasifikasi ini membantu guru untuk merancang strategi pembelajaran yang lebih efektif dan sesuai dengan kebutuhan siswa, materi, serta konteks pembelajaran (Heinich 2002; Sadiman 1986). Dengan memahami fungsi media, guru dapat memaksimalkan potensi media untuk meningkatkan pemahaman, keterampilan, dan motivasi belajar siswa.

a. Media untuk Penyampaian Informasi (Informational)

Media informational digunakan untuk menyampaikan konsep, fakta, teori, atau prosedur secara sistematis dan terstruktur. Media ini menekankan penyampaian materi secara jelas agar siswa dapat memahami informasi yang disampaikan. Contohnya meliputi buku teks, presentasi slide, infografik, diagram, video pembelajaran, atau animasi edukatif. Sebagai ilustrasi, video animasi tentang sistem peredaran darah manusia membantu siswa memahami proses biologis secara visual dan auditori, sehingga informasi yang disampaikan lebih mudah dipahami dan diingat. Media jenis ini sangat relevan untuk materi yang bersifat konseptual atau abstrak, di mana representasi visual atau audio dapat mempermudah pemahaman (Mayer 2009).

b. Media untuk Latihan atau Praktik (Instructional/Practical)

Media instructional atau praktikal digunakan untuk memberikan pengalaman langsung atau latihan kepada siswa agar dapat menginternalisasi konsep yang telah dipelajari. Contoh media ini meliputi simulasi komputer, laboratorium virtual, modul interaktif, aplikasi AR, serta permainan edukatif berbasis teknologi. Misalnya, aplikasi AR yang menampilkan model 3D perangkat keras komputer memungkinkan siswa untuk melakukan praktik merakit komponen secara virtual sebelum praktik langsung di laboratorium. Media jenis ini tidak hanya memperkuat keterampilan praktis, tetapi juga memfasilitasi pembelajaran berbasis pengalaman (*experiential Learning*), yang terbukti meningkatkan pemahaman dan retensi siswa (Gagné et al. 1992).

c. Media untuk Evaluasi (Assessment)

Media evaluasi digunakan untuk mengukur pencapaian belajar siswa, baik dalam hal pengetahuan, keterampilan, maupun sikap. Contohnya mencakup kuis digital, tes online, lembar evaluasi, rubrik penilaian, dan *software* penilaian interaktif. Media ini memungkinkan guru mendapatkan umpan balik secara cepat dan akurat mengenai kemampuan siswa, sekaligus mengevaluasi efektivitas strategi pembelajaran yang diterapkan. Misalnya, LMS dengan fitur kuis interaktif memungkinkan guru menilai kemampuan siswa secara real-time, sekaligus memberikan feedback yang memandu perbaikan belajar siswa (Prof. Dr. Yusufhadi Miarso 2004).

d. Media untuk Motivasi dan Pengembangan Minat (Motivational)

Media motivasional bertujuan menumbuhkan minat, rasa ingin tahu, dan motivasi belajar siswa. Media ini dapat berupa video inspiratif, animasi interaktif, aplikasi gamifikasi, permainan edukatif, atau konten interaktif berbasis AR/VR. Misalnya, aplikasi AR yang menampilkan simulasi eksperimen kimia interaktif dapat membuat siswa lebih tertarik dan

termotivasi untuk mencoba konsep tersebut secara nyata. Media motivasional meningkatkan keterlibatan siswa, memfasilitasi belajar aktif, dan membantu mengembangkan keterampilan berpikir kritis serta problem solving (Sadiman 1986).

Dengan memahami klasifikasi media berdasarkan fungsi atau tujuan, guru dapat merancang pembelajaran yang holistik, mengombinasikan media informational, praktikal, evaluatif, dan motivasional sesuai kebutuhan materi dan karakteristik peserta didik. Pendekatan ini tidak hanya membuat proses belajar lebih efektif, tetapi juga meningkatkan pengalaman belajar siswa sehingga lebih menarik, interaktif, dan relevan dengan tuntutan pendidikan abad 21.

3. Klasifikasi Berdasarkan Kompleksitas dan Teknologi

Pemilihan media pembelajaran yang tepat sangat dipengaruhi oleh tingkat kompleksitas dan teknologi yang digunakan. Memahami klasifikasi ini menjadi sangat penting karena menentukan bagaimana media dapat digunakan untuk mendukung tujuan pembelajaran, memfasilitasi interaksi antara guru dan peserta didik, serta menyesuaikan dengan karakteristik materi yang diajarkan. (Andi Kristanto, S.Pd. 2016) menyatakan bahwa media pembelajaran dapat dikategorikan menjadi dua kelompok utama, yaitu media sederhana dan media kompleks atau teknologi tinggi. Kedua kategori ini memiliki karakteristik, keunggulan, keterbatasan, dan peran yang berbeda dalam proses pembelajaran.

a. Media Sederhana

Media sederhana merupakan media pembelajaran yang mudah diakses dan digunakan, tidak memerlukan teknologi canggih, serta dapat dioperasikan dengan keterampilan dasar. Media jenis ini sangat efektif untuk menyampaikan konsep-konsep dasar, memperjelas materi secara visual atau auditori, serta mendukung kegiatan belajar-mengajar yang bersifat tatap muka. Contoh media sederhana antara lain:

- 1) Papan tulis dan spidol yang digunakan untuk menyampaikan materi secara langsung, memungkinkan guru menulis,

menggambar diagram, atau membuat ilustrasi secara real-time, yang membantu peserta didik memvisualisasikan konsep secara lebih konkret.

- 2) Gambar dan poster edukatif guna menyajikan informasi visual yang memperkuat pemahaman konsep abstrak atau prosedural. Misalnya, poster daur ulang di kelas sains untuk memvisualisasikan proses pengolahan limbah.
- 3) Buku teks dan modul cetak yang berfungsi sebagai sumber belajar utama yang dapat diakses secara fleksibel oleh siswa. Buku dan modul membantu siswa mempelajari materi secara berulang, sehingga mendukung pemahaman yang lebih mendalam.
- 4) Kartu flash dan model 3D sederhana yang digunakan untuk pengenalan objek atau istilah tertentu, seperti model organ tubuh atau alat-alat laboratorium. Media ini memfasilitasi pembelajaran kinestetik dan visual sekaligus.

Keunggulan media sederhana terletak pada biaya rendah, kemudahan penggunaan, dan fleksibilitas dalam berbagai situasi pembelajaran. Namun, keterbatasannya adalah ketidakmampuannya menyajikan materi secara interaktif, imersif, atau dinamis seperti media berbasis teknologi.

b. Media Kompleks atau Teknologi Tinggi

Media kompleks menggunakan teknologi canggih untuk menciptakan pengalaman belajar yang lebih interaktif, imersif, dan mendalam. Media jenis ini tidak hanya menyampaikan informasi, tetapi juga memungkinkan peserta didik untuk berinteraksi secara langsung dengan materi, memperoleh umpan balik real-time, dan melakukan simulasi atau eksperimen yang sebelumnya sulit dilakukan secara fisik. Contoh media kompleks antara lain:

- 1) Simulasi komputer memberikan lingkungan virtual untuk eksperimen atau latihan tanpa risiko kerusakan fisik atau bahaya nyata. Misalnya, simulasi laboratorium kimia yang memungkinkan siswa mencampur bahan kimia secara aman.

- 2) *Augmented Reality* (AR) menggabungkan objek digital dengan dunia nyata sehingga siswa dapat melihat, memutar, atau memanipulasi model 3D melalui perangkat mobile atau tablet, misalnya AR untuk mengenal perangkat keras komputer.
- 3) *Virtual Reality* (VR) menciptakan lingkungan virtual yang sepenuhnya imersif, seperti tur virtual ke lokasi bersejarah atau laboratorium sains, yang meningkatkan pemahaman konseptual dan keterampilan praktis.
- 4) *Learning Management System* (LMS) platform digital yang memungkinkan distribusi materi, kuis, forum diskusi, dan pelacakan kemajuan belajar siswa secara daring, mendukung pembelajaran jarak jauh dan personalisasi proses belajar.
- 5) Aplikasi interaktif program yang memungkinkan siswa berinteraksi secara langsung dengan materi melalui latihan, permainan edukatif, atau simulasi prosedural.

Menurut (Shoffa et al. 2021), media kompleks sangat bermanfaat untuk materi yang abstrak, prosedural, atau memerlukan visualisasi yang tidak dapat dicapai melalui media sederhana. Media ini mendukung pengembangan keterampilan abad 21, termasuk berpikir kritis, pemecahan masalah, dan kolaborasi. Namun, penggunaannya menuntut infrastruktur teknologi yang memadai, keterampilan teknis guru, serta biaya yang lebih tinggi dibanding media sederhana. Oleh karena itu, guru perlu mempertimbangkan keseimbangan antara efektivitas pembelajaran, ketersediaan sarana, dan kebutuhan peserta didik sebelum menentukan media yang akan digunakan.

Dengan memahami klasifikasi media berdasarkan kompleksitas dan teknologi, pendidik dapat merancang strategi pembelajaran yang lebih adaptif, interaktif, dan kontekstual. Pendekatan ini memungkinkan siswa memperoleh pengalaman belajar yang menarik, imersif, dan bermakna, baik dalam pembelajaran tatap muka maupun digital, sehingga meningkatkan keterlibatan, motivasi, dan capaian kompetensi secara signifikan (Andi Kristanto, S.Pd. 2016; Shoffa et al. 2021).

D. Prinsip Pemilihan Media yang Efektif

Dalam proses pembelajaran, media tidak hanya berfungsi sebagai perantara penyampaian informasi, tetapi juga sebagai sarana untuk membangun pengalaman belajar yang bermakna. Pemilihan media yang tepat menjadi faktor penting yang dapat memengaruhi tingkat pemahaman, motivasi, dan keterlibatan siswa. Media yang efektif mampu menghubungkan konsep abstrak menjadi lebih konkret, menyederhanakan informasi yang kompleks, serta memfasilitasi interaksi yang aktif antara guru dan siswa. Oleh karena itu, dalam merancang suatu media pembelajaran, diperlukan prinsip-prinsip tertentu yang menjadi acuan agar media tersebut tidak hanya menarik secara visual, tetapi juga relevan, tepat sasaran, dan mampu mendukung pencapaian tujuan pembelajaran secara optimal. Prinsip-prinsip ini membantu pendidik dalam mempertimbangkan berbagai aspek, mulai dari kesesuaian materi, karakteristik peserta didik, hingga kondisi lingkungan belajar.

1. Prinsip-Prinsip Dasar dalam Pemilihan Media

Dalam dunia pendidikan modern, penggunaan teknologi semakin menjadi kebutuhan utama untuk menunjang proses belajar mengajar. Salah satu inovasi teknologi yang kini banyak diterapkan adalah *Augmented Reality* (AR). AR memungkinkan siswa untuk berinteraksi dengan konten pembelajaran secara lebih nyata dan menarik, sehingga konsep abstrak dapat divisualisasikan dengan cara yang lebih konkret. Namun, keberhasilan penerapan AR dalam pembelajaran sangat bergantung pada pemilihan media yang tepat. Pemilihan media bukan hanya soal memilih alat teknologi terbaru, tetapi juga menyangkut kesesuaian media dengan tujuan pembelajaran, karakteristik siswa, serta efektivitas dalam mendukung proses belajar mengajar. Berikut ini adalah beberapa prinsip dasar yang perlu diperhatikan dalam pemilihan media pembelajaran berbasis AR agar media tersebut dapat berfungsi secara optimal dan memberikan manfaat maksimal.

a. Kejelasan dan Relevansi dengan Tujuan Pembelajaran

Prinsip pertama yang sangat penting adalah kejelasan dan relevansi media dengan tujuan pembelajaran. Media AR yang dipilih harus mampu menyampaikan informasi secara jelas, mudah dipahami, dan langsung terkait dengan kompetensi yang ingin dicapai. Kejelasan ini meliputi aspek visual, audio, maupun interaktif sehingga siswa dapat memahami materi dengan mudah tanpa mengalami kebingungan. Relevansi dengan tujuan pembelajaran juga penting karena media yang tidak sesuai dapat mengalihkan perhatian siswa atau menimbulkan informasi yang tidak terkait dengan materi inti. Sebagai contoh, jika tujuan pembelajaran adalah mengenal komponen perangkat keras komputer, maka media AR harus menampilkan model 3D komponen tersebut secara realistis, lengkap dengan fungsi dan cara penggunaannya, bukan hanya sekadar animasi menarik yang tidak berhubungan dengan materi.

b. Kemudahan Akses dan Penggunaan.(Chotib 2018)

Kemudahan akses dan penggunaan merupakan prinsip penting berikutnya. Media pembelajaran harus dapat diakses oleh guru maupun siswa tanpa hambatan teknis yang berarti. Hal ini mencakup kompatibilitas dengan perangkat yang tersedia, kemudahan instalasi, serta kesederhanaan dalam operasional sehari-hari. Media AR yang terlalu kompleks atau membutuhkan perangkat mahal bisa menghambat proses pembelajaran karena siswa atau guru kesulitan dalam menggunakannya. Dengan media yang mudah diakses, guru dapat fokus pada penyampaian materi, sedangkan siswa dapat belajar dengan lebih leluasa tanpa terganggu oleh masalah teknis. Selain itu, media yang sederhana dalam penggunaan juga meminimalkan waktu persiapan sebelum kelas dan memungkinkan lebih banyak waktu untuk kegiatan belajar yang interaktif.(Miftah and Nur Rokhman 2022).

c. Keterlibatan dan Interaktivitas Siswa

Media pembelajaran berbasis AR sebaiknya mampu menciptakan keterlibatan aktif siswa. Interaktivitas menjadi

salah satu kunci utama efektivitas media karena memungkinkan siswa untuk belajar secara aktif, bukan hanya pasif menerima informasi. Fitur interaktif pada AR, misalnya memutar, memindahkan, atau memperbesar objek 3D, dapat meningkatkan motivasi dan konsentrasi siswa. Dengan interaksi langsung terhadap materi, siswa dapat memahami konsep lebih mendalam, mengembangkan keterampilan berpikir kritis, dan meningkatkan daya ingat. Keterlibatan aktif ini juga memberikan pengalaman belajar yang lebih menyenangkan, sehingga siswa lebih termotivasi untuk mengeksplorasi materi secara mandiri.(Shabrina, Putri, and Khairi 2025)

d. Fleksibilitas dan Adaptabilitas Media

Prinsip berikutnya adalah fleksibilitas dan adaptabilitas media. Media AR harus mampu disesuaikan dengan berbagai kondisi kelas, karakteristik siswa, dan variasi gaya belajar. Fleksibilitas memungkinkan guru menggunakan media untuk berbagai topik atau materi yang berbeda, menyesuaikan tingkat kesulitan sesuai kemampuan siswa, atau mengubah cara penyajian agar lebih relevan dengan kebutuhan kelas. Sebagai contoh, sebuah media AR yang awalnya dirancang untuk materi pengenalan komputer dapat diadaptasi untuk latihan perakitan komputer dengan menambahkan level interaktif baru atau simulasi yang lebih kompleks. Adaptabilitas media membantu guru menjangkau seluruh siswa, baik yang cepat memahami maupun yang membutuhkan pendekatan lebih intensif.

e. Efisiensi Sumber Daya (Waktu, Biaya, dan Teknis)

Dalam pemilihan media, efisiensi menjadi pertimbangan penting. Media AR yang efektif tidak hanya memberikan kualitas pembelajaran yang tinggi, tetapi juga efisien dalam penggunaan waktu, biaya, dan sumber daya teknis. Media yang memerlukan biaya tinggi, perangkat khusus yang sulit diakses, atau waktu persiapan yang panjang dapat menjadi kendala bagi sekolah. Sebaliknya, media yang efisien memungkinkan guru mempersiapkan pembelajaran dengan cepat, siswa dapat menggunakan media tanpa kesulitan, dan sekolah dapat

memaksimalkan manfaat media tanpa mengeluarkan biaya besar. Efisiensi juga mencakup kestabilan teknis media, sehingga selama proses pembelajaran, guru dan siswa tidak terganggu oleh gangguan teknis atau kesalahan perangkat.(Mustaqim and Kurniawan 2022)

f. Dukungan terhadap Berbagai Gaya Belajar

Setiap siswa memiliki gaya belajar yang berbeda, seperti visual, auditori, dan kinestetik. Media pembelajaran yang efektif harus mampu mendukung keberagaman gaya belajar ini. Media AR memberikan keunggulan dalam hal visualisasi materi, misalnya menampilkan objek tiga dimensi atau animasi yang memudahkan pemahaman visual. Selain itu, kombinasi audio, teks, dan elemen interaktif memungkinkan siswa dengan gaya belajar auditori maupun kinestetik juga mendapatkan pengalaman belajar yang optimal. Dengan dukungan ini, media tidak hanya menjangkau sebagian siswa, tetapi seluruh siswa dalam kelas, sehingga pencapaian hasil belajar lebih merata dan menyeluruh.

g. Keamanan dan Kenyamanan Penggunaan

Prinsip tambahan yang juga penting adalah keamanan dan kenyamanan penggunaan. Media AR harus dirancang agar aman digunakan, baik dari segi fisik maupun psikologis. Misalnya, penggunaan headset atau perangkat mobile harus ergonomis dan tidak menyebabkan kelelahan visual atau fisik. Media juga harus menyajikan konten yang sesuai usia dan bebas dari materi yang dapat mengganggu konsentrasi siswa. Kenyamanan penggunaan ini membantu siswa fokus pada pembelajaran dan mendukung pengalaman belajar yang menyenangkan.

Dengan memperhatikan prinsip-prinsip dasar di atas, media pembelajaran berbasis AR dapat berfungsi lebih dari sekadar alat penyampaian materi. Media ini menjadi sarana untuk memperjelas konsep, meningkatkan interaktivitas, mengakomodasi berbagai gaya belajar, dan memaksimalkan hasil belajar siswa. Pemilihan

media yang tepat menjadikan proses pembelajaran lebih efektif, efisien, dan menyenangkan, sekaligus mempersiapkan siswa menghadapi tuntutan pembelajaran abad ke-21 yang menuntut kreativitas, keterampilan teknologi, dan kemampuan berpikir kritis. Oleh karena itu, guru dan pengembang media harus secara cermat menilai berbagai aspek sebelum memutuskan media AR yang akan digunakan, sehingga setiap proses belajar mengajar memberikan pengalaman yang bermakna dan berdampak jangka panjang bagi siswa.

2. Penjabaran Prinsip dengan Contoh Praktis

Pemilihan media yang tepat tidak bersifat generic ia harus ditempatkan dalam konteks materi, tujuan, kondisi penyelenggaraan pembelajaran, serta ketersediaan sumber daya. Prinsip-prinsip dasar yang telah dibahas sebelumnya menjadi panduan, namun penerapan praktisnya memerlukan penyesuaian. Di bawah ini diberikan beberapa contoh konkret bagaimana prinsip tersebut diterjemahkan ke dalam pilihan media dan desain pembelajaran, serta pertimbangan konteks (tatap muka, daring, hybrid) dan keterbatasan sumber daya.

a. Media visual sederhana untuk materi rumit (konseptual/abstrak)

Untuk materi yang bersifat abstrak atau berlapis-lapis (mis. aliran listrik, sistem jaringan komputer, atau mekanisme biologi), media visual seperti diagram interaktif, animasi singkat, atau slide bertingkat seringkali lebih efektif daripada penjelasan verbal saja. Contoh praktis: pada topik “aliran listrik”, guru dapat menggunakan diagram beranimasi yang memperlihatkan arus, resistansi, dan efek paralel/seri diberi label dan Langkah sehingga siswa dapat mengikuti proses langkah demi langkah. Dalam kelas tatap muka, diagram ini dapat diproyeksikan dan didiskusikan bersama; dalam pembelajaran daring, rekaman layar dan narasi (microlecture) dapat diunggah pada LMS untuk diulang siswa. Jika tidak tersedia akses digital, cetak poster berseri atau kartu kerja berurutan menjadi alternatif yang mematuhi prinsip efisiensi dan aksesibilitas.

b. Media interaktif untuk praktik keterampilan (procedural/praktik)

Keterampilan prosedural (mis. merakit komputer, pengamatan laboratorium, prosedur klinis) memperoleh manfaat besar dari media interaktif yang memungkinkan “*Learning-by-doing*”. AR mobile sederhana yang menampilkan komponen 3D dan petunjuk langkah demi langkah dapat menggantikan atau melengkapi praktik laboratorium yang terbatas alatnya. Contoh: siswa jurusan TKJ menggunakan aplikasi AR pada smartphone untuk menempatkan dan melepas komponen *motherboard* secara virtual sebelum praktik fisik; hal ini mengurangi risiko kerusakan dan mempercepat proses pembelajaran. Dalam konteks hybrid, sesi daring dapat memuat simulasi interaktif sebagai persiapan, lalu sesi tatap muka dipakai untuk praktik nyata. Jika sekolah tidak memiliki anggaran AR/VR, simulasi berbasis web atau video tutorial yang disertai tugas praktik (rubrik jelas) dapat menjadi solusi yang hemat biaya.

c. Kombinasi media (multimodal) untuk mendukung berbagai gaya belajar

Untuk menjangkau siswa visual, auditori, dan kinestetik sekaligus, kombinasi media seringkali lebih efektif. Misalnya, pelajaran anatomi dapat memadukan: (a) model 3D/AR untuk visual dan kinestetik, (b) narasi audio atau podcast untuk siswa auditori, (c) lembar kerja praktis untuk kegiatan kinestetik. Pendekatan ini harus hati-hati agar tidak berlebihan materi yang terlalu banyak format justru membingungkan oleh karena itu pilihlah satu atau dua format utama yang saling melengkapi.

d. Pertimbangan konteks penyelenggaraan: daring, tatap muka, hybrid

1) Tatap muka memanfaatkan media yang memfasilitasi interaksi real-time (simulasi desktop lab, proyeksi animasi, demonstrasi langsung).

- 2) Daring memprioritas pada aksesibilitas (file ringan, caption, mobile-friendly), kemampuan self-paced (rekaman, LMS, kuis interaktif).
- 3) Hybrid digunakan media daring untuk persiapan dan remedial; gunakan sesi tatap muka untuk praktik yang membutuhkan peralatan atau bimbingan intensif.

e. Menghadapi keterbatasan sumber daya: alternatif praktis

Ketika terbentur perangkat, bandwidth, atau anggaran, terapkan prinsip efisiensi:

- 1) Gunakan smartphone siswa (BYOD) dengan aplikasi AR ringan daripada headset mahal.
- 2) Konversi animasi menjadi gambar berurutan + panduan tertulis jika koneksi lemah.
- 3) Manfaatkan sumber terbuka (open educational resources) dan LMS gratis untuk distribusi materi.
- 4) Tingkatkan kapasitas guru melalui modul pelatihan singkat agar penggunaan media efektif (bukan sekadar “hiasan”).

f. Checklist praktis bagi guru sebelum memilih media

- 1) Apakah media mendukung kompetensi yang ingin dicapai?
- 2) Apakah siswa dan guru memiliki akses perangkat dan koneksi yang diperlukan?
- 3) Apakah media memungkinkan interaksi/umpan balik?
- 4) Berapa biaya dan waktu yang diperlukan untuk menyiapkan/menjaga media?
- 5) Apakah ada alternatif sederhana bila terjadi kendala teknis?
- 6) Bagaimana media mengakomodasi perbedaan gaya belajar dan kebutuhan aksesibilitas (caption, alt text)?

g. Contoh skenario implementasi singkat

- 1) Matematika (geometri) menggunakan aplikasi geometri dinamis (interaktif) untuk eksplorasi; bila daring, rekaman demonstrasi dan tugas praktik; bila tanpa perangkat, gunakan lembar kerja manipulatif.

- 2) Komputer & Jaringan menggunakan AR untuk visualisasi komponen *hardware*, simulasi jaringan untuk praktik konfigurasi, lab fisik bagi praktik akhir.
- 3) Bahasa menggunakan video dan tugas rekaman oral untuk latihan berbicara dan forum diskusi di LMS untuk interaksi asinkron.

3. Pendekatan Pengambilan Keputusan Guru dalam Memilih Media Pembelajaran

Pemilihan media pembelajaran yang efektif tidak dilakukan secara acak, melainkan melalui proses pengambilan keputusan yang sistematis oleh guru. Pendekatan ini bertujuan memastikan bahwa media yang dipilih benar-benar relevan dengan tujuan pembelajaran, sesuai dengan karakteristik peserta didik, dan mampu meningkatkan kualitas interaksi serta pemahaman materi. Beberapa tahap utama dalam pengambilan keputusan ini antara lain:

a. Analisis Kebutuhan

Tahap awal melibatkan identifikasi kebutuhan pembelajaran. Guru perlu mengevaluasi tujuan pembelajaran, kompleksitas materi, kemampuan siswa, serta kondisi lingkungan belajar. Misalnya, jika materi bersifat prosedural dan memerlukan praktik langsung, media interaktif atau simulasi AR/VR dapat lebih sesuai dibandingkan media visual statis. Analisis kebutuhan juga mempertimbangkan ketersediaan perangkat, kemampuan teknis guru, dan preferensi siswa.

b. Evaluasi Media yang Tersedia

Setelah kebutuhan ditentukan, guru melakukan evaluasi terhadap berbagai media yang potensial. Evaluasi ini meliputi kelayakan teknis, keterjangkauan biaya, kemudahan penggunaan, tingkat interaktivitas, serta kemampuan media untuk mendukung berbagai gaya belajar. Media yang memiliki reputasi baik atau telah diuji di konteks serupa dapat menjadi prioritas. Evaluasi ini dapat dilakukan dengan mengacu pada prinsip-prinsip dasar pemilihan media, seperti relevansi, fleksibilitas, dan efisiensi sumber daya.

c. Uji Coba Media (Pilot Test)

Sebelum penerapan penuh, media sebaiknya diuji coba pada kelompok kecil siswa. Uji coba ini memungkinkan guru melihat respons siswa, efektivitas penyampaian materi, serta kendala teknis yang mungkin muncul. Misalnya, guru dapat mencoba aplikasi AR pada beberapa siswa untuk menilai kejelasan instruksi, kenyamanan interaksi, dan dampaknya terhadap pemahaman konsep. Hasil uji coba ini memberikan masukan praktis untuk perbaikan.

d. Revisi dan Penyesuaian

Berdasarkan temuan dari uji coba, guru melakukan revisi dan penyesuaian media. Revisi ini dapat berupa perubahan konten, tata letak visual, tingkat interaktivitas, atau bahkan pemilihan media alternatif yang lebih sesuai dengan kondisi kelas. Tahap ini penting untuk memastikan bahwa media yang digunakan tidak hanya menarik, tetapi juga benar-benar efektif dalam mendukung pencapaian tujuan pembelajaran.

e. Implementasi dan Monitoring

Setelah media dipilih dan disesuaikan, tahap berikutnya adalah implementasi dalam skala penuh. Guru perlu memantau efektivitas media selama proses pembelajaran, termasuk keterlibatan siswa, pemahaman materi, dan respons terhadap media. Monitoring ini memungkinkan guru melakukan perbaikan berkelanjutan jika diperlukan.

Pendekatan sistematis ini menekankan bahwa pemilihan media bukan sekadar aspek teknis, melainkan bagian dari strategi pedagogis yang holistik. Guru yang cermat dalam menyeleksi media akan lebih mampu menghadirkan pengalaman belajar yang interaktif, adaptif, dan sesuai kebutuhan siswa.

Proses pengambilan keputusan ini juga menjadi jembatan menuju topik berikutnya, yaitu Tren Teknologi dalam Media Pembelajaran, karena pemahaman terhadap inovasi teknologi seperti AR, VR, video interaktif, dan LMS akan mempengaruhi pilihan media yang relevan, efektif, dan adaptif terhadap perkembangan pendidikan abad 21.

E. Tren Teknologi dalam Media Pembelajaran

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi telah membawa perubahan signifikan dalam cara guru menyampaikan materi dan siswa belajar. Media pembelajaran modern kini tidak lagi terbatas pada alat tradisional seperti papan tulis atau buku cetak, melainkan meluas ke berbagai platform digital yang interaktif dan adaptif. Tren teknologi dalam media pembelajaran mencerminkan upaya pendidikan untuk mengikuti kebutuhan abad 21, yang menekankan keterampilan berpikir kritis, kolaborasi, kreativitas, dan kemampuan memecahkan masalah.

Penerapan teknologi seperti *Augmented Reality* (AR), *Virtual Reality* (VR), video interaktif, *Learning Management System* (LMS), dan gamifikasi memungkinkan terciptanya pengalaman belajar yang lebih imersif dan menarik. Tren ini tidak hanya memperkaya konten pembelajaran, tetapi juga membuka peluang bagi guru untuk menyesuaikan strategi pembelajaran sesuai karakteristik siswa, kondisi kelas, serta tuntutan kurikulum modern. Dengan memahami tren teknologi yang berkembang, pendidik dapat membuat keputusan yang lebih tepat dalam memilih media pembelajaran yang efektif dan relevan.

1. Jenis-Jenis Tren Teknologi dalam Media Pembelajaran

Perkembangan teknologi dalam pendidikan telah menghadirkan beragam media pembelajaran yang mampu meningkatkan efektivitas dan pengalaman belajar. Pemahaman terhadap jenis-jenis tren teknologi ini menjadi penting agar guru dapat memilih dan mengimplementasikan media sesuai kebutuhan pembelajaran. Menurut (Bates, A. W.; Poole 2004) dalam *Effective Teaching with Technology in Higher Education*, pemilihan teknologi harus mempertimbangkan kesesuaian dengan tujuan pembelajaran, karakteristik peserta didik, serta kemudahan penerapannya. Berikut adalah beberapa tren teknologi yang saat ini banyak diadopsi dalam pembelajaran:

a. *Augmented Reality (AR)*

AR memungkinkan integrasi objek virtual 3D ke dalam lingkungan nyata sehingga siswa dapat berinteraksi langsung dengan model atau simulasi yang relevan dengan materi pembelajaran. Misalnya, pada mata pelajaran Teknologi Informasi, AR dapat digunakan untuk memvisualisasikan komponen perangkat keras komputer secara detail, memungkinkan siswa memahami bentuk, fungsi, dan cara kerjanya tanpa harus memiliki perangkat fisik. Penelitian oleh (Ibáñez and Delgado-Kloos 2018) dalam *Augmented Reality for STEM Learning* menunjukkan bahwa penggunaan AR dapat meningkatkan motivasi, pemahaman konsep, dan retensi informasi siswa.

b. *Virtual Reality (VR)*

VR menghadirkan pengalaman belajar yang sepenuhnya imersif melalui simulasi lingkungan virtual. Dalam pembelajaran sains, VR dapat digunakan untuk membuat laboratorium virtual yang memungkinkan eksperimen dilakukan tanpa risiko keselamatan atau keterbatasan fasilitas. Misalnya, siswa dapat mempelajari reaksi kimia berbahaya dalam lingkungan yang aman. Menurut (Cheng and Tsai 2019) dalam *A Case Study of VR in Education*, teknologi ini mendukung pembelajaran berbasis eksplorasi dan memperdalam keterlibatan kognitif siswa.

c. *Video Interaktif*

Berbeda dengan video konvensional, video interaktif menyertakan elemen navigasi, kuis, atau umpan balik langsung yang memungkinkan siswa aktif terlibat selama menonton. Contohnya adalah video pembelajaran matematika yang memberikan latihan soal di tengah tayangan untuk menguji pemahaman konsep yang baru dijelaskan. (Laurillard 2012) dalam *Teaching as a Design Science* menjelaskan bahwa integrasi interaktivitas dalam media video meningkatkan kualitas pembelajaran karena siswa tidak hanya menerima

informasi, tetapi juga memproses dan mengaplikasikannya secara langsung.

d. *Learning Management System (LMS)*

LMS merupakan platform digital yang digunakan untuk mendistribusikan materi, mengelola tugas, dan melakukan evaluasi pembelajaran. Contoh populer meliputi Moodle, Google Classroom, dan Canvas. Melalui LMS, guru dapat merancang kelas daring yang terstruktur, mengatur jadwal, memberikan penilaian, serta memfasilitasi diskusi. Penelitian oleh (Al-Busaidi and Al-Shihi 2012) dalam *Key Factors to LMS Success in Education* menegaskan bahwa LMS berperan penting dalam menciptakan sistem pembelajaran fleksibel dan terukur, terutama dalam pembelajaran jarak jauh.

e. *Gamifikasi & Game-Based Learning*

Gamifikasi mengadopsi elemen permainan seperti poin, lencana, dan papan peringkat untuk meningkatkan motivasi siswa. Sementara itu, *Game-Based Learning* menggunakan permainan sebagai inti kegiatan belajar. Contohnya, siswa mempelajari sejarah melalui permainan simulasi peradaban atau memahami konsep matematika melalui game berbasis tantangan logika. (Kapp 2012) dalam *The Gamification of Learning and Instruction* menjelaskan bahwa pendekatan ini dapat meningkatkan keterlibatan emosional dan memperkuat daya ingat.

f. *Kecerdasan Buatan (AI) dan Chatbot Pembelajaran*

AI memungkinkan personalisasi pembelajaran berdasarkan profil dan kebutuhan siswa, sementara *chatbot* dapat memberikan asistensi otomatis seperti menjawab pertanyaan, memberikan kuis, atau memberikan rekomendasi materi tambahan. Misalnya, *chatbot* pembelajaran bahasa dapat memberikan latihan percakapan dan koreksi tata bahasa secara instan. Menurut (Chen, Chen, and Lin 2020) dalam *AI in Education: Applications and Challenges*, teknologi ini

membantu guru memantau perkembangan siswa secara real time dan memberikan intervensi yang tepat waktu.

Dengan memahami berbagai jenis tren teknologi ini, guru dan institusi pendidikan dapat memilih media yang paling relevan dan efektif sesuai dengan tujuan pembelajaran dan kondisi peserta didik. Pemahaman ini akan mengarah pada pemanfaatan yang tepat, sehingga teknologi tidak hanya menjadi pelengkap, tetapi benar-benar berkontribusi pada peningkatan mutu pembelajaran.

2. Manfaat Tren Teknologi dalam Media Pembelajaran

Pemanfaatan tren teknologi dalam media pembelajaran memberikan berbagai manfaat yang signifikan baik bagi guru maupun siswa. Salah satu manfaat utama adalah meningkatkan keterlibatan siswa. Teknologi seperti *Augmented Reality* (AR) dan *Virtual Reality* (VR) menghadirkan pengalaman belajar yang imersif dan interaktif, sehingga siswa lebih termotivasi untuk berpartisipasi aktif dalam proses pembelajaran. (Ibáñez and Delgado-Kloos 2018) menekankan bahwa penggunaan AR dalam pembelajaran STEM mampu meningkatkan motivasi, minat, serta keterlibatan siswa secara substansial karena mereka dapat berinteraksi langsung dengan objek virtual yang terintegrasi dengan dunia nyata. Misalnya, visualisasi perangkat keras komputer melalui AR memungkinkan siswa memahami konsep kompleks secara lebih nyata dan menarik dibandingkan hanya menggunakan buku teks atau gambar statis (Ibáñez and Delgado-Kloos 2018).

Selain itu, tren teknologi memungkinkan pembelajaran adaptif dan personalisasi yang sesuai dengan kebutuhan dan kemampuan masing-masing siswa. *Learning Management System* (LMS) dan AI dalam pendidikan dapat menyesuaikan materi, tingkat kesulitan, dan feedback sesuai dengan profil belajar siswa. Menurut (Chen et al. 2020), teknologi AI yang diintegrasikan dalam media pembelajaran memungkinkan guru untuk memantau kemajuan peserta didik secara real-time, memberikan intervensi yang tepat, serta menyesuaikan aktivitas belajar agar lebih efektif. Contohnya, *chatbot* pembelajaran dapat menyediakan latihan

tambahan bagi siswa yang mengalami kesulitan dan memberi tantangan lebih untuk siswa yang lebih cepat memahami materi.

Selain meningkatkan keterlibatan dan personalisasi, tren teknologi juga mengatasi keterbatasan media konvensional, seperti keterbatasan laboratorium, bahan percobaan, atau ruang kelas. VR memungkinkan siswa melakukan simulasi eksperimen kimia atau fisika yang sulit atau berisiko dilakukan di kelas nyata. (Cheng and Tsai 2019) menyebutkan bahwa simulasi VR memberikan kesempatan bagi siswa untuk bereksperimen dalam lingkungan aman dan fleksibel, sehingga pembelajaran dapat berlangsung secara penuh meskipun fasilitas fisik terbatas. Demikian pula, AR memungkinkan visualisasi objek 3D atau proses ilmiah tanpa perlu alat yang mahal, sehingga setiap siswa memiliki akses yang setara terhadap materi pembelajaran.

Lebih jauh lagi, tren teknologi mendukung pembelajaran berbasis kompetensi abad 21, yang menekankan keterampilan berpikir kritis, kolaborasi, kreativitas, dan komunikasi. Gamifikasi dan game-based *Learning*, misalnya, tidak hanya membuat materi lebih menarik, tetapi juga menuntut siswa untuk memecahkan masalah, bekerja sama dalam tim, dan berpikir strategis. (Kapp 2012) menegaskan bahwa gamifikasi dalam pendidikan meningkatkan keterlibatan emosional siswa, memperkuat motivasi intrinsik, dan mendorong penguasaan materi yang lebih mendalam.

Secara keseluruhan, integrasi tren teknologi dalam media pembelajaran memberikan manfaat holistik: meningkatkan keterlibatan, memungkinkan personalisasi dan adaptasi sesuai kebutuhan siswa, serta mengatasi keterbatasan media tradisional. Hal ini menegaskan pentingnya guru untuk memahami dan mengadopsi teknologi secara tepat, sehingga proses belajar-mengajar menjadi lebih efektif, efisien, dan menyenangkan. Pemahaman ini juga menjadi jembatan menuju pembahasan selanjutnya mengenai pertimbangan dalam implementasi teknologi dan pemilihan media, di mana aspek teknis, kesiapan

guru, dan kesesuaian dengan tujuan pembelajaran akan dianalisis lebih mendalam.

3. Pertimbangan dalam Implementasi Tren Teknologi

Pemanfaatan tren teknologi dalam media pembelajaran memang menawarkan berbagai manfaat, namun keberhasilan implementasinya sangat bergantung pada beberapa pertimbangan penting. Pertama, infrastruktur teknologi menjadi faktor kunci. Penggunaan AR, VR, video interaktif, atau LMS memerlukan perangkat keras yang memadai, koneksi internet yang stabil, serta ketersediaan biaya untuk pengadaan dan pemeliharaan. Tanpa dukungan infrastruktur yang cukup, penggunaan teknologi canggih dapat menjadi tidak efektif bahkan menimbulkan hambatan dalam proses belajar-mengajar (Chen et al. 2020; Ibáñez and Delgado-Kloos 2018).

Kedua, kesiapan guru dan siswa juga sangat menentukan keberhasilan implementasi. Guru perlu memiliki literasi digital yang memadai untuk mengoperasikan media berbasis teknologi, merancang aktivitas belajar yang interaktif, dan memanfaatkan fitur-fitur yang tersedia secara optimal. Sementara itu, siswa juga harus terbiasa dengan penggunaan teknologi, memiliki kemampuan navigasi aplikasi, serta memahami etika digital dalam pembelajaran daring atau hybrid. Kurangnya literasi digital baik pada guru maupun siswa dapat mengurangi efektivitas media dan menurunkan motivasi belajar (Cheng and Tsai 2019).

Ketiga, relevansi teknologi dengan tujuan pembelajaran harus menjadi pertimbangan utama. Teknologi yang digunakan sebaiknya tidak sekadar menarik secara visual, tetapi mampu mendukung pencapaian kompetensi dan tujuan pembelajaran yang telah ditetapkan. Misalnya, penggunaan AR dalam pembelajaran perakitan komputer hanya efektif jika interaksi 3D yang ditampilkan secara langsung memperkuat pemahaman siswa terhadap langkah-langkah perakitan, bukan hanya sebagai hiburan semata (Chen et al. 2020; Ibáñez and Delgado-Kloos 2018).

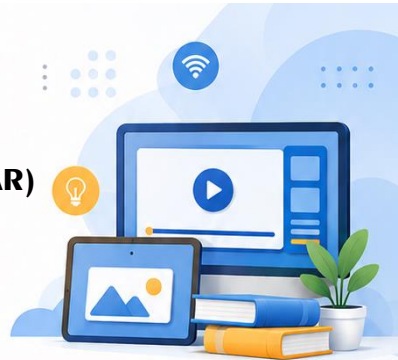
Selain itu, pertimbangan praktis seperti fleksibilitas penggunaan juga penting. Guru perlu menyesuaikan teknologi dengan kondisi kelas, ketersediaan perangkat, dan jumlah siswa. Media yang terlalu kompleks atau mahal mungkin tidak dapat digunakan setiap saat, sehingga strategi implementasi harus mempertimbangkan alternatif yang lebih sederhana atau kombinasi media konvensional dan digital. Pendekatan hybrid yang menggabungkan pembelajaran tatap muka dengan teknologi digital dapat menjadi solusi yang efektif untuk memaksimalkan manfaat teknologi sambil tetap mengatasi keterbatasan sumber daya.

Secara keseluruhan, implementasi tren teknologi dalam media pembelajaran harus direncanakan secara sistematis dengan memperhatikan aspek infrastruktur, kesiapan pengguna, relevansi pedagogis, dan fleksibilitas penggunaan. Dengan memperhatikan pertimbangan-pertimbangan tersebut, guru dapat mengoptimalkan potensi teknologi untuk meningkatkan kualitas proses belajar-mengajar, memperluas pengalaman belajar siswa, dan menjawab tuntutan pendidikan abad 21. Penekanan pada pertimbangan ini menjadi langkah penting sebagai penutup dari Bab 1, Konsep Dasar Media Pembelajaran, sebelum melanjutkan ke pembahasan Bab 2 yang akan mengulas perancangan dan pengembangan media pembelajaran berbasis teknologi.

BAB

2

PENGENALAN AUGMENTED REALITY (AR)



Bab ini memperkenalkan konsep dasar Augmented Reality (AR) sebagai teknologi yang menggabungkan objek virtual dengan dunia nyata secara interaktif dan real-time. Pembahasan mencakup definisi, karakteristik, komponen utama AR, sejarah perkembangannya, serta perbedaan AR dengan Virtual Reality (VR) dan Mixed Reality (MR). Bab ini juga menguraikan tren dan prospek pemanfaatan AR dalam pendidikan sebagai teknologi yang mampu meningkatkan visualisasi, interaktivitas, dan pengalaman belajar peserta didik.

A. Definisi dan Konsep AR

Augmented Reality (AR) merupakan teknologi yang mampu mengintegrasikan objek virtual yang dihasilkan oleh komputer ke dalam lingkungan dunia nyata secara interaktif dan berlangsung secara real-time. Teknologi ini memungkinkan pengguna untuk melihat perpaduan antara objek fisik dan objek digital dalam satu tampilan yang sama melalui perangkat seperti smartphone, tablet, maupun kacamata pintar (*smart glasses*). Berbeda dengan *Virtual Reality* (VR) yang menciptakan lingkungan virtual sepenuhnya dan memisahkan pengguna dari dunia nyata, AR mempertahankan keberadaan lingkungan nyata serta menambahkan informasi digital yang relevan sehingga pengguna tetap dapat berinteraksi dengan dunia di sekitarnya.

Dalam bidang pendidikan, *Augmented Reality* menjadi salah satu inovasi teknologi yang memiliki potensi besar untuk meningkatkan kualitas proses pembelajaran. Kehadiran AR memungkinkan materi yang bersifat abstrak, kompleks, dan sulit divisualisasikan menjadi lebih konkret dan mudah dipahami oleh peserta didik. Melalui representasi objek tiga dimensi (3D), animasi, audio, maupun video yang ditampilkan secara langsung pada lingkungan nyata, siswa dapat memperoleh pengalaman belajar yang lebih menarik, mendalam, dan bermakna. Teknologi ini mampu menghadirkan visualisasi yang tidak dapat diperoleh melalui media pembelajaran konvensional seperti buku teks, gambar dua dimensi, maupun presentasi statis.

Penggunaan AR dalam pembelajaran sangat relevan untuk mendukung pemahaman konsep-konsep yang membutuhkan visualisasi ruang dan bentuk. Sebagai contoh, pada materi perangkat keras komputer, siswa tidak hanya melihat gambar komponen seperti motherboard, prosesor, RAM, hard disk, atau power supply, tetapi juga dapat mengamati bentuk dan struktur komponen tersebut secara tiga dimensi. Siswa dapat memutar objek, memperbesar tampilan, melihat bagian-bagian tertentu secara detail, bahkan mempelajari fungsi masing-masing komponen secara interaktif. Dengan demikian, proses pembelajaran menjadi lebih kontekstual karena siswa dapat menghubungkan teori yang dipelajari dengan representasi visual yang mendekati kondisi nyata.

Selain meningkatkan pemahaman konsep, AR juga berperan dalam meningkatkan motivasi dan keterlibatan siswa selama proses pembelajaran. Interaksi langsung dengan objek virtual menciptakan pengalaman belajar yang lebih menyenangkan dan tidak monoton. Siswa menjadi lebih aktif dalam mengeksplorasi materi, melakukan pengamatan, serta menemukan informasi secara mandiri. Hal ini sejalan dengan pendekatan pembelajaran konstruktivistik yang menekankan bahwa pengetahuan dibangun melalui pengalaman dan interaksi aktif dengan lingkungan belajar.

Konsep *Augmented Reality* tidak hanya terbatas pada penambahan objek digital ke dalam dunia nyata, tetapi juga mencakup penciptaan pengalaman belajar yang lebih interaktif, kolaboratif, dan adaptif.

Teknologi ini memungkinkan siswa untuk melakukan simulasi berbagai aktivitas yang sulit diwujudkan dalam kondisi nyata karena keterbatasan sarana, biaya, waktu, maupun faktor keselamatan. Misalnya, dalam pembelajaran teknik komputer dan jaringan, siswa dapat mempelajari proses perakitan komputer, pemasangan komponen, atau identifikasi perangkat keras tanpa harus selalu menggunakan perangkat fisik yang jumlahnya terbatas. Dengan demikian, AR dapat menjadi alternatif laboratorium virtual yang efektif untuk mendukung kegiatan praktikum.

Lebih lanjut, penerapan AR dalam pendidikan mendukung karakteristik pembelajaran abad ke-21 yang menekankan kemampuan berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, dan literasi teknologi. Melalui pemanfaatan AR, siswa tidak hanya menjadi penerima informasi secara pasif, tetapi juga berperan sebagai pembelajar aktif yang mampu mengeksplorasi, menganalisis, dan mengonstruksi pengetahuan secara mandiri. Pengalaman belajar yang imersif dan interaktif tersebut dapat meningkatkan retensi informasi, memperkuat pemahaman konseptual, serta mendorong terciptanya pembelajaran yang lebih efektif dan berpusat pada siswa.

Seiring dengan perkembangan teknologi perangkat mobile yang semakin pesat, implementasi *Augmented Reality* dalam dunia pendidikan menjadi semakin mudah dan terjangkau. Berbagai aplikasi AR dapat dikembangkan dan digunakan pada perangkat yang telah dimiliki oleh sebagian besar siswa, seperti smartphone berbasis Android maupun iOS. Kondisi ini menjadikan AR sebagai salah satu solusi inovatif yang potensial untuk mendukung transformasi digital pendidikan, khususnya dalam menciptakan media pembelajaran yang interaktif, menarik, dan sesuai dengan kebutuhan generasi digital saat ini.

1. Definisi AR

Augmented Reality (AR) merupakan sebuah teknologi yang menggabungkan objek virtual dengan lingkungan nyata secara real-time, sehingga pengguna dapat berinteraksi secara langsung dengan informasi digital yang ditambahkan pada dunia fisik. Definisi AR pertama kali dirumuskan secara luas oleh (Azuma

1997), yang menjelaskan bahwa AR memiliki tiga karakteristik utama, yaitu menggabungkan dunia nyata dan dunia virtual, berjalan secara interaktif dan real-time, serta memungkinkan registrasi objek dalam tiga dimensi. Menurut Azuma, teknologi ini tidak sekadar menampilkan gambar digital di layar, tetapi juga memastikan bahwa elemen virtual dapat ditempatkan secara tepat dan proporsional pada dunia nyata sehingga memberikan ilusi seolah-olah berada di ruang yang sama.

Sementara itu, (Billinghurst 2023) mengembangkan perspektif yang lebih modern tentang AR, dengan menekankan aspek interaktivitas dan kolaborasi. Mereka berpendapat bahwa AR bukan hanya tentang menampilkan objek 3D di atas dunia nyata, tetapi juga memfasilitasi interaksi antar pengguna dalam lingkungan yang sama melalui objek virtual. Menurut mereka, AR membuka peluang besar di bidang pendidikan, industri, dan hiburan karena dapat meningkatkan pemahaman konsep abstrak melalui visualisasi langsung.

Pendapat lain disampaikan oleh (Hajirasouli and Banihashemi 2022) yang memperkenalkan konsep Reality-Virtuality Continuum. Mereka menempatkan AR di antara realitas murni dan *virtual reality* (VR), di mana AR mempertahankan elemen dunia nyata namun memperkaya persepsi pengguna dengan informasi virtual yang relevan. Dalam pandangan ini, AR dilihat sebagai salah satu bentuk *mixed reality*, yang menekankan pada keseimbangan antara informasi yang diambil dari dunia nyata dan elemen yang dihasilkan oleh komputer.

Menurut (Craig 2013), AR dapat didefinisikan sebagai media yang memperluas dunia fisik dengan lapisan digital yang dapat mencakup teks, gambar, video, dan animasi. Craig menyoroti bahwa nilai utama dari AR terletak pada kemampuannya untuk memberikan konteks tambahan terhadap objek nyata, sehingga membantu pengguna memahami informasi dengan lebih baik. Hal ini membuat AR sangat potensial untuk digunakan sebagai alat pembelajaran interaktif.

(Bamanger 2025) mendefinisikan AR sebagai teknologi yang menggabungkan informasi real-time yang dihasilkan oleh komputer dengan lingkungan nyata untuk menciptakan pengalaman interaktif yang imersif. Mereka menekankan bahwa keberhasilan implementasi AR sangat bergantung pada sensor, kamera, dan algoritma yang mampu mendeteksi serta melacak objek nyata secara akurat. Selain itu, Carmigniani menyoroti perkembangan pesat perangkat mobile sebagai salah satu faktor utama yang mempercepat adopsi teknologi AR di masyarakat luas.

Lebih lanjut, (Zhou, Duh, and Billinghurst 2012) menguraikan AR sebagai sistem yang menggabungkan dunia nyata dengan informasi virtual yang didaftarkan secara spasial, di mana integrasi tersebut dilakukan dengan memperhatikan kesesuaian perspektif, skala, dan orientasi. Menurut mereka, aspek kunci dari AR adalah registration, yaitu kemampuan untuk memastikan bahwa elemen virtual berada pada posisi yang benar di dunia nyata, sehingga pengalaman pengguna menjadi lebih alami dan meyakinkan.

Dari sudut pandang praktis, (Yuen et al. 2011) menjelaskan AR sebagai teknologi yang memungkinkan pengguna melihat dunia nyata dengan tambahan objek digital yang terintegrasi dengan baik. Mereka menekankan penerapan AR dalam pendidikan, di mana teknologi ini mampu meningkatkan motivasi belajar siswa melalui pengalaman belajar yang lebih visual, kontekstual, dan interaktif.

Jika dikompilasi, definisi-definisi dari para ahli tersebut menunjukkan kesepahaman bahwa AR adalah teknologi yang menggabungkan elemen dunia nyata dan virtual secara interaktif dan real-time, dengan penekanan pada akurasi registrasi spasial. Perbedaan definisi terletak pada fokus masing-masing ahli: (Azuma 1997) menekankan tiga karakteristik utama, (Hajirasouli and Banihashemi 2022) mengkontekstualkan AR dalam spektrum realitas, (Billinghurst 2023) menyoroti aspek kolaborasi, (Craig 2013) menekankan lapisan informasi kontekstual, (Bamanger 2025) fokus pada komponen teknis, sedangkan (Zhou et al. 2012)

serta (Yuen et al. 2011) memprioritaskan integrasi spasial dan manfaat edukatif.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa AR adalah teknologi yang memungkinkan penyatuan dunia nyata dan virtual secara harmonis melalui visualisasi tiga dimensi, interaksi real-time, dan registrasi spasial yang presisi, sehingga menghasilkan pengalaman pengguna yang kaya, interaktif, dan kontekstual.

Tabel 2. Tabel Pendapat Para Ahli

No	Ahli & Tahun	Definisi/Pendapat	Fokus Utama
1	Azuma (1997)	AR didefinisikan sebagai sistem yang memiliki tiga karakteristik utama: menggabungkan dunia nyata dan virtual, interaktif secara real-time, serta terdaftar dalam tiga dimensi.	Karakteristik dasar AR (integrasi real-virtual, real-time, 3D).
2	Hajirasouli & Banihashemi, (2022)	AR merupakan bagian dari <i>Mixed Reality Continuum</i> yang berada di antara dunia nyata dan dunia virtual sepenuhnya.	Posisi AR dalam spektrum realitas campuran.
3	Craig (2013)	AR adalah media yang memperluas dunia fisik dengan lapisan digital (teks, gambar, video, animasi) untuk memberikan konteks tambahan pada objek nyata.	Perluasan dunia nyata dengan informasi digital kontekstual.
4	Zhou, Duh, & Billinghurst (2008)	AR menggabungkan dunia nyata dengan informasi virtual yang didaftarkan secara spasial, dengan memperhatikan perspektif, skala, dan orientasi. Aspek kunci adalah <i>registration</i> .	Akurasi spasial & kesesuaian orientasi elemen virtual.
5	Yuen, Yaoyuneyong, & Johnson (2011)	AR adalah teknologi yang memungkinkan pengguna melihat dunia nyata dengan tambahan objek digital terintegrasi. Digunakan dalam pendidikan untuk meningkatkan motivasi belajar.	Penerapan AR dalam pendidikan (visual, interaktif, kontekstual).

No	Ahli & Tahun	Definisi/Pendapat	Fokus Utama
6	Billinghurst(2023)	AR adalah teknologi yang menggabungkan objek virtual ke dalam dunia nyata dan memungkinkan interaksi pengguna secara alami dengan objek tersebut.	Interaksi alami antara pengguna dan objek virtual.
7	Bamanger(2025)	AR didefinisikan sebagai teknologi yang memperkaya persepsi indera manusia dengan menambahkan informasi digital ke dunia nyata melalui perangkat seperti smartphone atau HMD.	Enrichment indera manusia melalui informasi digital.

2. Karakteristik AR

Augmented Reality (AR) memiliki karakteristik khusus yang membedakannya dari media pembelajaran konvensional maupun teknologi virtual lainnya. Karakteristik ini menjadi dasar bagi pemahaman bagaimana AR dapat diterapkan secara efektif dalam pendidikan modern, khususnya untuk meningkatkan keterlibatan, pemahaman, dan pengalaman belajar siswa. Beberapa karakteristik utama AR antara lain:

a. Integrasi Dunia Nyata dan Virtual

Salah satu ciri khas AR adalah kemampuannya menggabungkan elemen digital dengan dunia nyata. Menurut (Azuma 1997), AR harus menampilkan objek virtual yang terintegrasi secara visual dan spasial dengan lingkungan nyata sehingga pengguna dapat melihat keduanya secara bersamaan. Integrasi ini memungkinkan materi pembelajaran yang bersifat abstrak atau kompleks dapat divisualisasikan secara konkret, misalnya menampilkan model 3D perangkat keras komputer di atas meja belajar nyata siswa (Zhou et al. 2012).

b. Interaktivitas

Interaktivitas menjadi faktor penting yang membedakan AR dari media statis. (Billinghurst, Clark, and Lee 2015) menekankan bahwa AR memungkinkan pengguna berinteraksi

secara alami dengan objek virtual misalnya memutar, memperbesar, atau mengubah posisi model 3D yang membantu siswa untuk mengeksplorasi dan memahami konsep dengan lebih mendalam. (Yuen et al. 2011) juga menyoroti bahwa pengalaman interaktif AR dapat meningkatkan motivasi dan keterlibatan siswa dalam proses belajar karena siswa menjadi aktif, bukan hanya menerima informasi secara pasif.

c. Pemrosesan Real-Time (Real-Time Processing)

AR beroperasi secara real-time, yang berarti informasi digital ditampilkan dan diperbarui seketika sesuai dengan perubahan perspektif pengguna atau lingkungan fisik. (Craig 2013) menjelaskan bahwa real-time processing adalah elemen esensial agar interaksi antara pengguna, dunia nyata, dan konten virtual menjadi mulus dan responsif. Misalnya, saat siswa menggerakkan tablet untuk melihat model organ tubuh dalam pelajaran biologi, posisi, skala, dan orientasi objek virtual akan menyesuaikan secara langsung dengan sudut pandang perangkat.

d. Kontekstualitas

Selain tiga karakteristik utama di atas, AR juga menawarkan pengalaman belajar yang kontekstual. (Klopfer and Squire 2007) menekankan bahwa AR dapat menghadirkan materi pembelajaran yang relevan dengan lokasi atau konteks aktivitas siswa, sehingga pembelajaran lebih bermakna dan mudah diterapkan pada situasi nyata.

e. Dukungan Multi-Indera

AR sering memanfaatkan lebih dari satu indera manusia, termasuk visual, auditori, dan kinestetik, sehingga siswa dapat memperoleh pengalaman belajar yang lebih lengkap. (Carmigniani et al. 2010) menegaskan bahwa kemampuan AR untuk memperkaya persepsi indera ini membuat materi pembelajaran lebih menarik, imersif, dan mendukung berbagai gaya belajar.

Secara keseluruhan, karakteristik *Augmented Reality*, yang mencakup integrasi dunia nyata dan virtual, interaktivitas, pemrosesan real-time, kontekstualitas, serta dukungan multi-indra, menjadikan teknologi ini sangat potensial untuk meningkatkan kualitas pembelajaran. Karakteristik-karakteristik tersebut memungkinkan siswa berinteraksi secara aktif dengan materi, memperoleh pengalaman belajar yang imersif, dan memahami konsep-konsep kompleks dengan lebih mudah. Pemahaman mendalam mengenai karakteristik AR ini menjadi landasan penting sebelum membahas lebih lanjut tentang contoh penerapan AR dalam pendidikan, yang akan menampilkan bagaimana karakteristik tersebut diterjemahkan ke dalam praktik belajar-mengajar yang konkret dan efektif.

3. Contoh penerapan AR

Augmented Reality (AR) memiliki potensi besar untuk meningkatkan pengalaman belajar siswa melalui visualisasi yang interaktif dan imersif. Penerapan AR dapat disesuaikan dengan karakteristik materi, tujuan pembelajaran, serta gaya belajar siswa. Beberapa contoh penerapan AR dalam konteks pendidikan antara lain:

a. Visualisasi Perangkat Keras Komputer

Salah satu penerapan AR yang populer adalah pada pembelajaran teknologi informasi dan komputer, di mana AR digunakan untuk memvisualisasikan perangkat keras komputer dalam bentuk model 3D yang dapat diputar, diperbesar, dan dipecah menjadi komponen-komponen individual. Hal ini memungkinkan siswa untuk memahami struktur dan fungsi masing-masing komponen dengan cara yang lebih konkret dibandingkan dengan buku teks atau gambar statis (Billinghurst et al. 2015). Misalnya, aplikasi AR dapat menampilkan prosesor, *motherboard*, RAM, dan perangkat lain secara interaktif, sehingga siswa dapat mengeksplorasi setiap bagian sesuai kebutuhan pembelajaran.

b. Animasi Sains dan Eksperimen Virtual

Di bidang sains, AR digunakan untuk menampilkan animasi fenomena fisika, kimia, atau biologi yang sulit diamati secara langsung di laboratorium. Misalnya, AR dapat memvisualisasikan reaksi kimia secara 3D atau memperlihatkan proses pembelahan sel pada makhluk hidup. Menurut (Zhou et al. 2012), AR memungkinkan siswa mengamati eksperimen dari berbagai sudut pandang, sehingga pemahaman konsep menjadi lebih mudah dan menarik. Keterlibatan aktif siswa dalam memanipulasi objek virtual meningkatkan daya ingat dan pemahaman konsep.

c. Pembelajaran Sejarah dan Budaya

AR juga efektif diterapkan pada pembelajaran sejarah dan budaya, di mana siswa dapat menampilkan artefak, bangunan, atau peristiwa sejarah dalam bentuk digital di lingkungan nyata. Misalnya, melalui aplikasi AR, siswa dapat memvisualisasikan piramida Mesir, candi Borobudur, atau peristiwa sejarah tertentu di atas meja belajar mereka. Hal ini menciptakan pengalaman belajar yang imersif dan kontekstual, membantu siswa mengaitkan materi dengan dunia nyata (Klopfer and Squire 2007).

d. Pembelajaran Matematika dan Geometri

Dalam matematika, AR dapat memvisualisasikan bentuk geometri tiga dimensi yang sulit dibayangkan siswa dari gambar dua dimensi di buku teks. Misalnya, siswa dapat melihat dan memanipulasi kubus, bola, atau prisma di ruang nyata menggunakan AR. Visualisasi ini mempermudah siswa memahami konsep volume, luas permukaan, dan hubungan antar bentuk geometri, sehingga proses pembelajaran lebih efektif.

e. Pengembangan Keterampilan Praktik

AR juga dapat digunakan untuk pelatihan keterampilan praktis, seperti perakitan mesin, teknik laboratorium, atau

prosedur medis. Siswa dapat melakukan simulasi langkah-langkah praktis dengan panduan visual digital, mengurangi risiko kesalahan, dan meningkatkan kesiapan mereka sebelum melakukan praktik di dunia nyata (Yuen et al. 2011).

Penerapan AR yang tepat harus mempertimbangkan konteks pembelajaran, apakah tatap muka, daring, atau hybrid, serta keterbatasan sumber daya sekolah, seperti perangkat dan jaringan. Dengan integrasi yang baik, AR dapat memperkaya proses belajar, meningkatkan keterlibatan siswa, dan memfasilitasi pemahaman konsep yang kompleks.

B. Perbedaan AR, *Virtual Reality* (VR), dan *Mixed Reality* (MR)

Dalam perancangan media pembelajaran berbasis teknologi, pemahaman yang mendalam mengenai karakteristik dan perbedaan antara *Augmented Reality* (AR), *Virtual Reality* (VR), dan *Mixed Reality* (MR) menjadi sangat penting. Setiap teknologi memiliki cara kerja, tingkat interaktivitas, dan pengalaman pengguna yang berbeda, sehingga menentukan pilihan teknologi yang paling tepat sesuai tujuan pembelajaran, materi, dan kebutuhan siswa. Tanpa pemahaman ini, integrasi teknologi dalam pembelajaran dapat menjadi kurang efektif atau bahkan membingungkan bagi peserta didik.

Selain itu, pengetahuan tentang perbedaan AR, VR, dan MR membantu guru dan pengembang media dalam merancang pengalaman belajar yang sesuai dengan konteks kelas, baik itu pembelajaran tatap muka, daring, maupun hybrid. Memahami teknologi ini juga memungkinkan pemilihan media yang optimal untuk meningkatkan keterlibatan siswa, memfasilitasi pemahaman konsep, serta mendukung pembelajaran yang lebih interaktif, kontekstual, dan imersif.

1. *Augmented Reality* (AR)

Augmented Reality (AR) merupakan teknologi yang menggabungkan dunia nyata dengan elemen digital, sehingga pengguna dapat melihat lingkungan fisik mereka dengan tambahan objek virtual yang terintegrasi secara real-time. AR tidak

menciptakan dunia baru seperti *Virtual Reality* (VR), melainkan menambahkan lapisan informasi digital seperti teks, gambar, animasi, atau model 3D ke dalam lingkungan nyata, sehingga pengalaman belajar menjadi lebih interaktif dan kontekstual (Azuma 1997; Billinghurst et al. 2015).

Salah satu karakteristik utama AR adalah kemampuannya untuk menampilkan informasi digital yang selaras dengan posisi, perspektif, dan skala objek nyata. Misalnya, dalam pembelajaran perangkat keras komputer, AR dapat menampilkan model 3D komponen komputer di atas meja siswa, memungkinkan mereka memutar, memperbesar, atau menelusuri bagian-bagian internal perangkat tersebut. Pendekatan ini meningkatkan pemahaman konsep yang kompleks dan memfasilitasi keterlibatan siswa secara aktif (Yuen et al. 2011).

AR juga mendukung interaktivitas yang tinggi, di mana siswa dapat berinteraksi langsung dengan objek digital melalui gesture, sensor, atau perangkat mobile. Interaktivitas ini tidak hanya meningkatkan motivasi dan perhatian, tetapi juga membantu siswa membangun pengalaman belajar yang lebih personal dan adaptif terhadap kebutuhan mereka (Craig 2013). Selain itu, AR memungkinkan guru untuk menghadirkan materi yang relevan dengan konteks nyata, sehingga pembelajaran menjadi lebih bermakna dan mudah diterapkan pada situasi sehari-hari (Klopfer and Squire 2007).

Dengan demikian, AR menawarkan keunggulan unik dibanding media pembelajaran tradisional, yaitu kemampuan untuk memvisualisasikan konsep abstrak secara nyata, meningkatkan keterlibatan siswa, dan menyediakan pengalaman belajar yang lebih imersif, kontekstual, dan interaktif. Integrasi AR dalam pendidikan modern menjadi sangat relevan terutama untuk mata pelajaran yang membutuhkan visualisasi kompleks atau simulasi interaktif.

2. *Virtual Reality (VR)*

Virtual Reality (VR) adalah teknologi yang menciptakan lingkungan digital sepenuhnya, menggantikan dunia nyata dengan simulasi komputer yang imersif. Dalam VR, pengguna merasa seolah berada di dalam dunia virtual yang dirancang sedemikian rupa, di mana setiap elemen visual, audio, dan interaktif dikontrol oleh sistem komputer. Teknologi ini menutup pengalaman dunia nyata, sehingga fokus pengguna sepenuhnya tertuju pada lingkungan virtual yang disediakan (Milgram and Kishino 1994; Steuer 2000).

Karakteristik utama VR adalah imersi dan interaktivitas penuh. Pengguna dapat menavigasi ruang tiga dimensi, berinteraksi dengan objek virtual, dan mengalami simulasi yang mendekati kenyataan. Contohnya, dalam pembelajaran sains, VR memungkinkan siswa melakukan eksperimen laboratorium secara virtual tanpa risiko bahan kimia berbahaya. Begitu juga dalam pembelajaran sejarah, siswa dapat menjelajahi bangunan bersejarah atau peristiwa penting seolah berada di lokasi sebenarnya, meningkatkan pemahaman dan pengalaman belajar yang mendalam (Freina and Ott 2015).

Selain itu, VR dapat mendukung personalisasi pembelajaran. Sistem VR modern memungkinkan pengaturan tingkat kesulitan, jalur pembelajaran, dan feedback real-time sesuai kemampuan dan kebutuhan siswa. Hal ini membantu guru menyediakan pengalaman belajar yang adaptif dan terkontrol, sehingga proses pembelajaran menjadi lebih efektif, khususnya untuk materi yang kompleks atau sulit divisualisasikan melalui media tradisional (Radianti et al. 2020).

Namun, meskipun VR memberikan pengalaman imersif yang unik, teknologi ini juga memerlukan perangkat keras dan perangkat lunak yang lebih canggih, seperti headset VR, sensor gerak, dan komputer dengan spesifikasi tinggi. Oleh karena itu, penerapan VR dalam pendidikan harus mempertimbangkan kesiapan infrastruktur dan literasi digital siswa maupun guru agar pengalaman belajar dapat optimal.

Dengan demikian, VR menawarkan keunggulan dalam menciptakan pengalaman belajar yang imersif, aman, dan interaktif, tetapi berbeda secara fundamental dari AR karena menutup dunia nyata dan sepenuhnya menggantinya dengan lingkungan virtual.

3. Mixed Reality (MR)

Mixed Reality (MR) adalah teknologi yang menggabungkan elemen dunia nyata dan virtual secara simultan, sehingga pengguna dapat berinteraksi dengan objek fisik dan digital dalam waktu yang sama. MR berbeda dari AR dan VR karena tidak hanya menambahkan lapisan digital ke dunia nyata (seperti AR), maupun sepenuhnya menggantikan dunia nyata (seperti VR), tetapi menciptakan lingkungan hibrida di mana objek nyata dan virtual saling memengaruhi dan berinteraksi secara real-time (Craig 2013; Milgram and Kishino 1994).

Salah satu karakteristik utama MR adalah kemampuan interaktivitas yang tinggi dan adaptasi terhadap konteks pengguna. Dalam MR, objek virtual dapat “menempel” atau berinteraksi dengan benda fisik, sehingga memberikan pengalaman belajar yang lebih realistis dan dinamis. Contohnya, dalam pembelajaran perangkat keras komputer, model 3D komponen komputer dapat ditempatkan di atas meja nyata, memungkinkan siswa memanipulasi keduanya secara bersamaan memutar, memindahkan, dan mengamati keterkaitan antar komponen sehingga konsep yang kompleks lebih mudah dipahami (Billinghurst et al. 2015).

MR juga memungkinkan penggabungan sensor fisik, gesture, dan input perangkat untuk menciptakan pengalaman imersif yang bersifat interaktif. Teknologi ini mendukung personalisasi pembelajaran dan simulasi situasi dunia nyata yang sulit direplikasi di kelas tradisional, seperti laboratorium ilmiah yang memerlukan peralatan mahal atau lingkungan berisiko tinggi. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan keterlibatan siswa tetapi juga mendorong eksplorasi, kolaborasi, dan pembelajaran berbasis proyek (Carmigniani et al. 2010).

Dalam konteks pendidikan modern, MR menjadi relevan karena mampu menjembatani pembelajaran teoritis dan praktik nyata secara simultan. Dengan memanfaatkan MR, guru dapat menyajikan materi yang lebih kontekstual, sedangkan siswa dapat memperoleh pengalaman belajar yang lebih interaktif, realistis, dan adaptif terhadap berbagai gaya belajar. Teknologi MR juga membuka peluang untuk integrasi gamifikasi, visualisasi 3D, dan evaluasi interaktif, sehingga mendukung pencapaian tujuan pembelajaran abad 21 yang menekankan kreativitas, pemecahan masalah, dan kolaborasi (Klopfer and Squire 2007).

Secara keseluruhan, MR menawarkan pendekatan pembelajaran yang lebih kompleks dan adaptif dibanding AR maupun VR, karena menggabungkan keunggulan kedua teknologi tersebut menambah informasi digital ke dunia nyata sambil memungkinkan interaksi penuh antara objek fisik dan virtual secara simultan. Hal ini menjadikan MR sebagai salah satu tren teknologi penting yang memiliki potensi besar dalam inovasi media pembelajaran modern.

4. Tabel/Diagram Perbandingan

Tabel 3. Tabel Perbedaan AR,VR dan MR

Aspek	<i>Augmented Reality (AR)</i>	<i>Virtual Reality (VR)</i>	<i>Mixed Reality (MR)</i>
Definisi	Menambahkan objek digital ke dunia nyata	Menggantikan dunia nyata dengan lingkungan virtual sepenuhnya	Menggabungkan objek nyata dan virtual secara simultan
Tingkat Imersi	Sedang, tetap melihat dunia nyata	Tinggi, menutup dunia nyata sepenuhnya	Sangat tinggi, integrasi dunia nyata & virtual penuh
Interaktivitas	Interaksi terbatas pada objek digital overlay	Interaksi penuh dengan lingkungan virtual	Interaksi simultan dengan objek nyata dan virtual

Aspek	<i>Augmented Reality</i> (AR)	<i>Virtual Reality</i> (VR)	<i>Mixed Reality</i> (MR)
Contoh Aplikasi Pendidikan	Visualisasi perangkat keras komputer, anatomi	Laboratorium virtual, simulasi eksperimen	Model 3D interaktif di meja fisik, proyek kolaboratif
Kelebihan	Memperkuat pengalaman dunia nyata, mudah diakses	Imersif dan fokus, aman untuk eksperimen kompleks	Realistik, mendukung interaksi kompleks, adaptif
Kekurangan	Tidak sepenuhnya imersif, tergantung perangkat	Memerlukan perangkat khusus dan ruang khusus	Infrastruktur lebih kompleks dan mahal

Augmented Reality (AR) menjadi lebih relevan dalam media pembelajaran karena mampu menghadirkan pengalaman belajar yang interaktif, kontekstual, dan mudah diakses tanpa menggantikan dunia nyata sepenuhnya. AR memungkinkan guru menyajikan materi abstrak atau kompleks dengan visualisasi yang memperkuat pemahaman siswa, misalnya dalam pembelajaran perangkat keras komputer, sains, atau sejarah. Selain itu, AR dapat diimplementasikan dengan perangkat yang relatif ringan, seperti tablet atau smartphone, sehingga cocok untuk pembelajaran tatap muka, daring, maupun hybrid. Dengan kemampuan menambahkan lapisan informasi digital secara real-time, AR tidak hanya meningkatkan keterlibatan dan motivasi siswa, tetapi juga memperluas jangkauan metode pengajaran yang adaptif dan inovatif. Oleh karena itu, pemilihan AR sebagai media pembelajaran sangat sesuai untuk mendukung pencapaian tujuan pendidikan abad 21 yang menekankan kreativitas, kolaborasi, dan pemecahan masalah.

C. Komponen Utama AR (*Hardware, Software, Content*)

Dalam merancang sebuah media pembelajaran berbasis *Augmented Reality* (AR), pemahaman mengenai komponen utama yang membentuk sistem AR menjadi sangat penting. Hal ini dikarenakan keberhasilan suatu aplikasi AR tidak hanya ditentukan

oleh teknologi tampilan semata, melainkan juga bergantung pada integrasi perangkat keras, perangkat lunak, serta konten yang digunakan. Pemahaman yang baik akan membantu pengembang untuk memilih perangkat yang sesuai, memanfaatkan *software* pendukung secara optimal, serta merancang konten pembelajaran yang relevan dan efektif.

Selain itu, analisis terhadap komponen AR juga memberikan gambaran menyeluruh mengenai keterbatasan maupun kelebihan yang dimiliki. Dengan mengetahui kebutuhan perangkat keras, perangkat lunak, dan konten yang tepat, pengembang dapat menyesuaikan rancangan media dengan kondisi pengguna, baik dari segi fasilitas sekolah maupun kemampuan siswa dalam mengakses teknologi. Oleh karena itu, memahami komponen utama AR menjadi langkah fundamental sebelum melangkah pada tahap desain dan implementasi media pembelajaran berbasis AR.

1. Perangkat Keras (*Hardware*)

Perangkat keras merupakan komponen fundamental dalam pengembangan dan penggunaan AR. *Hardware* berfungsi sebagai media untuk menangkap lingkungan nyata, memproses data digital, serta menampilkan objek virtual secara real-time kepada pengguna. Beberapa perangkat utama yang digunakan dalam implementasi AR meliputi:

a. Smartphone dan Tablet

Perangkat ini merupakan media paling umum untuk menjalankan aplikasi AR karena sudah dilengkapi dengan prosesor, GPU, kamera, dan sensor. Spesifikasi minimum yang disarankan untuk menjalankan aplikasi AR adalah:

- 1) Prozessor Octa-core (minimal Snapdragon 660 / Apple A10 atau setara).
- 2) RAM 3 GB atau lebih agar dapat menjalankan aplikasi AR dengan lancar.
- 3) Kamera minimal resolusi 8 MP dengan autofocus untuk mendukung pelacakan marker.

- 4) Sensor accelerometer, gyroscope, magnetometer, dan GPS untuk mendukung AR berbasis lokasi.
 - 5) Sistem Operasi *Android* 10.0 ke atas atau *iOS* 11 ke atas.
 - 6) Layar resolusi HD 720p minimum untuk tampilan objek AR yang jelas.
- b. Headset AR (*Augmented Reality Glasses/Smart Glasses*)

Headset atau kacamata AR memberikan pengalaman lebih imersif karena objek virtual langsung ditampilkan pada bidang pandang pengguna. Contoh perangkat: Microsoft HoloLens, Magic Leap, Epson Moverio. Spesifikasi umum: Prosesor khusus AR, RAM ≥ 4 GB, field of view 35° – 50° , kamera kedalaman (depth camera), dan dukungan gesture/voice control.

c. Sensor Tambahan

Beberapa aplikasi AR memerlukan sensor eksternal untuk meningkatkan akurasi pelacakan. Misalnya:

- 1) Depth Sensor / LiDAR: Membantu mendeteksi jarak dan dimensi objek nyata.
- 2) Infrared Sensor: Digunakan pada perangkat AR tertentu untuk mendukung deteksi dalam kondisi cahaya rendah.

d. Kamera

Kamera berfungsi menangkap citra dari dunia nyata yang kemudian diproses untuk menampilkan objek virtual. Kamera bawaan smartphone sudah cukup, tetapi untuk AR yang lebih presisi, digunakan kamera dengan dukungan depth sensing atau multi-lens dengan resolusi minimum 720p (ideal 1080p atau lebih).

e. Komputer/Laptop (untuk pengembangan AR)

Untuk merancang media pembelajaran berbasis AR, perangkat komputer dengan spesifikasi memadai dibutuhkan agar mampu menjalankan *software* pengembangan seperti *Unity 3D* atau *Unreal Engine*.

- 1) CPU minimum intel i5 generasi ke-8 atau AMD Ryzen 5 ke atas.
- 2) RAM 8 GB minimum (disarankan 16 GB).
- 3) GPU NVIDIA GTX 1050Ti / AMD Radeon RX 560 atau lebih tinggi.
- 4) Penyimpanan SSD 256 GB untuk performa cepat.

2. Perangkat Lunak (Software)

Dalam pengembangan media pembelajaran berbasis *Augmented Reality*, perangkat lunak (*software*) berperan sebagai inti pengolah, penghubung, dan penyaji antara dunia nyata dengan objek virtual. *Software* memungkinkan sistem mengenali marker, menempatkan objek 3D, serta mengatur interaktivitas dengan pengguna. Beberapa platform dan tools yang umum digunakan antara lain Unity, Vuforia, serta *ARKit/ARCore*, yang masing-masing memiliki karakteristik dan kelebihan.

a. Unity

Unity adalah *game engine* lintas platform yang mendukung pengembangan AR dengan antarmuka visual yang fleksibel dan dukungan *scripting* berbasis *C#*. Unity menjadi pilihan utama karena menyediakan Asset Store yang kaya, integrasi dengan berbagai SDK AR (seperti Vuforia, AR Foundation, *ARKit*, dan *ARCore*), serta kemampuan lintas platform sehingga aplikasi dapat dijalankan di *Android* maupun *iOS*. Unity juga memungkinkan integrasi dengan cloud-based services untuk mendukung fitur tambahan seperti AI Assistant atau *Text-to-Speech*. (Billinghurst et al. 2015)

b. Vuforia

Vuforia adalah salah satu *Software Development Kit (SDK)* AR yang sering digunakan pada bidang pendidikan. Vuforia mendukung *marker-based* AR, yaitu menampilkan objek 3D berdasarkan marker yang terdeteksi kamera, serta *markerless* AR dengan fitur seperti *ground plane* detection. Keunggulan Vuforia adalah kemudahan integrasi dengan Unity, kemampuan

mendeteksi berbagai jenis marker (gambar, objek 3D, hingga model CAD), serta dukungan multiplatform.(Craig 2013)

c. *ARKit* dan *ARCore*

ARKit (dikembangkan oleh Apple) dan *ARCore* (dikembangkan oleh Google) adalah *framework* AR berbasis perangkat mobile yang memungkinkan pengembangan AR tanpa marker (*markerless* AR). *ARKit* khusus untuk perangkat *iOS*, sedangkan *ARCore* untuk perangkat *Android*. Keduanya mendukung fitur seperti motion tracking, environmental understanding, dan light estimation untuk menghasilkan interaksi AR yang lebih realistis.(Azuma 1997; Carmigniani et al. 2010)

Secara umum, pemilihan *software* atau platform pengembangan AR harus mempertimbangkan tujuan pembelajaran, jenis perangkat yang digunakan siswa, dan kompleksitas materi. Misalnya, untuk media pembelajaran perakitan komputer, Unity dan Vuforia menjadi kombinasi yang tepat karena mendukung penggunaan marker pada komponen perangkat keras komputer, memudahkan siswa memvisualisasikan bentuk dan fungsi komponen secara interaktif.

3. Isi (Content)

Konten merupakan elemen inti dalam pengalaman *Augmented Reality* (AR) karena menjadi jembatan antara teknologi dengan pengguna. Tanpa adanya konten yang relevan dan menarik, perangkat keras dan perangkat lunak tidak dapat memberikan pengalaman pembelajaran yang bermakna. Dalam konteks media pembelajaran, konten AR dirancang untuk menghadirkan visualisasi yang lebih interaktif dan imersif sehingga peserta didik dapat memahami materi dengan lebih mudah dan menyenangkan.

Menurut (Billinghurst et al. 2015), kualitas konten AR sangat menentukan tingkat keberhasilan pembelajaran, karena konten yang baik mampu merangsang perhatian, meningkatkan keterlibatan, serta memperkuat pemahaman konsep. Oleh sebab itu, perancangan konten harus mempertimbangkan aspek

pedagogis, estetika, serta interaktivitas. Beberapa komponen utama dalam konten AR meliputi:

a. Objek 3D

Objek tiga dimensi menjadi salah satu bentuk konten utama AR. Model 3D memungkinkan siswa untuk mengamati bentuk, struktur, dan fungsi objek secara lebih nyata dibandingkan gambar statis. Misalnya, dalam pembelajaran perakitan komputer, siswa dapat melihat visualisasi *motherboard*, RAM, atau prosesor dalam bentuk 3D sehingga memudahkan identifikasi komponen.

b. Animasi

Animasi menambah dimensi dinamis pada objek 3D dengan menampilkan pergerakan atau perubahan tertentu. Dalam pembelajaran, animasi berguna untuk memperlihatkan proses kerja suatu perangkat, seperti bagaimana CPU berinteraksi dengan komponen lain. Animasi membantu siswa memahami proses yang kompleks secara lebih sederhana dan intuitif (Craig 2013).

c. Audio

Elemen suara dalam AR dapat berupa narasi penjelasan, instruksi, atau efek suara yang memperkuat pengalaman imersif. Audio berfungsi sebagai pendukung pemahaman dengan memberikan konteks verbal terhadap visualisasi yang sedang ditampilkan.

d. Video

Integrasi video pada konten AR memungkinkan penyajian informasi tambahan dalam bentuk tutorial, demonstrasi, atau ilustrasi nyata. Misalnya, menampilkan video singkat mengenai langkah-langkah perakitan komputer yang dapat dipadukan dengan objek 3D untuk memperkaya pemahaman siswa.

e. Interaktivitas

Aspek interaktivitas adalah komponen penting dalam konten AR, karena memungkinkan pengguna melakukan eksplorasi, rotasi, zoom, atau bahkan simulasi proses tertentu. Menurut (Azuma 1997), interaktivitas menjadikan AR bukan sekadar media pasif, melainkan pengalaman aktif yang mendorong keterlibatan siswa dalam proses belajar.

Dengan memadukan objek 3D, animasi, audio, video, dan interaktivitas, konten AR dapat dirancang menjadi media pembelajaran yang menarik, adaptif, dan kontekstual sesuai dengan kebutuhan siswa. Konten yang tepat akan memberikan pengalaman belajar yang lebih efektif, karena siswa tidak hanya menerima informasi secara visual tetapi juga dapat berinteraksi langsung dengan materi.

4. Interaksi Antar Komponen

Dalam ekosistem *Augmented Reality* (AR), *hardware*, *software*, dan konten tidak dapat berdiri sendiri, melainkan harus saling berinteraksi untuk menciptakan pengalaman belajar yang optimal. *Hardware* berfungsi sebagai perangkat eksekusi yang menyediakan kemampuan pemrosesan, sensor, kamera, serta layar untuk menampilkan hasil visual AR. *Software* berperan sebagai penghubung antara perangkat keras dan konten, menyediakan lingkungan pengembangan, algoritma deteksi marker atau surface, serta integrasi dengan mesin grafis. Sementara itu, konten menjadi elemen inti yang disajikan kepada pengguna dalam bentuk objek 3D, animasi, maupun media interaktif.

Interaksi ketiga komponen ini berjalan dalam suatu alur yang sistematis: kamera perangkat keras menangkap marker atau permukaan nyata, kemudian *software* seperti Vuforia atau ARCore melakukan pemrosesan dan melacak posisi/rotasi marker. Setelah itu, mesin grafis (misalnya Unity) memanggil dan merender konten digital sesuai posisi dunia nyata, sehingga pengguna dapat melihat objek virtual secara selaras dengan lingkungannya. Kombinasi ini menciptakan pengalaman yang imersif, interaktif,

dan relevan dengan konteks pembelajaran (Billinghurst et al. 2015).

Dengan demikian, keberhasilan suatu media pembelajaran berbasis AR tidak hanya ditentukan oleh kualitas salah satu komponen, melainkan oleh sinergi antara *hardware*, *software*, dan konten. Apabila salah satu aspek lemah misalnya perangkat keras yang tidak memenuhi spesifikasi, algoritma pelacakan *software* kurang akurat, atau konten yang tidak relevan, maka pengalaman AR akan terganggu dan mengurangi efektivitas pembelajaran.

5. Contoh Implementasi

Pemanfaatan *Augmented Reality* dalam pendidikan sudah semakin meluas, terutama dalam bidang yang membutuhkan visualisasi objek kompleks dan interaksi praktis. AR memungkinkan siswa untuk memahami materi yang abstrak maupun teknis dengan lebih mudah melalui representasi tiga dimensi dan simulasi interaktif. Dua contoh penerapan yang relevan adalah pada visualisasi perakitan komputer serta eksperimen virtual sains.

a. Visualisasi Perakitan Komputer

Dalam mata pelajaran Dasar-Dasar Komputer dan Jaringan (DDK), perakitan komputer merupakan salah satu kompetensi inti yang harus dikuasai siswa. Namun, keterbatasan perangkat keras (*hardware*) dan risiko kerusakan komponen sering menjadi kendala. Implementasi AR dapat mengatasi hambatan ini dengan cara menampilkan model 3D komponen komputer seperti *motherboard*, RAM, prosesor, dan power supply secara detail.

Melalui AR, siswa dapat mempelajari urutan perakitan dengan panduan visual interaktif yang menyerupai praktik nyata, namun tanpa risiko merusak perangkat. Aplikasi AR juga memungkinkan siswa untuk melihat posisi pemasangan komponen secara akurat dan mengulangnya berkali-kali sesuai kebutuhan. Menurut penelitian (Endra and Saputra 2022), media pembelajaran berbasis AR terbukti meningkatkan

pemahaman siswa terhadap perakitan komputer sekaligus menumbuhkan minat belajar melalui pengalaman yang lebih imersif.

b. Eksperimen Virtual Sains

Selain di bidang teknologi komputer, AR juga banyak digunakan dalam pembelajaran ilmu sains seperti fisika, biologi, dan kimia. Misalnya, pada pelajaran fisika, siswa dapat melakukan eksperimen virtual terkait hukum Newton atau simulasi gerakan benda dengan menampilkan objek virtual yang dapat berinteraksi dengan lingkungan nyata. Pada biologi, AR dapat menampilkan model organ tubuh manusia secara 3D yang dapat diputar, dibongkar pasang, dan dieksplorasi untuk memahami struktur anatomi dengan lebih jelas.

Implementasi AR dalam eksperimen virtual ini tidak hanya memperkaya visualisasi konsep abstrak, tetapi juga membantu mengurangi keterbatasan laboratorium yang sering kali minim peralatan atau bahan berbahaya. Sejalan dengan penelitian (Billinghurst and Duenser 2012), AR memungkinkan siswa melakukan eksplorasi ilmiah dengan cara yang lebih aman, fleksibel, dan mudah dipahami.

D. Sejarah Perkembangan AR

Perkembangan teknologi *Augmented Reality* (AR) tidak lepas dari kemajuan di bidang komputer, grafika, dan sensor digital. Latar belakang munculnya AR terkait dengan kebutuhan manusia untuk memperkaya pengalaman persepsi dunia nyata dengan informasi tambahan yang relevan secara real-time. Sejak awal kemunculannya pada tahun 1960-an dengan sistem tampilan head-mounted sederhana yang dikembangkan oleh Ivan Sutherland, AR terus berevolusi seiring dengan peningkatan kemampuan komputer dan perangkat mobile, memungkinkan integrasi dunia nyata dan virtual yang lebih presisi dan interaktif.

Seiring waktu, AR mulai diaplikasikan dalam berbagai bidang, termasuk militer, industri, dan pendidikan. Pada era 1990-an hingga awal 2000-an, AR semakin dikenal melalui penelitian dan prototipe

yang menekankan *marker-based* tracking, registration, dan interaksi dengan objek virtual. Memasuki era smartphone dan tablet pada 2010-an, AR menjadi lebih mudah diakses, membuka peluang baru untuk pembelajaran interaktif, simulasi laboratorium, dan visualisasi konsep abstrak. Evolusi ini menunjukkan bagaimana teknologi AR mampu menyesuaikan diri dengan kebutuhan pendidikan modern yang menekankan pengalaman belajar imersif dan personalisasi materi.

1. Tahapan Perkembangan

Augmented Reality (AR) merupakan teknologi yang menggabungkan dunia nyata dengan elemen-elemen virtual secara real-time, menciptakan pengalaman interaktif yang imersif bagi penggunanya. Konsep AR pertama kali diperkenalkan oleh Ivan Sutherland pada tahun 1968 melalui karyanya yang dikenal sebagai "The Sword of Damocles", sebuah sistem tampilan kepala (*head-mounted display*) yang mampu menampilkan objek tiga dimensi di atas dunia nyata. Meskipun sederhana, inovasi ini menjadi dasar bagi perkembangan teknologi AR selanjutnya.

Seiring berjalannya waktu, AR mengalami berbagai tahap perkembangan yang signifikan. Pada tahun 1990-an, teknologi AR mulai berkembang dengan diperkenalkannya sistem berbasis marker, yang memungkinkan objek virtual ditampilkan di atas marker fisik. Selanjutnya, dengan kemajuan perangkat mobile dan sensor, AR mulai diterapkan dalam berbagai bidang seperti pendidikan, industri, dan hiburan, memberikan dampak yang signifikan terhadap cara kita berinteraksi dengan informasi dan lingkungan sekitar.

a. Tahun 1960-an Awal Perkembangan Sistem Grafis

Perjalanan *Augmented Reality* (AR) dimulai pada akhir 1960-an, ketika Ivan Sutherland, seorang ilmuwan komputer dari Universitas Utah, menciptakan sistem tampilan kepala pertama yang dikenal dengan nama "Sword of Damocles" pada tahun 1968. Perangkat ini merupakan *head-mounted display* (HMD) yang mampu menampilkan grafik *wireframe* tiga

dimensi yang disinkronkan dengan gerakan kepala pengguna. Meskipun sangat primitif dan harus digantung karena beratnya, "Sword of Damocles" dianggap sebagai cikal bakal teknologi AR dan *virtual reality* (VR) modern. Perangkat ini dilengkapi dengan sensor pelacakan posisi yang memungkinkan overlay grafis pada dunia nyata, meskipun terbatas pada lingkungan laboratorium.

Pada periode ini, konsep AR belum dikenal luas, dan teknologi yang ada masih terbatas pada eksperimen laboratorium. Namun, penemuan Sutherland membuka jalan bagi penelitian lebih lanjut dalam bidang grafika komputer dan interaksi manusia-komputer. Selain itu, pada tahun 1961, Philco Corporation mengembangkan sistem "Headsight", sebuah helmet dengan tampilan video yang memungkinkan pengguna melihat objek dari jarak jauh, menandai salah satu contoh awal dari teknologi yang mendasari AR. Meskipun sistem ini masih sangat sederhana dan hanya dapat digunakan di laboratorium, inovasi ini menjadi tonggak awal dalam sejarah AR. Menurut penelitian oleh (Sünger & Çankaya, 2019), "Perkembangan *Augmented Reality* dimulai pada tahun 1950-an dengan penemuan Sensorama oleh Morton L. Heilig, yang dianggap sebagai contoh pertama dari *Augmented Reality*."

b. Tahun 1990-an Awal Kemunculan AR Berbasis Marker

Perkembangan signifikan dalam AR terjadi pada tahun 1990-an. Pada tahun 1990, Tom Caudell dan David Mizell dari Boeing memperkenalkan istilah "*Augmented Reality*" untuk menggambarkan sistem tampilan yang membantu pekerja dalam merakit kabel pesawat terbang dengan menampilkan instruksi langsung di atas komponen yang sedang dikerjakan. Mereka menggantikan papan instruksi besar dengan sistem berbasis HMD yang menampilkan informasi kontekstual, meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam proses perakitan.

Pada tahun 1997, Ronald Azuma menerbitkan survei komprehensif yang mengidentifikasi tiga karakteristik utama AR yaitu menggabungkan elemen dunia nyata dan virtual,

interaksi waktu nyata, dan registrasi 3D yang tepat. Survei ini menjadi acuan penting dalam penelitian AR dan mendorong pengembangan lebih lanjut dalam bidang ini.

c. Tahun 2000-an Perkembangan AR Mobile dan Komersial

Memasuki awal abad ke-21, perkembangan teknologi mobile dan peningkatan kemampuan perangkat keras memungkinkan AR untuk diakses oleh khalayak luas. Pada tahun 2008, aplikasi AR pertama kali muncul di platform mobile, seperti *iOS* dan *Android*, memungkinkan pengguna untuk mengakses informasi tambahan melalui kamera perangkat mereka. Perusahaan seperti Layar dan Wikitude mengembangkan aplikasi berbasis lokasi yang menampilkan informasi kontekstual di layar ponsel, seperti restoran terdekat atau tempat wisata.

Pada tahun 2013, Google memperkenalkan Google Glass, sebuah perangkat AR berbasis kaca yang menampilkan informasi langsung di depan mata pengguna. Meskipun tidak sukses secara komersial, Google Glass menunjukkan potensi AR dalam kehidupan sehari-hari dan mendorong pengembangan perangkat wearable lainnya.

Selain itu, pada tahun 2016, Niantic merilis permainan mobile "Pokémon GO", yang menggabungkan AR dengan permainan berbasis lokasi, menjadi fenomena global dan menunjukkan potensi AR dalam hiburan dan pendidikan. Menurut penelitian oleh (Arth et al. 2015), "Perangkat mobile seperti smartphone dan tablet telah menjadi platform utama untuk aplikasi AR, berkat kemajuan dalam sensor dan kemampuan pemrosesan."

d. Era Digital Saat Ini Perkembangan AR di Bidang Pendidikan, Industri dan Hiburan

Saat ini, AR telah menjadi bagian integral dari berbagai sektor, termasuk pendidikan, industri, dan hiburan. Dalam bidang pendidikan, AR digunakan untuk menciptakan pengalaman belajar yang imersif dan interaktif. Misalnya, aplikasi AR memungkinkan siswa untuk memvisualisasikan

struktur molekul dalam 3D atau menjelajahi situs sejarah secara virtual, meningkatkan pemahaman dan keterlibatan mereka. Menurut penelitian oleh (Yuen et al. 2011), "AR memiliki potensi untuk meningkatkan pengalaman belajar dengan menyediakan konteks tambahan dan interaksi langsung dengan materi pembelajaran."

Dalam industri, AR diterapkan dalam pelatihan teknis, pemeliharaan peralatan, dan desain produk. Perusahaan seperti Boeing dan General Electric menggunakan AR untuk membantu teknisi dalam merakit dan memelihara mesin kompleks dengan menampilkan instruksi langkah demi langkah secara real-time. Menurut penelitian oleh (Billinghurst and Duenser 2012), "AR dapat meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam proses industri dengan menyediakan informasi kontekstual secara langsung."

Di sektor hiburan, AR digunakan dalam permainan, pemasaran, dan media sosial. Aplikasi seperti *Snapchat* dan Instagram menawarkan filter AR yang memungkinkan pengguna untuk menambahkan elemen virtual ke foto dan video mereka. Selain itu, AR digunakan dalam konser dan acara langsung untuk menciptakan pengalaman yang lebih menarik dan interaktif bagi penonton. Menurut penelitian oleh (Azuma 1997), "AR dapat meningkatkan pengalaman pengguna dengan menggabungkan elemen virtual ke dalam lingkungan nyata secara real-time."

Perkembangan terbaru dalam AR mencakup integrasi dengan teknologi lain seperti kecerdasan buatan (AI), Internet of Things (IoT), dan 5G, yang memperluas potensi aplikasi AR dalam berbagai bidang. Dengan kemajuan teknologi ini, AR diperkirakan akan semakin mendalam dan meluas, menciptakan pengalaman yang lebih realistis dan bermanfaat bagi pengguna di seluruh dunia.

2. Perkembangan dalam Pendidikan

Augmented Reality (AR) telah menunjukkan potensi besar dalam mentransformasi metode pembelajaran tradisional menjadi lebih interaktif dan kontekstual. Implementasi AR di kelas memungkinkan guru menghadirkan materi pembelajaran yang sulit dipahami melalui metode konvensional. Misalnya, dalam pembelajaran sains, AR dapat memvisualisasikan struktur molekul, sistem organ manusia, atau fenomena fisika secara tiga dimensi, sehingga siswa dapat mengamati dan memahami materi secara langsung dan mendalam (Yuen et al. 2011). Dengan memanfaatkan smartphone atau tablet, siswa dapat berinteraksi dengan objek digital sambil tetap berada di lingkungan fisik kelas, yang meningkatkan keterlibatan dan motivasi belajar.

Di laboratorium virtual, AR memungkinkan siswa melakukan eksperimen dan simulasi yang sebelumnya terbatas oleh ketersediaan alat, biaya, atau risiko keselamatan. Sebagai contoh, AR dapat digunakan untuk eksperimen kimia atau fisika secara virtual, menampilkan reaksi dan fenomena yang kompleks tanpa memerlukan bahan kimia berbahaya atau peralatan laboratorium yang mahal (Billinghurst and Duenser 2012). Pendekatan ini tidak hanya menghemat sumber daya tetapi juga memungkinkan siswa untuk mengulang percobaan beberapa kali, mengeksplorasi variasi, dan belajar dari kesalahan secara aman.

Selain itu, media interaktif berbasis AR semakin banyak diterapkan untuk mendukung materi pembelajaran sejarah, geografi, dan teknologi. Contohnya, siswa dapat menjelajahi situs sejarah secara virtual, melihat artefak berlapis digital, atau mengikuti animasi proses sejarah yang kompleks. Penerapan ini membantu siswa memahami konteks, kronologi, dan hubungan antar konsep dengan cara yang lebih visual dan imersif, yang sulit dicapai dengan buku teks atau media cetak tradisional (Azuma 1997). AR juga memfasilitasi pembelajaran kolaboratif, di mana siswa dapat bekerja dalam kelompok, berinteraksi dengan objek virtual yang sama, dan berdiskusi tentang pengamatan mereka secara real-time.

Penggunaan AR dalam pendidikan modern tidak terbatas pada visualisasi materi, tetapi juga dapat diintegrasikan dengan sistem pembelajaran digital, seperti *Learning Management System* (LMS), untuk melacak kemajuan belajar, memberikan kuis interaktif, dan menyediakan feedback instan. Pendekatan ini memungkinkan personalisasi pembelajaran sesuai dengan kemampuan dan kebutuhan siswa, sehingga pengalaman belajar menjadi lebih adaptif dan relevan dengan tujuan kompetensi abad 21 (Craig 2013).

Secara keseluruhan, tren pertumbuhan AR dalam pendidikan menunjukkan bahwa teknologi ini bukan hanya alat tambahan, tetapi juga komponen esensial untuk menciptakan pengalaman belajar yang lebih imersif, interaktif, dan efektif. Dengan kemampuan untuk mengatasi keterbatasan media konvensional, mendukung pembelajaran berbasis praktik, dan meningkatkan motivasi siswa, AR relevan sebagai strategi pendidikan modern yang sejalan dengan kebutuhan literasi digital dan pengembangan kompetensi abad 21. Implementasi AR di kelas, laboratorium virtual, dan media interaktif memberikan fondasi yang kuat bagi integrasi teknologi dalam proses belajar mengajar secara menyeluruh.

E. Tren dan Prospek AR di Bidang Pendidikan

Augmented Reality (AR) diprediksi akan semakin penting dalam dunia pendidikan karena kemampuannya menghadirkan pengalaman belajar yang lebih imersif, interaktif, dan kontekstual. Kebutuhan akan pembelajaran yang adaptif, visual, dan mampu menjembatani teori dengan praktik semakin meningkat seiring tuntutan kompetensi abad 21, seperti keterampilan berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, dan kemampuan teknologi. AR menawarkan solusi untuk menghadirkan materi yang kompleks dengan cara yang lebih mudah dipahami, meningkatkan motivasi belajar, serta mendukung berbagai gaya belajar siswa. Selain itu, perkembangan perangkat mobile, sensor canggih, dan platform *software* semakin mempermudah implementasi AR di kelas maupun dalam pembelajaran jarak jauh.

Tren penerapan AR di bidang pendidikan saat ini menunjukkan pergeseran dari media tradisional menuju pemanfaatan teknologi digital yang inovatif. Integrasi AR dengan simulasi laboratorium virtual, gamifikasi, pembelajaran berbasis proyek, dan sistem evaluasi interaktif semakin marak diterapkan. AR juga banyak digunakan dalam pendidikan STEM untuk memvisualisasikan konsep-konsep abstrak, seperti struktur molekul, proses fisika, dan mekanisme perangkat keras komputer, yang sebelumnya sulit dijelaskan melalui media konvensional (Billinghurst and Duenser 2012).

Prospek AR ke depan di pendidikan sangat menjanjikan karena teknologi ini mendukung personalisasi pembelajaran, memfasilitasi kolaborasi global antar siswa, dan mempermudah guru menyesuaikan materi sesuai karakteristik kelas. Dengan integrasi AI, AR dapat menyesuaikan konten secara otomatis berdasarkan tingkat pemahaman dan minat siswa, sehingga pembelajaran menjadi lebih adaptif dan responsif. Peningkatan kemampuan perangkat mobile, headset AR, dan *software* pembuat konten juga membuat implementasi lebih terjangkau dan mudah diakses (Yuen et al. 2011). Dengan demikian, AR berpotensi menjadi media pembelajaran yang relevan, berkelanjutan, dan mampu menjawab tantangan pendidikan abad 21.

1. Tren Saat Ini dalam Implementasi AR di Dunia Pendidikan

Penggunaan AR untuk visualisasi konsep abstrak menjadi salah satu tren utama dalam pendidikan modern. Teknologi ini memungkinkan siswa memahami materi yang sulit dijelaskan secara konvensional, seperti konsep ilmiah dalam fisika, kimia, atau biologi, dengan menghadirkan model 3D interaktif yang dapat diputar, diperbesar, atau dianimasikan. Misalnya, siswa dapat mengeksplorasi struktur molekul atau alur sistem peredaran darah melalui perangkat AR, sehingga konsep yang sebelumnya abstrak menjadi lebih konkret dan mudah dipahami. Hal ini sejalan dengan temuan (Billinghurst and Duenser 2012) yang menekankan kemampuan AR dalam memvisualisasikan informasi kompleks dan meningkatkan keterlibatan siswa .

Integrasi AR dengan gamifikasi dan *Learning Management System* (LMS) juga menjadi tren penting. Penggunaan elemen permainan, seperti poin, level, dan tantangan, dalam pembelajaran berbasis AR dapat meningkatkan motivasi, partisipasi, dan engagement siswa. LMS yang terintegrasi dengan AR memungkinkan guru untuk memantau progres belajar secara real-time, memberikan feedback interaktif, serta menyesuaikan materi sesuai kebutuhan peserta didik. Dengan kombinasi ini, pembelajaran tidak hanya bersifat imersif tetapi juga adaptif, sehingga mendukung pencapaian tujuan pembelajaran yang lebih optimal (Yuen et al. 2011).

Penggunaan *Augmented Reality* (AR) dalam mobile *Learning* semakin berkembang pesat, memanfaatkan perangkat seperti smartphone dan tablet untuk menghadirkan pengalaman belajar yang fleksibel dan interaktif. Teknologi AR memungkinkan siswa mengakses materi pembelajaran secara langsung di lingkungan sekitar mereka, menggabungkan informasi digital dengan dunia nyata. Hal ini mendukung konsep pembelajaran berbasis konteks dan eksplorasi mandiri, serta memperkaya pengalaman belajar dengan visualisasi tiga dimensi dan interaksi langsung.

Penelitian menunjukkan bahwa integrasi AR dalam mobile *Learning* dapat meningkatkan motivasi dan keterlibatan siswa. Misalnya, studi oleh (Sisouvong and Pasanchay 2024) menekankan pentingnya teknologi mobile dalam mendukung pendidikan mandiri melalui akses fleksibel ke materi pembelajaran, memungkinkan siswa untuk belajar kapan saja dan di mana saja. Selain itu, penelitian oleh (Ananda et al. 2024) melalui analisis bibliometrik menemukan bahwa AR semakin banyak diterapkan dalam mobile *Learning*, dengan dampak positif terhadap pemahaman konsep abstrak dan pembelajaran di luar kelas.

Secara keseluruhan, tren saat ini menunjukkan bahwa AR tidak hanya menjadi alat visualisasi, tetapi juga telah berkembang menjadi platform pembelajaran yang interaktif, adaptif, dan

mobile-friendly, mendukung pengalaman belajar yang lebih personal, menyenangkan, dan relevan dengan tuntutan abad 21.

2. Prospek Masa Depan

Augmented Reality (AR) diprediksi akan semakin penting dalam dunia pendidikan karena kemampuannya menghadirkan pengalaman belajar yang lebih imersif, interaktif, dan kontekstual. Kebutuhan akan pembelajaran yang adaptif, visual, dan mampu menjembatani teori dengan praktik semakin meningkat seiring tuntutan kompetensi abad 21, seperti keterampilan berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, dan kemampuan teknologi. AR menawarkan solusi untuk menghadirkan materi yang kompleks dengan cara yang lebih mudah dipahami, meningkatkan motivasi belajar, serta mendukung berbagai gaya belajar siswa. Selain itu, perkembangan perangkat mobile, sensor canggih, dan platform *software* semakin mempermudah implementasi AR di kelas maupun dalam pembelajaran jarak jauh.

a. Pembelajaran Imersif Berbasis AR

Pembelajaran imersif berbasis *Augmented Reality* (AR) menawarkan pengalaman belajar yang mendalam dengan menggabungkan elemen digital ke dalam dunia nyata. Teknologi ini memungkinkan siswa untuk berinteraksi dengan objek 3D, animasi, dan informasi kontekstual secara langsung melalui perangkat seperti smartphone atau tablet. Hal ini tidak hanya meningkatkan pemahaman konsep abstrak tetapi juga memperkaya pengalaman belajar dengan konteks visual yang nyata.

Menurut penelitian oleh (Billinghurst and Duenser 2012), AR memiliki potensi besar dalam pendidikan karena kemampuannya untuk menyajikan informasi kompleks dalam format yang mudah dipahami. Teknologi ini memungkinkan siswa untuk "melihat" dan "merasakan" materi pelajaran, seperti struktur molekul dalam kimia atau sistem peredaran darah dalam biologi, yang sulit dijelaskan hanya dengan teks atau gambar statis.

Lebih lanjut, studi oleh (Bacca-Acosta et al. 2014) menunjukkan bahwa AR dapat meningkatkan motivasi dan keterlibatan siswa dengan menyediakan pengalaman belajar yang interaktif dan menyenangkan. Penggunaan AR dalam pembelajaran juga dapat membantu siswa dengan berbagai gaya belajar, karena teknologi ini mendukung pendekatan multimodal yang menggabungkan visual, auditori, dan kinestetik.

b. Integrasi AI untuk Personalisasi Materi

Integrasi Kecerdasan Buatan (AI) dengan AR membuka peluang untuk menciptakan pengalaman belajar yang lebih personal dan adaptif. AI dapat menganalisis data interaksi siswa, seperti kecepatan belajar, area yang sulit dipahami, dan gaya belajar individu, untuk menyesuaikan konten pembelajaran secara real-time. Hal ini memungkinkan AR untuk menyajikan materi yang sesuai dengan kebutuhan dan kemampuan masing-masing siswa.

Menurut penelitian oleh (Kljun, Geroimenko, and Pucihar 2020), kombinasi AR dan AI dapat meningkatkan efektivitas pembelajaran dengan menyediakan umpan balik yang cepat dan tepat sasaran. AI dapat mengidentifikasi kesalahan atau kesulitan yang dihadapi siswa dan memberikan saran atau penjelasan tambahan melalui elemen AR, seperti petunjuk visual atau simulasi interaktif.

Selain itu, studi oleh (Ananda et al. 2024) menunjukkan bahwa penggunaan AI dalam pembelajaran berbasis AR dapat meningkatkan keterlibatan siswa dengan menyediakan jalur pembelajaran yang disesuaikan dan tantangan yang sesuai dengan tingkat kemampuan mereka. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan pemahaman materi tetapi juga mendorong siswa untuk belajar secara mandiri dan proaktif.

c. Kolaborasi Virtual Antar Siswa Menggunakan AR

AR mendukung kolaborasi virtual antar siswa dengan memungkinkan mereka untuk berinteraksi dalam lingkungan

digital yang imersif. Melalui platform AR, siswa dapat bekerja bersama dalam menyelesaikan tugas, berbagi ide, dan membangun pemahaman bersama, meskipun berada di lokasi yang berbeda. Teknologi ini memfasilitasi pembelajaran kolaboratif yang efektif, terutama dalam konteks pembelajaran jarak jauh atau hybrid.

Penelitian oleh (Bacca-Acosta et al. 2014) menunjukkan bahwa AR dapat meningkatkan interaksi sosial dan kerja sama antar siswa dengan menyediakan ruang virtual yang memungkinkan mereka untuk berkolaborasi secara langsung. Misalnya, aplikasi AR seperti "Construct3D" memungkinkan siswa untuk bekerja bersama dalam membangun model matematika atau geometri, meningkatkan pemahaman mereka melalui pengalaman praktis.

Lebih lanjut, studi oleh (Kljun et al. 2020) menekankan pentingnya AR dalam mendukung pembelajaran kolaboratif dengan menyediakan alat yang memungkinkan siswa untuk berinteraksi dengan objek 3D dan informasi digital secara bersamaan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan keterampilan teknis siswa tetapi juga mendorong mereka untuk bekerja sama dalam menyelesaikan masalah kompleks.

3. Manfaat Bagi Siswa dan Guru

Perkembangan teknologi *Augmented Reality* (AR) telah membawa perubahan signifikan dalam dunia pendidikan, menciptakan pengalaman belajar yang lebih interaktif, imersif, dan kontekstual. Pemanfaatan AR tidak hanya memungkinkan visualisasi konsep abstrak, tetapi juga mendorong partisipasi aktif siswa melalui interaksi langsung dengan objek digital yang dipadukan dalam dunia nyata. Tren penggunaan AR di kelas, laboratorium virtual, dan media pembelajaran interaktif menunjukkan bahwa teknologi ini memiliki potensi besar untuk meningkatkan motivasi, keterlibatan, serta efektivitas proses belajar mengajar.

a. Manfaat Bagi Siswa

Penggunaan *Augmented Reality* (AR) dalam pendidikan memberikan berbagai manfaat signifikan bagi siswa, terutama dalam hal keterlibatan, motivasi, dan pemahaman materi. AR memungkinkan siswa untuk mengalami pembelajaran secara interaktif, di mana konsep abstrak dapat divisualisasikan menjadi bentuk 3D atau animasi yang nyata. Misalnya, dalam pembelajaran biologi, siswa dapat melihat model organ tubuh manusia dalam tiga dimensi, memutar dan memanipulasi objek untuk memahami fungsi dan interaksi antar organ secara lebih mendalam (Bacca et al., 2014).

Selain meningkatkan pemahaman konsep, AR juga meningkatkan motivasi belajar siswa. Menurut (Alzahrani 2020), siswa yang belajar menggunakan AR menunjukkan tingkat partisipasi dan antusiasme yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional. Interaksi langsung dengan konten digital yang dipadukan dengan lingkungan nyata membuat pembelajaran lebih menyenangkan, sehingga siswa terdorong untuk mengeksplorasi materi secara mandiri dan aktif. Hal ini terutama penting untuk pembelajaran abad 21, yang menekankan keterampilan berpikir kritis, kolaboratif, dan kreatif.

AR juga mendukung keberagaman gaya belajar. Media ini menggabungkan elemen visual, auditori, dan kinestetik sehingga dapat menjangkau berbagai tipe siswa. Sebagai contoh, siswa yang lebih mudah belajar secara visual dapat melihat animasi 3D, siswa auditori dapat mendengarkan penjelasan narasi, dan siswa kinestetik dapat berinteraksi langsung dengan objek virtual menggunakan gesture atau kontrol perangkat. Dengan demikian, penggunaan AR dapat meningkatkan retensi informasi dan pemahaman materi secara menyeluruh, sehingga pembelajaran menjadi lebih efektif dan inklusif (Alzahrani 2020; Bacca-Acosta et al. 2014).

b. Manfaat Bagi Guru

AR juga memberikan manfaat signifikan bagi guru dalam menyampaikan materi pembelajaran secara lebih efektif dan menarik. Pertama, teknologi ini membantu guru menyederhanakan konsep-konsep yang kompleks dengan menyediakan visualisasi dinamis dan interaktif. Sebagai contoh, guru dapat menggunakan AR untuk menampilkan proses perakitan komputer atau eksperimen sains yang sulit dilakukan di kelas karena keterbatasan alat dan keamanan, sehingga mempermudah penjelasan dan pengajaran (Endra and Saputra 2022).

Kedua, AR memungkinkan guru untuk meningkatkan kualitas pembelajaran melalui pengawasan interaksi siswa secara real-time. Dengan sistem AR yang mendukung evaluasi dan feedback instan, guru dapat segera mengetahui area yang sulit dipahami siswa dan memberikan intervensi yang tepat. Hal ini meningkatkan efektivitas proses belajar mengajar karena penyesuaian materi dan metode dapat dilakukan secara adaptif (Billinghurst and Duenser 2012).

Selain itu, AR memperluas kreativitas guru dalam merancang strategi pembelajaran. Guru tidak terbatas pada media konvensional seperti papan tulis atau buku teks, melainkan dapat mengembangkan skenario pembelajaran yang interaktif dan kontekstual. Hal ini tidak hanya meningkatkan keterlibatan siswa tetapi juga memberikan guru fleksibilitas dalam menyampaikan materi sesuai karakteristik kelas, gaya belajar siswa, dan tujuan pembelajaran yang ingin dicapai. Dengan demikian, AR menjadi alat yang mendukung profesionalisme guru sekaligus meningkatkan mutu pendidikan secara keseluruhan (Bacca-Acosta et al. 2014; Endra and Saputra 2022).

Seiring dengan perkembangan teknologi dan kebutuhan pendidikan modern, pembahasan ini menguraikan secara komprehensif tentang *Augmented Reality* (AR) dalam konteks pembelajaran. Materi mencakup definisi dan konsep dasar AR,

perbedaan dengan *Virtual Reality* (VR) dan *Mixed Reality* (MR), serta komponen utama yang meliputi *hardware*, *software*, dan *content*. Selain itu, sejarah perkembangan AR dari sistem grafis awal pada 1960-an hingga implementasi modern di kelas, laboratorium virtual, dan media interaktif juga dijelaskan. Tren saat ini, seperti visualisasi konsep abstrak, integrasi gamifikasi dan LMS, serta *mobile AR Learning*, turut dibahas, bersamaan dengan prospek masa depan yang mencakup pembelajaran imersif, kolaborasi virtual, dan personalisasi materi berbasis AI. Berbagai manfaat AR bagi siswa dan guru termasuk peningkatan keterlibatan, motivasi, dan efektivitas pembelajaran ditekankan, beserta pertimbangan teknis dan pedagogis dalam penerapannya. Secara keseluruhan, uraian ini menegaskan bahwa AR merupakan teknologi yang semakin relevan dalam pendidikan, membuka peluang inovatif untuk pengalaman belajar yang interaktif, kontekstual, dan adaptif.

BAB

3

MEDIA PEMBELAJARAN BERBASIS AR



Bab ini membahas penerapan Augmented Reality sebagai media pembelajaran yang inovatif. Materi mencakup pengertian media pembelajaran berbasis AR, karakteristik dan keunggulannya dalam meningkatkan motivasi serta pemahaman siswa, hingga berbagai tantangan implementasinya. Selain itu, dijelaskan model-model penggunaan AR di dalam kelas dan beberapa studi kasus keberhasilan penerapan AR dalam berbagai bidang pendidikan sebagai contoh praktik baik yang dapat diadaptasi oleh pendidik.

A. Pengertian Media Pembelajaran Berbasis AR

Perkembangan teknologi digital telah membawa perubahan yang signifikan dalam berbagai aspek kehidupan, termasuk dalam dunia pendidikan. Transformasi pembelajaran yang sebelumnya didominasi oleh metode konvensional kini mulai bergeser menuju pembelajaran berbasis teknologi yang lebih interaktif, fleksibel, dan berpusat pada peserta didik. Dalam hal tersebut, *Augmented Reality* (AR) hadir sebagai salah satu inovasi teknologi yang menawarkan pengalaman belajar yang lebih menarik dan bermakna. Teknologi ini memungkinkan integrasi objek virtual ke dalam lingkungan nyata secara real-time, sehingga peserta didik dapat berinteraksi dengan materi pembelajaran melalui visualisasi yang lebih konkret dan mendalam.

Pentingnya *Augmented Reality* dalam pendidikan tidak terlepas dari kemampuannya dalam mengatasi berbagai kendala yang sering ditemui dalam proses pembelajaran. Salah satu tantangan utama yang dihadapi guru adalah menjelaskan konsep-konsep yang bersifat abstrak, kompleks, atau sulit diamati secara langsung oleh siswa. Materi seperti struktur perangkat keras komputer, mekanisme kerja jaringan komputer, sistem organ tubuh manusia, struktur molekul, maupun fenomena fisika sering kali membutuhkan kemampuan visualisasi yang tinggi agar dapat dipahami secara utuh. Ketika materi tersebut hanya disampaikan melalui teks, gambar dua dimensi, atau penjelasan verbal, siswa cenderung mengalami kesulitan dalam membangun pemahaman konseptual yang mendalam.

Augmented Reality menawarkan solusi terhadap permasalahan tersebut dengan menghadirkan representasi objek dalam bentuk tiga dimensi yang dapat diamati dan dieksplorasi secara langsung. Melalui perangkat seperti smartphone, tablet, atau perangkat AR lainnya, siswa dapat melihat objek virtual seolah-olah berada di lingkungan nyata. Mereka dapat memutar objek, memperbesar tampilan, mengamati detail setiap bagian, serta memahami hubungan antar komponen dengan lebih jelas. Pengalaman belajar seperti ini membantu siswa membangun pemahaman yang lebih konkret dibandingkan hanya membaca deskripsi atau melihat gambar statis dalam buku.

Selain meningkatkan pemahaman konsep, AR juga memiliki peran penting dalam meningkatkan motivasi dan keterlibatan siswa selama proses pembelajaran. Salah satu faktor yang memengaruhi keberhasilan belajar adalah tingkat perhatian dan minat siswa terhadap materi yang dipelajari. Media pembelajaran tradisional sering kali menyajikan informasi secara pasif sehingga kurang mampu mempertahankan fokus siswa dalam jangka waktu yang lama. Sebaliknya, teknologi AR menghadirkan pengalaman belajar yang interaktif dan imersif, sehingga siswa menjadi lebih aktif dalam mengeksplorasi materi pembelajaran. Interaksi langsung dengan objek virtual mampu menciptakan rasa ingin tahu yang lebih tinggi, meningkatkan partisipasi siswa, serta mendorong mereka untuk belajar secara mandiri.

Dalam konteks pembelajaran abad ke-21, kemampuan AR untuk menciptakan pengalaman belajar yang aktif sangat relevan dengan tuntutan pendidikan modern. Pembelajaran saat ini tidak lagi hanya berfokus pada transfer pengetahuan dari guru kepada siswa, tetapi juga pada pengembangan keterampilan berpikir kritis, pemecahan masalah, kreativitas, kolaborasi, dan literasi teknologi. *Augmented Reality* mendukung pencapaian tujuan tersebut dengan menyediakan lingkungan belajar yang memungkinkan siswa melakukan eksplorasi, observasi, dan investigasi secara mandiri. Siswa tidak hanya menerima informasi, tetapi juga terlibat secara langsung dalam proses membangun pengetahuan melalui pengalaman belajar yang autentik.

Keunggulan lain dari AR adalah kemampuannya dalam menyediakan simulasi pembelajaran yang aman, efisien, dan ekonomis. Pada beberapa bidang studi, kegiatan praktikum sering menghadapi keterbatasan fasilitas, biaya, waktu, maupun risiko keselamatan. Dengan bantuan AR, berbagai proses dan objek yang sulit dihadirkan secara nyata dapat divisualisasikan dalam bentuk simulasi interaktif. Sebagai contoh, siswa dapat mempelajari proses perakitan komputer, mengidentifikasi komponen motherboard, memahami cara kerja jaringan komputer, atau melakukan simulasi eksperimen laboratorium tanpa harus menggunakan peralatan fisik yang lengkap. Hal ini memberikan kesempatan belajar yang lebih luas bagi siswa sekaligus mengurangi keterbatasan yang sering dihadapi oleh institusi pendidikan.

Selain itu, *Augmented Reality* juga mendukung fleksibilitas dalam penyelenggaraan pembelajaran. Teknologi ini dapat diterapkan pada berbagai model pembelajaran, baik pembelajaran tatap muka, pembelajaran daring (online), maupun pembelajaran hybrid yang mengombinasikan keduanya. Materi berbasis AR dapat diakses kapan saja dan di mana saja melalui perangkat mobile yang dimiliki siswa, sehingga proses belajar tidak lagi terbatas oleh ruang dan waktu. Fleksibilitas ini sangat penting dalam mendukung kebutuhan pembelajaran modern yang menuntut akses informasi secara cepat dan mudah.

Dari perspektif pedagogis, penggunaan AR juga sejalan dengan teori konstruktivisme yang menekankan bahwa pengetahuan dibangun melalui pengalaman dan interaksi aktif dengan lingkungan belajar. Melalui visualisasi dan interaksi yang disediakan oleh AR, siswa memperoleh kesempatan untuk mengonstruksi pemahaman mereka sendiri berdasarkan pengalaman yang dialami selama proses pembelajaran. Pengalaman belajar yang bersifat kontekstual dan bermakna tersebut berkontribusi terhadap peningkatan retensi informasi, pemahaman konsep, serta hasil belajar siswa secara keseluruhan.

Dengan berbagai keunggulan yang dimilikinya, *Augmented Reality* tidak lagi dipandang sekadar sebagai teknologi pelengkap dalam pembelajaran, melainkan sebagai media inovatif yang mampu mendukung transformasi pendidikan di era digital. Kemampuannya dalam menggabungkan dunia nyata dan dunia virtual, meningkatkan interaktivitas, memfasilitasi visualisasi konsep yang kompleks, serta mendukung pembelajaran yang fleksibel menjadikan AR sebagai salah satu teknologi yang memiliki potensi besar untuk meningkatkan kualitas proses belajar-mengajar. Oleh karena itu, pemanfaatan *Augmented Reality* dalam pendidikan perlu terus dikembangkan dan diintegrasikan secara optimal agar dapat memberikan pengalaman belajar yang lebih efektif, menarik, dan sesuai dengan kebutuhan generasi digital masa kini.

1. Definisi Media Pembelajaran AR

Media pembelajaran berbasis *Augmented Reality* (AR) merupakan evolusi dari media pembelajaran konvensional yang mengintegrasikan elemen digital ke dalam dunia nyata untuk menciptakan pengalaman belajar yang lebih interaktif dan imersif. AR memungkinkan siswa tidak hanya menerima informasi secara pasif, tetapi juga berinteraksi langsung dengan materi pembelajaran melalui objek 3D, animasi, audio, maupun video yang ditampilkan di lingkungan nyata. Hal ini berbeda dengan media tradisional, seperti buku teks atau papan tulis, yang bersifat statis dan tidak mampu menampilkan dimensi interaksi atau pengalaman visual yang mendalam.

Menurut Azuma (1997), AR adalah sistem yang menggabungkan dunia nyata dan informasi virtual secara interaktif, dengan pemrosesan real-time dan registrasi spasial. Azuma menekankan bahwa keunggulan utama AR terletak pada kemampuannya untuk mempertahankan keterkaitan antara objek virtual dengan lingkungan nyata sehingga pengalaman belajar menjadi lebih natural dan realistis. Sedangkan Craig (2013) menegaskan bahwa AR memperluas dunia fisik dengan lapisan digital yang mencakup teks, gambar, video, dan animasi, sehingga memberikan konteks tambahan terhadap objek nyata yang membantu pemahaman peserta didik.

Billinghurst dan Duenser (2012) mendefinisikan AR sebagai teknologi yang memungkinkan pengguna berinteraksi dengan dunia nyata yang diperkuat oleh elemen virtual, yang secara signifikan dapat meningkatkan motivasi dan keterlibatan siswa dalam proses belajar. Sementara itu, Yuen, Yaoyuneyong, dan Johnson (2011) menjelaskan AR sebagai teknologi yang menghadirkan objek digital yang terintegrasi dengan lingkungan nyata, mendukung pembelajaran visual, kontekstual, dan interaktif. Zhou, Duh, dan Billinghurst (2008) menambahkan bahwa aspek registrasi penempatan objek virtual secara tepat di dunia nyata merupakan kunci efektivitas AR dalam memfasilitasi pengalaman belajar yang koheren dan menarik.

Dari perspektif pendidikan, media berbasis AR memiliki keunggulan dibandingkan media pembelajaran konvensional. Sebagai contoh, pada pembelajaran sains atau komputer, konsep yang abstrak dapat divisualisasikan dalam bentuk animasi 3D atau simulasi interaktif, sehingga siswa dapat mengeksplorasi, memanipulasi, dan memahami fenomena secara langsung. Berbeda dengan media tradisional yang hanya menampilkan teks atau gambar dua dimensi, AR mampu menghadirkan pengalaman belajar multisensorik, yang tidak hanya meningkatkan pemahaman materi tetapi juga keterampilan berpikir kritis dan pemecahan masalah.

Endra dan Saputra (2023) menegaskan bahwa penerapan AR dalam pendidikan memberikan manfaat signifikan berupa peningkatan keterlibatan siswa, pemahaman konsep yang lebih baik, serta peluang eksplorasi yang lebih luas dibandingkan media pembelajaran konvensional. Sejalan dengan penelitian Billinghamurst & Dünser (2012), AR juga mendukung pembelajaran yang bersifat kolaboratif dan kontekstual, di mana siswa dapat bekerja sama untuk menyelesaikan tugas atau eksperimen virtual dalam lingkungan yang mirip dunia nyata.

Dengan demikian, media pembelajaran berbasis AR dapat didefinisikan sebagai sarana atau perantara yang memanfaatkan teknologi untuk menggabungkan dunia nyata dengan elemen digital secara interaktif, real-time, dan kontekstual, sehingga mendukung tercapainya tujuan pembelajaran secara lebih efektif, menarik, dan bermakna dibandingkan media konvensional.

2. Contoh Penerapan Sederhana

Penerapan *Augmented Reality* (AR) dalam pembelajaran dapat dilakukan dengan berbagai cara yang sederhana namun efektif, menyesuaikan dengan materi dan tujuan pembelajaran. Salah satu contoh penerapan yang paling mudah adalah visualisasi perangkat keras komputer. Dengan menggunakan aplikasi AR, siswa dapat melihat model 3D komponen komputer seperti *motherboard*, RAM, prosesor, dan kartu grafis secara interaktif. Mereka dapat memutar, memperbesar, atau menyorot bagian tertentu, sehingga pemahaman mengenai struktur dan fungsi perangkat keras menjadi lebih konkret dibandingkan hanya menggunakan buku teks atau gambar dua dimensi.

Selain komputer, AR juga dapat diterapkan dalam pembelajaran sains. Misalnya, konsep abstrak seperti sistem peredaran darah, siklus air, atau reaksi kimia dapat divisualisasikan melalui animasi 3D yang ditempatkan di ruang kelas. Siswa dapat mengamati proses yang terjadi secara real-time, menyesuaikan sudut pandang, atau memanipulasi objek untuk mengeksplorasi fenomena tertentu. Pendekatan ini membuat siswa tidak hanya menerima informasi secara pasif, tetapi juga terlibat aktif dalam proses belajar,

meningkatkan daya ingat dan pemahaman konseptual (Endra and Saputra 2022).

Dalam pembelajaran sejarah, AR dapat digunakan untuk merekonstruksi artefak, bangunan bersejarah, atau peristiwa tertentu. Misalnya, siswa dapat menampilkan model 3D candi atau monumen sejarah di ruang kelas, lalu mempelajari detail arsitektur, konteks budaya, dan peristiwa terkait. Dengan cara ini, pembelajaran sejarah menjadi lebih menarik, kontekstual, dan imersif, dibandingkan hanya mengandalkan gambar atau teks.

Contoh lain adalah pembelajaran bahasa. AR dapat memproyeksikan objek dan kata-kata terkait ke dunia nyata, sehingga siswa dapat belajar kosakata dengan cara yang lebih interaktif. Misalnya, menampilkan kata “meja” di atas objek meja nyata, atau menampilkan animasi yang mencontohkan penggunaan kata tersebut dalam kalimat. Pendekatan ini membantu siswa mengaitkan konsep abstrak (kata atau frasa) dengan objek nyata, meningkatkan retensi dan pemahaman.

Selain itu, AR juga dapat diterapkan untuk latihan keterampilan atau simulasi prosedur praktis. Misalnya, dalam pendidikan teknik, siswa dapat melakukan simulasi perakitan mesin atau eksperimen laboratorium secara virtual, yang aman dan hemat biaya. Penggunaan AR memungkinkan mereka berlatih langkah-langkah prosedur, mengulang kesalahan, dan memahami proses secara mendalam sebelum melakukan praktik langsung di dunia nyata (Billinghurst and Duenser 2012).

Secara keseluruhan, penerapan AR dalam pembelajaran tidak hanya memperkaya media belajar, tetapi juga meningkatkan interaktivitas, motivasi, dan pemahaman siswa. Siswa dapat mengalami proses belajar yang lebih realistis, visual, dan imersif, sekaligus mendukung berbagai gaya belajar visual, auditori, maupun kinestetik. Dengan contoh-contoh sederhana ini, guru dapat mulai memanfaatkan AR sebagai media pembelajaran tanpa memerlukan perangkat atau sistem yang kompleks, sambil tetap mempersiapkan langkah-langkah lebih lanjut untuk integrasi teknologi yang lebih canggih.

3. Hubungan Efektivitas Pembelajaran

Hubungan penggunaan *Augmented Reality* (AR) dengan efektivitas pembelajaran telah banyak dibuktikan melalui berbagai penelitian. Salah satu keunggulan utama AR adalah kemampuannya menyajikan informasi dalam bentuk visualisasi interaktif yang dapat membantu siswa memahami konsep abstrak. Menurut Billingham et al. (2015), AR memungkinkan penggabungan objek virtual ke dalam dunia nyata, sehingga siswa dapat mengeksplorasi materi secara langsung dengan pengalaman yang lebih konkret. Hal ini berbeda dengan media konvensional yang cenderung statis, sehingga daya serap siswa terhadap materi seringkali terbatas.

Selain itu, AR terbukti mampu meningkatkan keterlibatan siswa dalam proses pembelajaran. Riset yang dilakukan oleh (Di Serio, Ibáñez, and Delgado-Kloos 2013) menunjukkan bahwa penggunaan AR dapat meningkatkan motivasi belajar siswa secara signifikan dibandingkan dengan metode tradisional. Hal ini dikarenakan AR menghadirkan pengalaman belajar yang menyenangkan, imersif, dan berbasis eksplorasi, sehingga siswa lebih antusias mengikuti pelajaran. Faktor keterlibatan ini penting, karena siswa yang termotivasi cenderung memiliki konsentrasi dan daya ingat yang lebih baik.

Dari sisi pemahaman konsep, AR juga terbukti efektif untuk materi yang memerlukan representasi visual. Misalnya, penelitian oleh (Radu 2014) menegaskan bahwa AR membantu siswa memahami topik yang sulit, seperti struktur organ tubuh manusia, proses sirkulasi darah, hingga perakitan perangkat keras komputer. Melalui simulasi AR, siswa tidak hanya membaca teori, tetapi dapat langsung mengamati representasi tiga dimensi dari objek tersebut. Dengan demikian, proses berpikir abstrak menjadi lebih sederhana karena didukung oleh visualisasi yang nyata.

Tidak hanya meningkatkan pemahaman, AR juga berkontribusi terhadap hasil belajar siswa. Hasil penelitian (Khan, Johnston, and Ophoff 2019) menemukan bahwa siswa yang belajar menggunakan AR menunjukkan peningkatan skor tes yang lebih

tinggi dibandingkan dengan kelompok kontrol yang menggunakan metode konvensional. Temuan ini menunjukkan bahwa AR bukan sekadar alat bantu tambahan, tetapi mampu memperbaiki efektivitas pembelajaran dalam jangka panjang.

Akhirnya, penerapan AR dalam pembelajaran menciptakan lingkungan belajar yang lebih aktif, kolaboratif, dan inovatif. Dengan kombinasi antara teori dan praktik berbasis teknologi, siswa tidak hanya menjadi penerima informasi, tetapi juga berperan sebagai penjelajah pengetahuan. Hal ini sejalan dengan tuntutan pendidikan abad ke-21 yang menekankan pada critical thinking, creativity, collaboration, dan communication. Dengan demikian, AR dapat dipandang sebagai media pembelajaran yang mampu menjawab tantangan pendidikan modern sekaligus meningkatkan kualitas hasil belajar siswa.

B. Karakteristik dan Keunggulan AR dalam Pembelajaran

Augmented Reality (AR) hadir sebagai salah satu inovasi teknologi yang semakin banyak dimanfaatkan dalam dunia pendidikan. Teknologi ini memiliki karakteristik utama berupa kemampuan menggabungkan dunia nyata dengan elemen digital secara real-time, sehingga memberikan pengalaman belajar yang lebih imersif. Berbeda dengan media pembelajaran tradisional yang cenderung bersifat statis, AR memungkinkan peserta didik untuk berinteraksi langsung dengan objek virtual yang ditampilkan di atas lingkungan nyata. Karakteristik ini membuat pembelajaran menjadi lebih kontekstual dan mudah dipahami.

Selain memberikan visualisasi yang lebih menarik, AR juga memiliki keunggulan dalam hal interaktivitas. Siswa tidak hanya melihat informasi dalam bentuk teks atau gambar dua dimensi, melainkan juga dapat memanipulasi objek tiga dimensi sesuai kebutuhan pembelajaran. Interaktivitas ini dapat meningkatkan rasa ingin tahu sekaligus mendorong keterlibatan aktif siswa dalam proses belajar. Dengan demikian, AR mampu mengubah pembelajaran dari yang bersifat pasif menjadi aktif dan eksploratif.

Keunggulan lain dari AR adalah kemampuannya untuk menghadirkan simulasi praktis yang sulit dilakukan di dunia nyata. Misalnya, dalam pembelajaran tentang organ tubuh manusia, siswa dapat mempelajari struktur dan fungsi organ melalui model 3D tanpa harus melakukan pembedahan. Hal ini tidak hanya meningkatkan pemahaman konsep tetapi juga mengurangi risiko dan biaya yang mungkin muncul pada praktik nyata.

Lebih jauh lagi, AR juga mendukung prinsip pembelajaran modern yang menekankan personalisasi. Siswa dapat belajar sesuai kecepatan dan gaya belajar masing-masing, baik secara individu maupun kolaboratif. Dengan kombinasi karakteristik unik dan berbagai keunggulan tersebut, AR menjadi salah satu media pembelajaran yang sangat potensial dalam meningkatkan efektivitas pendidikan di era digital saat ini.

1. Karakteristik AR

Salah satu karakteristik utama *Augmented Reality* (AR) adalah interaktivitas. Teknologi ini memungkinkan peserta didik berinteraksi langsung dengan objek digital yang ditampilkan dalam ruang nyata, baik melalui sentuhan, gerakan, maupun perangkat pendukung seperti smartphone atau headset AR. Interaktivitas ini memberikan pengalaman belajar yang lebih personal dan adaptif, di mana siswa tidak hanya menjadi penerima informasi, tetapi juga berperan aktif dalam membangun pengetahuan. Menurut (Billinghurst and Duenser 2012), interaktivitas dalam AR mendorong keterlibatan kognitif yang lebih tinggi karena siswa dilibatkan secara langsung dalam eksplorasi materi.

Karakteristik berikutnya adalah integrasi antara dunia nyata dan virtual. AR menggabungkan informasi digital, seperti teks, gambar, audio, atau model 3D, ke dalam lingkungan nyata secara simultan. Hal ini memungkinkan siswa mempelajari konsep abstrak dengan lebih kontekstual karena informasi tambahan muncul tepat pada objek atau situasi yang sedang diamati. (Azuma 1997) menyebutkan bahwa inti dari AR terletak pada kemampuannya menghubungkan lingkungan nyata dengan elemen

virtual secara seamless, sehingga menciptakan pengalaman belajar yang lebih kaya dan bermakna.

Selain itu, AR memiliki karakteristik *real-time feedback*. Sistem AR dapat merespons secara langsung terhadap tindakan siswa, misalnya ketika kamera smartphone diarahkan pada marker, objek virtual muncul secara instan sesuai dengan konteks. Umpan balik instan ini memungkinkan siswa memperbaiki kesalahan dan meningkatkan pemahaman konsep secara cepat. Menurut (Dede and Mitchell 2009), kemampuan memberikan feedback secara langsung merupakan salah satu faktor yang menjadikan AR lebih unggul dibandingkan media pembelajaran konvensional, karena siswa dapat segera mengetahui apakah interaksinya sudah benar atau masih perlu diperbaiki.

Karakteristik lain yang tidak kalah penting adalah visualisasi 3D. Dengan teknologi AR, objek yang sebelumnya hanya dapat dilihat melalui gambar dua dimensi dalam buku dapat dihadirkan dalam bentuk tiga dimensi yang interaktif. Hal ini sangat bermanfaat untuk mempelajari materi yang bersifat kompleks dan spasial, seperti struktur mesin, organ tubuh, atau perakitan perangkat keras komputer. (Radu 2014) menegaskan bahwa visualisasi 3D dalam AR membantu siswa memahami konsep abstrak dan kompleks dengan lebih mudah, karena mereka dapat mengamati detail dari berbagai sudut pandang seolah-olah sedang berinteraksi dengan objek nyata.

2. Keunggulan AR

Salah satu keunggulan utama penggunaan *Augmented Reality* (AR) dalam pembelajaran adalah kemampuannya untuk meningkatkan motivasi siswa. AR menghadirkan pengalaman belajar yang lebih menarik dibandingkan media konvensional karena menyajikan materi dalam bentuk visual interaktif yang seolah-olah hadir di dunia nyata. Penelitian yang dilakukan oleh (Di Serio et al. 2013) menunjukkan bahwa penggunaan AR mampu meningkatkan motivasi intrinsik siswa secara signifikan. Hal ini dikarenakan siswa merasa lebih tertarik untuk mempelajari materi

ketika disajikan dengan cara yang inovatif, interaktif, dan menyenangkan.

Selain itu, AR juga memberikan pengalaman belajar yang imersif. Dengan kemampuan menampilkan objek tiga dimensi secara realistis, siswa dapat mengeksplorasi materi pelajaran seolah-olah mereka berinteraksi langsung dengan objek tersebut. Misalnya, dalam pembelajaran biologi, siswa dapat melihat organ tubuh manusia secara detail dalam bentuk 3D, bahkan memanipulasinya untuk memahami struktur dan fungsinya. (Radu 2014) menegaskan bahwa pengalaman imersif semacam ini tidak hanya meningkatkan keterlibatan siswa, tetapi juga membantu memperdalam pemahaman terhadap konsep yang abstrak dan kompleks.

Keunggulan lain dari AR adalah fleksibilitas penggunaannya. AR dapat diterapkan pada berbagai perangkat, mulai dari smartphone, tablet, hingga perangkat khusus seperti kacamata AR. Fleksibilitas ini memudahkan guru untuk mengintegrasikan teknologi AR ke dalam pembelajaran tanpa harus memerlukan fasilitas laboratorium yang mahal. Dengan demikian, AR dapat diakses oleh berbagai kalangan pendidikan, baik di sekolah dengan fasilitas terbatas maupun di lembaga pendidikan yang lebih maju.

Selain fleksibilitas, AR juga mampu memberikan dukungan terhadap berbagai gaya belajar. Beberapa siswa cenderung lebih mudah memahami materi dengan visualisasi, sementara yang lain lebih suka praktik langsung atau belajar melalui pengalaman interaktif. AR mampu mengakomodasi berbagai gaya belajar ini dengan menghadirkan kombinasi visualisasi 3D, simulasi interaktif, dan pengalaman praktis secara virtual. Menurut (Billinghurst and Duenser 2012), kemampuan AR dalam mendukung beragam gaya belajar menjadikannya sebagai salah satu media pembelajaran yang inklusif dan efektif untuk meningkatkan hasil belajar siswa di berbagai konteks pendidikan.

3. Contoh Aplikasi Praktis di Kelas

Penerapan *Augmented Reality* (AR) dalam pembelajaran di kelas dapat diwujudkan dalam berbagai bentuk sesuai dengan mata pelajaran yang diajarkan. Salah satu contohnya adalah pada mata pelajaran Dasar-Dasar Komputer dan Jaringan (DDK), khususnya dalam materi perakitan komputer. Melalui AR, siswa dapat melihat secara langsung visualisasi tiga dimensi dari perangkat keras komputer seperti *motherboard*, RAM, prosesor, dan kartu grafis. Objek-objek ini dapat diputar, diperbesar, dan dianalisis secara detail sehingga siswa dapat memahami fungsi serta posisi setiap komponen sebelum benar-benar melakukan praktik perakitan. Hal ini membantu mengurangi risiko kerusakan komponen asli sekaligus memberikan pengalaman belajar yang lebih aman dan efektif.

Selain itu, dalam pembelajaran ilmu sains, AR dapat digunakan untuk menampilkan animasi interaktif mengenai konsep yang sulit dipahami, seperti proses fotosintesis, sirkulasi darah, atau sistem pernapasan manusia. Dengan AR, siswa tidak hanya membaca teori, tetapi juga dapat menyaksikan bagaimana reaksi kimia atau aliran darah berlangsung secara real-time melalui visualisasi 3D yang muncul di atas buku pelajaran atau media cetak lain. Metode ini terbukti meningkatkan pemahaman konsep abstrak yang biasanya sulit dijelaskan hanya dengan gambar statis atau penjelasan lisan guru.

Di sisi lain, dalam mata pelajaran sejarah, AR dapat dimanfaatkan untuk menghadirkan simulasi peristiwa bersejarah atau rekonstruksi bangunan bersejarah di dalam kelas. Misalnya, siswa dapat menggunakan perangkat AR untuk menjelajahi bentuk asli Candi Borobudur, Colosseum di Roma, atau suasana perang kemerdekaan Indonesia. Pengalaman imersif ini tidak hanya membuat siswa lebih mudah memahami konteks sejarah, tetapi juga meningkatkan rasa keterlibatan emosional karena mereka merasa seolah-olah berada langsung di dalam peristiwa tersebut.

Melalui ketiga contoh penerapan tersebut, jelas bahwa AR dapat diterapkan secara fleksibel dalam berbagai mata pelajaran

untuk meningkatkan kualitas pembelajaran. Visualisasi perakitan komputer melatih keterampilan teknis, animasi sains memperdalam pemahaman konsep abstrak, dan simulasi sejarah memperkaya pengetahuan serta imajinasi siswa. Dengan demikian, penggunaan AR di kelas bukan hanya sebagai media bantu, tetapi juga sebagai inovasi yang mampu memberikan pengalaman belajar yang lebih menyeluruh dan bermakna.

C. Keterbatasan dan Tantangan Impelementasi AR

Meskipun *Augmented Reality* (AR) menawarkan berbagai keunggulan dalam meningkatkan efektivitas pembelajaran, implementasinya di lingkungan pendidikan tidak terlepas dari keterbatasan dan tantangan yang perlu diperhatikan. Sebagai sebuah teknologi yang relatif baru, penerapan AR masih menghadapi hambatan dari sisi teknis, pedagogis, maupun sumber daya. Hambatan-hambatan ini seringkali menjadi faktor yang membatasi pemanfaatan AR secara optimal di kelas.

Dari sisi teknis, keterbatasan perangkat keras dan perangkat lunak sering kali menjadi kendala utama. Tidak semua sekolah memiliki fasilitas berupa smartphone atau perangkat berbasis AR dengan spesifikasi memadai. Selain itu, aplikasi AR membutuhkan koneksi internet yang stabil serta pemahaman teknis dari guru maupun siswa dalam mengoperasikannya. Hal ini menunjukkan bahwa kesiapan infrastruktur memegang peranan penting dalam mendukung keberhasilan implementasi AR.

Di sisi lain, tantangan pedagogis juga muncul terkait kesiapan guru dalam merancang dan mengintegrasikan AR ke dalam pembelajaran. AR bukan hanya soal menghadirkan teknologi, tetapi juga bagaimana guru dapat menyelaraskannya dengan tujuan pembelajaran, metode, dan evaluasi. Tanpa perencanaan yang matang, AR berisiko menjadi sekadar media hiburan tanpa memberikan dampak signifikan pada pencapaian kompetensi siswa. Oleh karena itu, pemahaman menyeluruh mengenai keterbatasan dan tantangan AR sangat penting agar pemanfaatannya benar-benar efektif dalam konteks pendidikan.

1. Keterbatasan Teknis

Salah satu tantangan utama dalam implementasi *Augmented Reality* (AR) di dunia pendidikan adalah keterbatasan teknis yang meliputi perangkat keras, koneksi internet, serta kompatibilitas perangkat lunak. AR umumnya membutuhkan perangkat dengan spesifikasi tinggi seperti kamera berkualitas baik, prosesor yang cepat, serta kapasitas memori yang memadai. Sayangnya, tidak semua sekolah atau siswa memiliki akses terhadap perangkat tersebut. Keterbatasan perangkat keras ini sering kali menjadi penghalang dalam penerapan AR secara merata, terutama di sekolah-sekolah dengan fasilitas terbatas. Menurut (Billinghurst et al. 2015), keberhasilan AR dalam pendidikan sangat dipengaruhi oleh ketersediaan perangkat yang memadai untuk menjalankan aplikasi secara optimal.

Selain itu, koneksi internet juga menjadi faktor krusial dalam mendukung penggunaan aplikasi AR. Banyak aplikasi AR yang membutuhkan jaringan internet stabil untuk mengunduh data, menampilkan model 3D, atau menjalankan fitur interaktif secara real-time. Di daerah dengan akses internet terbatas, hal ini menjadi kendala serius yang dapat menghambat kelancaran pembelajaran berbasis AR. Ketergantungan terhadap internet membuat keberhasilan penggunaan AR sangat bergantung pada infrastruktur jaringan yang tersedia di sekolah maupun lingkungan siswa. Hal ini sejalan dengan temuan (Resti and Mustika 2025) yang menyatakan bahwa keterbatasan jaringan internet menjadi salah satu kendala terbesar dalam implementasi media pembelajaran berbasis teknologi.

Aspek teknis lain yang tidak kalah penting adalah kompatibilitas perangkat lunak. Tidak semua aplikasi AR dapat berjalan di berbagai jenis sistem operasi atau perangkat dengan spesifikasi berbeda. Beberapa aplikasi hanya mendukung versi sistem tertentu, sehingga pengguna harus melakukan pembaruan perangkat atau bahkan membeli perangkat baru agar aplikasi dapat digunakan. Kondisi ini tidak hanya menambah biaya, tetapi juga membatasi fleksibilitas dalam penerapan AR di berbagai

lingkungan belajar. Menurut (Craig 2013), kompatibilitas *software* merupakan faktor penentu keberhasilan implementasi AR, karena aplikasi yang tidak seragam dapat membatasi akses pengguna serta memperlambat adopsi teknologi di bidang pendidikan.

2. Tantangan Pedagogis

Selain kendala teknis, penerapan *Augmented Reality* (AR) dalam pendidikan juga menghadapi tantangan dari sisi pedagogis. Salah satu aspek penting adalah kesiapan guru. Banyak guru masih merasa kesulitan dalam mengintegrasikan teknologi baru seperti AR ke dalam proses pembelajaran, baik karena keterbatasan keterampilan digital maupun kurangnya pelatihan yang memadai (Tarigan 2025). Tanpa dukungan kompetensi yang cukup, pemanfaatan AR berpotensi tidak maksimal dan hanya menjadi tambahan teknologi yang kurang efektif dalam mendukung capaian pembelajaran.

Tantangan berikutnya adalah desain materi pembelajaran. Media AR yang baik harus didasarkan pada prinsip-prinsip pedagogis yang tepat, bukan hanya sekadar menampilkan objek 3D atau animasi. Penyusunan materi harus disesuaikan dengan tujuan pembelajaran, tingkat perkembangan siswa, serta relevansi dengan kompetensi inti yang diharapkan. Menurut (Purboyo et al. 2025), desain pembelajaran berbasis AR perlu dirancang secara sistematis agar tidak sekadar menarik secara visual, tetapi juga mampu meningkatkan pemahaman konsep.

Selain itu, penyesuaian kurikulum juga menjadi tantangan penting. Kurikulum yang berlaku seringkali belum secara eksplisit mengakomodasi penggunaan AR dalam pembelajaran, sehingga guru harus melakukan adaptasi tambahan agar integrasi media ini tidak bertentangan dengan standar kompetensi. Penelitian oleh (Hanifah et al. 2024) menegaskan bahwa penerapan teknologi inovatif seperti AR perlu diselaraskan dengan kurikulum nasional agar penggunaannya tidak hanya bersifat insidental, tetapi terintegrasi secara berkelanjutan dalam proses pembelajaran.

Dengan demikian, kesiapan guru, kualitas desain materi, dan kesesuaian dengan kurikulum merupakan faktor-faktor krusial yang harus diperhatikan dalam mengimplementasikan AR di dunia pendidikan.

3. Biaya dan Sumber Daya

Biaya implementasi *Augmented Reality* (AR) tidak hanya soal membeli perangkat keras; ada tiga kelompok biaya utama yang harus diperhitungkan: lisensi perangkat lunak, pengembangan konten, dan pemeliharaan & dukungan operasional. Lisensi perangkat lunak mencakup engine/SDK AR (mis. lisensi komersial untuk Vuforia, Unity Pro, atau layanan cloud untuk pelacakan/hosting), lisensi aset (model 3D berbayar, paket animasi), serta biaya integrasi dengan sistem sekolah (LMS). Karena beberapa SDK menawarkan model berbayar untuk fitur enterprise atau distribusi skala besar, biaya lisensi dapat menjadi pengeluaran berulang yang signifikan terutama bila ingin fitur tingkat lanjut seperti multi-user anchoring atau cloud recognition. (lihat tinjauan manfaat/biaya AR dalam literatur terkait penggunaan AR di pendidikan).

Pengembangan konten seringkali adalah komponen biaya terbesar dan paling intensif sumber daya. Konten berkualitas pendidikan membutuhkan: desain instruksional (mengkonversi tujuan pembelajaran ke pengalaman AR), pembuatan aset (pemodelan 3D, *texturing*, *rigging* untuk animasi), *scripting* interaksi, dan pengujian pedagogis (uji coba di kelas, perbaikan). Jika tim internal tidak memiliki keterampilan ini, sekolah perlu menyewa pengembang, desainer 3D, animator, dan ahli materi yang meningkatkan biaya awal. Selain itu, pembuatan konten yang sesuai kurikulum dan adaptif untuk berbagai level siswa menambah waktu pengembangan. Literatur menunjukkan bahwa investasi pada konten pedagogis yang baik berkorelasi kuat dengan efektivitas belajar (Bacca-Acosta et al. 2014; Billinghurst and Duenser 2012).

Pemeliharaan dan dukungan operasional seringkali diremehkan tetapi berdampak jangka panjang: pembaruan aplikasi agar

kompatibel dengan versi OS terbaru, perbaikan bug, hosting server/asset (jika menggunakan model cloud), backup data, pelatihan ulang guru ketika fitur baru diimplementasikan, serta dukungan teknis harian saat pembelajaran berlangsung. Selain itu, perlu dialokasikan anggaran untuk lisensi tahunan, pembelian ulang aset, dan upgrade perangkat jika spesifikasi minimum berubah. Tanpa anggaran pemeliharaan yang memadai, proyek AR berisiko menjadi usang sehingga kehilangan manfaat pedagogisnya.

Agar perencanaan anggaran lebih praktis, berikut komponen biaya & faktor pendorongnya yang bisa dijadikan checklist saat menyusun proposal atau RAB:

- a. Lisensi & Platform
 - 1) SDK/engine (Vuforia, *ARCore/ARKit* integrasi via Unity/AR Foundation)
 - 2) Tools pendukung (*software* 3D Blender/3ds Max/Maya; lisensi komersial jika diperlukan)
 - 3) Biaya distribusi (akun developer, store fees)
- b. Pengembangan Konten
 - 1) Analisis kebutuhan & desain instruksional
 - 2) Pemodelan 3D, animasi, audio/narasi
 - 3) Integrasi assessment & analytics
 - 4) Uji coba pedagogis dan revisi
- c. Infrastruktur & Operasional
 - 1) Server/cloud hosting (jika asset disajikan on-demand)
 - 2) Koneksi jaringan & bandwidth untuk kelas/kebutuhan sinkronisasi
 - 3) Perangkat (tablet/smartphone/headset) dan penggantian periodik
- d. Sumber Daya Manusia
 - 1) Pelatihan guru & bahan ajar
 - 2) Tim IT/pendukung teknis
 - 3) Konsultan pedagogik atau vendor eksternal
- e. Pemeliharaan & Pengembangan Lanjutan
 - 1) Update berkala, kompatibilitas OS, perbaikan bug
 - 2) Penambahan konten baru sesuai kurikulum

Untuk mengurangi beban biaya tanpa mengorbankan kualitas, ada beberapa strategi mitigasi yang praktis: gunakan open-source tools (mis. Blender untuk 3D), manfaatkan asset store untuk membeli paket siap pakai yang dapat dimodifikasi, lakukan phased rollout (mulai pilot kecil lalu scaling), jalin kolaborasi dengan institusi pendidikan lain atau universitas untuk pengembangan konten bersama, dan ajukan pendanaan/grant untuk inovasi pendidikan. Selain itu, pelatihan guru internal (train-the-trainer) mengurangi ketergantungan pada vendor eksternal di jangka panjang. Penelitian dan praktik lapangan merekomendasikan kombinasi investasi awal pada konten berkualitas dan perencanaan pemeliharaan rutin untuk mendapatkan ROI pendidikan yang optimal (Bacca-Acosta et al. 2014; Billinghurst and Duenser 2012).

4. Strategi Mitigasi

Menghadapi keterbatasan biaya, tantangan teknis, maupun kendala pedagogis dalam implementasi *Augmented Reality* (AR), diperlukan strategi mitigasi agar proses adopsi tetap efektif dan berkelanjutan. Strategi ini tidak hanya menekankan pada aspek teknologi, tetapi juga pada kesiapan guru, siswa, serta kualitas konten pembelajaran. Tiga strategi utama yang dapat diupayakan adalah pelatihan guru, uji coba media, dan pemilihan konten sesuai kebutuhan pembelajaran.

a. Pelatihan Guru

Guru merupakan faktor kunci dalam keberhasilan pemanfaatan media berbasis AR. Tanpa kompetensi yang memadai, teknologi secanggih apa pun tidak akan optimal digunakan. Oleh karena itu, pelatihan guru menjadi langkah prioritas. Program pelatihan dapat difokuskan pada:

- 1) Literasi digital dasar, meliputi penguasaan perangkat, aplikasi AR, serta troubleshooting sederhana.
- 2) Desain pembelajaran berbasis AR, termasuk bagaimana mengintegrasikan teknologi ke dalam rencana pembelajaran, bukan sekadar menambah elemen visual.

- 3) Praktik langsung, agar guru terbiasa menjalankan simulasi AR, mengelola interaksi siswa, serta mengukur hasil belajar.

Pelatihan ini dapat dilakukan secara berjenjang, mulai dari pelatihan internal sekolah hingga kolaborasi dengan perguruan tinggi atau lembaga penyedia teknologi. Penelitian (Arifin 2021) menekankan bahwa keberhasilan adopsi teknologi pembelajaran sangat ditentukan oleh kompetensi guru dalam mendesain dan mengelola aktivitas berbasis media digital.

b. Uji Coba Media

Sebelum AR digunakan secara penuh dalam pembelajaran, uji coba media (pilot test) sangat penting untuk mengidentifikasi kelemahan teknis maupun pedagogis. Uji coba bisa dilakukan pada:

- 1) Skala kecil, misalnya satu kelas atau kelompok siswa.
- 2) Berbagai perangkat, untuk memastikan kompatibilitas antara media AR dengan smartphone, tablet, atau komputer yang digunakan siswa.
- 3) Variasi konteks pembelajaran, baik untuk mata pelajaran eksakta (misalnya simulasi eksperimen kimia) maupun non-eksakta (seperti visualisasi sejarah).

Melalui uji coba, guru dapat menilai apakah media AR benar-benar membantu pencapaian kompetensi, sekaligus memperbaiki konten atau alur pembelajaran sebelum diterapkan lebih luas. Hal ini sejalan dengan temuan (Fiscal et al. 2024), yang menekankan perlunya pengujian dan penyesuaian agar media inovatif benar-benar terintegrasi dengan kurikulum.

c. Pemilihan Konten Sesuai Kebutuhan

Tidak semua materi pembelajaran membutuhkan AR. Oleh karena itu, pemilihan konten harus didasarkan pada analisis kebutuhan dan relevansinya dengan kompetensi inti. Konten AR sebaiknya diprioritaskan pada materi yang:

- 1) Abstrak atau sulit divisualisasikan, misalnya struktur organ tubuh, komponen perangkat keras komputer, atau reaksi kimia.
- 2) Berisiko tinggi bila dipraktikkan langsung, seperti eksperimen laboratorium dengan bahan berbahaya.
- 3) Memerlukan keterlibatan aktif siswa, misalnya simulasi perakitan, role play, atau pemecahan masalah berbasis skenario.

Dengan memilih konten secara selektif, penggunaan AR menjadi lebih hemat sumber daya, tepat sasaran, dan benar-benar memberikan nilai tambah bagi proses belajar.

Secara keseluruhan, strategi mitigasi melalui pelatihan guru, uji coba media, dan seleksi konten memungkinkan sekolah untuk mengurangi risiko kegagalan implementasi AR. Pendekatan ini memastikan bahwa teknologi tidak hanya hadir sebagai tren, tetapi benar-benar berfungsi sebagai alat pedagogis yang efektif, berkelanjutan, dan sesuai dengan kebutuhan pembelajaran siswa.

D. Model-Model Penggunaan AR di Kelas

Perkembangan teknologi *Augmented Reality* (AR) dalam dunia pendidikan tidak hanya membawa peluang baru, tetapi juga memunculkan beragam model implementasi yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan pembelajaran. Penerapan AR di kelas dapat dilakukan dalam berbagai bentuk, mulai dari penggunaan aplikasi berbasis mobile hingga integrasi dengan perangkat khusus seperti *smart glasses*. Setiap model memiliki keunggulan tersendiri dalam memberikan pengalaman belajar yang lebih kontekstual, menarik, dan sesuai dengan karakteristik peserta didik.

Model penggunaan AR di kelas pada dasarnya bertujuan untuk menghadirkan pengalaman belajar yang lebih interaktif dan bermakna. Guru dapat memanfaatkan AR sebagai media pendukung penyampaian materi, sarana latihan interaktif, maupun simulasi yang menyerupai dunia nyata. Dengan demikian, AR tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu visualisasi, tetapi juga sebagai medium

pembelajaran aktif yang melibatkan siswa secara langsung dalam proses eksplorasi dan pemecahan masalah.

Selain itu, fleksibilitas model implementasi AR memungkinkan guru untuk menyesuaikan dengan kondisi kelas, infrastruktur yang tersedia, serta capaian pembelajaran yang ingin dicapai. Dalam konteks ini, pemilihan model yang tepat sangat menentukan efektivitas AR dalam meningkatkan kualitas pembelajaran. Oleh karena itu, pemahaman mengenai berbagai model penggunaan AR di kelas menjadi penting agar implementasinya tidak hanya sekadar adopsi teknologi, melainkan juga transformasi pedagogis yang mendukung keberhasilan pendidikan.

1. Model pembelajaran berbasis proyek dengan AR (Project-based AR Learning)

Model pembelajaran berbasis proyek (*Project-Based Learning* atau PjBL) merupakan salah satu pendekatan pembelajaran yang berorientasi pada pemberian pengalaman belajar bermakna melalui pengerjaan sebuah proyek. Ketika model ini dipadukan dengan teknologi *Augmented Reality* (AR), lahirlah sebuah inovasi yang dikenal sebagai *Project-Based AR Learning*. Model ini tidak hanya menekankan pada penyelesaian proyek, tetapi juga menghadirkan dukungan visual interaktif yang mampu membantu siswa memahami konsep secara lebih mendalam.

Dalam konteks pendidikan, PjBL dengan bantuan AR memberikan ruang bagi siswa untuk mengeksplorasi permasalahan nyata, kemudian mencari solusi dengan memanfaatkan teknologi sebagai media pendukung. Melalui integrasi AR, proyek yang sebelumnya hanya dapat divisualisasikan secara abstrak kini dapat diwujudkan dalam bentuk tiga dimensi yang interaktif. Hal ini tentu memperkuat pemahaman siswa, terutama dalam bidang yang membutuhkan visualisasi tinggi seperti matematika, sains, dan teknik.

Penelitian yang dilakukan oleh Fatahillah dan Faradillah (2023) membuktikan bahwa penerapan *Project-Based Learning* berbantuan AR mampu meningkatkan pemahaman konsep

matematika secara signifikan dibandingkan dengan metode konvensional. Visualisasi objek matematis dalam bentuk tiga dimensi, seperti grafik fungsi maupun bangun ruang, membantu siswa dalam membangun koneksi antar konsep secara lebih nyata (Fatahillah and Faradillah 2023). Dengan demikian, integrasi AR dalam PjBL dapat menjawab kesulitan siswa dalam memahami materi abstrak.

Tidak hanya dalam bidang matematika, penelitian Petrov dan Atanasova (2022) juga menunjukkan hasil serupa pada ranah STEM. Dalam penelitiannya, siswa diajak mengerjakan proyek pembangunan rumah ramah lingkungan dengan dukungan AR dan VR. Hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya peningkatan pencapaian belajar sekaligus motivasi siswa. Siswa merasa lebih terlibat karena dapat melihat hasil rancangan secara langsung dalam bentuk virtual yang mendekati kenyataan (Petrov and Atanasova 2022).

Lebih lanjut, Muslim et al. (2024) mengembangkan kerangka *Augmented Reality-Enhanced 5-Step PjBL Framework* yang memadukan pendekatan ADDIE dengan teknologi AR. Model ini terbukti praktis, valid, dan memperoleh respons positif baik dari guru maupun siswa, dengan tingkat praktikabilitas lebih dari 80%. Keberhasilan model ini menunjukkan bahwa integrasi AR dalam PjBL dapat dijadikan pedoman konkret untuk diterapkan dalam pembelajaran teknik maupun vokasional (Muslim et al. 2024).

Dengan demikian, *Project-Based AR Learning* tidak hanya berfokus pada pencapaian hasil proyek semata, tetapi juga memberikan pengalaman belajar yang imersif dan bermakna. Siswa tidak hanya memahami konsep, tetapi juga terlibat secara aktif dalam proses berpikir kritis, kolaborasi, serta pengambilan keputusan. Oleh karena itu, model ini dinilai sebagai salah satu strategi pembelajaran yang relevan untuk mendukung keterampilan abad ke-21 melalui pemanfaatan teknologi mutakhir.

2. Model pembelajaran interaktif (*Interactive AR Learning*)

Model pembelajaran interaktif merupakan salah satu bentuk penerapan *Augmented Reality* (AR) yang menekankan keterlibatan aktif siswa dalam proses belajar. Berbeda dengan media konvensional yang cenderung satu arah, AR menghadirkan pengalaman belajar dua arah, di mana siswa dapat berinteraksi langsung dengan objek virtual yang diproyeksikan ke dalam dunia nyata. Interaktivitas ini memungkinkan siswa untuk mengeksplorasi, memanipulasi, dan memahami konsep pembelajaran dengan cara yang lebih personal dan bermakna.

Menurut Billinghamurst, Clark, dan Lee (2015), AR berfungsi sebagai jembatan yang menghubungkan dunia nyata dengan dunia digital melalui interaksi pengguna secara langsung dengan objek virtual. Model *Interactive AR Learning* ini memungkinkan siswa untuk tidak sekadar menjadi penerima informasi, tetapi juga sebagai partisipan aktif yang mampu mengeksplorasi konsep, melakukan percobaan, hingga mendapatkan umpan balik secara real-time. Hal ini sangat penting dalam membangun pembelajaran yang berpusat pada siswa (*student-centered Learning*) (Billinghurst et al. 2015).

Penerapan *Interactive AR Learning* telah terbukti memberikan dampak positif pada pemahaman konsep dan keterlibatan siswa. Misalnya, penelitian yang dilakukan oleh Wojciechowski dan Cellary (2013) menunjukkan bahwa siswa yang menggunakan AR dalam pembelajaran biologi mampu memahami struktur sel dan fungsi organ dengan lebih baik dibandingkan dengan metode tradisional. Interaksi langsung dengan model 3D organ sel memungkinkan siswa untuk mengeksplorasi bagian-bagian sel secara detail, yang sebelumnya sulit dipahami hanya melalui buku teks atau gambar dua dimensi (Walczak, Wojciechowski, and Cellary 2006).

Selain meningkatkan pemahaman, model ini juga terbukti meningkatkan motivasi belajar. Di Serio, Ibáñez, dan Kloos (2013) menyatakan bahwa tingkat motivasi siswa meningkat secara signifikan ketika pembelajaran berbasis AR dirancang secara

interaktif. Visualisasi yang menarik, ditambah dengan kesempatan untuk berinteraksi secara langsung dengan objek pembelajaran, membuat siswa merasa lebih tertantang dan termotivasi untuk menyelesaikan aktivitas belajar. Dengan kata lain, interaktivitas yang ditawarkan AR mampu menghadirkan suasana belajar yang lebih imersif dan menyenangkan (Di Serio et al. 2013).

Lebih lanjut, model pembelajaran interaktif berbasis AR juga membuka peluang untuk mendukung pembelajaran kolaboratif. Siswa dapat bekerja dalam kelompok untuk memecahkan masalah, melakukan simulasi, atau mengeksplorasi materi bersama melalui perangkat AR. Menurut Chen dan Wang (2015), integrasi AR dalam pembelajaran kolaboratif tidak hanya meningkatkan partisipasi siswa, tetapi juga memperkuat kemampuan komunikasi, kerja sama, dan pemecahan masalah. Dengan demikian, *Interactive AR Learning* tidak hanya memberikan manfaat kognitif, tetapi juga mengembangkan keterampilan sosial yang penting di abad ke-21 (Chen and Tsai 2012).

3. Model *blended/hybrid Learning* menggunakan AR.

Blended Learning atau pembelajaran campuran telah menjadi salah satu pendekatan yang paling banyak digunakan dalam pendidikan modern, karena mampu menggabungkan keunggulan pembelajaran tatap muka dengan fleksibilitas pembelajaran daring. Kehadiran teknologi *Augmented Reality* (AR) semakin memperkuat model ini, karena AR memungkinkan integrasi konten digital interaktif dengan pengalaman belajar nyata. Menurut (Bower et al. 2014), AR memberikan peluang besar untuk menghadirkan pembelajaran yang lebih kaya dan bermakna dengan menghubungkan dunia fisik dan virtual secara simultan, sehingga sangat relevan untuk mendukung konsep *blended Learning*.

Dalam praktiknya, AR dapat memperluas ruang lingkup *blended Learning* melalui penyediaan materi visual yang dapat diakses kapan saja oleh siswa. Misalnya, siswa dapat mempelajari anatomi tubuh manusia melalui aplikasi AR di rumah, kemudian mendiskusikan temuannya bersama guru di kelas. Hal ini selaras

dengan pendapat (Chen et al. 2025), yang menekankan bahwa integrasi AR dalam *blended Learning* mampu meningkatkan keterlibatan siswa, karena mereka dapat memanfaatkan perangkat mobile untuk menjelajahi materi kapan pun dibutuhkan. Dengan demikian, pembelajaran tidak lagi terbatas pada ruang kelas, melainkan menjadi pengalaman yang berkelanjutan.

Selain itu, AR juga mendukung fleksibilitas dalam pembelajaran hybrid, terutama ketika siswa mengikuti pembelajaran jarak jauh. AR mobile memungkinkan siswa mengakses simulasi interaktif di luar sekolah, tanpa kehilangan pengalaman kontekstual yang biasanya hanya diperoleh di laboratorium atau ruang praktik. Chen, Liu, Cheng, dan Huang (2017) menegaskan bahwa AR dalam pembelajaran daring membantu mengatasi keterbatasan media konvensional dengan menyediakan pengalaman belajar yang lebih imersif dan interaktif, sehingga sangat bermanfaat untuk mendukung model hybrid *Learning* yang semakin populer pasca-pandemi (Chen et al. 2017).

Dari perspektif pedagogis, penggunaan AR dalam *blended Learning* juga meningkatkan kolaborasi antar siswa. Konten AR dapat digunakan dalam aktivitas kelompok, baik secara sinkron saat tatap muka maupun secara asinkron melalui platform *Learning Management System* (LMS). Seperti dijelaskan oleh (Bower et al. 2014), salah satu keunggulan utama AR adalah kemampuannya menghadirkan pengalaman belajar kolaboratif yang lebih dinamis, di mana siswa dapat saling berbagi interpretasi, berdiskusi, dan memecahkan masalah bersama melalui objek digital yang sama.

Lebih jauh, AR dalam *blended Learning* berperan penting dalam personalisasi pembelajaran. Guru dapat menyesuaikan konten AR dengan kebutuhan siswa, misalnya menyediakan simulasi tambahan bagi siswa yang mengalami kesulitan memahami materi abstrak, atau memberikan tantangan berbasis AR bagi siswa yang lebih cepat memahami. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efektivitas pembelajaran, tetapi juga membantu memenuhi gaya belajar yang berbeda. Menurut (Chen

et al. 2025), desain pembelajaran berbasis AR yang fleksibel memberikan dukungan teoretis untuk implementasi pendidikan personalisasi, memungkinkan penyesuaian konten dan metode pembelajaran sesuai dengan kebutuhan individu siswa.

Secara keseluruhan, integrasi AR dalam model *blended/hybrid Learning* tidak hanya memperkaya materi pembelajaran, tetapi juga memperluas ruang lingkup interaksi siswa dengan konten, guru, dan sesama siswa. Dengan menghadirkan pengalaman belajar yang fleksibel, interaktif, dan kontekstual, AR menjadikan *blended Learning* lebih efektif, imersif, dan sesuai dengan kebutuhan pendidikan abad ke-21.

4. Penjelasan langkah-langkah implementasi dan integrasi AR ke kurikulum

Implementasi AR dalam kurikulum pendidikan memerlukan pendekatan sistematis yang melibatkan beberapa tahapan penting. Menurut penelitian oleh (Rachim, Salim, and Qomario 2024), langkah pertama adalah perencanaan kurikulum yang mencakup identifikasi kompetensi dasar yang dapat diperkuat dengan teknologi AR. Hal ini memastikan bahwa penggunaan AR selaras dengan tujuan pembelajaran yang telah ditetapkan.

Tahap kedua adalah pengembangan materi ajar berbasis AR, yang melibatkan pembuatan konten interaktif yang sesuai dengan karakteristik siswa dan materi pelajaran. Dalam konteks ini, penggunaan model pengembangan seperti model 4D (Define, Design, Develop) yang dimodifikasi dapat diterapkan untuk menghasilkan media pembelajaran yang efektif dan menarik. Sebagai contoh, penelitian oleh (Mukti 2019) menunjukkan bahwa penerapan model 4D dalam pengembangan media AR di MI Wahid Hasyim menghasilkan media yang layak digunakan dalam pembelajaran.

Selanjutnya, pelatihan bagi pendidik menjadi krusial untuk memastikan bahwa guru memiliki kompetensi dalam mengoperasikan dan memanfaatkan teknologi AR dalam proses pembelajaran. Penelitian oleh (Rachim et al. 2024) menekankan

pentingnya dukungan institusi terhadap guru dalam meningkatkan pengetahuan mereka tentang AR, serta kesiapsiagaan teknologi itu sendiri.

Tahap berikutnya adalah penerapan AR dalam pembelajaran, di mana teknologi ini digunakan untuk memperkaya pengalaman belajar siswa melalui simulasi, visualisasi, dan interaksi langsung dengan objek pembelajaran. Sebagai contoh, penelitian oleh (Juwita, Saputri, and Kusmawati 2021) menunjukkan bahwa penggunaan AR dalam pembelajaran sains dapat meningkatkan hasil belajar peserta didik.

Terakhir, evaluasi dan umpan balik diperlukan untuk menilai efektivitas penggunaan AR dalam mencapai tujuan pembelajaran. Evaluasi ini mencakup aspek teknis, pedagogis, dan dampaknya terhadap motivasi serta pemahaman siswa. Penelitian oleh (Rachim et al. 2024) juga menyoroti pentingnya evaluasi berkelanjutan untuk memperbaiki dan menyesuaikan penggunaan AR dalam pembelajaran.

Dengan mengikuti langkah-langkah tersebut, integrasi AR ke dalam kurikulum pendidikan dapat dilakukan secara efektif, sehingga meningkatkan kualitas pembelajaran dan mempersiapkan siswa untuk menghadapi tantangan di era digital.

E. Studi Kasus Sukses Penggunaan AR di Pendidikan

Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan *Augmented Reality* (AR) dalam pendidikan telah menunjukkan dampak positif yang signifikan terhadap kualitas pembelajaran. Teknologi ini tidak hanya menghadirkan pengalaman belajar yang lebih menarik dan interaktif, tetapi juga mampu meningkatkan motivasi serta keterlibatan siswa dalam memahami konsep-konsep yang kompleks. Studi kasus tentang implementasi AR di berbagai institusi pendidikan memberikan gambaran nyata mengenai efektivitas media pembelajaran berbasis teknologi ini.

Penerapan AR dalam kelas, laboratorium virtual, serta program pembelajaran berbasis proyek menunjukkan bahwa siswa dapat belajar dengan cara yang lebih kontekstual dan praktis. Dengan

visualisasi objek 3D, simulasi interaktif, serta integrasi dengan materi kurikulum, AR memungkinkan guru menghadirkan pengalaman belajar yang mendekati situasi nyata, sehingga pemahaman konsep menjadi lebih mendalam.

Selain meningkatkan kualitas pembelajaran, studi kasus juga menyoroti pentingnya strategi implementasi yang tepat, termasuk pelatihan guru, kesiapan infrastruktur, serta pemilihan konten yang relevan. Analisis kasus-kasus sukses ini menjadi acuan penting bagi sekolah dan pendidik yang ingin mengintegrasikan AR secara efektif ke dalam proses belajar mengajar, sekaligus memberikan bukti empiris mengenai manfaat teknologi ini dalam pendidikan modern.

1. Contoh sekolah atau program yang sukses mengimplementasikan AR.

a. SD Anugrah Plus Pekanbaru – Pembelajaran Bangun Ruang dengan AR

Di SD Anugrah Plus Pekanbaru, teknologi *Augmented Reality* (AR) telah diintegrasikan dalam pembelajaran matematika, khususnya materi bangun ruang. Melalui aplikasi berbasis *Android* yang dikembangkan menggunakan Vuforia, siswa dapat memvisualisasikan objek bangun ruang dalam bentuk tiga dimensi, yang sebelumnya sulit dipahami secara abstrak. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa aplikasi ini sangat mudah digunakan oleh guru dan siswa, serta efektif dalam meningkatkan pemahaman siswa terhadap materi bangun ruang. Sebanyak 92% guru menilai aplikasi ini sangat baik dalam hal kemudahan penggunaan, dan 86% menyatakan bahwa aplikasi ini membantu dalam menjelaskan konsep bangun ruang secara real. Selain itu, 80% guru menilai aplikasi ini sangat menarik dan memiliki fitur yang lengkap.

b. SD Negeri 29 Idai, Kalimantan Barat – Literasi Digital melalui AR Cita-Cita

Di SD Negeri 29 Idai yang terletak di Desa Idai, Kecamatan Ketungau Hulu, Kabupaten Sintang, Kalimantan Barat, guru-guru telah mengimplementasikan *Augmented Reality* (AR)

Cita-Cita sebagai media pembelajaran untuk meningkatkan literasi digital siswa di pelosok negeri. Meskipun berada di daerah dengan keterbatasan infrastruktur, penggunaan AR Cita-Cita memungkinkan siswa untuk belajar dengan cara yang lebih interaktif dan menyenangkan, serta mengakses materi pembelajaran yang relevan dengan kebutuhan mereka. Hal ini menunjukkan bahwa AR dapat menjadi solusi efektif dalam meningkatkan kualitas pendidikan di daerah terpencil.

c. SMP Negeri 1 Kota Mojokerto – Pembelajaran TIK dengan AR

SMP Negeri 1 Kota Mojokerto telah mengembangkan dan menerapkan aplikasi *Augmented Reality* (AR) untuk mendukung pembelajaran Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK). Aplikasi ini dirancang dengan pendekatan rekayasa perangkat lunak melalui tahapan analisis, desain, implementasi, dan evaluasi. Hasil uji coba menunjukkan bahwa aplikasi AR ini efektif dalam membantu siswa memahami materi TIK secara lebih interaktif dan menarik, serta dapat mengatasi keterbatasan modul atau trainer yang mahal dan sulit diperoleh oleh sekolah.

d. Sekolah di Bali – Pembelajaran Sains dan Fisika dengan AR dan VR

Beberapa sekolah di Bali, seperti SMA Negeri 4 Denpasar, telah mengadopsi teknologi *Virtual Reality* (VR) dan *Augmented Reality* (AR) dalam pembelajaran sains dan fisika. Siswa menggunakan kacamata VR untuk melakukan simulasi eksperimen dan eksplorasi konsep-konsep ilmiah secara virtual. Penerapan teknologi ini tidak hanya meningkatkan pemahaman siswa terhadap materi pelajaran, tetapi juga menumbuhkan minat dan motivasi belajar mereka.

2. Analisis hasil peningkatan motivasi, pemahaman konsep, keterlibatan siswa.

Analisis hasil dari implementasi *Augmented Reality* (AR) di sekolah menunjukkan bahwa penggunaan teknologi ini memberikan dampak positif yang signifikan terhadap motivasi

belajar siswa. Menurut penelitian (Di Serio et al. 2013), siswa yang belajar menggunakan AR menunjukkan peningkatan motivasi belajar secara signifikan dibandingkan dengan metode konvensional. Interaktivitas yang ditawarkan AR seperti manipulasi objek 3D, animasi visual, dan elemen audio mendorong siswa untuk berpartisipasi aktif dalam kegiatan pembelajaran, sehingga mereka lebih termotivasi untuk mengeksplorasi materi secara mandiri.

Selain meningkatkan motivasi, AR juga terbukti memperdalam pemahaman konsep siswa. Misalnya, penggunaan AR untuk visualisasi perangkat keras komputer atau sistem sirkulasi darah dalam biologi memungkinkan siswa melihat proses yang biasanya abstrak menjadi lebih konkret dan mudah dipahami. Riset oleh (Radu 2014) menegaskan bahwa AR membantu siswa memahami topik-topik kompleks yang sulit dijelaskan melalui media konvensional, karena mereka dapat melihat representasi digital dari objek nyata dan berinteraksi langsung dengannya. Dengan demikian, konsep yang abstrak menjadi lebih nyata, dan siswa dapat membangun pemahaman konseptual yang lebih baik.

Selain motivasi dan pemahaman, keterlibatan siswa dalam proses belajar juga meningkat secara signifikan. Studi oleh (Ibáñez et al. 2014) menunjukkan bahwa siswa yang menggunakan AR dalam pembelajaran memperoleh skor tes yang lebih tinggi dibandingkan kelompok kontrol yang menggunakan metode tradisional. Hal ini menunjukkan bahwa pengalaman belajar yang lebih imersif, interaktif, dan kontekstual mampu meningkatkan fokus dan partisipasi siswa. AR mendorong pembelajaran aktif, di mana siswa tidak hanya menerima informasi secara pasif, tetapi juga berinteraksi dengan materi, menyelesaikan tugas berbasis objek virtual, dan melakukan refleksi terhadap hasil interaksi tersebut.

Dari sisi guru, penggunaan AR mempermudah penyampaian materi yang kompleks dan memungkinkan mereka untuk menyesuaikan metode pengajaran dengan kebutuhan dan karakteristik siswa. Media berbasis AR dapat digunakan sebagai

alat bantu visual, audio, dan interaktif yang membantu guru menjelaskan konsep yang sulit, mengurangi kebingungan siswa, dan meningkatkan efektivitas penyampaian materi. Penelitian (Nursdiansyah et al. 2024) menegaskan bahwa guru yang memanfaatkan AR melaporkan tingkat keterlibatan siswa yang lebih tinggi dan proses evaluasi yang lebih akurat karena siswa dapat menunjukkan pemahaman mereka melalui interaksi dengan objek virtual.

Secara keseluruhan, analisis hasil penerapan AR di pendidikan menunjukkan bahwa media ini mampu menciptakan pengalaman belajar yang lebih menarik, interaktif, dan efektif. Dampak positif terlihat pada peningkatan motivasi belajar, pemahaman konsep yang lebih mendalam, dan keterlibatan aktif siswa dalam proses pembelajaran. Keunggulan ini menjadikan AR sebagai alternatif media pembelajaran yang relevan dan strategis, terutama dalam konteks pendidikan modern yang menuntut pendekatan yang lebih inovatif, imersif, dan adaptif terhadap kebutuhan siswa.

3. Faktor keberhasilan dan pembelajaran yang dapat diadopsi oleh institusi lain.

Keberhasilan implementasi AR dalam pendidikan dipengaruhi oleh sejumlah faktor penting yang saling berkaitan. Pertama, kesiapan guru menjadi faktor utama. Guru yang memiliki keterampilan digital memadai dan memahami konsep AR mampu merancang pembelajaran yang interaktif, relevan, dan sesuai dengan tujuan kurikulum (Billinghurst and Duenser 2012). Pelatihan dan workshop khusus mengenai teknologi AR terbukti meningkatkan kemampuan guru dalam mengintegrasikan AR secara efektif ke dalam kelas.

Kedua, kualitas konten AR sangat menentukan efektivitas pembelajaran. Materi harus relevan dengan kurikulum, interaktif, dan mudah diakses oleh siswa. Konten yang dirancang dengan baik, misalnya visualisasi 3D perangkat keras komputer atau animasi proses ilmiah, dapat membantu siswa memahami konsep yang abstrak dan kompleks dengan lebih mudah (Di Serio et al. 2013).

Ketiga, infrastruktur teknologi yang memadai, termasuk perangkat AR, koneksi internet stabil, dan perangkat pendukung lain seperti tablet atau smartphone, menjadi faktor penentu. Sekolah yang mampu menyediakan sumber daya teknis ini memungkinkan siswa belajar secara lancar tanpa gangguan teknis yang mengurangi motivasi dan fokus belajar (Murtini et al. 2025).

Keempat, metode integrasi pembelajaran memainkan peran penting. Pendekatan yang sistematis, seperti model *Project-Based Learning*, *Interactive AR Learning*, atau *Blended AR Learning*, memfasilitasi proses pembelajaran yang lebih imersif dan kolaboratif. Model-model ini memungkinkan siswa untuk belajar melalui eksplorasi, praktik langsung, dan refleksi, yang dapat meningkatkan pemahaman dan keterampilan kritis.

Dari pengalaman sekolah dan program yang sukses, beberapa pembelajaran yang dapat diadopsi oleh institusi lain mencakup:

- a. Menyediakan pelatihan dan dukungan teknis bagi guru sebelum implementasi.
- b. Memilih konten AR yang relevan dan sesuai kurikulum.
- c. Mengimplementasikan AR secara bertahap, dimulai dari materi sederhana hingga materi kompleks.
- d. Menggabungkan AR dengan metode pembelajaran lain seperti diskusi, kuis interaktif, dan proyek kelompok.
- e. Melakukan evaluasi berkelanjutan terhadap efektivitas media AR dalam meningkatkan motivasi, keterlibatan, dan pemahaman siswa.

Dengan memperhatikan faktor-faktor ini, institusi pendidikan lain dapat mengadopsi praktik terbaik yang telah terbukti efektif, memaksimalkan manfaat AR, dan meminimalkan hambatan teknis atau pedagogis dalam implementasinya.

BAB

4

TEORI DAN LANDASAN PEMBELAJARAN



Bab ini menguraikan landasan teoritis yang mendukung penggunaan AR dalam pembelajaran. Pembahasan mencakup teori kognitif, konstruktivisme, dan teori beban kognitif sebagai dasar psikologis pembelajaran. Selain itu, dibahas prinsip-prinsip pedagogis seperti pembelajaran aktif, kontekstual, dan kolaboratif, serta integrasi AR ke dalam kurikulum. Bab ini juga menjelaskan kesesuaian teknologi AR dengan berbagai gaya belajar peserta didik untuk menciptakan pengalaman belajar yang lebih efektif dan bermakna.

A. Landasan psikologis (teori kognitif, *konstruktivisme*, teori beban kognitif)

Dalam pengembangan media pembelajaran, khususnya media pembelajaran berbasis *Augmented Reality* (AR), aspek teknologi tidak dapat dipisahkan dari aspek psikologis yang mendasari proses belajar peserta didik. Keberhasilan suatu media pembelajaran tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan teknologi yang digunakan, tetapi juga oleh kesesuaiannya dengan karakteristik, kebutuhan, dan cara kerja kognitif peserta didik. Oleh karena itu, pemahaman mengenai landasan psikologis menjadi salah satu faktor penting yang harus diperhatikan dalam merancang dan mengembangkan media pembelajaran berbasis AR. Landasan psikologis memberikan dasar ilmiah mengenai bagaimana peserta didik menerima, mengolah,

menyimpan, dan menggunakan informasi selama proses pembelajaran berlangsung.

Pada hakikatnya, belajar merupakan proses mental yang kompleks yang melibatkan berbagai aspek psikologis, seperti persepsi, perhatian, memori, motivasi, pemecahan masalah, serta pembentukan pengetahuan baru. Ketika peserta didik berinteraksi dengan media pembelajaran, mereka tidak hanya menerima informasi secara pasif, tetapi juga melakukan berbagai aktivitas kognitif untuk memahami dan menghubungkan informasi tersebut dengan pengetahuan yang telah dimiliki sebelumnya. Oleh karena itu, setiap media pembelajaran yang dikembangkan harus mampu mendukung proses kognitif tersebut agar pembelajaran dapat berlangsung secara efektif dan menghasilkan pemahaman yang bermakna.

Dalam konteks *Augmented Reality*, pentingnya landasan psikologis menjadi semakin nyata karena teknologi ini menghadirkan pengalaman belajar yang berbeda dibandingkan media pembelajaran konvensional. AR menggabungkan objek virtual, animasi, teks, audio, dan berbagai elemen digital lainnya ke dalam lingkungan nyata secara real-time. Integrasi antara dunia fisik dan dunia digital tersebut menciptakan pengalaman belajar yang kaya akan stimulus visual dan interaktif. Meskipun kondisi ini berpotensi meningkatkan daya tarik pembelajaran, penyajian informasi yang tidak dirancang dengan baik justru dapat menyebabkan kebingungan, distraksi, dan beban kognitif yang berlebihan bagi peserta didik. Oleh sebab itu, pengembangan media AR harus mempertimbangkan bagaimana informasi dipersepsikan dan diproses oleh otak manusia.

Landasan psikologis membantu menjawab berbagai pertanyaan penting dalam desain media pembelajaran AR. Misalnya, bagaimana cara menyajikan informasi visual agar mudah dipahami oleh peserta didik? Bagaimana mengatur jumlah informasi yang ditampilkan agar tidak melebihi kapasitas memori kerja? Bagaimana menciptakan interaksi yang mampu meningkatkan keterlibatan dan motivasi belajar? Bagaimana menghubungkan pengalaman virtual dengan pengalaman nyata agar pembelajaran menjadi lebih bermakna? Jawaban atas pertanyaan-pertanyaan tersebut dapat ditemukan

melalui berbagai teori psikologi belajar yang telah dikembangkan dan diuji dalam dunia pendidikan.

Salah satu teori yang memiliki relevansi tinggi dalam pengembangan media AR adalah Teori Beban Kognitif (*Cognitive Load Theory*). Teori ini menjelaskan bahwa kapasitas memori kerja manusia memiliki keterbatasan dalam memproses informasi baru. Apabila media pembelajaran menyajikan terlalu banyak informasi secara bersamaan, peserta didik dapat mengalami kelebihan beban kognitif yang berdampak pada menurunnya kemampuan memahami materi. Oleh karena itu, desain media AR harus memperhatikan prinsip-prinsip penyederhanaan informasi, pengorganisasian konten, dan penyajian elemen visual yang relevan agar proses belajar dapat berlangsung secara optimal.

Selain Teori Beban Kognitif, pendekatan Konstruktivisme juga menjadi landasan penting dalam pengembangan media pembelajaran berbasis AR. Teori konstruktivisme memandang bahwa pengetahuan tidak dapat ditransfer secara langsung dari guru kepada peserta didik, melainkan dibangun secara aktif melalui pengalaman dan interaksi dengan lingkungan. Teknologi AR sangat mendukung prinsip ini karena memungkinkan peserta didik melakukan eksplorasi, observasi, dan manipulasi terhadap objek virtual yang terintegrasi dengan lingkungan nyata. Melalui pengalaman tersebut, peserta didik dapat membangun pemahaman mereka sendiri berdasarkan proses penemuan dan interpretasi yang dilakukan secara aktif.

Selanjutnya, Teori Pembelajaran Kontekstual atau *Situated Learning* juga memberikan kontribusi penting dalam pengembangan media AR. Teori ini menekankan bahwa proses belajar akan menjadi lebih efektif apabila pengetahuan diperoleh dalam konteks yang mendekati situasi nyata. Salah satu keunggulan utama AR adalah kemampuannya menghadirkan objek dan informasi digital secara langsung pada lingkungan yang relevan dengan materi pembelajaran. Dengan demikian, peserta didik dapat memahami hubungan antara konsep teoritis dan penerapannya dalam kehidupan nyata. Pembelajaran yang bersifat kontekstual ini membantu meningkatkan

pemahaman konseptual, transfer pengetahuan, dan kemampuan pemecahan masalah.

Selain aspek kognitif, landasan psikologis juga mencakup aspek afektif yang berkaitan dengan motivasi, minat, dan keterlibatan peserta didik dalam pembelajaran. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penggunaan teknologi yang interaktif dan menarik dapat meningkatkan motivasi intrinsik peserta didik untuk belajar. Melalui visualisasi tiga dimensi, animasi interaktif, dan pengalaman belajar yang imersif, AR mampu menciptakan lingkungan belajar yang lebih menyenangkan dan menantang. Kondisi ini dapat mendorong peserta didik untuk lebih aktif berpartisipasi dalam pembelajaran, meningkatkan rasa ingin tahu, serta memperkuat keterikatan mereka terhadap materi yang dipelajari.

Dengan demikian, landasan psikologis memiliki peran yang sangat penting dalam memastikan bahwa pengembangan media pembelajaran berbasis *Augmented Reality* tidak hanya berfokus pada aspek teknologi, tetapi juga mempertimbangkan bagaimana manusia belajar secara efektif. Teori-teori psikologi belajar memberikan pedoman bagi perancang dan pengembang media dalam menentukan strategi penyajian informasi, bentuk interaksi, serta pengalaman belajar yang sesuai dengan karakteristik peserta didik. Melalui penerapan prinsip-prinsip psikologis yang tepat, media AR dapat dikembangkan menjadi sarana pembelajaran yang tidak hanya menarik secara visual, tetapi juga mampu meningkatkan pemahaman, motivasi, keterlibatan, dan hasil belajar peserta didik secara optimal.

Oleh karena itu, pemahaman terhadap berbagai teori psikologi belajar menjadi fondasi yang tidak dapat diabaikan dalam pengembangan media pembelajaran berbasis *Augmented Reality*. Teori-teori seperti Teori Beban Kognitif (*Cognitive Load Theory*), Konstruktivisme, dan Situated Learning akan menjadi kerangka konseptual yang membantu para pendidik, peneliti, dan pengembang media dalam merancang pengalaman belajar yang efektif, bermakna, dan sesuai dengan kebutuhan pembelajaran di era digital. Dengan berlandaskan pada prinsip-prinsip psikologis tersebut, pemanfaatan AR diharapkan mampu memberikan kontribusi nyata dalam

meningkatkan kualitas pendidikan dan menciptakan pengalaman belajar yang lebih inovatif serta berpusat pada peserta didik.

1. Teori Kognitif

Teori kognitif berfokus pada proses mental internal yang terjadi saat individu belajar. Teori ini memandang belajar sebagai aktivitas pemrosesan informasi yang aktif, di mana peserta didik menerima, mengolah, menyimpan, dan mengambil kembali informasi. Dalam konteks ini, *Augmented Reality* (AR) menawarkan potensi luar biasa sebagai jembatan antara dunia fisik dan representasi mental, secara langsung mendukung berbagai proses kognitif. Teknologi AR tidak hanya menyajikan informasi, tetapi juga mengubah cara informasi itu diproses, dipahami, dan digunakan untuk memecahkan masalah.

a. Pemrosesan Informasi dan Beban Kognitif

Salah satu keunggulan utama AR dalam perspektif kognitif adalah kemampuannya untuk mengurangi beban kognitif asing (*extraneous Cognitive load*), yaitu beban mental yang tidak perlu dan tidak berkontribusi pada proses belajar. Dalam media pembelajaran konvensional, peserta didik sering kali harus membagi perhatian mereka antara sumber informasi yang terpisah, misalnya antara buku teks dan objek nyata yang sedang dipelajari. Proses mental untuk mengintegrasikan dua sumber informasi yang terpisah ini dapat membebani memori kerja dan menghambat pemahaman.

AR mengatasi masalah ini dengan menerapkan prinsip kedekatan spasial dan temporal (*spatial and temporal contiguity*). Dengan AR, informasi digital seperti label, diagram, atau animasi 3D dapat ditampilkan secara langsung di atas objek nyata secara real-time. Peserta didik tidak perlu lagi mengalihkan pandangan dan mentalnya dari buku ke objek. Sebagaimana sebuah studi tentang penggunaan AR di laboratorium fisika menunjukkan, meskipun tidak selalu meningkatkan hasil tes pengetahuan konseptual, penggunaan AR secara signifikan dapat menurunkan beban kognitif asing

yang dilaporkan oleh mahasiswa (Thees et al. 2020). Dengan membebaskan sumber daya kognitif ini, peserta didik dapat lebih fokus pada pemrosesan informasi yang esensial dan membangun skema pengetahuan yang lebih mendalam.

b. Memori dan Pemahaman Konsep

AR memfasilitasi proses pengkodean informasi ke dalam memori jangka panjang melalui penyajian konten yang kaya, interaktif, dan multi-modal. Manusia cenderung lebih baik dalam mengingat informasi yang disajikan secara visual dan spasial dibandingkan teks semata. AR memungkinkan visualisasi konsep-konsep yang abstrak atau tidak terlihat seperti medan magnet, anatomi tubuh manusia, atau proses kimia menjadi model 3D yang konkret dan dapat dimanipulasi.

Interaksi langsung dengan objek virtual ini mendorong pembelajaran aktif (*active Learning*). Peserta didik dapat memutar, memperbesar, atau bahkan "membongkar" model virtual untuk memahami strukturnya dari berbagai sudut pandang. Pengalaman belajar yang kontekstual dan imersif ini menciptakan jejak memori yang lebih kuat. Sebuah studi tentang penggunaan AR pada pembelajaran IPA di tingkat sekolah dasar menemukan bahwa media AR efektif dalam membantu siswa memahami dan mengingat materi, terutama untuk konsep-konsep abstrak yang sulit diamati secara langsung (Guntur and Setyaningrum 2021). Dengan memberikan pengalaman yang nyata dan kontekstual, AR memungkinkan siswa memanipulasi objek virtual, sehingga memfasilitasi pemahaman yang lebih dalam.

c. Pemecahan Masalah (Problem Solving)

Pembelajaran tidak hanya tentang mengingat fakta, tetapi juga tentang menerapkan pengetahuan untuk memecahkan masalah. AR dapat menciptakan lingkungan belajar berbasis skenario atau simulasi yang aman, di mana peserta didik dapat berlatih dan mengasah keterampilan pemecahan masalah. Misalnya, mahasiswa kedokteran dapat berlatih prosedur medis

pada organ virtual, atau siswa teknik dapat belajar merakit mesin kompleks tanpa risiko merusak peralatan fisik.

Dalam lingkungan AR, peserta didik dapat bereksperimen, membuat hipotesis, dan melihat konsekuensi dari tindakan mereka secara langsung. Umpan balik instan ini sangat penting untuk proses belajar melalui coba-gagal (*trial and error*). Penelitian telah menunjukkan bahwa penggunaan modul pembelajaran berbasis AR memiliki pengaruh signifikan terhadap peningkatan keterampilan pemecahan masalah siswa (Athiyah et al. 2024). Dengan menyediakan lingkungan yang mendukung eksplorasi dan eksperimen, AR mendorong siswa untuk mengembangkan pemikiran kritis dan kemampuan untuk menerapkan pengetahuan teoretis ke dalam situasi praktis.

2. *Konstruktivisme*

Konstruktivisme adalah teori belajar yang memandang pengetahuan bukan sebagai sesuatu yang diterima secara pasif, melainkan sebagai hasil konstruksi aktif oleh individu melalui interaksi dengan lingkungannya. Dalam pandangan ini, peserta didik adalah pembangun makna (*meaning makers*), yang secara aktif menyusun pemahaman mereka berdasarkan pengalaman yang dialami. *Augmented Reality* (AR), dengan kemampuannya untuk memperkaya dunia nyata, menjadi platform yang sangat ideal untuk menerapkan prinsip-prinsip *konstruktivisme* dalam pembelajaran

a. Pembelajaran Aktif dan Konstruksi Pengetahuan

Berbeda dengan metode pembelajaran tradisional yang sering menempatkan siswa sebagai penerima informasi pasif, AR mendorong pembelajaran aktif (*active Learning*). Teknologi ini menuntut pengguna untuk bergerak, berinteraksi, dan bereksplorasi dalam lingkungan yang diperkaya secara digital. Sebagai contoh, saat mempelajari anatomi, siswa tidak hanya melihat gambar jantung di buku, tetapi dapat "memegang" model jantung 3D virtual, memutarinya, dan

bahkan melihat bagian dalamnya. Proses interaksi fisik dan kognitif inilah yang menjadi inti dari konstruksi pengetahuan.

Pengalaman langsung ini memungkinkan siswa untuk membangun pemahaman yang lebih otentik dan personal. Mereka tidak menghafal fakta, melainkan mengalaminya. Seperti yang dinyatakan dalam sebuah tinjauan sistematis, lingkungan belajar AR dapat menempatkan siswa dalam skenario otentik yang mendorong mereka untuk berpartisipasi aktif, sehingga mendukung proses konstruksi pengetahuan secara mandiri (Ibáñez and Delgado-Kloos 2018). Ketika siswa dapat memanipulasi variabel dan melihat akibatnya secara langsung, mereka sedang membangun model mental yang kuat dan tahan lama tentang konsep yang dipelajari.

b. Memfasilitasi Pembelajaran Berbasis Penemuan

Salah satu implementasi kuat dari *konstruktivisme* adalah pembelajaran berbasis penemuan (*discovery Learning*), di mana siswa didorong untuk menemukan prinsip-prinsip kunci secara mandiri melalui eksplorasi. AR adalah alat yang ampuh untuk memfasilitasi pendekatan ini. Sebuah aplikasi AR dapat dirancang bukan untuk memberikan jawaban, melainkan untuk menyajikan sebuah masalah atau fenomena. Misalnya, dalam pelajaran fisika, siswa dapat menggunakan AR untuk mengatur katrol virtual dan bereksperimen dengan berbagai konfigurasi untuk menemukan sendiri prinsip keuntungan mekanis.

Lingkungan AR menjadi semacam "laboratorium virtual" yang aman dan fleksibel. Siswa dapat melakukan percobaan yang mungkin terlalu berbahaya, mahal, atau tidak mungkin dilakukan di dunia nyata. Dengan menyediakan alat dan ruang untuk bereksperimen, AR memberdayakan siswa untuk bertanya, menguji hipotesis, dan menarik kesimpulan mereka sendiri. Penelitian menunjukkan bahwa keterlibatan melalui AR dapat meningkatkan pencapaian dan motivasi siswa, karena mereka mengambil peran aktif sebagai penemu, bukan sebagai konsumen informasi (Estapa and Nadolny 2015). Dengan cara ini, AR mengubah proses belajar menjadi sebuah petualangan

intelektual yang digerakkan oleh rasa ingin tahu siswa itu sendiri.

3. Teori Beban Kognitif

Teori Beban Kognitif (CLT) didasarkan pada asumsi bahwa kapasitas memori kerja manusia tempat kita memproses informasi secara sadar sangat terbatas. Teori ini menyatakan bahwa proses belajar akan menjadi tidak efektif jika total beban kognitif yang dipaksakan pada peserta didik melebihi kapasitas memori kerja mereka. Beban kognitif ini terbagi menjadi tiga jenis: beban intrinsik (kesulitan inheren dari materi), beban asing (extraneous load, yang disebabkan oleh cara penyajian informasi yang tidak efisien), dan beban relevan (germane load, sumber daya mental yang digunakan untuk pemahaman mendalam dan konstruksi skema). Dalam desain pembelajaran, tujuannya adalah untuk meminimalkan beban asing agar lebih banyak sumber daya kognitif dapat dialokasikan untuk beban relevan. Di sinilah *Augmented Reality* (AR) menawarkan solusi yang kuat.

a. Mengurangi Beban Kognitif Asing

Salah satu kontribusi terbesar AR dalam pembelajaran adalah kemampuannya untuk secara drastis mengurangi beban kognitif asing, terutama yang disebabkan oleh efek perhatian terpisah (split-attention effect). Efek ini terjadi ketika peserta didik harus membagi perhatian mereka antara beberapa sumber informasi yang saling terkait namun terpisah secara fisik, seperti membaca instruksi di manual sambil melihat mesin yang sedang dirakit. Proses bolak-balik untuk mengintegrasikan informasi ini secara mental sangat membebani memori kerja.

AR mengatasi masalah ini dengan menyatukan informasi digital langsung ke dalam konteks dunia nyata. Instruksi, panah penunjuk, atau animasi dapat ditampilkan persis di lokasi di mana tindakan diperlukan. Dengan demikian, tidak ada lagi pemisahan spasial antara instruksi dan objeknya. Sebuah studi tentang penggunaan AR untuk tugas perakitan mekanis menunjukkan bahwa dengan menyajikan informasi prosedural

secara kontekstual, AR secara signifikan mengurangi beban kognitif asing dan meningkatkan kinerja tugas dibandingkan dengan instruksi berbasis video tradisional (Nee et al. 2012). Dengan menghilangkan kebutuhan untuk integrasi mental, AR membebaskan kapasitas kognitif siswa untuk fokus pada apa yang harus dipelajari, bukan bagaimana cara menafsirkan instruksi.

b. Menstrukturkan Informasi dan Mempermudah Konsep Kompleks

Selain mengurangi beban asing, AR juga sangat efektif dalam mengelola beban intrinsik beban yang berasal dari kompleksitas materi itu sendiri. Banyak konsep dalam sains, teknologi, teknik, dan matematika (STEM) bersifat abstrak, tidak terlihat, atau melibatkan interaksi spasial yang rumit (misalnya, struktur molekul, sirkuit listrik, atau anatomi internal). AR dapat membuat konsep-konsep ini menjadi nyata, terlihat, dan interaktif.

Dengan memvisualisasikan yang tak terlihat, AR membantu memecah informasi kompleks menjadi bagian-bagian yang lebih mudah dicerna. Peserta didik dapat mengamati fenomena dari berbagai sudut, memanipulasi model 3D, dan melihat hubungan sebab-akibat secara langsung. Metode penyajian ini membantu menstrukturkan informasi dengan cara yang selaras dengan cara kerja kognisi manusia. Penelitian dalam bidang pendidikan keperawatan, misalnya, menemukan bahwa penggunaan AR untuk mempelajari teknik steril secara signifikan lebih efektif dalam mengurangi beban kognitif dan meningkatkan kinerja dibandingkan metode demonstrasi standar, karena AR menyajikan informasi langkah-demi-langkah secara terintegrasi dan kontekstual (Chen et al. 2017). Dengan menyederhanakan representasi konsep yang kompleks, AR memungkinkan siswa membangun skema mental yang akurat dan kuat, yang merupakan inti dari pembelajaran yang bermakna.

B. Landasan pedagogis (prinsip pembelajaran aktif, kontekstual, kolaboratif)

Jika landasan psikologis berfokus pada cara kerja internal pikiran peserta didik, maka landasan pedagogis berfokus pada seni, ilmu, dan strategi dalam merancang dan memfasilitasi proses pembelajaran itu sendiri. Kehadiran teknologi canggih seperti *Augmented Reality* (AR) tidak secara otomatis menjamin terjadinya pembelajaran yang efektif. Tanpa didasari oleh prinsip-prinsip pedagogis yang kuat, media AR berisiko menjadi sekadar alat peraga yang mengesankan secara visual namun kosong dari tujuan instruksional yang jelas. Oleh karena itu, landasan pedagogis berfungsi sebagai kompas yang mengarahkan pemanfaatan teknologi untuk mencapai hasil belajar yang bermakna.

Pentingnya pedagogi terletak pada perannya dalam memberikan kerangka kerja yang terstruktur untuk keseluruhan proses belajar-mengajar. Prinsip pedagogis membantu para pendidik dan perancang media dalam menjawab pertanyaan-pertanyaan fundamental, seperti: "Apa tujuan pembelajaran yang ingin dicapai?", "Bagaimana peran guru dan siswa dalam aktivitas ini?", "Strategi apa yang paling efektif untuk menyajikan materi ini?", dan "Bagaimana cara mengukur pemahaman siswa?". Dengan kata lain, pedagogi memastikan bahwa implementasi AR dalam pendidikan bersifat terarah, bertujuan, dan berpusat pada siswa (*purposeful, goal-oriented, and learner-centered*), mengubah siswa dari konsumen pasif teknologi menjadi partisipan aktif dalam konstruksi pengetahuan mereka.

Sub-bab ini akan membahas berbagai pendekatan dan model pedagogis yang sangat relevan dan dapat diperkuat melalui penggunaan media pembelajaran AR. Pembahasan akan mencakup bagaimana AR dapat menjadi alat yang ampuh untuk mengimplementasikan strategi seperti pembelajaran kontekstual (*situated Learning*), pembelajaran berbasis kolaboratif (*colaborative Learning*), dan pembelajaran aktif (*active Learning*). Dengan memahami landasan ini, kita dapat merancang pengalaman belajar AR yang tidak hanya inovatif, tetapi juga solid secara pedagogis dan terbukti efektif dalam meningkatkan kompetensi peserta didik.

1. Pembelajaran Aktif

Pembelajaran aktif adalah sebuah pendekatan pedagogis yang menekankan peran sentral siswa dalam proses belajar. Berbeda dengan pembelajaran pasif di mana siswa hanya menerima informasi dari guru, pembelajaran aktif melibatkan siswa secara langsung dalam berbagai aktivitas yang memaksa mereka untuk berpikir, berdiskusi, menyelidiki, dan mencipta. *Augmented Reality* (AR) secara inheren merupakan teknologi yang mendukung pembelajaran aktif, karena ia mengubah pengguna dari sekadar penonton menjadi partisipan yang terlibat langsung dengan materi pembelajaran

a. Mendorong Keterlibatan Melalui Interaktivitas

Inti dari kemampuan AR untuk mendorong pembelajaran aktif terletak pada interaktivitasnya. Media AR bukanlah konten statis; ia merespons kehadiran, gerakan, dan input dari pengguna. Siswa tidak hanya melihat model 3D dari sistem tata surya, mereka dapat berjalan mengelilingi planet-planet, memperbesar cincin Saturnus, atau memutar animasi rotasi Bumi dengan tangan mereka. Keterlibatan fisik ini secara langsung memicu keterlibatan kognitif. Siswa didorong untuk bertanya, "Apa yang terjadi jika saya melihat ini dari sisi lain?" atau "Bagaimana bagian ini terhubung dengan bagian itu?".

Interaksi langsung ini memecah penghalang antara konsep teoretis dan pemahaman konkret. Sebuah tinjauan meta-analisis tentang penggunaan AR dalam pendidikan menyimpulkan bahwa salah satu manfaat utama AR adalah kemampuannya untuk menyediakan interaksi yang lebih kaya dengan konten pembelajaran, yang pada gilirannya dapat meningkatkan motivasi dan keterlibatan siswa (Radu 2014). Ketika siswa dapat memanipulasi objek belajar secara langsung, mereka membangun hubungan yang lebih personal dan mendalam dengan materi tersebut, mengubah proses belajar menjadi sebuah eksplorasi aktif.

b. Simulasi dan Eksperimen Virtual yang Kontekstual

AR membuka pintu bagi simulasi dan eksperimen virtual yang dapat dilakukan di mana saja, terutama di dalam konteks lingkungan belajar yang nyata. Pendekatan ini memungkinkan siswa untuk "belajar sambil melakukan" (*Learning by doing*) dalam skenario yang terkontrol dan aman. Misalnya, dalam pelajaran biologi, siswa dapat melakukan simulasi pembedahan katak virtual di atas meja laboratorium mereka tanpa membahayakan hewan hidup. Dalam pelajaran kimia, mereka bisa mencampurkan "bahan kimia" virtual untuk melihat reaksi yang terjadi tanpa risiko ledakan atau paparan zat berbahaya.

Eksperimen virtual berbasis AR ini memungkinkan siswa untuk menguji hipotesis, melakukan kesalahan, dan belajar dari konsekuensinya secara instan. Mereka dapat mengulang percobaan berkali-kali dan memanipulasi variabel yang mungkin tidak dapat diubah di laboratorium fisik. Penelitian telah menunjukkan bahwa simulasi berbasis AR dapat secara efektif meningkatkan pemahaman konseptual dan keterampilan praktis siswa, karena memungkinkan mereka untuk memvisualisasikan dan berinteraksi dengan fenomena yang sulit diamati (Cai, Wang, and Chiang 2014). Dengan menyediakan "laboratorium di dalam saku" ini, AR memberdayakan setiap siswa untuk menjadi seorang ilmuwan yang aktif, bereksperimen, dan menemukan pengetahuan secara mandiri.

2. Pembelajaran Kontekstual

Pembelajaran Kontekstual adalah pendekatan pedagogis yang didasarkan pada premis bahwa pembelajaran terjadi secara optimal ketika siswa dapat memproses informasi baru dalam konteks yang relevan dengan pengalaman dan dunia nyata mereka. Pendekatan ini berupaya menjembatani kesenjangan antara pengetahuan teoretis yang diajarkan di sekolah dengan penerapannya dalam situasi kehidupan nyata. *Augmented Reality* (AR), dengan kemampuannya untuk menempatkan lapisan digital di atas dunia

fisik, merupakan teknologi yang secara fundamental dirancang untuk menciptakan pengalaman belajar yang kaya akan konteks.

a. Menghubungkan Materi Abstrak dengan Situasi Nyata

Salah satu tantangan terbesar dalam pendidikan adalah membuat konsep-konsep abstrak menjadi relevan dan dapat dipahami oleh siswa. AR unggul dalam mengatasi tantangan ini dengan "mengeluarkan" materi pelajaran dari buku teks dan meletakkannya langsung di lingkungan siswa. Sebagai contoh, saat mempelajari arsitektur candi Borobudur, siswa tidak hanya melihat gambar, tetapi dapat menampilkan model 3D candi tersebut di atas meja mereka. Mereka dapat berjalan mengitarinya, melihat detail stupa, dan memahami strukturnya dalam skala yang dapat dikelola.

Dengan cara ini, AR secara visual dan spasial menghubungkan konsep abstrak dengan referensi dunia nyata yang konkret. Pengalaman ini membuat materi menjadi lebih personal dan mudah diingat. AR memungkinkan siswa untuk melihat, berinteraksi, dan memahami hubungan antara teori dan aplikasi praktisnya di lingkungan yang mereka kenal. Sebagaimana para ahli nyatakan, teknologi mobile seperti AR memiliki potensi besar untuk mendukung pembelajaran kontekstual dengan menyediakan informasi digital yang relevan dengan lokasi fisik pengguna (Wu et al. 2013). Hal ini mengubah lingkungan sekitar siswa menjadi sebuah kanvas pembelajaran yang interaktif.

b. Pembelajaran Berbasis Lokasi (*Situated Learning*)

Pembelajaran Kontekstual sering kali diwujudkan dalam bentuk pembelajaran berbasis lokasi (*situated Learning*), di mana proses belajar terjadi langsung di lokasi atau lingkungan di mana pengetahuan tersebut akan digunakan. AR adalah katalisator yang kuat untuk model pembelajaran ini. Bayangkan sebuah kunjungan lapangan ke cagar alam; dengan AR, siswa dapat mengarahkan ponsel mereka ke sebuah pohon dan langsung melihat informasi tentang spesiesnya, usianya, atau

perannya dalam ekosistem. Kunjungan ke situs bersejarah menjadi lebih hidup ketika AR dapat menampilkan rekonstruksi bangunan kuno di atas reruntuhan yang ada.

AR mengubah dunia menjadi ruang kelas tanpa dinding. Proses belajar tidak lagi terbatas pada jam pelajaran, melainkan dapat terjadi secara otentik di mana saja. Penelitian tentang penggunaan AR dalam tur kampus, misalnya, menunjukkan bahwa sistem AR dapat memberikan informasi kontekstual yang relevan dengan lokasi pengguna, memperkaya pengalaman belajar di lingkungan nyata (Wichert 2002). Dengan menanamkan pembelajaran dalam konteks dunia nyata, AR tidak hanya meningkatkan keterlibatan tetapi juga memfasilitasi transfer pengetahuan kemampuan siswa untuk menerapkan apa yang telah mereka pelajari ke dalam situasi baru karena mereka belajar dalam konteks yang sama dengan di mana pengetahuan itu akan diterapkan.

3. Pembelajaran Kolaboratif

Pembelajaran kolaboratif adalah pendekatan pedagogis di mana siswa bekerja bersama dalam kelompok kecil untuk memaksimalkan proses belajar mereka dan rekan-rekannya. Fokusnya adalah pada interaksi, diskusi, dan pencapaian tujuan bersama, yang menumbuhkan keterampilan komunikasi dan kerja sama tim. Meskipun sering dianggap sebagai pengalaman individual, *Augmented Reality* (AR) memiliki potensi unik untuk menciptakan ruang belajar bersama yang interaktif, di mana siswa dapat berkolaborasi dengan cara yang tidak mungkin dilakukan dengan media lain.

a. Menciptakan Ruang Interaksi Virtual Bersama

Salah satu fitur paling kuat dari AR untuk kolaborasi adalah kemampuannya menciptakan ruang virtual bersama (*shared virtual space*) yang ditumpangkan di atas dunia nyata. Dengan aplikasi AR multi-pengguna, beberapa siswa dapat melihat dan berinteraksi dengan objek virtual yang sama secara serentak dari perspektif mereka masing-masing. Bayangkan sekelompok

mahasiswa kedokteran yang berkumpul di sekitar meja dan melihat model 3D jantung virtual yang sama. Satu mahasiswa dapat menunjuk arteri koroner, sementara yang lain "mengiris" jantung tersebut untuk menunjukkan biliknya, dan semua anggota kelompok dapat melihat tindakan ini secara real-time.

Ruang bersama ini menjadi titik fokus untuk diskusi dan pemecahan masalah kolektif. Objek virtual berfungsi sebagai artefak bersama yang dapat dimanipulasi dan dianalisis oleh seluruh kelompok. Hal ini mengatasi tantangan dalam tugas kelompok konvensional di mana sering kali sulit bagi semua anggota untuk melihat atau berinteraksi dengan objek studi secara bersamaan. Sebagaimana dijelaskan oleh pelopor dalam bidang ini, AR kolaboratif memungkinkan pengguna untuk berinteraksi dengan mulus baik dengan dunia nyata maupun dengan informasi virtual bersama, menciptakan antarmuka tatap muka yang alami (Billinghurst and Kato 2003). Dengan demikian, teknologi tidak menjadi penghalang, melainkan menjadi medium yang menyatukan interaksi kelompok.

b. Mendorong Komunikasi dan Saling Ketergantungan

AR dapat dirancang secara strategis untuk mendorong komunikasi yang esensial dan saling ketergantungan positif (positive interdependence) di antara anggota kelompok. Misalnya, dalam sebuah skenario pembelajaran berbasis permainan AR, setiap siswa mungkin diberikan peran yang berbeda atau potongan informasi yang unik yang hanya dapat dilihat melalui perangkat mereka. Untuk memecahkan teka-teki atau menyelesaikan misi, mereka harus berkomunikasi, berbagi informasi, dan mengoordinasikan tindakan mereka. Satu siswa mungkin berperan sebagai "navigator" yang melihat peta virtual, sementara yang lain adalah "teknisi" yang melihat diagram sirkuit virtual pada perangkat yang sama.

Struktur tugas asimetris semacam ini memastikan bahwa tidak ada satu siswa pun yang dapat menyelesaikan tugas sendirian, sehingga kolaborasi menjadi sebuah keharusan, bukan pilihan. Penelitian tentang pengembangan sistem

pembelajaran kolaboratif berbasis AR menunjukkan bahwa lingkungan semacam ini dapat meningkatkan interaksi siswa dan mendorong mereka untuk membangun pengetahuan bersama melalui negosiasi dan penjelasan (Chiang, Yang, and Hwang 2014). Dengan memfasilitasi tugas-tugas yang memerlukan kontribusi dari setiap anggota, AR membantu siswa mengembangkan keterampilan sosial dan komunikasi yang krusial, sambil secara bersamaan memperdalam pemahaman mereka tentang materi pelajaran.

C. Integrasi AR dalam kurikulum

Kehadiran teknologi secanggih *Augmented Reality* (AR) di dalam kelas membawa potensi besar, namun potensi tersebut hanya dapat terealisasi secara maksimal apabila tidak diperlakukan sebagai alat tambahan (*add-on*) yang terpisah, melainkan diintegrasikan secara sistematis ke dalam kurikulum. Integrasi kurikulum adalah proses merancang dan menenun pengalaman belajar berbasis AR secara sengaja ke dalam alur, tujuan, dan asesmen pembelajaran yang sudah ada. Tanpa integrasi yang terencana, penggunaan AR berisiko menjadi aktivitas sporadis yang hanya menyentuh permukaan dan gagal memberikan dampak jangka panjang terhadap pencapaian siswa.

Pentingnya integrasi ini terletak pada upaya untuk memastikan bahwa setiap penggunaan AR memiliki tujuan pedagogis yang jelas dan terukur. Ketika AR diintegrasikan ke dalam kurikulum, ia berhenti menjadi sekadar demonstrasi teknologi yang memukau dan berubah menjadi instrumen yang dirancang khusus untuk membantu siswa menguasai kompetensi atau standar pembelajaran tertentu. Proses ini memaksa para pendidik dan perancang kurikulum untuk berpikir kritis: "Tujuan pembelajaran mana yang paling bisa dicapai dengan bantuan AR?" atau "Bagaimana aktivitas AR ini dapat dinilai untuk menunjukkan pemahaman siswa?".

Oleh karena itu, sub-bab ini akan membahas strategi dan model untuk mengintegrasikan AR secara efektif ke dalam kurikulum yang ada. Pembahasan akan mencakup cara memetakan teknologi AR ke tujuan pembelajaran, merancang Rencana Pelaksanaan Pembelajaran

(RPP) yang diperkaya AR, serta mengembangkan metode asesmen yang dapat menangkap hasil belajar dari pengalaman interaktif ini. Tujuannya adalah untuk membekali para pendidik dengan kerangka kerja praktis agar AR dapat dimanfaatkan secara strategis untuk memperdalam pemahaman, meningkatkan keterlibatan, dan pada akhirnya membantu setiap siswa mencapai tujuan pembelajaran yang telah ditetapkan.

1. Langkah-langkah Integrasi

Integrasi *Augmented Reality* (AR) ke dalam kurikulum bukanlah proses yang terjadi secara kebetulan, melainkan hasil dari perencanaan yang cermat dan disengaja. Untuk memastikan AR berfungsi sebagai alat pedagogis yang efektif, pendidik perlu mengikuti serangkaian langkah strategis yang dimulai dari perencanaan, pemilihan topik yang tepat, hingga perancangan aktivitas yang bermakna. Proses ini memastikan bahwa teknologi digunakan untuk melayani tujuan pembelajaran, bukan sebaliknya.

a. Perencanaan Materi dan Penentuan Tujuan

Langkah pertama dan paling fundamental adalah memulai dari kurikulum yang ada, bukan dari teknologinya. Pendidik harus mengidentifikasi terlebih dahulu tujuan pembelajaran atau kompetensi dasar yang ingin dicapai. Setelah tujuan jelas, langkah berikutnya adalah memikirkan bagaimana dan pada tingkat apa AR dapat membantu mencapai tujuan tersebut. Salah satu kerangka kerja yang populer untuk memandu proses ini adalah model SAMR (*Substitution, Augmentation, Modification, Redefinition*) oleh Dr. Ruben Puentedura.

- 1) *Substitution* (Substitusi) AR digunakan sebagai pengganti langsung dari alat yang sudah ada tanpa perubahan fungsional. Contoh: Menggunakan AR untuk menampilkan model 3D statis dari sebuah molekul, menggantikan gambar di buku teks.
- 2) *Augmentation* (Augmentasi) AR bertindak sebagai pengganti langsung tetapi dengan beberapa perbaikan

fungsional. Contoh: Model 3D molekul tersebut dapat diputar dan dianimasikan.

- 3) *Modification* (Modifikasi) AR memungkinkan desain ulang tugas yang signifikan. Contoh: Siswa menggunakan AR untuk menyusun molekul virtual yang berbeda dan menguji stabilitasnya.
- 4) *Redefinition* (Redefinisi) AR memungkinkan penciptaan tugas-tugas baru yang sebelumnya tidak terbayangkan. Contoh: Siswa berkolaborasi dalam ruang AR bersama untuk membangun dan memecahkan teka-teki protein kompleks.

Dengan menggunakan model seperti SAMR, pendidik dapat merencanakan integrasi AR secara bertahap dan lebih terarah, memastikan tingkat adopsi teknologi sesuai dengan tujuan pedagogis yang diinginkan (Cáceres-Nakiche et al. 2024).

b. Pemilihan Topik yang Relevan

Tidak semua topik dalam kurikulum akan mendapatkan manfaat yang sama dari integrasi AR. Efektivitas tertinggi dicapai ketika AR diterapkan pada materi yang memiliki karakteristik tertentu. Pendidik harus cermat dalam memilih topik di mana AR dapat memberikan nilai tambah yang signifikan. Kriteria topik yang ideal untuk AR meliputi:

- 1) Konsep yang Abstrak dan Tidak Terlihat: Materi yang sulit dibayangkan seperti medan magnet, aliran listrik, struktur atom, atau proses biologis seluler.
- 2) Membutuhkan Pemahaman Spasial 3D: Topik seperti geometri, arsitektur, anatomi tubuh manusia, atau rekayasa mekanik di mana pemahaman hubungan antar bagian dalam tiga dimensi sangat krusial.
- 3) Berbahaya, Mahal, atau Tidak Mungkin Dilakukan: Eksperimen atau simulasi yang terlalu berisiko (reaksi kimia berbahaya), terlalu mahal (mengoperasikan mesin industri), atau tidak mungkin dilakukan di kelas (mengamati letusan gunung berapi).
- 4) Membutuhkan Kontekstualisasi Dunia Nyata: Seperti yang dibahas sebelumnya, topik yang pembelajarannya diperkuat

dengan menempatkannya di lingkungan nyata (misalnya, identifikasi spesies tanaman di taman sekolah).

Sebuah tinjauan sistematis terhadap berbagai pengalaman belajar AR menemukan bahwa AR paling sering dan efektif digunakan dalam bidang sains, teknologi, dan teknik, di mana visualisasi objek 3D dan proses kompleks sangat penting (Cáceres-Nakiche et al. 2024).

c. Desain Aktivitas Pembelajaran Berbasis AR

Setelah topik dipilih, langkah terakhir adalah merancang aktivitas pembelajaran yang konkret. Desain yang baik tidak hanya berfokus pada interaksi dengan teknologi, tetapi juga pada keseluruhan pengalaman belajar siswa. Beberapa elemen kunci dalam desain aktivitas AR yang efektif meliputi:

- 1) Struktur Tiga Bagian yaitu rancang aktivitas yang memiliki bagian sebelum (pengantar dan aktivasi pengetahuan awal), selama (eksplorasi AR), dan sesudah (diskusi, refleksi, atau asesmen) untuk memastikan pembelajaran yang mendalam.
- 2) Instruksi yang jelas yaitu sediakan panduan atau lembar kerja yang jelas agar siswa tahu apa yang harus mereka lakukan dan amati selama menggunakan AR. Ini mencegah siswa hanya "bermain" tanpa arah.
- 3) Fokus pada Tugas, Bukan Teknologi Aktivitas harus mendorong pemikiran tingkat tinggi seperti analisis, pemecahan masalah, atau kreasi. Misalnya, daripada hanya meminta siswa "melihat" jantung, berikan tugas seperti "identifikasi bagian mana dari jantung ini yang mengalami kerusakan berdasarkan simulasi detak yang tidak normal".
- 4) Mendorong Kolaborasi yaitu jika memungkinkan, rancang tugas yang mendorong siswa untuk bekerja dalam kelompok, berdiskusi, dan berbagi temuan mereka saat berinteraksi dengan pengalaman AR.

Desain aktivitas yang cermat adalah kunci untuk mengubah pengalaman AR dari sekadar hal baru yang menarik menjadi alat pembelajaran yang kuat dan transformatif.

2. Evaluasi dan Penyesuaian

Integrasi teknologi ke dalam kurikulum bukanlah proses yang statis dan berakhir pada tahap implementasi. Sebaliknya, ia adalah sebuah siklus dinamis yang berkelanjutan yang menuntut adanya evaluasi, refleksi, dan penyesuaian. Setelah aktivitas pembelajaran berbasis *Augmented Reality* (AR) dilaksanakan, langkah krusial berikutnya adalah menilai efektivitasnya secara kritis. Proses evaluasi ini memberikan data dan wawasan yang sangat berharga untuk menyempurnakan strategi pengajaran dan bahkan menyesuaikan kurikulum secara lebih luas, memastikan bahwa inovasi yang dilakukan benar-benar memberikan dampak positif yang berkelanjutan.

a. Penilaian Efektivitas Penggunaan AR

Evaluasi efektivitas AR harus melampaui sekadar mengukur tingkat kesenangan atau keterlibatan siswa. Penilaian yang komprehensif harus berfokus pada sejauh mana penggunaan AR membantu mencapai tujuan pembelajaran yang telah ditetapkan di awal. Untuk mendapatkan gambaran yang utuh, pendidik dapat menggunakan pendekatan multi-metode:

- 1) Penilaian Kognitif menggunakan instrumen seperti tes pre-post untuk mengukur peningkatan pengetahuan, atau memberikan tugas pemecahan masalah yang kompleks untuk menilai pemahaman konseptual dan keterampilan berpikir tingkat tinggi.
- 2) Observasi dan Penilaian Kualitatif mengamati secara langsung bagaimana siswa berinteraksi dengan AR dan satu sama lain. Apakah mereka berkolaborasi secara efektif? Apakah mereka mengajukan pertanyaan yang mendalam? Wawancara singkat atau diskusi kelompok terfokus setelah sesi dapat memberikan wawasan mendalam tentang pengalaman belajar mereka.
- 3) Analisis Usabilitas menilai kemudahan penggunaan aplikasi AR itu sendiri. Teknologi yang sulit atau membingungkan dapat menciptakan beban kognitif asing yang justru menghambat pembelajaran. Kuesioner sederhana seperti

System Usability Scale (SUS) dapat digunakan untuk tujuan ini.

Penelitian yang menganalisis berbagai studi tentang AR dalam pendidikan menyimpulkan bahwa meskipun banyak studi melaporkan hasil positif, penting untuk menggunakan metode evaluasi yang kuat untuk secara objektif mengukur dampak pada hasil belajar (Garzón 2019).

b. Revisi Strategi Pengajaran

Data yang terkumpul dari proses evaluasi menjadi dasar untuk praktik reflektif dan revisi strategi pengajaran. Tahap ini adalah jembatan antara data dan tindakan perbaikan. Berdasarkan temuan, pendidik dapat menanyakan pada diri sendiri:

- 1) Jika pemahaman siswa tidak meningkat signifikan: Apakah aktivitas AR terlalu dangkal? Apakah perlu ada pertanyaan pemantik yang lebih menantang atau tugas lanjutan yang menuntut analisis lebih dalam?
- 2) Jika siswa kesulitan menggunakan teknologinya: Apakah instruksi awal kurang jelas? Apakah perlu ada sesi tutorial atau pengenalan alat yang lebih baik sebelum aktivitas utama?
- 3) Jika kolaborasi tidak berjalan lancar: Apakah desain tugas sudah cukup mendorong saling ketergantungan? Apakah perlu ada pembagian peran yang lebih jelas dalam kelompok?

Proses revisi ini bersifat iteratif. Setiap siklus implementasi dan evaluasi akan memberikan pemahaman baru yang memungkinkan pendidik untuk terus menyempurnakan cara mereka mengintegrasikan AR, menjadikannya semakin efektif dari waktu ke waktu.

c. Penyesuaian Kurikulum

Ketika strategi pengajaran berbasis AR secara konsisten terbukti efektif untuk mengajarkan topik atau keterampilan

tertentu, langkah selanjutnya adalah melakukan penyesuaian pada level kurikulum yang lebih formal. Ini adalah tahap untuk melembagakan inovasi yang berhasil agar menjadi praktik standar, bukan lagi sekadar eksperimen seorang guru. Penyesuaian ini dapat berupa:

- 1) Memasukkan aktivitas berbasis AR sebagai salah satu metode pembelajaran yang direkomendasikan dalam dokumen kurikulum untuk unit tertentu.
- 2) Mengalokasikan waktu dan sumber daya secara formal untuk pelaksanaan pembelajaran berbasis AR.
- 3) Mengadaptasi metode asesmen sumatif untuk mengakomodasi keterampilan atau pemahaman yang diperoleh melalui AR (misalnya, penilaian berbasis proyek atau portofolio digital).

Dengan melakukan penyesuaian kurikulum, sekolah atau institusi pendidikan memastikan bahwa manfaat dari integrasi AR dapat dirasakan secara merata oleh semua siswa dan tidak bergantung pada inisiatif individu guru saja. Hal ini menjadikan inovasi menjadi bagian yang berkelanjutan dan terukur dari budaya pembelajaran institusi.

3. Studi Kasus Singkat

Untuk mengilustrasikan bagaimana langkah-langkah integrasi dapat diterapkan dalam praktik, kita dapat melihat contoh implementasi AR dalam kurikulum Kimia di tingkat sekolah menengah. Studi kasus ini didasarkan pada temuan umum dari berbagai penelitian yang mengeksplorasi penggunaan AR untuk eksperimen kimia virtual.

a. Konteks dan Perencanaan (Pemilihan Topik)

- 1) Kurikulum: Kimia Sekolah Menengah.
- 2) Tujuan Pembelajaran: Siswa dapat memahami dan memvisualisasikan struktur molekul serta proses reaksi kimia pada level atomik (misalnya, reaksi pembentukan air dari hidrogen dan oksigen, $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$).

- 3) Masalah: Konsep ikatan kimia dan reaksi bersifat sangat abstrak dan tidak terlihat. Selain itu, melakukan beberapa eksperimen kimia secara nyata bisa jadi berbahaya dan membutuhkan peralatan laboratorium yang mahal. Ini menjadikan topik reaksi kimia sebagai kandidat yang sangat ideal untuk intervensi AR.

b. Desain Aktivitas Pembelajaran

Sebuah aplikasi AR dikembangkan untuk memungkinkan siswa melakukan eksperimen virtual. Prosesnya dirancang sebagai berikut:

- 1) Sebelum (Aktivasi): Guru memberikan pengantar singkat tentang konsep dasar molekul, atom, dan reaksi kimia menggunakan metode ceramah dan diskusi. Siswa diberikan lembar kerja berisi hipotesis tentang apa yang akan terjadi selama reaksi.
- 2) Selama (Eksplorasi AR):
 - Siswa bekerja dalam kelompok kecil. Setiap kelompok mendapatkan beberapa kartu penanda (marker).
 - Ketika sebuah kartu (misalnya, dengan simbol " H_2 ") diarahkan ke kamera perangkat, sebuah model 3D interaktif dari molekul hidrogen muncul di layar, seolah-olah berada di atas meja.
 - Siswa kemudian mengambil kartu lain (misalnya, " O_2 ") untuk memunculkan molekul oksigen.
 - Ketika kedua kartu penanda didekatkan, aplikasi akan memicu simulasi animasi reaksi kimia. Siswa dapat melihat ikatan pada molekul hidrogen dan oksigen pecah, kemudian atom-atom tersebut tersusun ulang membentuk molekul air (H_2O).

Sesudah (Refleksi) siswa mendiskusikan hasil pengamatan mereka dalam kelompok, menjawab pertanyaan di lembar kerja, dan membandingkan hasil simulasi dengan hipotesis awal mereka. Guru memfasilitasi diskusi kelas untuk mengkonsolidasikan pemahaman.

c. Evaluasi dan Hasil

Penelitian yang mengimplementasikan sistem serupa secara konsisten menunjukkan hasil yang positif. Dalam sebuah studi kasus yang relevan oleh (Cai et al. 2014)), penggunaan sistem simulasi AR untuk pelajaran kimia ditemukan dapat:

- 1) Meningkatkan Prestasi Belajar siswa pada kelompok yang menggunakan AR menunjukkan peningkatan pemahaman konsep yang signifikan dibandingkan dengan kelompok kontrol yang menggunakan metode tradisional.
- 2) Meningkatkan Sikap dan Motivasi siswa melaporkan bahwa pembelajaran menjadi lebih menarik, intuitif, dan menyenangkan. Kemampuan untuk memvisualisasikan dan berinteraksi secara langsung dengan konsep abstrak mengurangi frustrasi dan meningkatkan minat mereka terhadap subjek.
- 3) Menyediakan Lingkungan Belajar yang Aman siswa dapat bereksperimen dengan berbagai reaksi tanpa risiko apa pun.

Studi kasus ini menjadi contoh nyata bagaimana AR, ketika diintegrasikan secara terencana ke dalam kurikulum pada topik yang tepat, dapat mengubah cara siswa belajar dan berinteraksi dengan konsep yang kompleks, sekaligus mencapai tujuan pembelajaran secara lebih efektif.

D. Kesesuaian AR untuk berbagai gaya belajar

Setiap peserta didik memasuki ruang kelas dengan cara yang unik dalam memproses dan memahami informasi. Konsep gaya belajar merujuk pada preferensi individu mengenai cara mereka menyerap, mengolah, dan mengingat pengetahuan baru. Meskipun tidak ada satu siswa pun yang hanya memiliki satu gaya belajar, memahami preferensi ini menjadi penting dalam merancang pengalaman pembelajaran yang inklusif dan efektif. Dalam konteks *Augmented Reality* (AR), pemahaman ini menjadi kunci untuk memaksimalkan potensi teknologi dan memastikan bahwa manfaatnya dapat dirasakan oleh spektrum siswa yang seluas mungkin.

Pentingnya memahami gaya belajar adalah untuk menghindari pendekatan "satu ukuran untuk semua" (one-size-fits-all) dalam implementasi teknologi. Sebuah aplikasi AR yang dirancang dengan buruk mungkin hanya akan menarik bagi siswa dengan preferensi belajar tertentu, sementara siswa lain mungkin merasa kurang terlibat atau bahkan terhambat. Dengan mempertimbangkan keragaman gaya belajar, pendidik dan perancang dapat menciptakan pengalaman AR yang lebih kaya dan multi-modal, yang menawarkan berbagai cara bagi siswa untuk berinteraksi dengan konten. Hal ini tidak hanya meningkatkan keterlibatan, tetapi juga memberikan jalur alternatif menuju pemahaman, memungkinkan setiap siswa untuk belajar dengan cara yang paling alami bagi mereka.

Oleh karena itu, sub-bab ini akan mengupas bagaimana karakteristik unik AR dapat disesuaikan untuk melayani berbagai gaya belajar, dengan fokus pada model VARK (Visual, Auditory, Read/Write, Kinesthetic) yang populer. Kita akan mengeksplorasi bagaimana sifat multi-indrawi dari AR menjadikannya alat yang sangat fleksibel untuk menciptakan lingkungan pembelajaran yang lebih personal dan adaptif, sehingga tidak ada siswa yang tertinggal dalam revolusi pembelajaran digital ini.

1. Visual Learners

Pelajar visual adalah individu yang paling efektif menyerap informasi ketika disajikan dalam format yang dapat mereka lihat. Mereka cenderung berpikir dalam gambar, diagram, grafik, dan skema. Bagi pembelajar visual, "melihat adalah percaya" dan "sebuah gambar bernilai seribu kata" bukan sekadar kiasan, melainkan inti dari proses pembelajaran mereka. Dalam konteks ini, *Augmented Reality* (AR) muncul sebagai media pembelajaran yang sangat kuat dan secara inheren selaras dengan preferensi gaya belajar visual.

a. AR sebagai Alat Utama Visualisasi 3D

Keunggulan utama AR bagi pembelajar visual terletak pada kemampuannya untuk menyediakan visualisasi 3D yang imersif dan interaktif di dunia nyata. Berbeda dengan gambar 2D statis

di buku teks atau presentasi slide, AR memungkinkan siswa untuk memproyeksikan objek virtual tiga dimensi ke dalam lingkungan fisik mereka sendiri. Ini mengubah konsep abstrak menjadi entitas visual yang konkret dan dapat dijelajahi dari berbagai sudut pandang.

Misalnya, saat mempelajari sistem tata surya, pembelajar visual dapat menggunakan AR untuk menampilkan model planet-planet di atas meja mereka. Mereka dapat berjalan di sekitar model tersebut, mengamati orbit, dan memvisualisasikan skala relatif planet-planet secara lebih akurat daripada hanya melihat ilustrasi datar. Demikian pula, untuk anatomi manusia, model organ 3D virtual yang muncul di atas manekin atau bahkan di tubuh siswa itu sendiri, memungkinkan eksplorasi visual yang mendalam dan pemahaman spasial yang tidak dapat diberikan oleh diagram dua dimensi. Kemampuan untuk secara spasial berinteraksi dengan model 3D di lingkungan nyata secara signifikan meningkatkan pemahaman visual mereka terhadap kompleksitas.

b. Animasi dan Visualisasi Konsep yang Dinamis

Selain visualisasi objek statis, AR juga unggul dalam menyajikan animasi dan visualisasi konsep yang dinamis. Banyak proses ilmiah atau teknis yang melibatkan perubahan, pergerakan, dan interaksi antar elemen yang sulit ditangkap hanya dengan gambar diam. AR dapat menghidupkan proses-proses ini di lingkungan nyata siswa.

Sebagai contoh, dalam pelajaran fisika, siswa dapat mengarahkan perangkat AR mereka ke area tertentu dan melihat animasi tentang bagaimana gaya gravitasi memengaruhi objek, atau bagaimana gelombang suara menyebar melalui medium. Dalam kimia, mereka dapat menyaksikan simulasi visual tentang bagaimana atom-atom berikatan dan putus selama reaksi kimia. Animasi ini memungkinkan pembelajar visual untuk "melihat" proses yang tidak terlihat oleh mata telanjang,

membantu mereka membangun model mental yang akurat tentang bagaimana sesuatu bekerja.

Sebuah penelitian menyoroti bahwa penggunaan AR untuk visualisasi molekul 3D dan proses kimia dapat secara signifikan meningkatkan pemahaman konseptual siswa, karena AR memungkinkan mereka untuk berinteraksi dengan model virtual di dunia nyata, yang sangat bermanfaat bagi pembelajar visual (Cai et al. 2014). Dengan menyediakan representasi visual yang kaya, dinamis, dan kontekstual, AR secara langsung memenuhi kebutuhan pembelajar visual untuk "melihat" apa yang sedang mereka pelajari.

2. Auditory Learners

Pembelajar auditori adalah mereka yang belajar paling baik melalui pendengaran. Mereka mengandalkan penjelasan lisan, diskusi, dan isyarat suara untuk memproses informasi. Bagi mereka, mendengarkan narasi atau instruksi sering kali jauh lebih efektif daripada membaca teks dalam jumlah besar. Meskipun *Augmented Reality* (AR) secara inheren merupakan media visual, kemampuannya untuk mengintegrasikan audio secara sinkron menjadikannya alat yang sangat ampuh untuk melayani kebutuhan para pembelajar auditori.

a. Pemanfaatan Narasi dan Instruksi Audio

Salah satu cara paling efektif AR mendukung pembelajar auditori adalah melalui narasi audio dan instruksi verbal. Saat seorang siswa berinteraksi dengan model 3D yang kompleks, seperti mesin jet atau sistem peredaran darah, aplikasi AR dapat menyertakan narasi yang direkam secara profesional untuk menjelaskan setiap komponen yang mereka lihat. Ini seperti memiliki seorang pemandu ahli yang berbisik di telinga mereka, memberikan konteks dan detail yang mungkin terlewatkan jika hanya mengandalkan label teks.

Untuk tugas-tugas prosedural, instruksi audio langkah-demi-langkah sangatlah berharga. Misalnya, saat berlatih merakit sebuah sirkuit virtual, aplikasi AR dapat memberikan perintah

lisan seperti, "Sekarang, sambungkan kabel biru ke terminal negatif." Hal ini memungkinkan siswa untuk tetap fokus pada tugas manual dan visual di depan mereka tanpa harus membagi perhatian dengan membaca manual atau teks di layar. Dengan cara ini, AR menghormati preferensi auditori untuk menerima informasi secara lisan, sekaligus mengurangi beban kognitif.

b. Efek Suara untuk Umpan Balik dan Imersi

Selain narasi, efek suara memainkan peran penting dalam memberikan umpan balik dan meningkatkan realisme pengalaman AR. Bagi pembelajar auditori, isyarat suara bisa menjadi penanda yang sangat kuat.

Umpan Balik (Feedback): Sebuah suara "klik" yang memuaskan dapat memberikan konfirmasi instan bahwa sebuah komponen virtual telah ditempatkan dengan benar. Sebaliknya, suara "buzzer" yang lembut dapat menandakan kesalahan, mendorong siswa untuk mencoba lagi. Umpan balik auditori ini sering kali lebih cepat diproses daripada umpan balik visual.

Imersi dan Konteks: Suara yang realistis dapat membuat simulasi terasa lebih nyata dan berkesan. Mendengar suara detak jantung saat mengamati model jantung virtual, atau mendengar suara mesin mobil virtual saat mempelajari cara kerjanya, menambahkan lapisan sensorik yang memperkuat pembelajaran dan membuatnya lebih mudah diingat.

Penelitian tentang penggunaan AR di lingkungan belajar informal seperti museum menunjukkan bahwa lapisan informasi tambahan, termasuk narasi audio, secara signifikan dapat memperdalam pemahaman dan keterlibatan pengunjung. Dengan mendengarkan cerita atau penjelasan tentang sebuah artefak sambil melihatnya secara visual melalui AR, pengunjung (siswa) dapat membangun koneksi yang lebih kaya dengan materi (Yoon et al., 2012). Integrasi audio yang cermat mengubah AR dari pengalaman visual murni menjadi pengalaman multi-indrawi yang lengkap, yang sangat mengakomodasi para pembelajar auditori.

3. Kinesthetic Learners

Pembelajar kinestetik adalah tipe pembelajar yang memahami dan mengingat informasi paling baik melalui tindakan fisik dan pengalaman langsung (*Learning by doing*). Mereka perlu bergerak, menyentuh, dan berinteraksi dengan lingkungan untuk dapat menginternalisasi sebuah konsep. Bagi mereka, belajar adalah sebuah proses yang aktif, bukan pasif. *Augmented Reality* (AR), dengan sifatnya yang interaktif dan sering kali menuntut pergerakan fisik, menyediakan platform yang ideal untuk memenuhi kebutuhan para pembelajar kinestetik.

a. Interaksi Hands-On dengan Dunia Virtual

AR memungkinkan pembelajar kinestetik untuk "menyentuh" yang tak tersentuh. Teknologi ini memungkinkan mereka untuk berinteraksi dan memanipulasi objek virtual seolah-olah objek tersebut benar-benar ada di hadapan mereka. Mereka tidak hanya melihat model 3D dari sebuah mesin; mereka dapat menggunakan tangan atau perangkat mereka untuk membongkar pasang komponennya, memutarnya, dan melihat bagaimana setiap bagian saling terhubung.

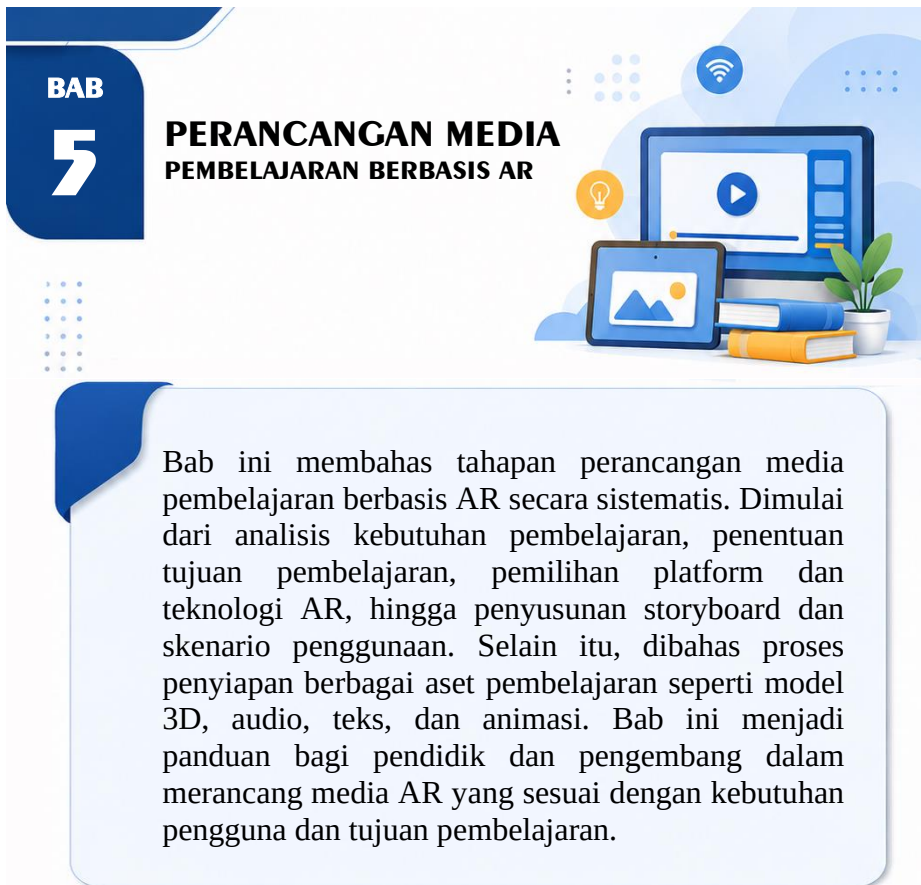
Tindakan fisik ini berjalan mengelilingi objek virtual, menggerakkan perangkat untuk melihat dari sudut yang berbeda, atau menggunakan gestur untuk berinteraksi secara langsung melibatkan indra kinestetik mereka. Proses belajar menjadi sebuah aktivitas fisik yang nyata. Daripada hanya membaca tentang bagaimana piramida dibangun, siswa dapat secara aktif menumpuk balok-balok virtual untuk membangunnya sendiri. Keterlibatan fisik ini menciptakan memori otot dan pemahaman spasial yang jauh lebih kuat daripada yang bisa ditawarkan oleh metode pasif.

b. Simulasi dan Eksperimen Berbasis Tindakan

Bagi pembelajar kinestetik, simulasi dan eksperimen adalah metode pembelajaran yang paling efektif. AR menyediakan semacam "laboratorium virtual" yang aman dan dapat diakses di mana saja, memungkinkan siswa untuk belajar melalui

tindakan dan eksperimen. Mereka dapat berlatih keterampilan prosedural yang kompleks, seperti melakukan prosedur medis virtual, merakit perabotan, atau bahkan berlatih teknik pengelasan, semua dalam lingkungan yang terkendali.

Dalam simulasi AR, setiap tindakan fisik siswa memiliki konsekuensi virtual yang langsung. Mereka belajar dari sebab-akibat melalui trial and error tanpa risiko di dunia nyata. Sebuah penelitian tentang penggunaan AR untuk pembelajaran anatomi menemukan bahwa siswa yang menggunakan sistem AR interaktif di mana mereka dapat secara aktif memanipulasi dan "mengiris" organ virtual menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam hasil belajar dibandingkan dengan mereka yang menggunakan metode tradisional. Kemampuan untuk secara aktif dan kinestetik menjelajahi materi terbukti sangat efektif (Norgaard et al. 2018). Dengan mengubah pembelajaran menjadi serangkaian tindakan dan eksperimen, AR secara langsung melayani dorongan pembelajar kinestetik untuk belajar dengan cara melakukan.



Bab ini membahas tahapan perancangan media pembelajaran berbasis AR secara sistematis. Dimulai dari analisis kebutuhan pembelajaran, penentuan tujuan pembelajaran, pemilihan platform dan teknologi AR, hingga penyusunan storyboard dan skenario penggunaan. Selain itu, dibahas proses penyiapan berbagai aset pembelajaran seperti model 3D, audio, teks, dan animasi. Bab ini menjadi panduan bagi pendidik dan pengembang dalam merancang media AR yang sesuai dengan kebutuhan pengguna dan tujuan pembelajaran.

A. Analisis Kebutuhan Pembelajaran

Perancangan media pembelajaran berbasis *Augmented Reality* (AR) merupakan proses yang tidak hanya mengandalkan kemampuan teknis dalam mengembangkan aplikasi atau menciptakan visualisasi tiga dimensi, tetapi juga membutuhkan pemahaman yang mendalam terhadap kebutuhan pembelajaran yang akan diakomodasi oleh media tersebut. Dalam praktiknya, banyak proyek pengembangan media pembelajaran gagal mencapai tujuan yang diharapkan bukan karena keterbatasan teknologi, melainkan karena kurangnya pemahaman terhadap permasalahan pembelajaran yang sesungguhnya. Oleh sebab itu, sebelum memasuki tahap desain, pengembangan konten, pemodelan objek tiga dimensi, maupun pemrograman aplikasi,

diperlukan suatu tahap awal yang sangat penting, yaitu analisis kebutuhan.

Analisis kebutuhan merupakan fondasi utama dalam keseluruhan proses pengembangan media pembelajaran. Tahap ini berfungsi untuk memastikan bahwa media yang dirancang benar-benar mampu menjawab kebutuhan pengguna, mendukung pencapaian tujuan pembelajaran, serta memberikan solusi terhadap permasalahan yang dihadapi dalam proses belajar mengajar. Dengan kata lain, analisis kebutuhan menjadi titik awal yang menentukan arah, ruang lingkup, dan karakteristik media yang akan dikembangkan. Tanpa adanya analisis kebutuhan yang sistematis, pengembangan media berisiko menghasilkan produk yang menarik secara visual dan canggih secara teknologi, tetapi kurang memberikan dampak nyata terhadap peningkatan kualitas pembelajaran.

Secara umum, analisis kebutuhan dapat dipahami sebagai proses pengumpulan, pengkajian, dan interpretasi informasi untuk mengidentifikasi kesenjangan antara kondisi pembelajaran yang sedang berlangsung dengan kondisi ideal yang diharapkan. Kesenjangan tersebut dapat berupa rendahnya pemahaman siswa terhadap suatu materi, kurangnya motivasi belajar, terbatasnya sarana pembelajaran, rendahnya partisipasi siswa, atau belum optimalnya media yang digunakan oleh guru dalam menyampaikan materi. Melalui proses analisis yang komprehensif, pengembang dapat memperoleh gambaran yang jelas mengenai masalah yang perlu diselesaikan dan solusi yang paling tepat untuk diterapkan.

Dalam konteks pengembangan media pembelajaran berbasis *Augmented Reality*, analisis kebutuhan memiliki peran yang sangat strategis karena teknologi AR pada dasarnya harus digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pembelajaran tertentu, bukan sekadar mengikuti tren perkembangan teknologi. Penggunaan AR harus memiliki alasan pedagogis yang kuat. Tidak semua materi pembelajaran memerlukan visualisasi AR, dan tidak semua permasalahan pembelajaran dapat diselesaikan melalui teknologi tersebut. Oleh karena itu, tahap analisis kebutuhan diperlukan untuk

menentukan apakah AR merupakan solusi yang tepat bagi suatu materi atau tujuan pembelajaran tertentu.

Salah satu aspek penting yang perlu dianalisis adalah karakteristik peserta didik sebagai pengguna utama media pembelajaran. Informasi mengenai usia, tingkat pendidikan, kemampuan akademik, gaya belajar, pengalaman menggunakan teknologi digital, serta kebutuhan belajar siswa menjadi data yang sangat penting dalam proses perancangan. Karakteristik pengguna akan memengaruhi berbagai keputusan desain, seperti tingkat kompleksitas materi, bentuk visualisasi yang digunakan, model interaksi, navigasi aplikasi, hingga bahasa yang digunakan dalam penyajian konten. Media pembelajaran yang dirancang sesuai dengan karakteristik peserta didik akan lebih mudah diterima, dipahami, dan digunakan secara efektif.

Selain karakteristik pengguna, analisis kebutuhan juga harus mencakup kajian terhadap materi pembelajaran yang akan disampaikan. Tidak semua materi memiliki tingkat kesulitan yang sama. Beberapa materi mungkin dapat dipahami dengan baik melalui buku teks atau media presentasi biasa, sementara materi lain memerlukan visualisasi yang lebih interaktif agar konsep-konsep abstraknya dapat dipahami secara optimal. Sebagai contoh, pada bidang Informatika dan Teknik Komputer, materi mengenai struktur motherboard, arsitektur komputer, topologi jaringan, atau proses komunikasi data sering kali sulit dipahami jika hanya dijelaskan melalui teks dan gambar dua dimensi. Dalam kasus seperti ini, AR dapat memberikan nilai tambah yang signifikan melalui penyajian objek tiga dimensi yang dapat diamati dan dieksplorasi secara langsung oleh peserta didik.

Analisis kebutuhan juga mencakup identifikasi tujuan pembelajaran yang ingin dicapai. Setiap fitur, konten, maupun aktivitas yang terdapat dalam media AR harus dirancang untuk mendukung pencapaian tujuan tersebut. Tujuan pembelajaran menjadi acuan utama dalam menentukan materi yang akan ditampilkan, jenis interaksi yang diberikan kepada pengguna, bentuk evaluasi yang digunakan, serta indikator keberhasilan media pembelajaran. Dengan demikian, pengembangan media tidak hanya

berorientasi pada aspek visual atau teknologi, tetapi juga berfokus pada pencapaian kompetensi yang diharapkan.

Di samping aspek pedagogis, analisis kebutuhan juga perlu memperhatikan faktor teknis dan lingkungan pembelajaran. Pengembang perlu mengetahui perangkat yang tersedia, spesifikasi smartphone atau tablet yang digunakan siswa, ketersediaan jaringan internet, sistem operasi yang dominan digunakan, serta kondisi sarana dan prasarana sekolah. Informasi ini penting untuk memastikan bahwa media yang dikembangkan dapat diimplementasikan secara optimal tanpa menghadapi kendala teknis yang berarti. Sebuah aplikasi AR yang membutuhkan spesifikasi perangkat tinggi mungkin tidak dapat digunakan secara efektif apabila sebagian besar siswa hanya memiliki perangkat dengan kemampuan terbatas.

Lingkungan pembelajaran juga menjadi faktor yang perlu dipertimbangkan dalam analisis kebutuhan. Media pembelajaran dapat digunakan dalam berbagai skenario, seperti pembelajaran di kelas, pembelajaran mandiri di rumah, praktikum laboratorium, maupun pembelajaran daring. Setiap konteks penggunaan memiliki karakteristik dan kebutuhan yang berbeda sehingga perlu diperhitungkan sejak tahap awal perancangan. Pemahaman terhadap konteks penggunaan akan membantu pengembang menciptakan pengalaman belajar yang lebih sesuai dengan kebutuhan pengguna dan situasi pembelajaran yang sebenarnya.

Melalui proses analisis kebutuhan yang sistematis, pengembang dapat memperoleh dasar yang kuat untuk merancang media pembelajaran berbasis *Augmented Reality* yang efektif, efisien, dan relevan. Hasil analisis tersebut akan menjadi pedoman dalam menentukan spesifikasi media, merancang alur pembelajaran, memilih teknologi yang digunakan, mengembangkan konten, serta menyusun strategi implementasi dan evaluasi. Setiap keputusan desain yang diambil akan memiliki landasan yang jelas dan dapat dipertanggungjawabkan secara pedagogis maupun teknis.

Dengan demikian, analisis kebutuhan bukan sekadar tahap awal dalam proses pengembangan media pembelajaran, melainkan merupakan fondasi yang menentukan kualitas dan keberhasilan

produk yang akan dihasilkan. Semakin mendalam dan akurat proses analisis yang dilakukan, semakin besar pula peluang untuk menghasilkan media pembelajaran AR yang mampu memberikan pengalaman belajar yang bermakna, meningkatkan keterlibatan peserta didik, serta mendukung pencapaian tujuan pembelajaran secara optimal. Oleh karena itu, sebelum memasuki tahap desain antarmuka, pengembangan objek tiga dimensi, maupun implementasi teknologi AR, para pengembang dan pendidik perlu memastikan bahwa proses analisis kebutuhan telah dilakukan secara komprehensif dan sistematis sebagai dasar bagi seluruh tahapan pengembangan berikutnya.

1. Identifikasi Kebutuhan Siswa

Setelah memahami pentingnya analisis kebutuhan secara umum, langkah pertama yang spesifik adalah memfokuskan lensa pada target utama dari media pembelajaran: siswa. Merancang media yang efektif berarti merancang untuk mereka. Proses ini melibatkan penggalian data yang mendalam mengenai berbagai aspek dari siswa sebagai pembelajar. Mengabaikan tahap ini sama saja dengan merancang tanpa mengetahui untuk siapa produk ini dibuat. Analisis kebutuhan siswa setidaknya harus mencakup empat area krusial berikut.

a. Kesenjangan Pengetahuan (*Knowledge Gaps*)

Ini adalah inti dari analisis kebutuhan belajar. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi secara presisi konsep atau keterampilan apa yang menjadi kesulitan bagi siswa. Pertanyaan yang perlu dijawab meliputi:

- 1) Materi spesifik apa dalam kurikulum yang secara konsisten menunjukkan tingkat pemahaman paling rendah?
- 2) Mengapa materi tersebut sulit? Apakah karena sifatnya yang terlalu abstrak, melibatkan proses yang tidak terlihat, atau membutuhkan pemahaman spasial yang tinggi?
- 3) Apa miskonsepsi umum yang sering dimiliki siswa terkait topik tersebut?

Data ini bisa didapatkan melalui analisis hasil ujian, survei, wawancara dengan guru dan siswa, atau observasi kelas. Hasil identifikasi kesenjangan inilah yang akan menentukan konten utama dan tujuan pembelajaran spesifik dari media AR yang akan dikembangkan.

b. Kemampuan Teknis (Technical Abilities)

Media AR, secanggih apapun, akan gagal jika siswa tidak dapat menggunakannya dengan mudah. Oleh karena itu, penting untuk memahami tingkat literasi digital dan kemampuan teknis siswa. Pertimbangan dalam area ini mencakup:

- 1) Seberapa familiarkah siswa dengan penggunaan perangkat seperti smartphone atau tablet?
- 2) Apakah mereka pernah memiliki pengalaman menggunakan aplikasi AR sebelumnya?
- 3) Bagaimana tingkat kenyamanan mereka dalam berinteraksi dengan antarmuka digital?

Analisis ini akan sangat memengaruhi desain antarmuka pengguna (UI) dan pengalaman pengguna (UX). Misalnya, media untuk siswa sekolah dasar harus memiliki ikon yang besar, instruksi verbal, dan interaksi yang minimalis. Sebaliknya, media untuk mahasiswa mungkin dapat menyertakan fitur yang lebih kompleks. Mengabaikan kemampuan teknis dapat menyebabkan frustrasi dan menciptakan beban kognitif asing yang justru menghalangi proses belajar.

c. Gaya Belajar (*Learning Styles*)

Seperti yang telah dibahas pada bab sebelumnya, siswa memiliki preferensi cara belajar yang berbeda-beda. Analisis pada tahap ini bertujuan untuk memahami profil gaya belajar umum dari populasi target. Apakah mayoritas siswa cenderung visual, auditori, atau kinestetik? Idealnya, media AR yang baik dirancang secara multi-modal untuk melayani semua gaya belajar. Desain harus mempertimbangkan untuk menyertakan:

- 1) Visual berupa model 3D berkualitas tinggi, animasi yang jelas, dan label visual.
- 2) Auditori berupa opsi untuk narasi penjelasan, efek suara sebagai umpan balik, dan instruksi lisan.
- 3) Kinestetik berupa interaksi yang memungkinkan siswa untuk memanipulasi, memutar, atau membongkar pasang objek virtual.

d. Motivasi (Motivation)

Apa yang mendorong atau justru menghambat semangat belajar siswa pada topik yang dipilih? Memahami faktor motivasi sangat penting untuk merancang pengalaman yang menarik dan dapat mempertahankan keterlibatan siswa. Analisis ini mencoba menjawab:

- 1) Apakah siswa menganggap topik tersebut membosankan atau tidak relevan dengan kehidupan mereka?
- 2) Apa yang biasanya membuat mereka bersemangat untuk belajar? (misalnya, kompetisi, cerita, tantangan, atau relevansi praktis).

Wawasan ini akan memandu penerapan elemen-elemen desain yang dapat meningkatkan motivasi, seperti gamifikasi (skor, lencana, papan peringkat), alur cerita (storytelling), atau dengan secara eksplisit menunjukkan penerapan dunia nyata dari konsep yang dipelajari. Sebuah tinjauan sistematis terhadap literatur AR dalam pendidikan menyoroti bahwa salah satu keuntungan utama AR adalah potensinya untuk meningkatkan motivasi belajar siswa; namun, potensi ini hanya dapat terwujud jika media dirancang dengan mempertimbangkan faktor-faktor yang menarik bagi siswa (Akçayır and Akcayir 2016).

Dengan memetakan keempat area ini secara komprehensif, perancang akan memiliki profil pengguna yang kaya sebagai dasar yang kuat untuk membuat keputusan desain yang terinformasi dan berpusat pada siswa.

2. Analisis Materi dan Kurikulum

Setelah memetakan kebutuhan siswa, analisis bergeser ke elemen fundamental kedua: materi pelajaran dan kurikulum. Tahap ini memastikan bahwa media *Augmented Reality* (AR) yang dirancang tidak hanya menarik bagi siswa, tetapi juga relevan secara akademis, akurat secara konten, dan selaras dengan standar pendidikan yang berlaku. Analisis ini berfungsi untuk membedah "apa" yang akan diajarkan dan "mengapa" AR adalah alat yang tepat untuk mengajarkannya.

a. Mengidentifikasi Materi yang Relevan untuk AR

Langkah pertama adalah memindai kurikulum untuk menemukan "titik intervensi" di mana AR dapat memberikan nilai tambah terbesar. Seperti yang telah disinggung sebelumnya, tidak semua materi cocok untuk AR. Analisis pada tahap ini berfokus pada identifikasi konten yang memiliki satu atau lebih karakteristik berikut:

- 1) Berbasis Spasial dan Tiga Dimensi: Materi yang menuntut pemahaman mendalam tentang bentuk, struktur, dan hubungan spasial, seperti anatomi dalam biologi, geometri molekuler dalam kimia, atau sistem mekanis dalam teknik.
- 2) Melibatkan Proses Abstrak atau Tak Terlihat: Konsep yang tidak dapat diamati secara langsung, misalnya peredaran darah, medan magnet, atau proses fotosintesis. AR dapat membuat yang tak terlihat menjadi terlihat.
- 3) Memerlukan Simulasi Prosedural: Pembelajaran yang berbasis langkah-demi-langkah atau keterampilan praktik, seperti prosedur laboratorium, perakitan perangkat, atau simulasi medis.
- 4) Berbahaya, Mahal, atau Sulit Diakses: Topik yang melibatkan skenario yang tidak praktis untuk direplikasi di kelas, seperti menjelajahi situs arkeologi, mengamati fenomena astronomi, atau melakukan eksperimen yang berisiko.

b. Menganalisis Tingkat Kesulitan Konsep

Setelah topik yang relevan diidentifikasi, penting untuk menganalisis mengapa topik tersebut dianggap sulit. Kesulitan sebuah konsep sering kali berkaitan dengan beban kognitif intrinsik yaitu, jumlah elemen informasi yang harus diproses secara bersamaan oleh siswa dalam memori kerja mereka. Misalnya, memahami cara kerja mesin empat tak sangat sulit karena siswa harus secara mental melacak pergerakan piston, katup, busi, dan aliran bahan bakar secara simultan.

Dengan memahami sumber kesulitan ini, media AR dapat dirancang secara spesifik untuk mengelolanya. AR dapat mengurangi beban kognitif dengan:

- 1) Visualisasi yaitu mengubah deskripsi teks yang rumit menjadi model 3D yang intuitif.
- 2) Segmentasi menyajikan informasi secara bertahap atau per bagian, bukan sekaligus.
- 3) Scaffolding memberikan petunjuk visual atau label just-in-time saat siswa menjelajahi model.

c. Menetapkan Kompetensi yang Ingin Dicapai

Analisis kurikulum harus berpuncak pada penetapan kompetensi atau tujuan pembelajaran yang jelas dan terukur. Apa yang seharusnya dapat dilakukan oleh siswa setelah menggunakan media AR? *Taksonomi Bloom* dapat menjadi kerangka kerja yang sangat berguna di sini. Apakah tujuan media AR ini adalah:

- 1) Mengingat (Remembering), siswa dapat mengidentifikasi dan menamai bagian-bagian dari sel hewan.
- 2) Memahami (Understanding), siswa dapat menjelaskan fungsi dari setiap organel sel.
- 3) Menerapkan (Applying), siswa dapat menggunakan model sel virtual untuk mensimulasikan proses osmosis.
- 4) Menganalisis (Analyzing), siswa dapat mendiagnosis penyakit seluler berdasarkan kelainan yang ditampilkan pada model.

Penetapan tingkat kompetensi ini sangat penting karena akan menentukan tingkat interaktivitas dan kompleksitas yang harus dimiliki oleh aplikasi AR. Tinjauan berbagai aplikasi AR dalam pendidikan dan pelatihan menunjukkan bahwa AR sangat efektif untuk mencapai kompetensi yang lebih tinggi, terutama dalam domain yang memerlukan keterampilan psikomotorik dan pemahaman spasial yang kompleks (Lee 2012).

3. Analisis Sumber Daya

Sebuah ide media pembelajaran *Augmented Reality* (AR) yang brilian secara konseptual akan sia-sia jika tidak dapat diimplementasikan di lapangan. Oleh karena itu, analisis sumber daya adalah sebuah uji kelayakan (*feasibility study*) yang pragmatis untuk memastikan bahwa rencana yang disusun realistis dan dapat diwujudkan. Tahap ini melibatkan inventarisasi dan evaluasi jujur terhadap ketersediaan perangkat keras, infrastruktur jaringan, perangkat lunak, dan anggaran yang ada. Mengabaikan analisis ini dapat menyebabkan proyek yang terhenti di tengah jalan atau menghasilkan produk akhir yang tidak dapat digunakan oleh target siswa.

a. Ketersediaan Perangkat Keras (*Hardware*)

Ini adalah fondasi teknis dari setiap implementasi AR. Pertanyaan kunci yang harus dijawab adalah: perangkat apa yang akan digunakan oleh siswa?

- 1) Jenis dan Kepemilikan: Apakah sekolah menyediakan tablet untuk setiap siswa, atau apakah modelnya adalah *Bring Your Own Device* (BYOD), di mana siswa menggunakan smartphone pribadi?
- 2) Spesifikasi Teknis: AR adalah teknologi yang cukup menuntut. Apakah perangkat yang ada memiliki RAM, prosesor (CPU/GPU), dan kualitas kamera yang memadai untuk menjalankan aplikasi AR dengan lancar? Perangkat dengan spesifikasi rendah akan menghasilkan pengalaman yang lambat dan tidak responsif, yang dapat menghambat pembelajaran.

- 3) Jumlah dan Rasio: Apakah rasio perangkat adalah 1:1 dengan siswa, atau apakah siswa perlu bekerja dalam kelompok? Jawaban ini akan memengaruhi desain aktivitas, apakah dirancang untuk penggunaan individual atau kolaboratif.

b. Infrastruktur Jaringan (Network)

Banyak aplikasi AR membutuhkan koneksi internet untuk mengunduh *aset 3D*, konten, atau untuk fitur kolaboratif. Oleh karena itu, analisis jaringan sangat penting.

- 1) Konektivitas Sekolah: Apakah jaringan Wi-Fi sekolah cukup stabil dan memiliki bandwidth yang cukup untuk menangani puluhan perangkat yang mengakses konten AR secara bersamaan? Jaringan yang tidak stabil dapat menyebabkan frustrasi dan mengganggu alur pelajaran.
- 2) Akses Internet Siswa: Jika menggunakan model BYOD untuk tugas di rumah, apakah dapat diasumsikan bahwa semua siswa memiliki akses internet yang andal? Ini adalah isu ekuitas yang serius.
- 3) Kebutuhan Offline: Berdasarkan kondisi jaringan, apakah aplikasi perlu dirancang untuk dapat berfungsi penuh secara offline setelah instalasi dan pengunduhan konten awal? Ini sering kali menjadi solusi paling aman untuk lingkungan sekolah.

c. Perangkat Lunak (*Software*) dan Platform

Analisis ini mencakup ekosistem perangkat lunak dari pengembangan hingga distribusi.

- 1) Platform Pengembangan: Aplikasi akan dibuat menggunakan platform apa (misalnya, Unity, Unreal Engine, atau platform web-based)? Apakah tim pengembang memiliki keahlian yang dibutuhkan?
- 2) Platform Sistem Operasi: Mayoritas siswa menggunakan perangkat *Android* atau *iOS*? Aplikasi harus kompatibel dengan platform yang dominan.

- 3) Distribusi Aplikasi: Bagaimana aplikasi akan didistribusikan ke perangkat siswa? Apakah melalui toko aplikasi publik (Google Play Store, Apple App Store) atau sistem manajemen perangkat seluler (Mobile Device Management - MDM) milik sekolah?
- d. Biaya Pengembangan dan Pemeliharaan (Cost)

Anggaran sering kali menjadi faktor penentu utama yang membentuk skala dan kompleksitas proyek.

- 1) Biaya Pengembangan: Ini adalah biaya awal yang mencakup desain, pemrograman, pembuatan *aset 3D*, pembelian lisensi *software*, dan lainnya. Pengembangan AR kustom bisa menjadi investasi yang signifikan.
- 2) Biaya Perangkat Keras: Jika perangkat yang ada tidak memadai, apakah ada anggaran untuk pengadaan perangkat baru?
- 3) Biaya Pemeliharaan: Ini adalah biaya jangka panjang yang sering terlupakan. Aplikasi memerlukan pembaruan rutin untuk tetap kompatibel dengan versi sistem operasi baru, perbaikan bug, dan dukungan teknis.

Berbagai tinjauan sistematis tentang implementasi AR di dunia pendidikan secara konsisten mengidentifikasi bahwa masalah teknis (terkait perangkat keras dan lunak) serta biaya yang tinggi merupakan tantangan dan penghalang utama yang harus diatasi (Akçayır and Akcayir 2016). Oleh karena itu, analisis sumber daya yang jujur dan menyeluruh di tahap awal akan membantu menetapkan batasan yang realistis dan memastikan proyek dapat berjalan secara berkelanjutan.

B. Penentuan Tujuan Pembelajaran

Setelah analisis kebutuhan memberikan gambaran yang jelas tentang siapa siswa dan apa masalah belajar yang dihadapi, langkah selanjutnya adalah menerjemahkan temuan tersebut ke dalam pernyataan yang konkret dan terukur: tujuan pembelajaran. Jika analisis kebutuhan adalah proses diagnostik, maka penentuan tujuan pembelajaran adalah penulisan resepnya. Dalam proses perancangan

media *Augmented Reality* (AR), tujuan pembelajaran bukanlah sekadar formalitas administratif; ia adalah bintang pemandu (guiding star) yang mengarahkan setiap keputusan desain, pengembangan, dan evaluasi.

Hubungan antara tujuan pembelajaran dan desain media AR bersifat langsung dan fundamental. Tujuan yang dirumuskan dengan baik akan secara eksplisit mendikte fungsionalitas, tingkat interaktivitas, dan konten apa yang harus ada di dalam aplikasi AR. Sebagai contoh, tujuan yang berbunyi "Siswa dapat mengidentifikasi bagian-bagian jantung" akan menuntut desain AR yang berfokus pada visualisasi 3D yang akurat dengan label yang jelas. Namun, tujuan yang lebih tinggi seperti "Siswa dapat menganalisis dampak kerusakan katup pada aliran darah" akan menuntut desain AR yang jauh lebih kompleks sebuah simulasi interaktif di mana siswa dapat memanipulasi variabel dan mengamati konsekuensinya.

Dengan demikian, tujuan pembelajaran berfungsi sebagai kriteria keberhasilan yang objektif. Tanpa tujuan yang jelas, mustahil untuk mengukur apakah media AR yang dikembangkan benar-benar "efektif". Tujuan inilah yang menjadi tolok ukur pada tahap evaluasi untuk menentukan apakah media tersebut berhasil memfasilitasi pembelajaran atau hanya menjadi pengalaman teknologi yang menyenangkan namun dangkal. Sub-bab ini akan membahas cara merumuskan tujuan pembelajaran yang efektif dan bagaimana tujuan tersebut secara langsung membentuk kerangka kerja untuk perancangan media AR yang berdampak.

1. Tujuan Umum dan Spesifik

Setelah tujuan pembelajaran ditetapkan sebagai pemandu, langkah selanjutnya adalah merumuskannya ke dalam hierarki yang jelas, yaitu Tujuan Pembelajaran Umum (TPU) dan Tujuan Pembelajaran Khusus (TPK). Pendekatan ini membantu perancang untuk melihat gambaran besar kompetensi yang ingin dicapai, sekaligus memecahnya menjadi langkah-langkah yang konkret, teramati, dan terukur. Hierarki ini memastikan bahwa setiap interaksi dalam media AR memiliki maksud dan tujuan yang jelas.

a. Tujuan Pembelajaran Umum (TPU)

Tujuan Pembelajaran Umum (TPU), atau sering disebut juga tujuan instruksional umum, adalah pernyataan yang luas tentang apa yang diharapkan dapat dikuasai siswa setelah menyelesaikan satu unit pembelajaran secara keseluruhan. TPU mendeskripsikan kompetensi akhir dalam istilah yang masih umum dan abstrak.

- 1) Fungsi TPU memberikan arah dan konteks utama untuk keseluruhan media pembelajaran AR. Ia menjawab pertanyaan, "Secara garis besar, kemampuan apa yang akan dimiliki siswa setelah menggunakan media ini?"
- 2) Contoh dalam Konteks AR:
"Setelah menyelesaikan unit ini menggunakan media AR, siswa akan memahami proses metamorfosis pada kupu-kupu."

Kata kerja "memahami" di sini masih bersifat luas dan belum dapat diukur secara langsung. Namun, TPU ini sudah cukup untuk memberikan arahan bahwa media AR yang akan dibuat harus mencakup keseluruhan siklus hidup kupu-kupu.

b. Tujuan Pembelajaran Khusus (TPK)

Tujuan Pembelajaran Khusus (TPK) adalah penjabaran dari TPU. TPK adalah pernyataan yang spesifik, operasional, dan dapat diukur yang mendeskripsikan perilaku atau performa yang dapat diamati dari siswa sebagai bukti bahwa mereka telah belajar. Untuk merumuskan TPK yang baik, sering kali digunakan model ABCD:

- 1) A (Audience) yaitu Siapa subjek belajarnya (Siswa).
- 2) B (Behavior) yaitu Perilaku spesifik yang dapat diamati (menggunakan kata kerja operasional seperti mengidentifikasi, menyebutkan, mendemonstrasikan).
- 3) C (Condition) yaitu Kondisi atau situasi di mana perilaku tersebut ditampilkan (misalnya, "dengan menggunakan model AR").

- 4) D (Degree) yaitu Tingkat keberhasilan atau kriteria performa (misalnya, "dengan benar," "sesuai urutan").

Contoh TPK (penjabaran dari TPU di atas):

- 1) TPK 1 (Mengingat) yaitu Diberikan model 3D dari setiap fase metamorfosis melalui AR (Condition), siswa (Audience) dapat mengidentifikasi dan menyebutkan nama keempat fase (telur, larva, pupa, imago) (Behavior) dengan benar (Degree).
- 2) TPK 2 (Memahami) yaitu Melalui simulasi AR (Condition), siswa (Audience) dapat menjelaskan perubahan utama yang terjadi pada setiap fase (Behavior) dengan menggunakan kalimat mereka sendiri (Degree).
- 3) TPK 3 (Menerapkan) yaitu Diberikan model AR dari berbagai jenis serangga (Condition), siswa (Audience) dapat membedakan mana serangga yang mengalami metamorfosis sempurna dan tidak sempurna (Behavior) secara akurat (Degree).

Setiap TPK ini secara langsung menginformasikan fitur spesifik yang harus ada dalam aplikasi AR. TPK 1 memerlukan model 3D dengan fitur label interaktif. TPK 2 memerlukan modul animasi atau simulasi proses. TPK 3 memerlukan sebuah aktivitas atau kuis interaktif di dalam aplikasi. Dengan demikian, perancangan media AR yang efektif bukanlah tentang menambahkan fitur sebanyak mungkin, melainkan tentang merancang fitur yang secara langsung melayani pencapaian tujuan pembelajaran yang spesifik. Seperti yang ditekankan dalam literatur, desain tugas (task design) dalam AR harus didasarkan pada tujuan pedagogis yang jelas agar teknologi tersebut benar-benar mendukung proses belajar di kelas (Billinghurst and Duenser 2012).

2. Kriteria Keberhasilan

Merumuskan tujuan pembelajaran adalah langkah pertama; langkah selanjutnya yang sama pentingnya adalah mendefinisikan cara untuk mengukurnya. Kriteria keberhasilan adalah seperangkat

standar dan indikator yang digunakan untuk menilai apakah tujuan pembelajaran telah tercapai dan sejauh mana media *Augmented Reality* (AR) efektif sebagai alat bantu belajar. Tanpa kriteria yang jelas, evaluasi menjadi subjektif dan sulit untuk dibuktikan. Kriteria ini menerjemahkan tujuan yang telah dirumuskan menjadi bukti pembelajaran yang nyata.

a. Indikator Pencapaian

Indikator pencapaian adalah bukti-bukti spesifik dan teramati yang menunjukkan bahwa seorang siswa telah menguasai sebuah Tujuan Pembelajaran Khusus (TPK). Indikator ini diturunkan langsung dari komponen Behavior (Perilaku) dan Degree (Tingkat Keberhasilan) dalam rumusan TPK. Indikator inilah yang akan diobservasi dan diukur selama proses evaluasi. Contoh (melanjutkan TPK metamorfosis):

- 1) TPK yaitu "Diberikan model 3D dari setiap fase metamorfosis melalui AR, siswa dapat mengidentifikasi dan menyebutkan nama keempat fase dengan benar."
- 2) Indikatornya: Siswa dapat mencocokkan nama "Telur", "Larva", "Pupa", dan "Imago" dengan model 3D yang sesuai tanpa kesalahan.

Indikator haruslah sangat spesifik sehingga tidak ada keraguan apakah seorang siswa sudah berhasil atau belum.

b. Evaluasi Hasil Belajar

Evaluasi hasil belajar adalah proses pengumpulan data berdasarkan indikator yang telah ditetapkan. Metode evaluasi harus dirancang agar selaras dengan jenis kompetensi yang diukur. Secara umum, evaluasi dapat dibagi menjadi dua jenis:

- 1) Evaluasi Formatif yaitu dilakukan selama proses pembelajaran untuk memberikan umpan balik dan memandu siswa. Dalam konteks AR, ini bisa berupa:
- 2) Kuis singkat atau drag-and-drop di dalam aplikasi.
- 3) Tugas interaktif di mana aplikasi memberikan feedback langsung (misalnya, "Benar!" atau "Coba lagi!").

- 4) Lembar kerja observasi yang diisi guru saat siswa menggunakan AR.
- c. Evaluasi Sumatif yaitu dilakukan setelah unit pembelajaran selesai untuk mengukur pencapaian akhir. Contohnya meliputi:
 - 1) Tes akhir (post-test) yang berisi pertanyaan-pertanyaan terkait TPK.
 - 2) Penugasan proyek di mana siswa menggunakan media AR untuk membuat laporan atau presentasi.
 - 3) Penilaian kinerja (performance assessment) di mana siswa mendemonstrasikan sebuah prosedur menggunakan simulasi AR.
- d. Metode Pengukuran Efektivitas Media

Selain mengukur hasil belajar siswa, penting juga untuk mengukur efektivitas media AR itu sendiri sebagai sebuah intervensi pembelajaran. Ini menjawab pertanyaan, "Apakah media AR ini merupakan cara yang baik untuk mencapai tujuan tersebut?" Pengukuran ini dapat mencakup:

- 1) Studi Komparatif yaitu membandingkan hasil belajar kelompok siswa yang menggunakan AR dengan kelompok kontrol yang menggunakan metode tradisional (misalnya, buku teks atau video).
- 2) Pengukuran Keterlibatan dan Motivasi yaitu menggunakan kuesioner atau skala standar (misalnya, Instructional Materials Motivation Survey - IMMS) untuk mengukur apakah media AR berhasil meningkatkan minat dan motivasi siswa.
- 3) Evaluasi Usabilitas yaitu menilai kemudahan penggunaan aplikasi melalui metode seperti System Usability Scale (SUS) atau dengan mengamati apakah siswa dapat mengoperasikannya tanpa kesulitan teknis yang berarti.

Berbagai meta-analisis di bidang ini menekankan pentingnya penggunaan metode evaluasi yang kuat, seperti desain penelitian dengan kelompok kontrol dan pengukuran pre-test/post-test, untuk dapat secara objektif membuktikan dampak positif AR terhadap pembelajaran (Garzón 2019). Dengan

menggabungkan evaluasi hasil belajar dan pengukuran efektivitas media, perancang dapat memperoleh gambaran lengkap tentang keberhasilan proyek AR yang dikembangkan.

C. Pemilihan Platform Dan Teknologi AR

Setelah kebutuhan dianalisis dan tujuan pembelajaran dirumuskan dengan jelas, proses perancangan beralih dari pertanyaan "mengapa" dan "apa" ke pertanyaan "bagaimana" secara teknis. Pada tahap inilah keputusan krusial mengenai pemilihan platform dan teknologi *Augmented Reality* (AR) harus dibuat. Pilihan ini bukanlah sekadar detail teknis di akhir proses, melainkan keputusan fundamental yang akan menentukan kapabilitas, jangkauan, dan pada akhirnya, kualitas pengalaman belajar yang dapat dihadirkan kepada siswa.

Peran platform dan teknologi dalam konteks ini dapat diibaratkan sebagai mesin dan kerangka dari sebuah kendaraan. Desain pedagogis adalah cetak biru kendaraannya, namun platform teknologilah yang menentukan seberapa cepat ia bisa melaju, medan seperti apa yang bisa ditempuhnya, dan seberapa nyaman pengalamannya bagi penumpang. Platform yang sederhana mungkin cukup untuk perjalanan singkat di jalan yang mulus (misalnya, menampilkan model 3D sederhana), namun untuk perjalanan yang menantang (misalnya, simulasi yang kompleks dan interaktif), diperlukan mesin yang jauh lebih bertenaga.

Oleh karena itu, pemilihan platform dan teknologi adalah sebuah tindakan penyeimbangan strategis antara visi pedagogis dengan realitas teknis dan sumber daya. Tidak ada satu platform pun yang "terbaik" untuk semua situasi. Keputusan harus didasarkan pada pertimbangan cermat terhadap tujuan pembelajaran yang ingin dicapai, kompleksitas konten, perangkat yang akan digunakan oleh siswa, serta batasan waktu dan anggaran. Sub-bab ini akan mengupas berbagai jenis platform dan teknologi AR yang tersedia, mulai dari yang berbasis aplikasi hingga berbasis web, untuk membantu Anda memilih fondasi teknis yang paling sesuai untuk media pembelajaran yang akan Anda bangun.

1. Kriteria Pemilihan Platform

Memilih platform teknologi yang tepat adalah salah satu keputusan paling strategis dalam siklus pengembangan media pembelajaran AR. Keputusan ini akan berdampak langsung pada biaya, waktu pengembangan, kualitas pengalaman pengguna akhir, dan keberlanjutan proyek. Proses pemilihan ini haruslah merupakan analisis cermat yang menyeimbangkan antara ambisi pedagogis dengan realitas teknis dan sumber daya. Berikut adalah empat kriteria utama yang harus dipertimbangkan secara mendalam.

a. Kemudahan Penggunaan dan Kompleksitas Pengembangan

Platform AR hadir dalam spektrum yang luas, mulai dari yang sangat ramah bagi pemula hingga yang menuntut keahlian pemrograman tingkat lanjut.

1) Platform No-Code/Low-Code

Platform seperti Assemblr, ZapWorks, atau Blippar dirancang untuk memungkinkan pengguna (termasuk pendidik) membuat konten AR sederhana tanpa perlu menulis kode.

a) Kelebihan: Waktu pengembangan sangat cepat, antarmuka visual yang intuitif, dan tidak memerlukan tim developer khusus. Sangat ideal untuk proyek dengan tujuan pembelajaran sederhana, seperti menampilkan video, model 3D, atau tautan di atas sebuah gambar penanda.

b) Kekurangan: Tingkat kustomisasi dan interaktivitas sangat terbatas. Pengguna terikat pada fitur-fitur yang disediakan platform, sehingga sulit untuk menciptakan simulasi atau mekanika permainan yang kompleks.

2) Engine Profesional

Platform seperti Unity (dengan pustaka AR Foundation) dan Unreal Engine adalah standar industri untuk pengembangan aplikasi interaktif 2D/3D, termasuk AR.

a) Kelebihan

Fleksibilitas dan kontrol kreatif yang nyaris tak terbatas. Mampu menangani visualisasi 3D yang sangat kompleks, fisika realistis, dan logika interaktif yang rumit. Didukung oleh komunitas pengembang yang sangat besar.

b) Kekurangan

Memiliki *kurva belajar* yang sangat curam. Membutuhkan keahlian khusus dalam pemrograman (C# untuk Unity, C++/Blueprints for Unreal) dan desain 3D. Waktu pengembangan jauh lebih lama.

Pilihan antara kedua spektrum ini harus didasarkan pada Tujuan Pembelajaran Khusus (TPK) yang telah ditetapkan. Semakin tinggi tingkat kompetensi yang ditargetkan (misalnya, Menganalisis atau Mencipta), semakin besar kemungkinan engine profesional menjadi pilihan yang lebih tepat.

b. Kompatibilitas Perangkat dan Jangkauan Akses

Platform yang dipilih harus dapat berjalan dengan baik pada perangkat yang akan digunakan oleh siswa. Ini adalah pertimbangan krusial terkait aksesibilitas dan ekuitas.

1) Aplikasi Native (Berbasis Aplikasi) yang dibangun menggunakan SDK spesifik seperti *ARKit* (untuk Apple *iOS*) atau *ARCore* (untuk Google *Android*), sering kali melalui engine seperti Unity.

a) Kelebihan

Menawarkan performa, stabilitas, dan kualitas grafis terbaik karena memiliki akses penuh ke perangkat keras perangkat. Dapat dirancang untuk berfungsi secara offline.

b) Kekurangan

Mengharuskan siswa untuk mengunduh dan menginstal aplikasi, yang bisa menjadi penghalang signifikan (barrier to entry).

2) WebAR (Berbasis Web)

Pengalaman AR diakses langsung melalui peramban web (browser) di smartphone, tanpa perlu menginstal aplikasi apapun. Contoh platformnya adalah 8th Wall, Zappar, atau MindAR.

a) Kelebihan: Aksesibilitas maksimal. Pengalaman dapat dibagikan hanya dengan sebuah tautan atau kode QR. Secara otomatis kompatibel di berbagai perangkat (*Android* dan *iOS*).

b) Kekurangan: Kinerja umumnya tidak secepat aplikasi native. Sangat bergantung pada koneksi internet dan memiliki keterbatasan dalam hal kompleksitas grafis dan fitur AR canggih.

c. Dukungan *Software* dan Ekosistem

Sebuah platform teknologi lebih dari sekadar alat; ia adalah sebuah ekosistem. Dukungan yang kuat dapat secara dramatis mempercepat pengembangan dan mempermudah pemecahan masalah.

1) Dokumentasi dan Komunitas

Apakah platform memiliki dokumentasi yang lengkap, tutorial yang mudah diakses, dan forum komunitas yang aktif? Platform besar seperti Unity memiliki sumber daya belajar dan komunitas yang sangat luas.

2) Asset Store (Toko Aset)

Apakah platform memiliki pasar digital di mana pengembang dapat membeli atau mengunduh model 3D, skrip, atau plugin yang sudah jadi? Ini dapat menghemat ratusan jam kerja pengembangan.

3) Stabilitas dan Pembaruan

Seberapa sering platform diperbarui untuk mendukung versi sistem operasi dan fitur perangkat keras terbaru? Platform yang didukung secara aktif oleh pengembangnya akan lebih berkelanjutan dalam jangka panjang.

d. Biaya Lisensi dan Model Bisnis

Anggaran adalah realitas yang tidak dapat dihindari. Model penetapan harga setiap platform sangat bervariasi dan harus dianalisis dengan cermat.

- 1) Model Berlangganan (Subscription) umumnya digunakan oleh platform no-code/low-code. Biaya dibayarkan secara bulanan atau tahunan, sering kali per pengguna (per seat) atau per jumlah tayangan (views).
- 2) Model Freemium atau Berbasis Pendapatan engine seperti Unity dan Unreal pada dasarnya gratis untuk digunakan dalam proyek pendidikan dan proyek dengan pendapatan di bawah ambang batas tertentu. Ini membuat mereka sangat menarik untuk institusi pendidikan.
- 3) Biaya Per Proyek atau Lisensi Khusus beberapa platform mungkin memerlukan negosiasi biaya lisensi untuk penggunaan komersial atau skala besar.

Seperti yang dijelaskan dalam literatur teknis, kemampuan inti dari sebuah sistem AR seperti metode pelacakan (tracking), proses *rendering*, dan cara ia menangani interaksi sangat ditentukan oleh perangkat lunak dan perangkat keras yang mendasarinya (Schmalstieg and Höllerer 2017). Oleh karena itu, pemilihan platform adalah keputusan teknis mendasar yang akan menetapkan batas atas dari apa yang mungkin dicapai oleh media pembelajaran Anda.

2. Pilihan Teknologi

Setelah memilih platform pengembangan (misalnya, Unity), langkah teknis selanjutnya adalah memilih teknologi atau *Software Development Kit* (SDK) spesifik yang akan menjadi "mesin"

untuk fungsi AR. Teknologi ini bertanggung jawab atas tugas paling fundamental dalam AR: melacak posisi dan orientasi perangkat di dunia nyata untuk menempatkan objek virtual secara akurat. Pilihan teknologi akan sangat menentukan jenis interaksi yang mungkin dilakukan. Berikut adalah tiga pendekatan teknologi utama yang umum digunakan.

a. AR Mobile Tanpa Penanda (*Markerless*): *ARKit* dan *ARCore*

Ini adalah teknologi dominan yang digunakan di smartphone modern. AR tanpa penanda tidak memerlukan gambar pemicu khusus. Sebaliknya, ia menggunakan serangkaian algoritma kompleks yang disebut SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Secara sederhana, SLAM memungkinkan perangkat untuk:

- 1) Memetakan Lingkungan Menggunakan kamera untuk mengidentifikasi titik-titik fitur yang unik (seperti sudut meja atau pola di lantai) untuk membangun pemahaman geometris tentang ruangan.
- 2) Melacak Gerakan Menggunakan sensor gerak (akselerometer dan giroskop) untuk melacak posisi dan orientasi perangkat di dalam peta yang baru dibuat tersebut.

Hasilnya, perangkat dapat mendeteksi permukaan datar seperti lantai atau meja dan "menjangkarkan" objek virtual di atasnya. Objek tersebut akan tetap stabil di posisinya meskipun pengguna berjalan mengelilinginya.

SDK Utama dapat berupa *ARKit* dari Apple untuk perangkat *iOS* dan *ARCore* dari Google untuk perangkat *Android*. Platform seperti Unity AR Foundation menyediakan lapisan abstraksi sehingga developer dapat membangun satu aplikasi yang bekerja di keduanya.

1) Kelebihan

- a) Imersif dan Kontekstual Memberikan kebebasan penuh untuk menempatkan objek virtual di mana saja di lingkungan nyata siswa, menciptakan pengalaman yang sangat realistis.

- b) Interaksi Alami Siswa dapat bergerak bebas di sekitar objek virtual, mendorong eksplorasi kinestetik.
 - c) Fitur Canggih: Mendukung deteksi bidang vertikal dan horizontal, estimasi pencahayaan (membuat objek virtual tampak menyatu dengan pencahayaan nyata), dan pelacakan gambar.
- 2) Kekurangan
 - a) Ketergantungan Perangkat

Membutuhkan smartphone atau tablet modern dengan prosesor yang kuat dan sensor yang memadai. Perangkat lama atau kelas bawah mungkin tidak kompatibel.
 - b) Sensitif terhadap Lingkungan

Kinerjanya dapat menurun di ruangan yang terlalu gelap, terlalu terang, atau pada permukaan yang tidak memiliki tekstur (misalnya, dinding putih polos).
- b. AR Berbasis Penanda (*Marker-Based*): Contoh Utama Vuforia

Ini adalah salah satu bentuk AR yang paling awal dan matang. Cara kerjanya adalah dengan "melatih" aplikasi untuk mengenali sebuah gambar spesifik yang disebut penanda (marker). Ketika kamera perangkat mendeteksi penanda ini, ia akan langsung mengenali pola uniknya dan menggunakan informasi tersebut untuk menghitung posisi dan orientasi kamera. Konten virtual kemudian ditampilkan persis di atas penanda tersebut.

 - 1) SDK Utama Vuforia adalah SDK yang paling populer dan kuat untuk AR berbasis penanda. Ia dapat digunakan sebagai plugin di dalam Unity atau engine lainnya.
 - 2) Kelebihan
 - a) Sangat Stabil dan Presisi

Pelacakan sangat akurat dan andal selama penanda terlihat jelas oleh kamera.

b) Dukungan Perangkat Luas

Secara komputasi lebih ringan daripada AR tanpa penanda, sehingga dapat berjalan dengan baik di berbagai jenis perangkat, termasuk yang lebih lama.

c) Pemicu Konten yang Jelas

Sempurna untuk "menghidupkan" media cetak. Misalnya, mengarahkan kamera ke diagram jantung di buku teks (penanda) untuk memunculkan model 3D-nya.

3) Kekurangan

a) Terikat pada Penanda

Pengalaman AR sepenuhnya bergantung pada penanda. Jika penanda keluar dari pandangan kamera, objek virtual akan hilang. Ini membatasi kebebasan eksplorasi.

b) Membutuhkan Media Fisik

Pengguna harus memiliki akses ke penanda fisik (dicetak atau pada layar lain), yang bisa menjadi tantangan logistik.

c. AR Berbasis Web (WebAR)

WebAR bukanlah satu teknologi tunggal, melainkan sebuah pendekatan untuk menyajikan pengalaman AR langsung melalui peramban web (browser) di smartphone, menghilangkan kebutuhan untuk menginstal aplikasi.

- 1) Cara kerja menggunakan standar web seperti WebXR Device API dan pustaka JavaScript untuk mengakses kamera dan sensor perangkat. WebAR dapat diimplementasikan baik secara berbasis penanda (menggunakan pustaka open-source seperti AR.js) maupun tanpa penanda (menggunakan platform komersial canggih seperti 8th Wall yang memiliki teknologi SLAM-nya sendiri).

2) Kelebihan

- a) Aksesibilitas Instan: Ini adalah keunggulan terbesarnya. Tidak perlu mengunduh apa pun. Cukup pindai kode QR atau klik sebuah tautan untuk memulai pengalaman.
- b) Lintas Platform Sejati: Bekerja di hampir semua smartphone modern dengan browser yang mendukung, baik itu *iOS* maupun *Android*.
- c) Pembaruan Mudah: Konten dapat diperbarui di server web, dan semua pengguna akan langsung mendapatkan versi terbaru.

3) Kekurangan

- a) Keterbatasan Kinerja: Umumnya, kinerja (kehalusan dan kecepatan) tidak sebanding dengan aplikasi native.
- b) Ketergantungan Jaringan: Biasanya memerlukan koneksi internet untuk memuat dan menjalankan pengalaman.
- c) Fitur Lebih Terbatas: Mungkin tidak mendukung fitur-fitur AR paling canggih yang tersedia di *ARKit/ARCore*.

Tinjauan komprehensif tentang teknologi AR menyoroti bahwa pilihan antara paradigma pelacakan yang berbeda (misalnya, berbasis penanda vs. berbasis sensor/SLAM) adalah keputusan desain fundamental yang menentukan sifat interaksi dan aplikasi yang mungkin (Shoaib and Jaffry 2015).

3. Pertimbangan Teknis

Setelah memilih platform dan teknologi, perancang harus menetapkan serangkaian spesifikasi teknis minimum yang menjadi standar acuan. Tahap ini krusial untuk menjembatani kesenjangan antara potensi teknologi dan realitas perangkat yang dimiliki siswa. Mendefinisikan pertimbangan teknis secara jelas di awal akan memastikan bahwa pengalaman *Augmented Reality* (AR) yang dirancang tidak hanya inovatif, tetapi juga dapat diakses, berjalan dengan lancar, dan memberikan pengalaman yang konsisten bagi seluruh pengguna. Mengabaikan hal ini dapat mengakibatkan frustrasi, masalah teknis, dan isu ekuitas di mana hanya siswa dengan perangkat paling canggih yang dapat menikmati pengalaman belajar secara penuh.

a. Spesifikasi Minimum Perangkat

Ini adalah daftar persyaratan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) paling dasar yang harus dipenuhi oleh perangkat siswa agar dapat menjalankan aplikasi AR dengan baik. Menetapkan standar ini di awal akan memandu proses pengembangan dan pengujian.

1) Sistem Operasi (OS)

Setiap SDK AR (seperti *ARKit* dan *ARCore*) memiliki persyaratan versi OS minimum. Sangat penting untuk menentukannya secara eksplisit, misalnya: "Membutuhkan *iOS* 13.0 atau lebih baru" atau "Membutuhkan *Android* 8.0 (Oreo) atau lebih baru". Ini adalah filter pertama untuk kompatibilitas.

2) Prosesor (CPU) dan RAM: AR, terutama pelacakan tanpa penanda (*markerless*), adalah proses yang sangat intensif.

a) CPU Meskipun sulit untuk menentukan model CPU spesifik, panduan umumnya adalah perangkat harus secara resmi mendukung *ARKit* atau *ARCore*. Perangkat kelas bawah (entry-level) atau yang berusia lebih dari 4-5 tahun kemungkinan besar akan kesulitan.

b) RAM Ini adalah salah satu faktor paling kritis. Model 3D dan tekstur beresolusi tinggi memakan banyak RAM. Kekurangan RAM akan menyebabkan aplikasi berjalan lambat, macet (lag), atau bahkan mogok (crash). Minimum 3 GB RAM sering dianggap sebagai standar aman, dengan 4 GB RAM atau lebih direkomendasikan untuk pengalaman yang lancar.

Sensor merupakan perangkat wajib memiliki sensor standar seperti akselerometer dan giroskop untuk pelacakan gerak dasar. Kamera dengan kualitas yang layak juga sangat penting untuk pelacakan visual yang andal.

b. Kapasitas Penyimpanan (*Storage Capacity*)

Aplikasi AR bisa berukuran sangat besar, terutama jika memuat banyak *aset 3D* berkualitas tinggi. Ini menjadi masalah serius bagi siswa yang perangkatnya memiliki kapasitas penyimpanan terbatas.

- 1) Ukuran Aplikasi merupakan ukuran total aplikasi saat diunduh dari app store harus dioptimalkan sekecil mungkin. Ukuran di atas 100-150 MB sering kali menjadi penghalang bagi pengguna untuk menginstalnya.
- 2) Optimisasi Aset ialah pengembang harus secara agresif mengoptimalkan semua aset. Ini termasuk mengurangi jumlah *poligon* pada model 3D, mengompres tekstur, dan menggunakan format audio yang efisien.
- 3) Strategi Pengunduhan Konten ialah untuk aplikasi dengan banyak konten, strategi yang baik adalah pengunduhan sesuai permintaan (*on-demand downloading*). Aplikasi awal yang diunduh berukuran kecil, dan konten (seperti model 3D untuk bab tertentu) baru diunduh dari server saat pengguna akan mengaksesnya. Namun, strategi ini memerlukan koneksi internet yang stabil.

c. Kemampuan Grafis (*Graphics Capabilities*)

Kemampuan grafis perangkat, yang ditentukan oleh GPU (*Graphics Processing Unit*), secara langsung memengaruhi kualitas visual dan kehalusan pengalaman AR.

1) Frame Rate (FPS)

Ini adalah ukuran seberapa halus gambar bergerak di layar, diukur dalam frame per detik. Angka di bawah 30 FPS akan membuat pengalaman terasa patah-patah dan tidak responsif, yang dapat mengganggu imersi dan bahkan menyebabkan pusing. Target ideal adalah 60 FPS, dengan 30 FPS sebagai batas minimum yang dapat diterima.

2) Kompleksitas Visual

Jumlah *poligon* pada model 3D, resolusi tekstur, efek pencahayaan, dan bayangan semuanya membebani GPU. Sebuah model tunggal yang sangat detail mungkin berjalan dengan baik, tetapi menampilkan beberapa model kompleks secara bersamaan dapat menyebabkan penurunan frame rate yang drastis pada perangkat kelas menengah.

3) Skalabilitas Grafis

Praktik terbaik adalah mengimplementasikan pengaturan kualitas grafis (misalnya: Rendah, Sedang, Tinggi) di dalam aplikasi. Ini memungkinkan pengguna dengan perangkat kelas atas untuk menikmati visual terbaik, sementara pengguna dengan perangkat spesifikasi lebih rendah dapat menurunkan kualitas grafis untuk mencapai frame rate yang lancar.

Berbagai penelitian telah mengidentifikasi bahwa masalah teknis termasuk ketidakcocokan perangkat, kinerja yang buruk, dan masalah usability adalah salah satu tantangan paling signifikan dalam implementasi AR di lingkungan pendidikan (Akçayır and Akçayır 2016). Oleh karena itu, mengatasi pertimbangan teknis ini secara proaktif selama fase desain adalah langkah esensial untuk memastikan keberhasilan proyek.

D. Perancangan *Storyboard* Dan Skenario AR

Setelah fondasi pedagogis (tujuan pembelajaran) dan fondasi teknis (platform) ditetapkan, proses perancangan beralih dari yang abstrak ke yang konkret. Kita harus mulai memvisualisasikan bagaimana sebenarnya pengalaman belajar itu akan dirasakan oleh siswa. Di sinilah *storyboard* dan skenario memainkan peran vital. Sebuah *storyboard* adalah cetak biru visual yang menerjemahkan tujuan pembelajaran yang kaku menjadi sebuah alur cerita dan rangkaian pengalaman interaktif yang mengalir.

Pentingnya *storyboard* menjadi berlipat ganda dalam konteks media interaktif seperti *Augmented Reality* (AR), yang sifatnya sangat

berbeda dari media linier seperti video atau buku teks. Dalam AR, siswa adalah partisipan aktif, bukan penonton pasif; mereka memiliki kendali untuk bergerak, menjelajah, dan berinteraksi. Oleh karena itu, *storyboard* AR tidak hanya merinci apa yang akan dilihat siswa, tetapi juga meramalkan apa yang akan dilakukan siswa dan bagaimana aplikasi akan merespons setiap tindakan tersebut, termasuk di mana objek virtual akan muncul, tombol apa yang tersedia, dan umpan balik apa yang akan diberikan.

Storyboard berfungsi sebagai alat komunikasi esensial yang menyatukan visi antara para ahli materi (pendidik), perancang pengalaman pengguna (desainer UX), dan pengembang (programer). Ia adalah cara termurah dan tercepat untuk menguji alur pembelajaran, menemukan potensi kebingungan navigasi, dan memastikan bahwa setiap interaksi memiliki tujuan pedagogis yang jelas sebelum satu baris kode pun ditulis. Sub-bab ini akan menguraikan langkah-langkah dalam membuat skenario dan *storyboard* yang efektif untuk pengalaman belajar AR.

1. Pembuatan *Storyboard*

Pembuatan *storyboard* adalah proses di mana skenario yang masih bersifat naratif diterjemahkan ke dalam serangkaian panel visual yang konkret. Ini adalah langkah krusial yang memaksa perancang untuk berpikir secara mendetail, adegan demi adegan, tentang bagaimana siswa akan berinteraksi dengan media AR. *Storyboard* bukanlah karya seni; ia adalah alat komunikasi teknis. Fokusnya bukan pada keindahan gambar, melainkan pada kejelasan alur, interaksi, dan transisi.

a. Visualisasi Adegan

Setiap panel dalam *storyboard* mewakili satu "momen" kunci dalam pengalaman AR. Visualisasi adegan harus menjawab pertanyaan: Apa yang dilihat siswa di layar pada saat ini? Setiap panel sketsa (bahkan jika hanya goresan sederhana) harus mencakup tiga elemen utama:

- 1) Lingkungan Nyata: Latar belakang yang dilihat melalui kamera (misalnya, meja laboratorium, halaman buku, atau lantai ruangan).
- 2) Antarmuka Pengguna (UI): Semua elemen 2D yang menempel di layar, seperti tombol ("Lanjut," "Info," "Putar"), teks instruksi, atau bilah kemajuan.
- 3) Objek AR: Representasi dari konten virtual (misalnya, model 3D jantung, animasi planet) dan di mana posisinya relatif terhadap lingkungan nyata atau penanda.

Visualisasi ini membantu seluruh tim pendidik, desainer, dan programmer memiliki pemahaman yang sama tentang tampilan dan nuansa aplikasi sebelum masuk ke produksi *aset 3D* yang mahal.

b. Merancang Interaksi Pengguna

Ini adalah elemen yang membedakan *storyboard* AR dari *storyboard* film. Karena AR bersifat interaktif, setiap panel harus secara eksplisit mendefinisikan siklus Aksi-Reaksi:

- 1) Aksi Pengguna (Input): Apa yang harus dilakukan siswa untuk melanjutkan atau memicu sebuah peristiwa? Ini harus didefinisikan dengan jelas. Contoh aksinya bisa berupa:
 - a) Mengetuk (tap) objek 3D tertentu.
 - b) Mengarahkan kamera untuk memindai penanda baru.
 - c) Berjalan mendekati objek virtual.
 - d) Menekan tombol UI di layar.
- 2) Reaksi Sistem (Output): Apa respons aplikasi terhadap aksi pengguna tersebut? Setiap aksi harus memiliki reaksi yang jelas, misalnya:
 - a) Memainkan animasi (misalnya, jantung mulai berdetak).
 - b) Memunculkan label teks atau narasi audio.
 - c) Objek 3D berubah (misalnya, "terbuka" untuk menunjukkan bagian dalam).
 - d) Transisi ke adegan atau langkah berikutnya.

Merinci siklus interaksi ini dalam *storyboard* memastikan bahwa pengalaman pengguna intuitif dan setiap tindakan memiliki umpan balik yang logis.

c. Urutan Aktivitas Pembelajaran

Urutan panel-panel *storyboard* bukanlah urutan yang acak, melainkan representasi visual dari rencana pelaksanaan pembelajaran (RPP) itu sendiri. Alur *storyboard* harus secara langsung mencerminkan urutan Tujuan Pembelajaran Khusus (TPK) yang telah dirancang.

1) Alur Linier vs. Bercabang

Storyboard harus menentukan apakah alurnya linier (siswa dipandu langkah demi langkah: 1 → 2 → 3), yang cocok untuk tutorial prosedural. Atau, apakah alurnya bercabang (branching), di mana siswa dapat memilih jalur eksplorasi mereka sendiri (misalnya, dari menu utama, siswa bisa memilih untuk menjelajahi "Sistem Peredaran Darah" atau "Sistem Pernapasan").

2) Koneksi ke Pedagogi

Urutan ini memastikan bahwa siswa menerima informasi pada waktu yang tepat. Misalnya, panel *storyboard* tidak akan menampilkan kuis (asesmen) sebelum panel-panel yang menyajikan materi inti. Penelitian tentang desain simulasi AR yang imersif menekankan pentingnya merancang narasi, aturan interaksi, dan peran pengguna secara cermat untuk mencapai tujuan pedagogis (Dede and Mitchell 2009). Semua elemen narasi dan aturan ini pertama kali ditetapkan dan divisualisasikan dalam *storyboard*.

2. Skenario Pembelajaran

Jika *storyboard* adalah kumpulan panel visual statis, maka skenario pembelajaran adalah naskah naratif dinamis yang menghidupkan panel-panel tersebut. Skenario adalah "cerita" pengalaman belajar dari perspektif siswa, yang menguraikan seluruh perjalanan pedagogis secara rinci. Ia menetapkan konteks,

mendefinisikan masalah, memandu alur, dan secara eksplisit merinci setiap interaksi yang diharapkan. Perancangan skenario yang kuat memastikan bahwa pengalaman AR bukan hanya sekumpulan interaksi acak, melainkan sebuah alur pembelajaran yang koheren dan memiliki tujuan yang jelas.

a. Menetapkan Situasi Pembelajaran (Konteks)

Skenario pembelajaran yang efektif tidak terjadi di ruang hampa; ia harus kontekstual dan situasional. Bagian pertama dari perancangan skenario adalah "mengatur panggung" (setting the stage) untuk pembelajaran. Ini melibatkan pendefinisian:

1) Konteks Fisik dan Sosial

Di mana pengalaman AR ini akan berlangsung? Apakah di ruang kelas yang sunyi, laboratorium yang sibuk, di luar ruangan saat kunjungan lapangan, atau di rumah sebagai pekerjaan rumah? Apakah siswa akan bekerja secara individu atau secara kolaboratif dalam kelompok? Jawaban ini secara fundamental akan mengubah desain.

2) Peran dan Motivasi (Kait Pemicu)

Skenario yang kuat sering kali menempatkan siswa dalam sebuah peran atau menyajikan mereka dengan sebuah masalah. Daripada instruksi pasif ("Lihatlah model jantung ini"), skenario yang baik bersifat aktif:

"Skenario: Anda adalah seorang dokter muda di unit gawat darurat. Seorang pasien datang dengan gejala X dan Y. Gunakan alat pemindai AR Anda untuk memeriksa model jantung virtual ini, temukan anomali pada katupnya, dan ajukan diagnosis."

Situasi ini secara instan memberikan tujuan, peran, dan motivasi intrinsik kepada siswa, mengubah tugas dari "mengingat" menjadi "menganalisis".

b. Penjelasan Langkah-demi-Langkah Penggunaan

Ini adalah inti naratif dari skenario, yang merinci alur ideal atau "jalur emas" (golden path) yang akan diambil siswa dari awal hingga akhir. Skenario ini harus mencakup keseluruhan siklus aktivitas belajar (Pre-Aktivitas, Selama Aktivitas, Post-Aktivitas).

- 1) Pra-Aktivitas yaitu skenario dimulai sebelum perangkat menyala. Apa yang dilakukan guru? (Misalnya: "Guru membagi siswa ke dalam kelompok 4 orang dan membagikan lembar kerja yang berisi studi kasus pasien").
- 2) Selama Aktivitas (Inti AR) ini adalah alur langkah-demi-langkah penggunaan aplikasi yang terhubung langsung dengan *storyboard*.
 - a) "Siswa meluncurkan aplikasi AR dan mengarahkannya ke penanda di meja untuk memuat model jantung."
 - b) "Siswa mengetuk tombol 'Info Gejala' untuk mendengarkan audio keluhan pasien."
 - c) "Siswa menggunakan tombol 'Aliran Darah' untuk memvisualisasikan simulasi darah yang mengalir."
 - d) "Mereka melihat adanya aliran balik (regurgitasi) di katup mitral dan menggunakan alat 'Diagnosis' untuk memilih 'Prolaps Katup Mitral'."

Pasca-Aktivitas: Apa yang terjadi setelah aplikasi ditutup? Skenario harus mencakup kesimpulan. (Misalnya: "Setiap kelompok menuliskan temuan diagnosis mereka di lembar kerja dan mempresentasikannya di depan kelas").

c. Mendefinisikan Interaksi Siswa

Bagian ini menguraikan secara rinci sifat dari interaksi yang terjadi, bukan hanya urutannya. Ini memastikan bahwa desain tersebut secara sadar mendukung pedagogi yang diinginkan (misalnya, *konstruktivisme* atau pembelajaran kolaboratif).

1) Interaksi Siswa-Konten

Apakah interaksinya pasif (hanya melihat dan mendengarkan) atau aktif? Skenario harus merinci interaksi aktif: "Siswa akan memutar model 360 derajat, menggunakan slider untuk mempercepat atau memperlambat simulasi aliran darah, dan membongkar pasang lapisan jantung secara virtual."

2) Interaksi Siswa-Siswa (jika kolaboratif)

Jika skenario dirancang untuk kelompok, bagaimana mereka akan berinteraksi? "Satu siswa (Pemegang Perangkat) akan mengarahkan tablet, sementara dua siswa lainnya (Analisis) memegang lembar kerja dan memberikan instruksi kepada pemegang perangkat tentang apa yang harus dilihat." Ini adalah interaksi yang dirancang, bukan kebetulan.

3) Interaksi Siswa-Guru

Apa peran guru selama skenario berlangsung? Skenario harus mendefinisikannya. "Guru tidak memberikan jawaban, tetapi berkeliling sebagai fasilitator, mengajukan pertanyaan pemantik seperti, 'Apa yang Anda lihat terjadi pada katup itu?' atau 'Bagaimana hal itu menjelaskan gejala yang Anda dengar?'"

Perancangan skenario pembelajaran yang terstruktur ini sangat fundamental sehingga penelitian mulai berfokus pada penciptaan perangkat lunak khusus (authoring tools) yang memungkinkan para pendidik bahkan yang tidak memiliki latar belakang teknis untuk membangun skenario AR yang kaya konteks dan terstruktur secara pedagogis (Rajput 2024). Ini membuktikan bahwa skenario (narasi pembelajaran) sama pentingnya dengan *aset 3D* itu sendiri.

3. Contoh Ilustratif

Contoh Ilustratif: *Storyboard* Model Pendamping Buku Teks (AR-Book) untuk Perangkat Keras Komputer. Contoh ini

menguraikan *storyboard* yang mengikuti alur di mana aplikasi AR berfungsi sebagai pendamping media pembelajaran utama (seperti buku modul atau halaman web), menggunakan teknologi AR berbasis penanda (*marker-based*).

Panel 1: Inisiasi dan Pemilihan Materi

- a. Visualisasi Adegan: Aplikasi terbuka. Pengguna disajikan dengan halaman Menu Utama. Layar ini menampilkan antarmuka pengguna (UI) yang bersih dengan beberapa tombol kategori yang mewakili bab-bab dalam buku, seperti: "1. Pengantar Komputer", "2. Perangkat Keras", "3. Perangkat Lunak".
- b. Aksi Pengguna: Siswa telah membaca bab 2 di buku modulnya dan kini mengetuk tombol menu "2. Perangkat Keras" di aplikasi.
- c. Reaksi Sistem / Info Pedagogis: Aplikasi bertransisi ke layar berikutnya (Panel 2). Alur ini menciptakan navigasi yang terstruktur dan mencerminkan daftar isi buku, memperkuat struktur kurikulum yang ada.

Panel 2: Halaman Materi (Pusat Informasi)

- a. Visualisasi Adegan: Layar "Perangkat Keras" muncul. Halaman ini berisi submenu atau daftar komponen (misalnya: "Motherboard", "CPU", "RAM"). Ketika siswa memilih "RAM", layar menampilkan gambar 2D dari RAM, diikuti oleh deskripsi teks mendalam tentang fungsi, jenis, dan cara kerjanya. Di bagian bawah deskripsi teks, terdapat satu tombol aksi (CTA) yang menonjol dengan ikon kamera, berlabel "Pindai Model 3D".
- b. Aksi Pengguna: Setelah membaca teks informasi, siswa mengetuk tombol "Pindai Model 3D" untuk memvisualisasikan apa yang baru saja mereka baca.
- c. Reaksi Sistem / Info Pedagogis: Aplikasi menutup halaman teks dan mengaktifkan antarmuka kamera (Panel 3). Ini adalah jembatan pedagogis yang krusial, menghubungkan pengetahuan teoretis (diperoleh dari membaca) langsung ke eksplorasi visual interaktif.

Panel 3: Pemindaian Penanda dan Deteksi Objek

- a. Visualisasi Adegan: Tampilan kamera pass-through aktif. Sebuah animasi overlay muncul di layar (misalnya, bingkai kotak atau panah) yang memberi instruksi kepada pengguna: "Arahkan kamera ke gambar 'Penanda RAM' di buku modul Anda."
- b. Aksi Pengguna: Siswa menemukan gambar penanda khusus (misalnya, ilustrasi RAM sederhana dengan bingkai unik) di buku modul mereka dan mengarahkan kamera perangkat ke gambar tersebut.
- c. Reaksi Sistem / Info Pedagogis: Aplikasi (yang didukung teknologi seperti Vuforia) mengenali pola unik penanda tersebut. Animasi pemindaian menghilang, dan secara instan, model 3D dari stik RAM muncul dan "terkunci" secara virtual di atas gambar di buku tersebut. Objek 3D tampak seolah-olah keluar dari halaman buku.

Panel 4: Interaksi Objek 3D (Eksplorasi)

- a. Visualisasi Adegan: Model 3D RAM kini berada di layar, tertanam di atas video dunia nyata. Di sudut layar, sebuah jendela teks kecil muncul dengan poin-poin penjelasan singkat (misalnya, "Lihat pin konektor emas" atau "Ini adalah chip memori"). UI gestur sederhana (seperti ikon putar atau cubit) mungkin ditampilkan sesaat untuk memberi petunjuk kepada pengguna.
- b. Aksi Pengguna:
 - 1) Siswa menggunakan gestur satu jari (geser) pada layar untuk memutar model RAM 360 derajat pada porosnya.
 - 2) Siswa menggunakan gestur dua jari (mencubit/merenggangkan) untuk memperbesar dan melihat detail chip memori dan pin konektor.

Reaksi Sistem / Info Pedagogis: Model 3D merespons secara real-time terhadap input gestur pengguna, memungkinkan eksplorasi visual yang mendetail. Ini melayani pembelajar visual dan kinestetik. Model "AR-Book" seperti ini telah terbukti sangat efektif dalam bidang-bidang seperti kedokteran; penelitian telah

menunjukkan bahwa penggunaan buku teks anatomi yang dilengkapi dengan model AR interaktif seperti ini secara signifikan meningkatkan hasil belajar siswa dibandingkan dengan menggunakan buku teks saja (Norgaard et al. 2018).

E. Penyiapan Materi (3D Model, Audio, Teks, Animasi)

Jika *storyboard* dan skenario adalah cetak biru arsitektural dari sebuah media pembelajaran AR, maka materi konten *aset digital* seperti model 3D, klip audio, teks, dan animasi adalah material bangunan esensial yang akan mewujudkan visi tersebut. Kualitas, akurasi, dan desain pedagogis dari setiap aset inilah yang pada akhirnya akan menentukan seberapa meyakinkan, efektif, dan mendalamnya pengalaman belajar yang dirasakan oleh siswa.

Peran utama dari materi konten ini adalah untuk menghadirkan tingkat realisme dan interaktivitas yang tidak mungkin dicapai oleh media pembelajaran tradisional. Sebuah model 3D fotorealistis dari artefak sejarah atau anatomi jantung memberikan pemahaman spasial dan konkret yang jauh melampaui gambar 2D di buku teks. Realisme ini diperkuat oleh audio narasi yang jernih dan efek suara yang kontekstual. Lebih lanjut, aset-aset inilah yang menjadi fondasi dari interaktivitas; model 3D adalah objek yang akan dimanipulasi siswa, animasi adalah umpan balik visual terhadap tindakan mereka, dan teks adalah panduan yang menyertai eksplorasi mereka.

Oleh karena itu, penyiapan materi bukanlah sekadar langkah teknis mengumpulkan file, melainkan bagian integral dari proses desain instruksional. Setiap aset harus dibuat atau dipilih secara sengaja untuk melayani tujuan pembelajaran, sekaligus dioptimalkan secara teknis agar dapat berjalan lancar di perangkat target. Sub-bab ini akan membahas pertimbangan utama dan praktik terbaik dalam merancang, memperoleh, dan mengoptimalkan setiap jenis aset konten yang krusial untuk membangun pengalaman pembelajaran AR yang berkualitas tinggi.

1. Objek 3D

Objek 3D adalah inti dari hampir semua pengalaman pembelajaran berbasis *Augmented Reality*. Ini adalah aset visual

utama yang akan dilihat, dijelajahi, dan dimanipulasi oleh siswa. Namun, berbeda dengan model 3D yang digunakan dalam film animasi atau video game kelas atas, model 3D untuk AR seluler (mobile AR) memiliki satu tantangan utama: mereka harus mencapai keseimbangan sempurna antara fidelitas visual (realisme) dan optimasi kinerja (performa). Model yang terlalu kompleks akan membuat aplikasi berjalan patah-patah atau bahkan mogok di perangkat siswa. Oleh karena itu, persiapan objek 3D adalah proses teknis dan artistik yang cermat.

a. Pembuatan Model dan Optimasi *Poligon*

Sebuah model 3D pada dasarnya adalah "jaring" digital yang terbuat dari ribuan (atau jutaan) titik dan permukaan datar kecil yang disebut *poligon*. Semakin banyak *poligon*, semakin detail model tersebut, tetapi semakin berat pula beban kerja untuk perangkat (khususnya GPU) dalam menampilkannya.

1) Akuisisi Model

Model dapat diperoleh dengan dua cara: (1) Membuat dari awal menggunakan perangkat lunak seperti Blender, 3ds Max, atau Maya, yang memberikan kontrol penuh atas akurasi pedagogis; atau (2) Mengakuisisi dari marketplace online seperti Sketchfab atau TurboSquid, yang lebih cepat tetapi mungkin memerlukan optimasi berat.

2) Optimasi *Poligon* (*Budget Poligon*)

Ini adalah langkah wajib. Model "berkualitas film" mungkin memiliki jutaan *poligon* (*high-poly*), yang tidak mungkin dijalankan di ponsel. Untuk AR seluler, model harus dioptimalkan menjadi model *low-poly* (misalnya, antara 5.000 hingga 50.000 *poligon*, tergantung target). Proses ini (disebut retopology) bertujuan mempertahankan siluet dan bentuk kunci model sambil mengurangi jumlah *poligon* secara drastis. Setiap proyek AR harus menetapkan "budget *poligon*" yang ketat berdasarkan spesifikasi perangkat target.

b. Tekstur dan Material (*Texturing*)

Jika model *low-poly* adalah patung tanpa detail, maka tekstur adalah cat yang membuatnya tampak hidup dan realistis. Tekstur adalah gambar 2D datar yang "dibungkus" di sekeliling model 3D untuk memberikan warna, pola, dan ilusi detail permukaan.

1) Fidelitas vs. Ukuran File

Tekstur sering kali menjadi komponen yang memakan ruang penyimpanan terbesar dalam sebuah aplikasi AR. Tekstur beresolusi sangat tinggi (misalnya 4K atau 8K) akan terlihat tajam, tetapi akan menghabiskan banyak RAM dan memperlambat aplikasi. Resolusi tekstur harus dioptimalkan (misalnya, 1K atau 2K) agar tetap terlihat bagus tanpa membebani perangkat.

2) Memalsukan Detail dengan Normal Maps

Teknik terpenting dalam *texturing* AR adalah menggunakan Normal Map. Ini adalah jenis tekstur khusus yang "menipu" mesin pencahayaan untuk membuat model *low-poly* yang datar terlihat sangat detail seolah-olah memiliki tonjolan, sekrup, retakan, atau guratan tanpa menambahkan satu *poligon* pun. Ini adalah kunci utama untuk mencapai visual yang realistis pada model yang sangat optimal.

c. Skala Objek (*Object Scale*)

Skala mengacu pada seberapa besar objek 3D akan muncul di dunia nyata. Ini bukan keputusan teknis semata, melainkan keputusan pedagogis yang fundamental.

1) Skala 1:1 (Ukuran Sebenarnya)

Objek AR ditampilkan dalam ukuran aslinya. Misalnya, siswa dapat menempatkan model paus biru seukuran aslinya di lapangan sekolah atau menempatkan mesin mobil seukuran aslinya di garasi. Pendekatan ini sangat kuat untuk

memberikan pemahaman tentang konteks, ukuran, dan dampak fisik suatu objek.

2) Skala Miniatur (Table-Top)

Objek diperkecil agar pas diletakkan di atas meja. Ini ideal untuk konsep yang terlalu besar (seperti sistem tata surya) atau terlalu kecil (seperti struktur molekul). Skala miniatur memungkinkan siswa untuk melihat keseluruhan sistem dan hubungan antar bagian dari perspektif "mata dewa".

d. Orientasi Objek dan Titik Pivot

Ini adalah detail teknis kecil yang sering diabaikan namun memiliki dampak besar pada pengalaman pengguna (UX).

1) Orientasi

Ketika siswa menempatkan model, apakah model itu akan muncul menghadap mereka, membelakangi mereka, atau terbalik? Model harus diekspor dari perangkat lunak 3D dengan orientasi "maju" yang konsisten (misalnya, selalu menghadap sumbu Z positif) sehingga selalu muncul dengan benar saat pertama kali ditempatkan.

2) Titik Pivot (Pivot Point)

Ini adalah titik pusat tak terlihat dari sebuah model. Ketika pengguna melakukan gestur rotasi (memutar) atau skala (memperbesar), semua transformasi terjadi mengelilingi titik pivot ini. Jika pivot ditempatkan salah (misalnya, di sudut model, bukan di tengah), model akan berputar secara liar di luar layar saat diputar. Pivot harus ditempatkan secara sengaja (biasanya di tengah-bawah model) untuk memastikan interaksi terasa intuitif dan stabil.

Keseluruhan alur kerja ini mulai dari pemodelan 3D, optimasi, hingga pemformatan file adalah jalur teknis yang penting. Penelitian yang berfokus pada pengembangan penampil model 3D untuk AR seluler menegaskan bahwa

proses optimasi aset (mengelola jumlah *poligon* dan ukuran tekstur) adalah langkah fundamental untuk mencapai *rendering* yang lancar secara real-time pada perangkat seluler yang memiliki keterbatasan sumber daya (Kirpes, Hu, and Sly 2022).

2. Audio dan Narasi

Meskipun *Augmented Reality* (AR) adalah media yang didominasi oleh visual, elemen audio termasuk narasi, instruksi, dan efek suara sering kali menjadi faktor pembeda antara pengalaman yang membingungkan dan pengalaman belajar yang efektif dan imersif. Audio berfungsi sebagai lapisan pemandu yang sangat penting, mengubah AR dari sekadar "pameran 3D" menjadi "tur berpemandu" yang interaktif. Peran pedagogis utamanya adalah untuk mengelola beban kognitif dengan memanfaatkan saluran pendengaran siswa, sehingga membebaskan saluran visual mereka untuk fokus penuh pada informasi grafis yang kompleks.

Pendekatan ini didukung secara kuat oleh Prinsip Modalitas (Modality Principle) dari Teori Pembelajaran Multimedia Richard Mayer. Prinsip ini menyatakan bahwa siswa belajar lebih mendalam dari grafik dan narasi (audio) daripada dari grafik dan teks di layar. Mengapa? Karena ketika siswa harus melihat model 3D yang rumit dan pada saat yang sama membaca teks penjelasan di layar, saluran visual mereka menjadi kelebihan beban (overload). Dengan memindahkan penjelasan ke format audio, beban kognitif didistribusikan secara efisien antara saluran visual (untuk memproses model AR) dan saluran auditori (untuk memproses penjelasan), sehingga pemahaman menjadi lebih efektif.

a. Narasi Penjelasan Konsep

Ini adalah penggunaan audio yang paling penting secara pedagogis. Narasi adalah suara (biasanya direkam sebelumnya) yang menjelaskan apa yang sedang dilihat oleh siswa.

1) Fungsi

Saat siswa mengamati model 3D jantung virtual, narasi dapat menjelaskan, "Ini adalah aorta, arteri terbesar dalam tubuh, yang berfungsi memompa darah kaya oksigen dari bilik kiri ke seluruh tubuh."

2) Implementasi

Narasi ini membebaskan mata siswa 100%. Mereka tidak perlu bolak-balik membaca teks lalu mencari bagian pada model. Mereka dapat sepenuhnya fokus menjelajahi model secara visual sementara penjelasannya masuk melalui telinga mereka. Ini sangat penting untuk konsep yang kompleks secara visual dan spasial.

b. Instruksi Verbal

Instruksi verbal adalah audio yang memberi tahu siswa apa yang harus dilakukan selanjutnya. Ini adalah panduan navigasi dan interaksi.

1) Fungsi

Daripada menampilkan teks "Sekarang, ketuk ikon 'Pindai' di sudut kanan atas," aplikasi dapat mengatakannya secara lisan. Ini secara drastis mengurangi beban kognitif asing (upaya yang diperlukan hanya untuk menggunakan aplikasi).

2) Implementasi

Ini sangat berguna dalam skenario prosedural, seperti simulasi perakitan: "Ambil baut virtual dan letakkan di lubang yang berkedip." Panduan auditori ini membuat interaksi terasa lebih alami dan mengurangi waktu yang dihabiskan siswa hanya untuk mencari tahu cara menggunakan aplikasi.

c. Efek Suara (SFX)

Efek suara adalah audio non-verbal singkat yang memberikan umpan balik dan meningkatkan realisme.

1) Fungsi Umpan Balik (Feedback)

Ini adalah fungsi krusial. Sebuah suara "klik" yang memuaskan dapat memberi konfirmasi bahwa komponen virtual telah terpasang dengan benar. Sebaliknya, suara "buzz" yang lembut dapat menandakan tindakan yang salah. Umpan balik auditori instan ini memperkuat siklus belajar coba-gagal (trial and error) dengan cara yang sangat efisien.

2) Fungsi Imersi dan Realisme

Efek suara membuat dunia virtual terasa lebih hidup. Mendengar detak jantung ritmis saat mengamati model jantung AR, atau suara mesin yang menderu saat melihat simulasi mesin, secara signifikan meningkatkan keterlibatan dan "rasa kehadiran" (sense of presence), membuat pengalaman belajar lebih berkesan.

Penelitian yang secara khusus berfokus pada penerapan prinsip-prinsip Mayer untuk pelatihan berbasis AR menegaskan bahwa penggunaan narasi audio secara sadar sejalan dengan Prinsip Modalitas adalah strategi desain inti untuk memastikan bahwa pengalaman AR dapat menyampaikan informasi kompleks tanpa membebani kapasitas kognitif pengguna (Mayer 2008).

3. Teks dan Informasi Tambahan

Meskipun prinsip multimedia menyarankan penggunaan narasi audio untuk penjelasan yang kompleks (seperti yang dibahas sebelumnya), teks tetap memainkan peran yang sangat penting dalam antarmuka *Augmented Reality* (AR). Kuncinya adalah menggunakan teks secara strategis dan minimalis. Teks dalam AR tidak boleh digunakan seperti paragraf dalam buku; ia harus berfungsi sebagai penanda, petunjuk singkat, atau informasi referensi cepat yang mendukung, bukan bersaing dengan, visual 3D yang kaya. Penggunaan teks yang berlebihan di layar akan

memaksa siswa untuk membagi perhatian mereka (efek split-attention), sehingga dapat membatalkan manfaat kognitif dari penggunaan AR itu sendiri.

a. Label (Penamaan Komponen)

Fungsi utama dan paling umum dari teks dalam AR adalah sebagai label. Label berfungsi untuk mengidentifikasi objek atau bagian-bagian spesifik dari sebuah model 3D (misalnya, "Aorta," "CPU," "Piston").

1) Desain

Tantangan desain terbesar pada label adalah keterbacaan dan kepadatan visual. Jika sebuah model (seperti *motherboard* komputer) memiliki 30 komponen kecil yang berdekatan, menampilkan semua 30 label sekaligus akan menciptakan "kekacauan label" (label clutter) yang mustahil untuk dibaca.

2) Praktik Terbaik

Solusi terbaik adalah pelabelan sesuai permintaan (on-demand labeling). Secara default, tidak ada label yang muncul. Hanya ketika siswa mengetuk bagian tertentu, label untuk bagian itu saja yang akan muncul. Atau, gunakan hotspot (ikon "+") yang dapat diketuk siswa untuk menampilkan label. Ini memberi siswa kendali dan menjaga antarmuka tetap bersih.

b. Deskripsi Singkat (Informasi Kontekstual)

Terkadang, siswa membutuhkan lebih dari sekadar label; mereka membutuhkan definisi atau penjelasan singkat. Di sinilah deskripsi digunakan, namun harus tunduk pada prinsip penyingkapan progresif (progressive disclosure).

1) Prinsip Desain

Jangan pernah menampilkan paragraf deskripsi yang panjang secara permanen di layar utama. Sebaliknya, tempatkan ikon "Info" (i) kecil di sebelah label.

2) Alur Interaksi

- a) Siswa mengetuk sebuah komponen (misalnya, "Piston").
- b) Label "Piston" muncul, bersama dengan ikon (i) kecil.
- c) Hanya jika siswa memilih untuk mengetuk ikon (i) tersebut, barulah sebuah jendela *pop-up* kecil muncul dengan deskripsi singkat (misalnya, "Piston: Komponen yang bergerak naik-turun di dalam silinder untuk mengompres campuran bahan bakar dan udara.").

3) Fungsi

Ini memberdayakan siswa untuk "menarik" (pull) informasi saat mereka membutuhkannya, alih-alih membanjiri mereka dengan informasi yang tidak diminta.

c. Indikator Interaktif (Petunjuk dan Umpan Balik)

Ini adalah bentuk teks dan grafis terpenting untuk usability. Indikator interaktif adalah "rambu lalu lintas" yang memandu siswa tentang apa yang harus dilakukan dan apa yang sedang terjadi.

1) Teks Instruksi

Perintah singkat dan jelas yang memandu langkah berikutnya, seperti: "Pindai penanda untuk memulai," "Ketuk hotspot untuk info," atau "Geser untuk memutar objek." Teks ini harus muncul hanya saat dibutuhkan dan hilang setelah tindakan selesai.

2) Indikator Affordance (Penanda Aksi)

Ini adalah isyarat visual yang memberi tahu pengguna bahwa sesuatu dapat diinteraksikan. Karena objek 3D virtual tidak secara fisik "terlihat" interaktif, kita harus menambahkannya. Ini sering kali bukan teks, melainkan:

- a) Efek Berkedip (Pulsating Glow): Memberi sinyal bahwa objek dapat diketuk.

b) Hotspot: Ikon "+" atau "i" yang ditempatkan pada titik-titik menarik.

3) Umpan Balik Tekstual

Teks singkat yang mengonfirmasi tindakan, seperti "Komponen terpasang!" atau "Jawaban salah."

Keputusan desain antara menggunakan teks di layar atau narasi audio adalah pertukaran yang kritis. Penelitian yang secara langsung membandingkan keduanya dalam instruksi prosedural AR menemukan bahwa meskipun narasi audio sering kali lebih unggul untuk penjelasan proses yang kompleks (mendukung Prinsip Modalitas), teks di layar yang ringkas sangat penting untuk memberikan isyarat spesifik, label, dan data referensi (seperti angka atau formula) di mana siswa perlu mengontrol kecepatan mereka dalam membaca informasi (Fiorentino et al. 2021).

4. Animasi dan Interaktivitas

Jika model 3D, audio, dan teks adalah "aset" statis, maka animasi dan interaktivitas adalah "tindakan" yang mengubah aset tersebut dari diorama pasif menjadi sebuah laboratorium virtual yang dinamis. Inilah inti dari kekuatan pedagogis *Augmented Reality* (AR). Interaktivitas memungkinkan siswa untuk beralih dari pengamat menjadi partisipan aktif, memfasilitasi pembelajaran kinestetik dan berbasis penemuan. Persiapan materi tidak selesai hanya dengan memiliki model 3D; model tersebut harus dapat melakukan sesuatu untuk melayani tujuan pembelajaran.

a. Animasi Menghidupkan Konsep

Animasi adalah gerakan terencana dari objek 3D yang dirancang untuk mendemonstrasikan sebuah konsep atau proses. Dalam AR, animasi berfungsi untuk membuat proses yang tidak terlihat menjadi terlihat dan mudah dipahami.

1) Animasi Penjelasan (Konseptual): Ini adalah animasi yang dipicu oleh pengguna (misalnya, dengan menekan tombol "Play") untuk menunjukkan cara kerja sesuatu. Contoh:

a) Anatomi

Setelah siswa menampilkan model jantung, menekan tombol "Play" akan memicu animasi siklus jantung lengkap, menunjukkan katup membuka-tutup dan partikel berwarna yang mewakili darah beroksigen dan terdeoksigenasi bergerak antar bilik.

b) Teknik

Menampilkan animasi empat langkah (isap, kompresi, bakar, buang) dari piston dan katup di dalam mesin mobil.

- 2) Animasi Transisional: Ini adalah animasi UI/UX yang membuat pengalaman terasa halus, seperti menu yang meluncur dengan mulus atau komponen yang beranimasi saat dipilih.

b. Simulasi Proses

Ini adalah tingkat yang lebih tinggi dari animasi. Animasi adalah rekaman gerakan yang tetap, sedangkan simulasi adalah sistem interaktif yang berjalan berdasarkan aturan. Simulasi memungkinkan siswa untuk memanipulasi variabel dan melihat hasil atau konsekuensinya secara real-time.

1) Fungsi

Daripada hanya menonton animasi detak jantung yang normal, aplikasi berbasis simulasi mungkin menyediakan slider (panel geser) berlabel "Tingkat Stres" atau "Denyut Nadi". Saat siswa menggeser slider tersebut, simulasi detak jantung akan berakselerasi, dan data UI lainnya (seperti tekanan darah virtual) ikut berubah.

2) Contoh

Dalam simulasi perakitan PC, sistem dapat memberikan umpan balik jika siswa mencoba memasang stik RAM ke slot yang salah, mensimulasikan kegagalan pemasangan di dunia nyata. Ini secara langsung mendukung pembelajaran berbasis pemecahan masalah (problem-solving).

Berbagai tinjauan sistematis terhadap literatur AR di bidang pendidikan (khususnya STEM) secara konsisten menyimpulkan bahwa efektivitas AR sangat terkait dengan ketersediaan fitur interaktif ini. Kemampuan untuk memanipulasi objek 3D secara bebas dan mensimulasikan proses memungkinkan siswa untuk secara aktif membangun pengetahuan mereka sendiri, yang sangat selaras dengan prinsip-prinsip pedagogis *konstruktivisme* dan pembelajaran berbasis penemuan (Ibáñez and Delgado-Kloos 2018).



Bab ini menjelaskan proses teknis pengembangan media pembelajaran berbasis AR. Pembahasan mencakup perangkat dan perangkat lunak yang digunakan, pembuatan objek tiga dimensi, integrasi aset ke dalam aplikasi AR, serta pengujian fungsional dan usability. Selain itu, dijelaskan berbagai teknik optimasi agar aplikasi dapat berjalan dengan baik pada perangkat mobile maupun desktop. Bab ini memberikan panduan praktis dalam mewujudkan rancangan media AR menjadi produk yang siap digunakan.

A. Perangkat dan *Software* Pengembangan AR

Setelah melalui tahap analisis kebutuhan dan perancangan konseptual, proses pengembangan media pembelajaran berbasis *Augmented Reality* (AR) memasuki fase implementasi atau produksi. Pada tahap ini, berbagai konsep, desain, storyboard, serta spesifikasi yang telah dirancang sebelumnya mulai diwujudkan menjadi sebuah produk yang dapat digunakan secara nyata. Keberhasilan proses produksi tidak hanya ditentukan oleh kualitas desain pembelajaran yang telah disusun, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh pemilihan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) yang digunakan selama proses pengembangan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai kebutuhan teknologi pengembangan AR menjadi hal yang sangat penting bagi pengembang maupun institusi

pendidikan yang ingin mengimplementasikan teknologi ini secara optimal.

Dalam pengembangan media pembelajaran berbasis AR, perangkat keras dan perangkat lunak berfungsi sebagai infrastruktur utama yang memungkinkan proses desain, pemodelan, pemrograman, pengujian, hingga distribusi aplikasi dapat dilakukan secara efektif. Keduanya saling melengkapi dan membentuk sebuah ekosistem pengembangan yang mendukung terciptanya media pembelajaran yang interaktif, stabil, dan sesuai dengan tujuan pembelajaran yang telah ditetapkan. Tanpa dukungan perangkat yang memadai, proses pengembangan dapat mengalami berbagai kendala, mulai dari keterbatasan performa, kesulitan dalam pengolahan objek tiga dimensi, hingga masalah kompatibilitas saat aplikasi dijalankan pada perangkat pengguna.

Pemilihan perangkat keras merupakan langkah awal yang perlu diperhatikan dalam proses produksi media pembelajaran AR. Pengembangan aplikasi AR umumnya melibatkan berbagai aktivitas yang membutuhkan sumber daya komputasi cukup tinggi, seperti pemodelan objek tiga dimensi (3D), rendering visual, pengolahan tekstur, animasi, pemrograman, hingga proses kompilasi aplikasi. Oleh karena itu, komputer atau laptop yang digunakan oleh pengembang harus memiliki spesifikasi yang memadai agar seluruh proses dapat berjalan dengan lancar. Komponen seperti prosesor (CPU), kartu grafis (GPU), kapasitas memori (RAM), serta media penyimpanan berkecepatan tinggi menjadi faktor penting yang memengaruhi kinerja pengembangan.

Proses pemodelan dan rendering objek tiga dimensi, misalnya, membutuhkan kemampuan grafis yang cukup tinggi agar visualisasi objek dapat ditampilkan secara akurat dan responsif. Semakin kompleks model yang dibuat, semakin besar pula kebutuhan terhadap performa perangkat keras. Selain itu, aplikasi pengembangan AR modern sering kali memanfaatkan teknologi rendering real-time yang memerlukan dukungan GPU yang baik untuk menghasilkan tampilan visual yang realistis. Oleh karena itu, penggunaan perangkat dengan

spesifikasi yang sesuai akan membantu meningkatkan produktivitas pengembang sekaligus mempercepat proses produksi.

Selain perangkat pengembangan, ketersediaan perangkat target juga menjadi bagian penting dalam pengembangan media AR. Perangkat target merupakan perangkat yang nantinya digunakan oleh pengguna akhir untuk menjalankan aplikasi, seperti smartphone, tablet, atau perangkat wearable berbasis AR. Pengujian pada berbagai jenis perangkat diperlukan untuk memastikan bahwa aplikasi dapat berjalan dengan baik pada kondisi nyata. Faktor seperti ukuran layar, resolusi kamera, kemampuan sensor, sistem operasi, dan kapasitas pemrosesan perangkat dapat memengaruhi pengalaman pengguna saat menggunakan aplikasi AR. Oleh karena itu, pengembang perlu melakukan pengujian secara berkala pada berbagai perangkat untuk memastikan kompatibilitas dan stabilitas aplikasi.

Di samping perangkat keras, perangkat lunak memiliki peran yang tidak kalah penting dalam proses pengembangan media pembelajaran berbasis AR. Perangkat lunak merupakan sarana yang digunakan untuk merancang, membangun, mengelola, dan mengimplementasikan seluruh komponen aplikasi. Saat ini terdapat berbagai platform dan alat pengembangan yang dapat digunakan untuk membangun aplikasi AR, mulai dari perangkat lunak pemodelan tiga dimensi hingga lingkungan pengembangan aplikasi yang terintegrasi.

Salah satu komponen perangkat lunak yang paling penting adalah game engine atau mesin pengembangan aplikasi interaktif. Game engine berfungsi sebagai pusat pengembangan yang mengintegrasikan berbagai elemen seperti objek tiga dimensi, animasi, audio, antarmuka pengguna, logika aplikasi, serta sistem interaksi. Platform seperti Unity dan Unreal Engine menjadi pilihan yang populer dalam pengembangan AR karena menyediakan berbagai fitur yang mendukung pembuatan aplikasi interaktif secara efisien. Melalui game engine, pengembang dapat mengelola seluruh aset digital dan membangun pengalaman pembelajaran yang menarik serta mudah digunakan oleh peserta didik.

Selain game engine, pengembangan AR juga memerlukan *Software Development Kit (SDK)* khusus yang berfungsi untuk menyediakan kemampuan *Augmented Reality* pada aplikasi. SDK ini memungkinkan aplikasi mengenali marker, mendeteksi permukaan, melacak posisi perangkat, serta menampilkan objek virtual pada lingkungan nyata. Berbagai SDK seperti Vuforia Engine, AR Foundation, ARCore, dan ARKit banyak digunakan dalam pengembangan aplikasi AR modern karena menawarkan fitur pelacakan yang akurat dan dukungan terhadap berbagai perangkat mobile. Pemilihan SDK yang tepat akan sangat memengaruhi kemampuan teknis dan performa aplikasi yang dihasilkan.

Komponen perangkat lunak lainnya yang tidak kalah penting adalah perangkat pemodelan tiga dimensi. Dalam media pembelajaran berbasis AR, objek tiga dimensi merupakan elemen utama yang berfungsi sebagai representasi visual dari materi pembelajaran. Oleh karena itu, diperlukan perangkat lunak khusus untuk membuat, mengedit, dan mengoptimalkan model 3D yang akan digunakan dalam aplikasi. *Software* seperti Blender, Autodesk Maya, dan 3ds Max memungkinkan pengembang menciptakan objek tiga dimensi yang detail dan realistis sesuai dengan kebutuhan materi pembelajaran. Pada konteks pendidikan, model 3D dapat berupa komponen komputer, struktur organ tubuh manusia, alat laboratorium, bangunan, maupun berbagai objek lain yang mendukung visualisasi konsep pembelajaran.

Selain perangkat lunak utama tersebut, proses pengembangan AR juga sering melibatkan perangkat lunak pendukung seperti aplikasi desain grafis, pengolah audio, editor video, sistem manajemen versi, dan perangkat pengujian aplikasi. Seluruh perangkat lunak tersebut bekerja secara terintegrasi dalam sebuah alur kerja pengembangan (*development pipeline*) yang memungkinkan proses produksi berlangsung secara sistematis dan efisien. Semakin baik integrasi antarperangkat lunak yang digunakan, semakin mudah pula proses pengembangan, pemeliharaan, dan penyempurnaan aplikasi yang dilakukan.

Dari perspektif manajemen proyek, pemilihan perangkat keras dan perangkat lunak bukan sekadar keputusan teknis, tetapi juga merupakan keputusan strategis yang memiliki dampak langsung terhadap biaya, waktu, sumber daya manusia, dan kualitas produk yang dihasilkan. Penggunaan perangkat yang terlalu sederhana dapat memperlambat proses pengembangan, sedangkan penggunaan teknologi yang terlalu kompleks dapat meningkatkan biaya produksi secara signifikan. Oleh karena itu, pemilihan perangkat perlu disesuaikan dengan kebutuhan proyek, karakteristik pengguna, tujuan pembelajaran, serta sumber daya yang tersedia.

Dengan demikian, perangkat keras dan perangkat lunak merupakan komponen fundamental dalam proses pengembangan media pembelajaran berbasis *Augmented Reality*. Keduanya membentuk lingkungan kerja yang memungkinkan ide dan desain pembelajaran diwujudkan menjadi aplikasi yang dapat digunakan secara nyata. Pemahaman yang baik mengenai karakteristik, fungsi, dan peran masing-masing perangkat akan membantu pengembang dalam memilih teknologi yang paling sesuai dengan kebutuhan proyek. Melalui pemilihan perangkat keras dan perangkat lunak yang tepat, proses pengembangan media pembelajaran AR dapat dilakukan secara lebih efektif, efisien, dan menghasilkan produk yang berkualitas tinggi serta mampu mendukung tercapainya tujuan pembelajaran secara optimal.

1. Perangkat Keras

Pengembangan *Augmented Reality* (AR) adalah tugas yang menuntut komputasi secara intensif, melibatkan *rendering* grafis 3D, pemrosesan video real-time, dan algoritma pelacakan yang kompleks. Oleh karena itu, pemilihan perangkat keras yang tepat untuk tim pengembang bukan hanya soal kenyamanan, tetapi faktor penentu produktivitas dan kualitas akhir aplikasi. Perangkat keras ini dapat dibagi menjadi dua kategori utama: perangkat kerja (*workstation*) untuk menciptakan aplikasi, dan perangkat target (*testbed*) untuk menguji aplikasi di lingkungan nyata.

a. Komputer/Laptop Pengembang (*Developer Workstation*)

Ini adalah mesin utama tempat semua proses kreatif dan teknis terjadi mulai dari pemodelan 3D, desain UI, hingga penulisan kode dan kompilasi (compiling) aplikasi. Berbeda dengan pengembangan web standar, pengembangan AR membutuhkan spesifikasi yang jauh lebih tinggi.

1) CPU (Prosesor)

Diperlukan CPU multi-core modern (misalnya, Intel Core i7/i9 atau AMD Ryzen 7/9). Proses kompilasi proyek dari engine seperti Unity atau Unreal bisa memakan waktu lama, dan prosesor yang cepat secara drastis mengurangi waktu tunggu ini.

2) GPU (Kartu Grafis)

Ini adalah komponen non-negosiable. Pengembang akan menjalankan editor 3D engine yang pada dasarnya adalah sebuah game itu sendiri. Diperlukan kartu grafis khusus (dedicated) yang kuat (misalnya, NVIDIA seri GeForce RTX 3060/4060 ke atas) untuk menangani *rendering* viewport 3D, menguji pencahayaan, dan memastikan editor berjalan lancar.

3) RAM

Pengembangan AR modern sangat rakus memori. Pengembang sering kali harus menjalankan beberapa program berat sekaligus (misalnya, Unity, Blender, Visual Studio, dan Photoshop). 16 GB adalah standar minimum absolut, namun 32 GB RAM sangat direkomendasikan untuk alur kerja profesional yang efisien.

4) Penyimpanan

Solid-State Drive (SSD), idealnya NVMe SSD, adalah sebuah keharusan. Aset proyek AR, library engine, dan tekstur beresolusi tinggi berukuran sangat besar. Menggunakan HDD tradisional akan menyebabkan waktu

buka proyek dan pemuatan aset menjadi sangat lambat, menghambat produktivitas.

5) Kebutuhan Khusus (macOS)

Jika target aplikasi adalah perangkat *iOS* (iPhone/iPad), tim wajib memiliki setidaknya satu perangkat Mac (seperti MacBook Pro atau Mac Mini dengan chip M-series). Apple memberlakukan aturan bahwa proses kompilasi akhir dan pengiriman aplikasi ke App Store hanya dapat dilakukan melalui *software* Xcode di sistem operasi macOS.

b. Perangkat Mobile Pengujian (*Android/iOS*)

Emulator perangkat mobile di komputer tidak cukup untuk pengembangan AR. AR sangat bergantung pada kamera fisik, sensor (giroskop/akselerometer), dan pemahaman lingkungan dunia nyata. Oleh karena itu, pengembang harus terus-menerus menguji aplikasi mereka di perangkat fisik yang sesungguhnya.

1) *Android (ARCore)*

Karena ekosistem *Android* sangat terfragmentasi, tim idealnya memiliki rangkaian perangkat uji: (1) Perangkat flagship terbaru (misal, Google Pixel atau Samsung Galaxy S series) untuk menguji fitur tercanggih; (2) Perangkat kelas menengah yang populer di kalangan target siswa (ini sering menjadi target spesifikasi utama); dan (3) Perangkat kelas bawah yang nyaris memenuhi spesifikasi minimum untuk memastikan aplikasi tetap dapat digunakan (optimasi).

2) *iOS (ARKit)*

Ekosistem Apple lebih seragam. Pengembang setidaknya memerlukan beberapa model iPhone dan iPad dari generasi berbeda untuk memastikan kompatibilitas dan kinerja di berbagai ukuran layar dan kekuatan prosesor.

c. Headset AR (Opsional)

Jika proyek pengembangan ditujukan melampaui AR handheld (berbasis ponsel) ke pengalaman yang lebih imersif, maka perangkat keras tambahan diperlukan.

1) Contoh Perangkat

Ini mencakup headset AR sejati seperti Microsoft HoloLens 2 (yang memproyeksikan hologram stabil di dunia nyata) atau headset Mixed Reality (MR) seperti Meta Quest 3 (yang menggunakan kamera passthrough berkualitas tinggi untuk menggabungkan virtual dan nyata).

2) Implikasi

Pengembangan untuk headset mewakili paradigma desain yang sama sekali berbeda. Interaksi tidak lagi menggunakan layar sentuh, melainkan beralih ke pelacakan tangan (hand tracking), perintah suara, dan pelacakan pandangan mata (gaze tracking). Ini adalah ranah yang jauh lebih kompleks dan mahal, biasanya diperuntukkan bagi pelatihan simulasi tingkat lanjut.

Berbagai survei di bidang *Augmented Reality* menegaskan bahwa kinerja dan kemampuan perangkat keras termasuk sensor, prosesor, dan unit tampilan adalah komponen inti yang mendefinisikan pengalaman AR. Oleh karena itu, pengembang harus memiliki akses langsung ke perangkat keras target ini selama siklus pengembangan untuk melakukan debugging dan optimasi dalam konteks dunia nyata, karena kinerja sensor dan CPU sangat bervariasi antar perangkat (Billinghurst et al. 2015)

2. **Software Pengembangan**

Pemilihan perangkat lunak (*software*) adalah keputusan arsitektural yang menentukan bagaimana sebuah ide AR dibangun, seberapa kuat kinerjanya, dan di platform apa ia dapat diakses. Ekosistem pengembangan AR modern umumnya terdiri dari dua komponen utama: (1) *Game Engine* sebagai platform

pengembangan inti, dan (2) *Software Development Kit* (SDK) AR spesifik yang menyediakan fungsi pelacakan dunia nyata.

a. *Unity 3D Platform Utama* (Mesin Inti)

Unity 3D bukanlah platform AR; ia adalah platform pengembangan 3D real-time (atau dikenal sebagai *game engine*). Namun, ia telah menjadi standar industri de facto untuk membangun hampir semua aplikasi AR interaktif yang serius.

1) Mengapa Unity? Unity menyediakan semua alat yang diperlukan untuk mengelola dunia virtual, sementara SDK AR (dibahas di bawah) menangani koneksi ke dunia nyata. Unity bertanggung jawab atas:

a) *Rendering Engine*

Menampilkan grafis 3D, material, pencahayaan, dan bayangan.

b) *Physics Engine*

Mengatur simulasi fisika (seperti gravitasi atau tabrakan antar objek virtual).

c) *Scripting (C#)*

Menyediakan bahasa pemrograman (C#) untuk menulis semua logika interaktivitas (misalnya, "Jika pengguna mengetuk objek ini, mainkan animasi dan audio").

d) *Manajemen Aset*

Mengimpor dan mengelola semua model 3D, tekstur, dan file audio.

e) *Kompilasi Lintas Platform*

Kemampuannya untuk membangun (meng-compile) satu basis kode proyek menjadi aplikasi yang dapat berjalan di berbagai sistem operasi (seperti *Android* dan *iOS*) adalah keunggulan terbesarnya.

Dalam alur kerja AR, Unity berfungsi sebagai hub pusat atau "ruang operasi" di mana pengembang mengimpor SDK AR sebagai plugin. Pengembang kemudian membangun seluruh adegan dan logika aplikasi di dalam Unity.

2) Vuforia SDK: Spesialis AR Berbasis Penanda (*Marker-Based*)

Vuforia adalah salah satu SDK AR komersial tertua dan paling matang, yang berspesialisasi dalam AR berbasis gambar/penanda.

a) Fungsi Inti

Vuforia unggul dalam pengenalan gambar (image recognition). Pengembang "melatih" Vuforia dengan mengunggah gambar target (penanda). Vuforia menganalisis fitur unik gambar tersebut. Saat aplikasi berjalan, Vuforia menggunakan kamera untuk terus memindai dunia nyata. Ketika menemukan gambar yang cocok, ia menghitung posisi, orientasi, dan skala penanda tersebut dalam ruang 3D secara presisi dan sangat stabil.

b) Penggunaan

Vuforia diintegrasikan ke dalam Unity sebagai plugin. Vuforia memberitahu Unity, "Saya menemukan penanda 'Jantung' di koordinat X, Y, Z." Unity kemudian merespons dengan merender model 3D jantung di lokasi yang tepat tersebut. Ini adalah teknologi pilihan untuk aplikasi "AR-Book" yang menghidupkan buku teks.

3) ARKit (Apple) / ARCore (Google): Standar AR Tanpa Penanda (*Markerless*)

Ini adalah teknologi AR native (bawaan) yang dikembangkan langsung oleh Apple dan Google untuk sistem operasi seluler mereka. Keduanya berfokus pada AR tanpa penanda, menggunakan algoritma SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) untuk memahami geometri dunia nyata.

a) *ARKit* (untuk *iOS*)

SDK dari Apple yang terintegrasi penuh dengan perangkat keras iPhone dan iPad.

b) *ARCore* (untuk *Android*)

Layanan dari Google yang perlu diinstal pada perangkat *Android* yang kompatibel.

c) Kemampuan: Keduanya menyediakan fungsi inti yang serupa:

- Pelacakan Gerak: Memahami bagaimana perangkat bergerak di dunia nyata menggunakan sensor kamera dan IMU (giroskop/akselerometer).
- Pemahaman Lingkungan: Mendeteksi permukaan datar horizontal (lantai, meja) dan vertikal (dinding).
- Estimasi Pencahayaan: Menganalisis pencahayaan sekitar untuk membantu membuat bayangan objek virtual tampak realistis.

d) Integrasi (via AR Foundation)

Jarang sekali pengembang menggunakan *ARKit* atau *ARCore* secara langsung karena itu berarti membuat dua aplikasi terpisah. Sebaliknya, mereka menggunakan AR Foundation di dalam Unity. AR Foundation adalah lapisan abstraksi (pembungkus) yang dibuat oleh Unity. Pengembang hanya perlu menulis kode sekali menggunakan perintah AR Foundation (misalnya, "Deteksi permukaan datar"). AR Foundation kemudian secara otomatis menerjemahkan perintah itu ke *ARKit* jika aplikasi berjalan di *iOS*, atau ke *ARCore* jika berjalan di *Android*. Ini adalah alur kerja modern standar untuk AR seluler tanpa penanda.

4) Spark AR / WebAR: Platform Berbasis Aksesibilitas

Kelompok teknologi ini mengorbankan kekuatan grafis dan komputasi demi kemudahan akses instan.

a) Spark AR (Studio): Ini adalah *software* milik Meta (Facebook/Instagram). Ini adalah platform terintegrasi untuk membangun efek dan filter AR khusus untuk Instagram dan Facebook. Ini jauh lebih terbatas daripada Unity, lebih fokus pada pelacakan wajah, efek visual, dan interaksi sederhana (bukan simulasi kompleks). Kegunaan utamanya adalah untuk jangkauan viral/sosial media, bukan untuk aplikasi pembelajaran mendalam.

b)

c) WebAR (AR Berbasis Browser)

Ini adalah sebuah konsep, bukan satu *software* tunggal. WebAR memungkinkan pengalaman AR dijalankan langsung di peramban web seluler (seperti Chrome atau Safari) tanpa perlu menginstal aplikasi apa pun.

- Teknologi

Ini dicapai melalui standar web baru seperti WebXR API dan pustaka JavaScript (contoh: AR.js untuk *marker-based* sederhana, atau platform komersial seperti 8th Wall untuk *markerless* yang lebih canggih).

- Pertukaran

Keuntungannya adalah akses instan (cukup pindai QR code). Kerugiannya adalah kinerja yang jauh di bawah aplikasi native (Unity+ARCore/Kit), ketergantungan pada koneksi internet, dan fitur yang lebih terbatas.

Berbagai penelitian yang membandingkan kerangka kerja pengembangan ini mencatat bahwa meskipun platform native (Unity dengan ARCore/ARKit) menawarkan kinerja tertinggi dan set fitur terlengkap, platform berbasis web (WebAR) menawarkan keuntungan signifikan dalam kemudahan distribusi dan aksesibilitas lintas platform, menjadikannya pilihan yang menarik untuk skenario pembelajaran cepat yang tidak memerlukan simulasi grafis intensif (Terzopoulos et al. 2020).

3. Pertimbangan Teknis

Setelah meninjau berbagai opsi perangkat lunak, keputusan akhir tidak boleh hanya didasarkan pada daftar fitur. Keberhasilan, kecepatan, dan keberlanjutan jangka panjang dari proyek pengembangan AR sering kali bergantung pada faktor ekosistem yang lebih luas. Memilih *software* berarti "menikah" dengan ekosistemnya. Oleh karena itu, empat pertimbangan teknis berikut kompatibilitas, lisensi, komunitas, dan dokumentasi harus dievaluasi secara cermat sebelum berkomitmen pada sebuah tumpukan teknologi (tech stack).

a. Kompatibilitas

Kompatibilitas memastikan bahwa semua bagian yang bergerak dari proyek Anda dapat "berbicara" satu sama lain dan bekerja pada perangkat target Anda. Ini mencakup tiga tingkatan:

1) Kompatibilitas Mesin-SDK

Teknologi berkembang cepat. Versi Unity terbaru (misalnya, 2023.x) mungkin tidak langsung kompatibel dengan versi SDK Vuforia terbaru, atau mungkin memerlukan patch khusus. Penting untuk memverifikasi bahwa engine inti dan SDK AR yang dipilih secara resmi saling mendukung.

2) Kompatibilitas Lintas Platform

Ini adalah pertimbangan terbesar. Apakah tumpukan teknologi yang Anda pilih memungkinkan Anda untuk membangun aplikasi untuk *Android* dan *iOS* dari satu basis kode? Menggunakan Unity + AR Foundation secara eksplisit dirancang untuk ini. Memilih SDK yang hanya berfungsi di *Android*, misalnya, akan secara otomatis mengabaikan semua siswa yang menggunakan iPhone atau iPad.

3) Kompatibilitas Alur Aset (Asset Pipeline)

Seberapa mudah mentransfer model 3D dari *software* pemodelan (seperti Blender) ke engine (seperti Unity)? Format file (seperti .FBX atau .GLB) harus didukung sepenuhnya, mentransfer tidak hanya model tetapi juga tekstur, material, dan animasi tanpa masalah. Alur kerja yang terputus-putus di sini dapat membuang waktu pengembangan yang sangat besar.

b. Lisensi dan Model Biaya

Aspek hukum dan biaya dari sebuah perangkat lunak akan menentukan anggaran proyek Anda, baik di awal maupun dalam jangka panjang.

1) Open-Source (Gratis dan Terbuka)

Platform seperti AR.js sepenuhnya gratis dan kode sumbernya terbuka. Keuntungannya jelas (tidak ada biaya), namun kerugiannya sering kali berupa dokumentasi yang kurang lengkap dan dukungan yang hanya bergantung pada komunitas.

2) Freemium / Gratis untuk Pendidikan

Ini adalah model yang paling umum untuk engine besar seperti Unity dan Unreal Engine. Mereka 100% gratis untuk digunakan oleh institusi pendidikan dan pengembang individu. Biaya atau royalti hanya berlaku jika produk Anda (misalnya, game komersial) menghasilkan pendapatan di atas ambang batas yang sangat tinggi (misalnya, di atas \$100.000 per tahun), yang hampir tidak pernah berlaku untuk proyek media pembelajaran.

3) Berlangganan / Per-Tayang (Paid Subscription)

Platform komersial seperti Vuforia Pro atau platform WebAR canggih seperti 8th Wall beroperasi dengan model berlangganan bulanan/tahunan per pengembang, atau membebankan biaya berdasarkan jumlah "tayangan" (views)

pengalaman AR Anda. Ini harus diperhitungkan sebagai biaya operasional yang berkelanjutan dalam anggaran proyek.

c. Dukungan Komunitas

Ini adalah "faktor manusia" yang sering diabaikan namun bisa dibilang paling penting. Dukungan komunitas adalah jaringan global pengembang lain yang menggunakan alat yang sama dengan Anda, yang berkumpul di forum (seperti Forum Unity, Stack Overflow), server Discord, dan blog.

- 1) Mengapa Ini Krusial? Pengembangan AR itu sulit dan relatif baru. Tim Anda pasti akan menghadapi bug yang aneh, kesalahan yang tidak jelas, dan masalah khusus perangkat (misalnya, "Mengapa pelacakan AR saya gagal di ponsel Samsung model X setelah pembaruan *Android* terakhir?").
- 2) Dengan platform yang memiliki komunitas besar (seperti Unity), kemungkinan besar sudah ada orang lain yang mengalami masalah yang sama dan solusinya sudah diposting secara online. Untuk platform yang ceruk atau baru, tim Anda akan sendirian, dan pemecahan masalah bisa memakan waktu sehari-hari atau bahkan berminggu-minggu, yang menghancurkan jadwal proyek.

d. Dokumentasi

Jika komunitas adalah bantuan informal, dokumentasi adalah buku panduan resmi yang diterbitkan oleh pembuat perangkat lunak. Ini mencakup referensi API (kamus untuk programmer), panduan langkah-demi-langkah, dan contoh proyek.

1) Fungsi

Ini adalah sumber kebenaran utama untuk mempelajari cara menggunakan fitur perangkat lunak dengan benar. Tanpa dokumentasi yang baik, pengembang hanya bisa menebak-nebak.

2) Evaluasi

Dokumentasi yang baik harus: (1) Terkini (sesuai dengan versi perangkat lunak terbaru), (2) Jelas (ditulis dengan baik dan mudah dipahami), dan (3) Lengkap (mencakup semua fitur dengan contoh kode). Dokumentasi yang buruk, kedaluwarsa, atau tidak ada adalah tanda bahaya besar yang menunjukkan bahwa platform tersebut tidak didukung secara profesional.

Studi teknis yang secara langsung membandingkan berbagai kerangka kerja AR tidak hanya mengukur kinerja mentah (seperti stabilitas pelacakan), tetapi juga secara eksplisit menggunakan kriteria seperti kualitas dokumentasi, ketersediaan dukungan komunitas, biaya lisensi, dan dukungan lintas platform sebagai faktor penentu utama untuk merekomendasikan satu platform di atas yang lain (Herpich, Guarese, and Tarouco 2017).

B. Proses Pembuatan Objek 3D

Jika kita menganggap aplikasi *Augmented Reality* (AR) sebagai sebuah pementasan teater, maka objek 3D adalah aktor utamanya. Ia adalah inti visual, protagonis dari keseluruhan pengalaman belajar, dan elemen yang menjadi jembatan antara dunia digital dan realitas fisik siswa. Semua aset pendukung lainnya audio narasi, label teks, dan tombol interaktif pada dasarnya ada untuk menjelaskan, mendukung, atau memodifikasi objek 3D tersebut. Kualitas, akurasi pedagogis, dan realisme dari aset inilah yang akan menentukan tingkat imersi dan efektivitas pembelajaran.

Proses pembuatan objek 3D bukan sekadar langkah teknis, melainkan perpaduan rumit antara seni artistik dan optimasi teknis yang presisi. Di satu sisi, model harus akurat secara visual dan detail untuk dapat dipercaya sebagai representasi dari konsep nyata (baik itu anatomi jantung maupun mesin jet). Di sisi lain, ia harus sangat "ringan" dan efisien agar dapat ditampilkan secara real-time dengan lancar di perangkat seluler yang memiliki keterbatasan sumber daya.

Memahami alur kerja atau "pipeline" produksi 3D sangat penting bagi siapa saja yang terlibat dalam perancangan media AR, bahkan

bagi mereka yang bukan seniman 3D. Pengetahuan ini memungkinkan perancang pembelajaran dan manajer proyek untuk menetapkan ekspektasi yang realistis, mengalokasikan anggaran dengan benar, dan memastikan bahwa aset akhir yang dihasilkan tidak hanya indah secara visual tetapi juga optimal secara teknis dan benar secara pedagogis. Sub-bab ini akan menguraikan langkah-langkah standar industri dalam proses pembuatan objek 3D, mulai dari konsep hingga menjadi aset yang siap digunakan dalam engine AR.

1. Tahapan Pembuatan

Proses pembuatan objek 3D adalah alur kerja (pipeline) multi-langkah yang mengubah ide konseptual menjadi *aset digital* yang teroptimasi dan siap digunakan dalam aplikasi. Setiap langkah membangun di atas langkah sebelumnya dan memerlukan perpaduan antara keterampilan artistik dan keahlian teknis.

a. Perancangan Model (Fase Konsep dan Perencanaan)

Sebelum seorang seniman 3D membuka *software* pemodelan, langkah pertama yang krusial adalah fase perancangan dan perencanaan. Ini adalah tahap "pra-produksi" untuk *aset 3D*, di mana tim desain (termasuk pendidik dan pengembang) menerjemahkan kebutuhan dari *storyboard* menjadi serangkaian spesifikasi teknis dan artistik yang jelas untuk tim 3D. Mengabaikan tahap perencanaan ini hampir pasti akan mengakibatkan pemborosan waktu dan anggaran, karena model yang dibuat mungkin tidak sesuai dengan kebutuhan interaksi. Fase perancangan ini berfokus pada tiga tugas utama:

1) Menganalisis Kebutuhan Fungsional dari *Storyboard*

Pertanyaan terpenting adalah: Apa yang akan dilakukan oleh model ini? Jawabannya ada di dalam *storyboard*.

- a) Jika *storyboard* menunjukkan siswa hanya melihat model (misalnya, patung virtual), model tersebut dapat dibuat sebagai satu objek solid tunggal (static mesh).

b) Namun, jika *storyboard* menunjukkan siswa akan membongkar komponen mesin atau melihat tampilan meledak (*exploded view*), maka model 3D tidak boleh dibuat sebagai satu objek tunggal. Model tersebut harus dirancang secara modular artinya, setiap komponen (piston, baut, katup) harus dibuat sebagai objek 3D terpisah yang kemudian dirakit secara digital. Ini secara drastis meningkatkan kompleksitas dan waktu pemodelan.

2) Menentukan Fidelitas Visual dan Akurasi Pedagogis

Seberapa "nyata" model ini harus terlihat? Ini adalah penyeimbangan antara realisme dan kinerja.

a) Akurasi Pedagogis

Bagian mana dari model yang paling penting untuk tujuan pembelajaran? Untuk model jantung, keakuratan katup dan ruang bilik adalah krusial. Jaringan lemak eksterior mungkin bisa disederhanakan. Tim harus memutuskan untuk memfokuskan "*anggaran poligon*" pada bagian-bagian yang relevan secara pedagogis.

b) Jarak Pandang

Apakah siswa akan melihat model ini dari sangat dekat (seperti jam tangan) atau dari jauh (seperti bangunan)? Objek yang akan dilihat dari dekat membutuhkan detail yang lebih tinggi.

3) Membuat Lembar Konsep (Concept Sheet)

Semua keputusan ini dirangkum dalam dokumen spesifikasi untuk seniman 3D, yang biasanya mencakup: gambar referensi (foto, sketsa), anggaran *poligon* (misal: "maksimal 25.000 *poligon*"), resolusi tekstur (misal: "gunakan satu peta 2K"), dan kebutuhan teknis ("model harus modular" dan "titik pivot harus di bagian tengah bawah").

Penelitian tentang prinsip-prinsip desain untuk lingkungan belajar AR menekankan bahwa elemen virtual (objek 3D) bukanlah sekadar dekorasi, melainkan harus dirancang secara sengaja untuk mendukung tugas belajar yang spesifik. Cara sebuah informasi divisualisasikan (misalnya, apakah bagian-bagian tertentu disorot, disederhanakan, atau dibuat dapat dibongkar) adalah keputusan desain pedagogis fundamental yang harus ditetapkan pada tahap perencanaan ini, berdasarkan skenario yang telah ditentukan (Dunleavy 2014).

b. Pemodelan

Setelah tahap perancangan (pra-produksi) selesai dan lembar konsep disetujui, seniman 3D akan memulai tahap produksi teknis: Ini adalah proses di mana seniman menggunakan perangkat lunak khusus untuk membangun geometri atau "jaring" (*mesh*) dari objek 3D, berdasarkan spesifikasi yang telah ditetapkan. Ini adalah pekerjaan digital "memahat" yang mengubah konsep 2D menjadi *aset 3D*.

1) Perangkat Lunak 3D Utama

Proses ini dilakukan menggunakan program pemodelan 3D yang canggih. Tiga alat yang paling dominan dalam industri adalah:

a) Blender

Pilihan yang sangat populer dan kuat, terutama untuk proyek pendidikan dan pengembang independen. Keunggulan terbesarnya adalah Blender bersifat gratis dan open-source (FOSS). Dulunya dianggap sebagai alat hobi, kini Blender telah berkembang menjadi perangkat lunak berstandar industri yang mampu menangani keseluruhan alur kerja 3D, mulai dari pemodelan, sculpting, hingga *texturing* dan animasi.

b) Autodesk Maya

Sering dianggap sebagai standar industri untuk animasi karakter dan efek visual (VFX). Maya memiliki perangkat rigging dan animasi yang sangat canggih.

c) Autodesk 3ds Max

Secara historis, ini adalah standar industri untuk visualisasi arsitektur dan pengembangan game, dikenal karena perangkat pemodelan *poligonal*nya yang kuat.

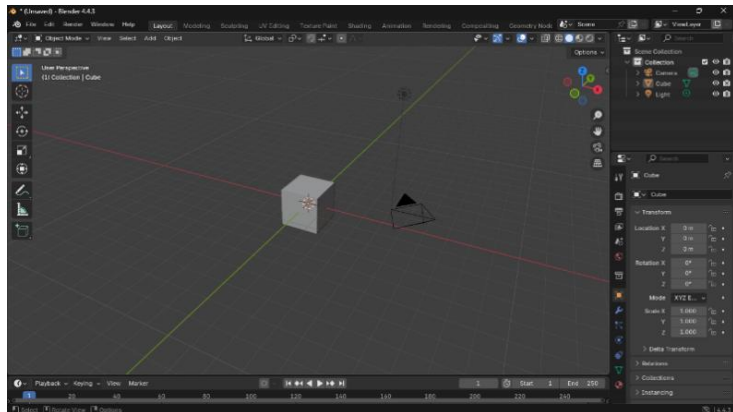
Untuk sebagian besar kebutuhan media pembelajaran AR, Blender lebih dari cukup dan sering kali menjadi pilihan terbaik karena tidak adanya hambatan biaya lisensi yang mahal seperti produk Autodesk.

2) Proses dan Teknik Pemodelan

Seniman 3D tidak hanya "menggambar" objek. Mereka membangunnya menggunakan beberapa teknik inti, yang paling umum adalah pemodelan *poligonal*:

a) Pembentukan Geometri

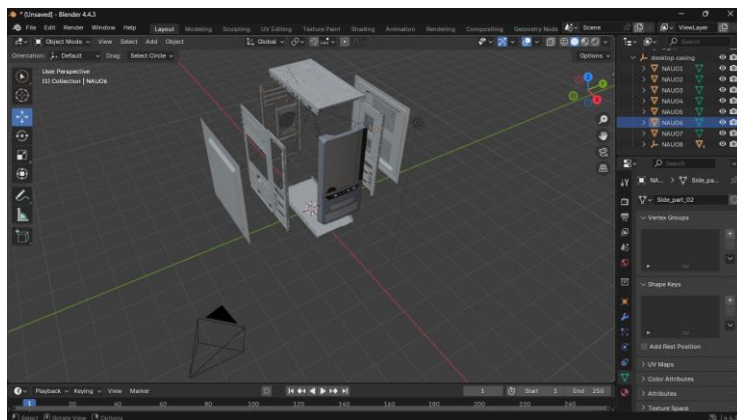
Seniman biasanya memulai dengan bentuk primitif (seperti kubus, silinder, atau bola) dan kemudian secara metodis memanipulasi komponen dasarnya (titik vertices, garis edges, dan permukaan faces). Mereka "menarik," "mendorong," "memotong," dan "mengekstrusi" (extrude) permukaan-permukaan ini untuk membentuk geometri yang diinginkan, seperti memahat menggunakan tanah liat digital.



Gambar 1. Awali Dengan Sebuah Kubus

b) Eksekusi Desain Modular

Ini adalah saat di mana rencana dari *storyboard* dieksekusi. Jika model yang dibuat adalah mesin yang harus bisa dibongkar (untuk exploded view), seniman tidak akan membuat mesin itu sebagai satu objek solid. Sebaliknya, mereka akan memodelkan piston, baut, blok mesin, dan katup sebagai objek 3D terpisah (mesh terpisah). Mereka harus memastikan setiap bagian pas satu sama lain dengan sempurna, seperti membuat suku cadang digital.



Gambar 2. Membuat Sebuah Objek Nyata

c) Alur Kerja High-Poly ke *Low-Poly*

Untuk mencapai realisme tanpa mengorbankan performa, alur kerja standar industri adalah:

- Seniman pertama-tama membuat model High-Poly yang sangat detail (bisa jutaan *poligon*), sering kali menggunakan digital sculpting.
- Mereka kemudian membuat model *Low-Poly* yang jauh lebih sederhana (ribuan *poligon*) yang hanya menangkap siluet dasarnya (proses ini disebut *retopology*).
- Mereka kemudian menggunakan proses yang disebut "Baking" untuk mentransfer detail visual dari model high-poly ke Normal Map (sebuah tekstur), yang kemudian diterapkan pada model *low-poly*. Ini adalah teknik fundamental untuk membuat model yang ringan terlihat sangat detail.

d) Validasi Teknis

Sebelum mengeksport, seniman harus memastikan dua hal sesuai rencana: (1) Skala Dunia Nyata (misalnya, memastikan model jantung berukuran 15cm) dan (2) Titik Pivot (memastikan pusat rotasi objek berada di tengah-bawah agar interaksi putar/skala di Unity terasa alami).

Keseluruhan alur kerja pemodelan untuk AR seluler adalah proses yang sangat teknis. Penelitian yang berfokus pada alur kerja pengembangan AR menegaskan bahwa proses pemodelan harus terintegrasi erat dengan optimasi. Langkah-langkah seperti pengurangan *poligon* (*polygon reduction*) dan baking normal map bukanlah langkah opsional, melainkan bagian inti dari alur kerja untuk memastikan *aset 3D* dapat berfungsi secara efektif pada keterbatasan perangkat keras seluler (Schmalstieg and Höllerer 2017).

c. Tekstur dan Warna (*Texturing*)

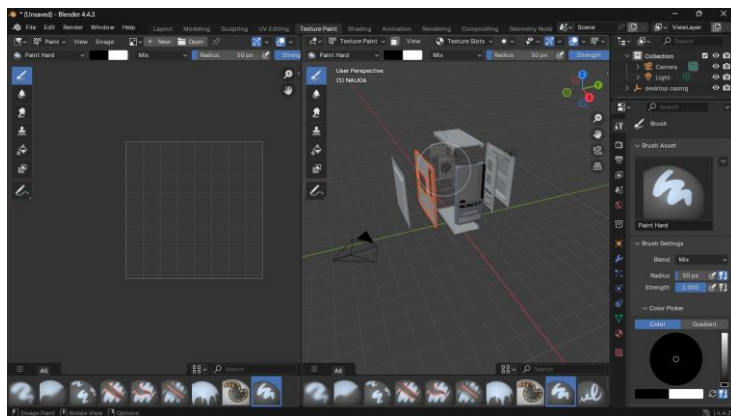
Setelah tahap pemodelan selesai, kita memiliki objek 3D dengan bentuk geometri yang akurat, namun objek tersebut

masih berupa "kanvas" abu-abu polos (gray mesh). Tahap tekstur adalah proses "melukis" kanvas tersebut, memberikannya warna, detail permukaan, dan properti material (seperti apakah ia berkilau seperti logam atau kusam seperti karet). Ini adalah langkah yang mengubah model 3D dari representasi bentuk menjadi aset yang terlihat realistis dan menarik secara visual.

1) Proses UV Unwrapping (Membuka Lipatan)

Langkah teknis pertama sebelum melukis adalah UV Unwrapping. Sebuah model 3D itu kompleks, sementara tekstur adalah gambar 2D yang datar. Untuk menerapkan gambar 2D ke permukaan 3D secara akurat tanpa terdistorsi, model 3D tersebut harus "dibuka lipatannya" dan "dipipihkan" menjadi tata letak 2D, yang disebut UV Map.

Analogi terbaik adalah membayangkan membuat kotak kardus. Model 3D adalah kotak yang sudah jadi, sedangkan UV Map adalah pola kardus datar sebelum dilipat dan dilem. Proses unwrapping yang baik sangat penting untuk memastikan tekstur dapat dilukis dengan detail tinggi dan diterapkan pada model tanpa ada peregangan atau jahitan yang terlihat aneh.



Gambar 3. Proses Pemberian Texture Warna

2) Pembuatan Peta Tekstur (PBR)

Di era modern, seniman tidak hanya melukis "warna". Mereka menggunakan alur kerja yang disebut PBR (*Physically Based Rendering*), di mana mereka membuat serangkaian gambar (peta) yang berbeda, yang masing-masing memberi tahu engine (seperti Unity) bagaimana permukaan tersebut harus bereaksi terhadap cahaya. Peta utamanya meliputi:

a) Peta Warna (Albedo/Color Map)

Ini adalah warna dasar murni dari objek (misalnya, pola serat kayu, warna kulit, warna cat).

b) Peta Normal (Normal Map)

Ini adalah peta terpenting untuk AR. Seperti dibahas sebelumnya, ini adalah peta "detail palsu" yang di-bake dari model high-poly. Peta berwarna ungu ini memberi tahu mesin pencahayaan di mana ada tonjolan, lekukan, goresan, atau pori-pori palsu pada permukaan model *low-poly* yang sebenarnya datar. Inilah rahasia membuat aset yang ringan terlihat sangat detail.

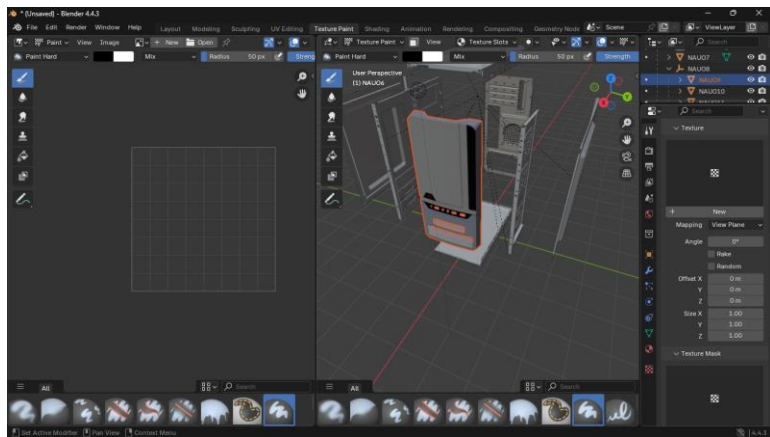
c) Peta Metalik & Kekasaran (Metallic & Roughness)

Peta ini (seringkali dalam skala abu-abu) memberi tahu engine properti material. Apakah permukaannya terbuat dari logam atau non-logam? Seberapa kasar atau halus permukaan itu? (Misalnya, bola biliar sangat halus/tidak kasar sehingga memantulkan cahaya dengan tajam, sedangkan karet ban sangat kasar sehingga menyebarkan cahaya).

Ketika semua peta ini digabungkan dalam engine AR, mereka menciptakan material yang terlihat realistis dan bereaksi secara dinamis terhadap pencahayaan di lingkungan virtual.

3) Optimasi Tekstur

Sama seperti *poligon*, tekstur adalah salah satu "pemakan" memori terbesar dalam aplikasi seluler. Resolusi tekstur (seberapa besar gambarnya) harus dioptimalkan. Menggunakan tekstur 8K atau 4K untuk setiap objek akan dengan cepat menghabiskan RAM ponsel dan membuat aplikasi mogok. Untuk AR seluler, resolusi tekstur umumnya dibatasi pada 2K (2048x2048 piksel) atau 1K (1024x1024 piksel) dan dikompresi ke dalam format yang efisien untuk GPU seluler.



Gambar 4. Optimasi Texture

Buku *Augmented Reality: Principles and Practice* (Schmalstieg and Höllerer 2017) mendedikasikan sebagian besar pembahasannya pada proses *Rendering* dan Visualisasi. Proses *rendering* yang realistis bergantung pada shaders (program GPU kecil) yang secara akurat menafsirkan peta tekstur (seperti peta normal dan peta albedo) untuk menghitung bagaimana cahaya virtual harus berinteraksi dengan permukaan model agar dapat menyatu secara mulus dengan dunia nyata.

d. Optimasi (Pengurangan *Poligon*)

Tahap optimasi adalah langkah terakhir namun paling penting dalam alur kerja 3D sebelum aset diekspor ke engine

AR seperti Unity. Ini adalah proses teknis untuk mengurangi beban komputasi dari sebuah *aset 3D* terutama jumlah *poligon*nya agar dapat ditampilkan dengan lancar (smooth) secara real-time di perangkat seluler yang memiliki keterbatasan daya.

Sebuah model 3D yang dibuat untuk film atau animasi offline mungkin memiliki jutaan *poligon* untuk mencapai realisme sinematik. Jika model seberat itu dimasukkan secara paksa ke dalam aplikasi AR seluler, hasilnya sudah dapat dipastikan: aplikasi akan langsung mengalami penurunan frame rate (lag, patah-patah) atau mogok (crash) karena GPU dan RAM perangkat tidak mampu menanganinya. Optimasi adalah proses "meringankan" model tersebut sambil mempertahankan kualitas visual setinggi mungkin.

1) Metode Utama Pengurangan *Poligon*

Ada dua pendekatan utama untuk mengurangi jumlah *poligon*, yang sering kali merupakan tindak lanjut dari alur kerja High-Poly ke *Low-Poly* yang dibahas pada tahap pemodelan:

a) Retopologi (Retopology)

Ini adalah metode manual dan berkualitas tinggi. Seniman 3D secara manual "menggambar ulang" jaring geometri baru yang jauh lebih sederhana (model *Low-Poly*) di atas permukaan model High-Poly yang sangat detail. Proses ini memastikan bahwa alur *poligon* (topologi) sangat efisien, mengalir mengikuti bentuk utama model. Meskipun memakan waktu, ini memberikan hasil terbaik untuk aset yang perlu dianimasikan (seperti karakter) atau aset utama (hero asset).

b) Desimasi (Decimation)

Ini adalah metode otomatis atau algoritmik. Seniman menggunakan alat atau modifier (seperti "Decimate" di

Blender) yang secara cerdas meruntuhkan (collapse) sisi-sisi *poligon* untuk mengurangi jumlah totalnya berdasarkan persentase atau target jumlah *poligon*. Ini adalah cara yang sangat cepat untuk mengurangi kepadatan model yang rumit (seperti patung hasil pindaian 3D). Kelemahannya adalah ia dapat menghasilkan topologi yang berantakan, tetapi sering kali cukup baik untuk objek statis (tidak bergerak).

2) Peran Vital Baking Normal Map

Optimasi bukan hanya tentang menghapus *poligon*. Jika kita hanya menghapus *poligon*, model akan kehilangan semua detailnya dan terlihat kotak-kotak. Keajaiban optimasi terletak pada proses yang disebut "Baking".

Dalam proses ini, kita mengambil dua model: model High-Poly (detail tinggi, jutaan *poligon*) dan model Low-Poly (model optimal hasil retopologi, ribuan *poligon*). Kita kemudian memberi tahu perangkat lunak: "Lihat semua detail tonjolan dan lekukan halus yang ada di model High-Poly dan 'panggang' (rekam) informasi detail tersebut sebagai gambar Normal Map."

Hasilnya, kita mendapatkan model Low-Poly (sangat ringan, ramah performa) yang memakai Normal Map (tekstur). Ketika dimasukkan ke Unity, Normal Map ini menipu mesin pencahayaan agar menampilkan semua detail halus dari model High-Poly di permukaan model Low-Poly yang sebenarnya datar. Ini adalah teknik fundamental yang digunakan oleh semua pengembang game dan AR untuk mencapai visual yang memukau pada perangkat keras yang terbatas.

Keseluruhan proses ini penting karena AR seluler bergantung pada *rendering* real-time. Buku definitif dari (Schmalstieg and Höllerer 2017) menjelaskan bahwa inti dari sistem AR adalah kemampuannya untuk melakukan *rendering* objek virtual agar selaras dengan dunia nyata secara instan pada setiap frame. Untuk

mencapai frame rate yang stabil (misalnya, 30-60 FPS), beban komputasi per frame harus dijaga seminimal mungkin, menjadikan alur kerja optimasi (pengurangan *poligon* dan penggunaan tekstur yang efisien seperti normal maps) sebagai persyaratan teknis yang tidak dapat ditawar.

2. Hasil Akhir

Tahap "Hasil Akhir" adalah proses pengemasan semua komponen yang telah dibuat dan dioptimasi jaring (mesh) *low-poly*, peta UV, dan semua peta tekstur (Albedo, Normal, dll.) ke dalam satu format file terstandar yang dapat dibaca oleh engine AR (seperti Unity). Ini adalah langkah "penyerahan" aset dari perangkat lunak pemodelan 3D ke platform pengembangan aplikasi.

a. Format File Ekspor: .FBX vs .GLB/.gLTF

Pemilihan format file ekspor sangat penting untuk kompatibilitas. Dua format paling dominan adalah:

1) .FBX (Filmbox)

Ini telah lama menjadi standar industri untuk mentransfer aset antar program 3D dan *game engine*. Keunggulan utamanya adalah kemampuannya yang kuat untuk mengemas tidak hanya model dan tekstur, tetapi juga data animasi kerangka (rigging) yang kompleks dan bahkan beberapa kamera atau pencahayaan dalam satu file. Ini adalah pilihan yang sangat solid untuk alur kerja Unity.

2) .gLTF / .GLB (GL Transmission Format)

Ini adalah standar modern yang sering disebut sebagai "JPEG-nya 3D".

a) .gLTF

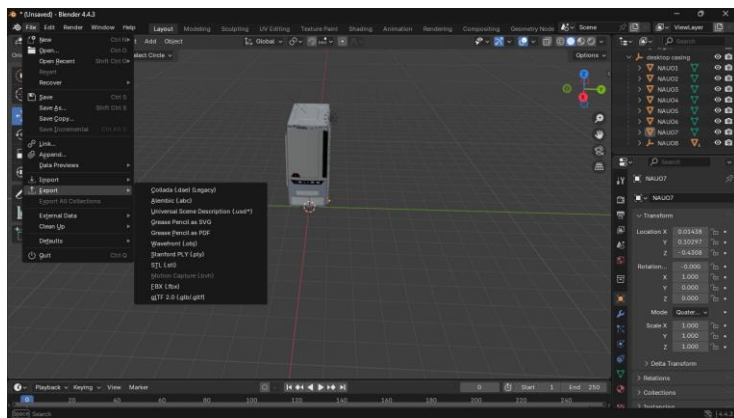
Berbasis JSON, ini adalah file deskripsi yang biasanya merujuk ke file eksternal lain (seperti file geometri biner dan gambar tekstur .PNG).

b) GLB

Ini adalah versi biner dari gLTF yang mengemas semuanya (geometri, tekstur, animasi) ke dalam satu file biner tunggal.

c) Mengapa ini Penting untuk AR

Format .GLB sangat efisien, ringan, dan dioptimalkan untuk pemuatan cepat, menjadikannya format pilihan utama untuk WebAR dan banyak platform AR seluler modern.



Gambar 5. Pilihan Eksport Objek

b. Daftar Periksa Validasi Akhir

Sebelum menekan tombol "Ekspor", seniman 3D harus melakukan validasi teknis terakhir untuk mencegah sakit kepala besar bagi pengembang nanti:

1) Penerapan Transformasi (Apply Transforms)

Semua data skala dan rotasi objek harus "dibekukan" atau diterapkan.

2) Pemeriksaan Skala

Apakah aset diekspor dalam skala dunia nyata yang benar (misalnya, 1 unit = 1 meter)? Jika tidak, model bisa muncul

seukuran gedung pencakar langit atau seukuran semut saat diimpor ke Unity.

3) Pemeriksaan Orientasi

Apakah sumbu "Atas" (biasanya Y-Axis di Unity) dan "Depan" (biasanya Z-Axis) sudah benar? Kesalahan orientasi akan menyebabkan model diimpor dalam keadaan terbaring miring atau menghadap ke belakang.

4) Pemeriksaan Titik Pivot

Apakah titik pivot berada di tengah-bawah model untuk rotasi yang intuitif?

C. Integrasi Objek ke dalam Aplikasi AR

Setelah proses pembuatan aset yang intensif selesai menghasilkan file model 3D yang telah dioptimasi, dilengkapi tekstur, dan siap pakai aset tersebut masih hanya berupa file pasif di dalam folder. Langkah selanjutnya, dan yang paling krusial, adalah integrasi: proses teknis untuk "menghidupkan" aset tersebut di dalam platform pengembangan dan menghubungkannya dengan sistem *Augmented Reality* (AR). Proses inilah yang memastikan bahwa materi pembelajaran yang telah dirancang dengan cermat dapat diakses, dilihat, dan diinteraksikan oleh siswa melalui aplikasi AR.

Integrasi adalah jembatan yang menghubungkan alur kerja konten (seniman 3D) dengan alur kerja pengembangan (programer). Proses ini melibatkan lebih dari sekadar "mengimpor" file; ini mencakup konfigurasi material dan shader agar tampil realistis, menautkan objek 3D ke pemicu AR spesifik (baik itu penanda gambar atau permukaan yang terdeteksi), dan yang terpenting, melampirkan skrip interaktivitas yang memungkinkan objek merespons input pengguna seperti yang telah dirancang dalam *storyboard*.

Sebuah model 3D yang sempurna sekalipun akan gagal secara pedagogis jika proses integrasinya buruk misalnya, jika model muncul di lokasi yang salah, bergetar tidak stabil, atau gagal merespons ketukan siswa. Sub-bab ini akan menguraikan langkah-langkah teknis fundamental yang diperlukan untuk mengimpor *aset*

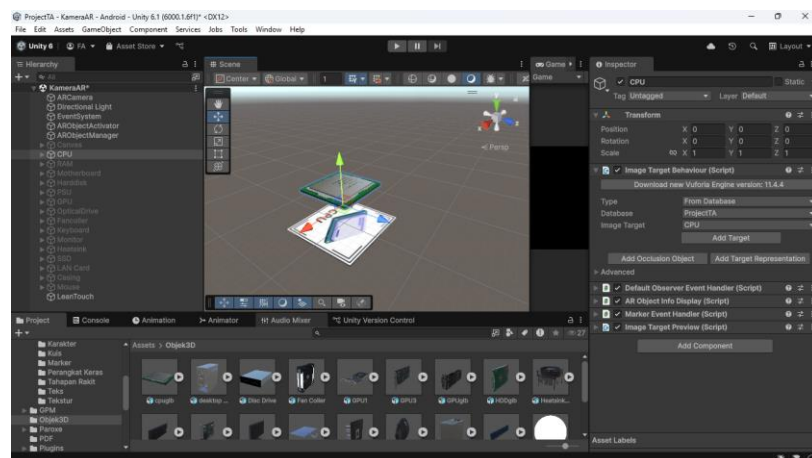
3D ke dalam engine pengembangan dan mengonfigurasinya agar berfungsi dengan baik dalam adegan AR yang interaktif.

1. Tahapan

Proses integrasi adalah serangkaian langkah teknis yang sistematis di dalam engine pengembangan (seperti Unity) untuk mengambil file *aset 3D* mentah dan mengubahnya menjadi komponen aplikasi yang hidup, interaktif, dan responsif terhadap dunia nyata.

a. Impor Objek 3D ke Unity

Langkah pertama adalah memindahkan aset yang telah diekspor (misalnya, file .fbx atau .glb) ke dalam platform pengembangan. Di Unity, ini secara harfiah dilakukan dengan menyeret (drag-and-drop) file tersebut ke dalam jendela "Project" (panel Aset).



Gambar 6. Import Objek 3D Ke Scene

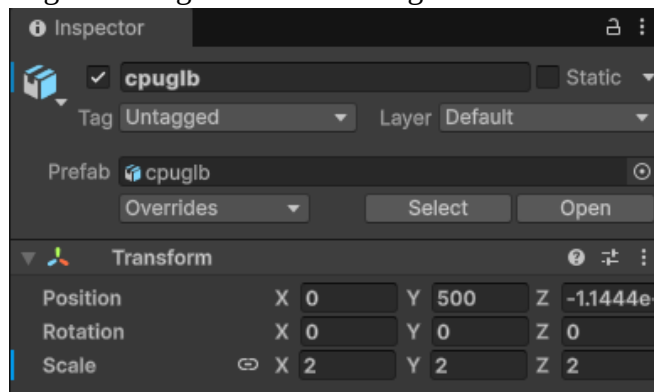
Setelah diimport, Unity membaca file tersebut dan memecahnya menjadi komponen-komponen penyusunnya: Mesh (geometri 3D), Material (tempat untuk menampung tekstur), dan Animasi (jika ada). Sering kali, material tidak terhubung secara otomatis. Pengembang mungkin perlu secara manual menyeret file gambar tekstur (Albedo, Normal Map, dll.) ke slot yang sesuai pada material yang baru saja diimport

oleh Unity agar model tersebut tampil dengan benar (beralih dari abu-abu polos menjadi bertekstur penuh).

b. Penyesuaian Skala, Posisi, dan Orientasi (Konfigurasi Prefab)

Objek yang diimpor jarang sekali langsung siap pakai. Sering terjadi masalah umum seperti model mengimpor dalam keadaan "terbaring" (karena perbedaan sumbu "Atas", di mana Blender menggunakan Z-Up sementara Unity menggunakan Y-Up) atau ukurannya terlalu besar/kecil. Di sinilah konsep Prefab (fabrikasi awal) menjadi sangat penting. Pengembang akan:

- 1) Menyeret model mentah ke dalam "Scene" (adegan) kerja.
- 2) Melakukan koreksi satu kali: memutarnya agar berdiri tegak (misalnya, rotasi 90 derajat pada sumbu X), dan menyesuaikan skalanya (misalnya, menjadi 0.1, 0.1, 0.1) agar sesuai dengan skala dunia nyata.
- 3) Mereka kemudian menyimpan objek yang sudah dikonfigurasi dengan benar ini sebagai "Prefab".



Gambar 7. Mengatur skala objek 3D

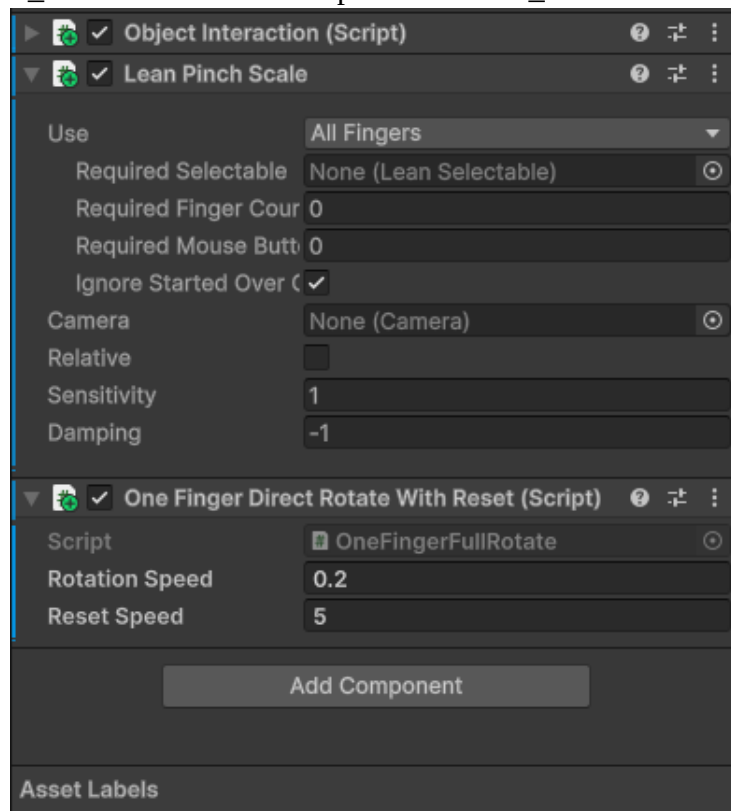
Mulai saat ini, aplikasi tidak akan pernah menggunakan model mentah lagi, ia hanya akan menggunakan Prefab ini, memastikan bahwa setiap kali objek AR dimunculkan, ia selalu muncul dengan skala, posisi, dan orientasi yang benar.

c. Penerapan Skrip Interaktivitas

Prefab yang ada saat ini sudah terlihat benar namun masih "bodoh" ia tidak tahu cara merespons input pengguna. Langkah

ini menambahkan "otak" pada objek. Dalam Unity, ini dilakukan dengan melampirkan skrip C# (komponen kode) ke Prefab. Skrip-skrip ini ditulis untuk menangani logika yang telah ditentukan dalam *storyboard*:

- 1) Skrip Rotasi/Zoom: Sebuah skrip dibuat untuk mendeteksi input sentuhan layar. Misalnya, skrip akan memeriksa: "Apakah ada satu jari yang menyentuh dan bergerak? Jika ya, putar objek ini. Apakah ada dua jari yang mencubit? Jika ya, perbesar atau perkecil skala objek ini."
- 2) Skrip Informasi Tambahan: Ini adalah logika *storyboard*. Sebuah skrip dilampirkan yang mengelola hotspot. Skrip ini akan berkata, "Jika pengguna mengetuk bagian objek dengan collider bernama 'Katup_Aorta', maka aktifkan panel UI 'Info_Aorta' dan mainkan klip audio 'Narasi_Aorta'."



Gambar 8. Penambahan Script Interaksi

d. Pengaturan Pemicu AR (*Marker vs Markerless*)

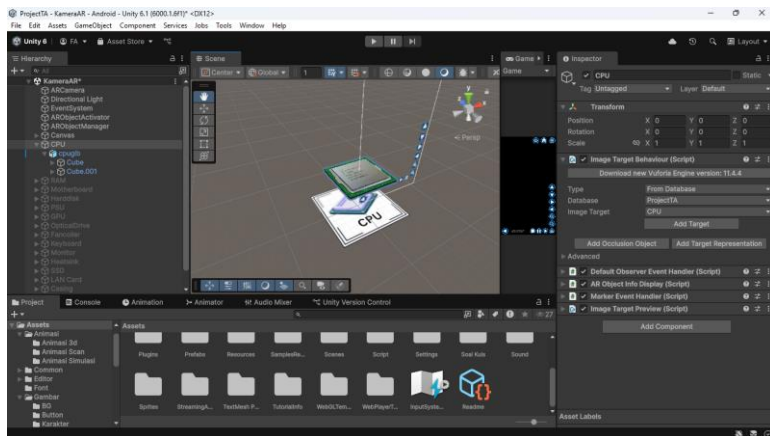
Ini adalah langkah terakhir yang menghubungkan objek interaktif kita ke dunia nyata. Pengembang harus memberi tahu Unity kapan dan di mana harus memunculkan (spawn) Prefab ini. Alurnya sangat berbeda tergantung pada teknologi yang dipilih:

1) Skenario Berbasis Penanda (*Marker-Based - Vuforia*)

Di dalam Unity, pengembang menambahkan objek "*Image Target*" (Target Gambar) dari database Vuforia (yang sudah berisi gambar penanda dari buku teks). Prosesnya kemudian sangat sederhana: pengembang menjadikan Prefab objek 3D interaktif sebagai "anak" (child) dari "*Image Target*" tersebut di dalam hierarki adegan. Hasilnya: Saat Vuforia menemukan penanda, ia secara otomatis mengaktifkan "*Image Target*," yang kemudian secara otomatis menampilkan semua "anak"-nya (model 3D kita) tepat di atas penanda tersebut.

2) Skenario Tanpa Penanda (*Markerless - AR Foundation: ARCore/ARKit*)

Ini sedikit lebih kompleks dan berbasis skrip. Pengembang menambahkan "AR Plane Manager" ke adegan, yang memungkinkan *ARCore/ARKit* mendeteksi permukaan datar (lantai/meja). Pengembang kemudian menulis skrip "Tap-to-Place" (Ketuk-untuk-Menempatkan) yang pada dasarnya mengatakan: "Terus pantau layar. Jika pengguna mengetuk layar, lakukan raycast (tembakkan sinar tak terlihat). Jika sinar itu mengenai permukaan datar yang telah dideteksi, maka ciptakan (instantiate) satu salinan dari Prefab kita di titik persentuhan tersebut."



Gambar 9. Pemberian Penanda (Marker)

Kedua metode ini adalah implementasi praktis dari apa yang disebut dalam literatur teknis sebagai "Registrasi" proses fundamental dalam AR untuk menyelaraskan koordinat ruang virtual (posisi model 3D Anda) dengan koordinat ruang dunia nyata (data yang disediakan oleh pelacak, baik itu Vuforia atau ARCore). Buku definitif dari (Schmalstieg and Höllerer 2017) menguraikan prinsip-prinsip ini, menjelaskan bahwa keberhasilan AR bergantung pada seberapa cepat dan akurat sistem dapat "mendaftarkan" (meregistrasi) grafik virtual ke dunia nyata pada setiap frame.

2. Output

Hasil akhir (output) dari keseluruhan proses perancangan dan pengembangan yang telah diuraikan adalah sebuah produk konkret: aplikasi *Augmented Reality* (AR) fungsional yang siap didistribusikan kepada siswa. Ini bisa berupa file .apk (untuk *Android*), aplikasi yang terdaftar di App Store (untuk *iOS*), atau tautan WebAR. Namun, output ini lebih dari sekadar kumpulan kode dan aset 3D; ia adalah sintesis dari setiap keputusan pedagogis, desain, dan teknis yang dibuat di sepanjang alur kerja.

a. Sintesis Desain yang Teralinasi

Aplikasi AR final ini adalah wujud nyata dari tujuan pembelajaran dan skenario *storyboard* yang telah dirancang. Nilai dari output ini tidak diukur dari kecanggihan

teknologinya, melainkan dari keselarasan (alignment) yang ketat dengan kebutuhan awal:

1) Keselarasan Tujuan

Setiap fitur interaktif yang ada di dalam aplikasi harus dapat dilacak kembali secara langsung ke Tujuan Pembelajaran Khusus (TPK) yang spesifik. Jika TPK-nya adalah "siswa dapat menganalisis," maka aplikasi harus menyediakan fitur simulasi atau virtual cutaway yang memungkinkan analisis.

2) Kesetiaan pada Skenario

Alur pengguna (user flow), tata letak antarmuka (UI), dan narasi audio dalam aplikasi akhir harus mencerminkan skenario dan *storyboard* yang telah disetujui.

b. Objek 3D Interaktif yang Bermakna

Inti dari output ini adalah objek 3D yang kini "hidup" dan interaktif. Aplikasi yang sukses menyajikan objek 3D yang tidak hanya akurat secara visual tetapi juga dilengkapi dengan interaktivitas yang bermakna secara pedagogis. Aplikasi akhir ini memungkinkan siswa untuk:

- 1) Mengeksplorasi (Rotasi/Zoom): Memenuhi kebutuhan pembelajar visual dan kinestetik untuk memahami bentuk spasial.
- 2) Menganalisis (Tampilan Meledak/Potongan Lintang): Memungkinkan pemikiran tingkat tinggi dengan melihat komponen internal dan hubungan antar bagian.
- 3) Memahami Proses (Animasi/Simulasi): Mengubah konsep yang dinamis dan tak terlihat (seperti aliran darah atau siklus mesin) menjadi sesuatu yang dapat diamati.
- 4) Menerima Informasi (Label/Audio): Mendapatkan informasi kontekstual just-in-time sesuai prinsip manajemen beban kognitif.

c. Siap untuk Evaluasi

Akhirnya, output ini adalah artefak yang siap untuk diuji dan divalidasi. Ini adalah "intervensi pembelajaran" yang sekarang dapat diberikan kepada siswa dan dievaluasi terhadap kriteria keberhasilan yang ditetapkan dalam fase analisis kebutuhan. Kita sekarang dapat secara empiris mengukur: Apakah aplikasi ini benar-benar meningkatkan pemahaman siswa dibandingkan dengan metode tradisional?

Berbagai tinjauan sistematis dalam literatur Pendidikan seperti yang dilakukan oleh (Ibáñez and Delgado-Kloos 2018) menganalisis output-output semacam ini (aplikasi AR yang sudah jadi). Tinjauan tersebut secara konsisten menemukan bahwa ketika aplikasi AR (sebagai output akhir) dirancang dengan baik untuk mendukung pembelajaran STEM, menggabungkan interaktivitas tinggi dan kemampuan simulasi, aplikasi tersebut terbukti memiliki dampak yang signifikan dan positif terhadap hasil belajar siswa.

D. Pengujian Fungsional dan Usability

Menghasilkan output aplikasi AR yang telah terkompilasi bukanlah akhir dari proses pengembangan; itu adalah awal dari fase verifikasi yang kritis. Kita mungkin telah mengikuti desain dan *storyboard* dengan sempurna, namun kita belum tahu pasti apakah aplikasi tersebut berfungsi seperti yang diharapkan di dunia nyata atau apakah siswa dapat menggunakannya dengan mudah. Pengujian adalah proses sistematis untuk memverifikasi bahwa perangkat lunak yang dibangun telah sesuai dengan semua kebutuhan fungsional dan pedagogis yang diidentifikasi pada tahap analisis.

Tahap ini dapat dibagi menjadi dua fokus utama yang berbeda namun sama pentingnya. Pertama, pengujian fungsional, yang secara teknis menjawab pertanyaan, "Apakah aplikasi ini bekerja sesuai spesifikasi?" Ini adalah perburuan bug, crash, dan kesalahan logika memastikan bahwa setiap tombol berfungsi, setiap model 3D muncul saat seharusnya, dan aplikasi tidak gagal di tengah penggunaan. Kedua, pengujian usability (kebergunaan), yang menjawab

pertanyaan yang lebih berorientasi pada manusia, "Apakah aplikasi ini mudah dan menyenangkan untuk digunakan oleh siswa?" Sebuah aplikasi bisa saja berfungsi sempurna secara teknis (bebas bug), namun gagal total secara pedagogis jika antarmukanya membingungkan, alurnya membuat frustrasi, atau interaksinya tidak intuitif.

Pengujian adalah langkah penting untuk menjamin kualitas sebelum aplikasi diberikan kepada siswa untuk evaluasi pembelajaran skala besar. Sub-bab ini akan menguraikan metodologi untuk melakukan kedua jenis pengujian tersebut, memastikan bahwa produk akhir yang dihasilkan tidak hanya stabil secara teknis tetapi juga efektif dan nyaman digunakan oleh target audiensnya.

1. Jenis Pengujian

Setelah aplikasi (output) selesai dibuat, proses pengujian dimulai untuk memverifikasi dua aspek yang berbeda namun sama pentingnya: apakah aplikasi bekerja secara teknis (fungsional), dan apakah aplikasi dapat digunakan secara manusiawi (usability).

a. Pengujian Fungsional (Verifikasi Teknis)

Inti Pertanyaan: "Apakah aplikasi ini bekerja sesuai spesifikasi teknis dan *storyboard*?"

Pengujian fungsional adalah proses teknis yang objektif, biasanya dilakukan oleh tim pengembang atau tim Quality Assurance (QA), untuk menemukan bug, kesalahan, dan kegagalan. Ini adalah proses verifikasi mekanis di mana setiap fitur yang dijanjikan dalam desain diperiksa satu per satu. Pengujian fungsional tidak peduli apakah aplikasinya "membingungkan" bagi pengguna; ia hanya peduli apakah fitur tersebut "berfungsi" atau "rusak".

Sebuah daftar pemeriksaan (test case) fungsional untuk aplikasi AR pendidikan biasanya mencakup:

1) Verifikasi Pemicu AR:

a) Untuk *Marker-Based* (Vuforia)

Apakah penanda terdeteksi dengan cepat? Apakah terdeteksi dalam cahaya redup dan cahaya terang? Apakah model 3D tetap stabil (tidak bergetar/gemetar) saat menempel pada penanda? Apa yang terjadi jika penanda ditutup sebagian atau keluar dari layar (apakah model menghilang dengan benar)?

b) Untuk *Markerless* (ARCore/ARKit)

Seberapa cepat deteksi permukaan (lantai/meja) bekerja? Apakah objek yang ditempatkan (via "tap-to-place") muncul di lokasi yang benar? Apakah objek tetap "terkunci" di posisi dunia nyata saat pengguna berjalan mengelilinginya (verifikasi world anchoring)?

2) Verifikasi Aset dan Interaksi:

- a) Apakah model 3D yang benar dimuat (tidak ada tekstur yang hilang atau model yang tampil abu-abu)?
- b) Apakah semua animasi yang dibuat (misalnya, detak jantung) dapat diputar, dijeda, dan dihentikan?
- c) Apakah interaksi dasar (rotasi gestur satu jari, zoom gestur dua jari) berfungsi tanpa hambatan?

3) Verifikasi Alur UI dan Logika:

- a) Apakah semua tombol hotspot memunculkan panel informasi yang benar?
- b) Apakah semua narasi audio diputar saat dipicu?
- c) Apakah tombol "Kembali" dan navigasi menu berfungsi sesuai alur *storyboard*?

4) Pengujian Stres (Stress Testing):

- a) Apa yang terjadi jika pengguna mengetuk layar 20 kali dengan cepat? Apakah aplikasi mogok (crash)?
- b) Apa yang terjadi jika aplikasi diminimalkan lalu dibuka kembali? Apakah sesi AR berlanjut atau rusak?

b. Pengujian Usability (Kebergunaan)

Inti Pertanyaan: "Apakah siswa atau guru dapat menggunakan aplikasi ini dengan mudah, efisien, dan tanpa frustrasi?"

Ini adalah pengujian yang berpusat pada manusia (HCI) dan sangat penting untuk media pembelajaran. Sebuah aplikasi bisa saja 100% fungsional (bebas bug), namun memiliki nilai usability 0% jika alurnya membingungkan, ikonnya tidak jelas, dan siswa menghabiskan lebih banyak waktu untuk mencari tahu cara menggunakan aplikasi daripada untuk belajar materi. Pengujian ini harus dilakukan dengan melibatkan pengguna akhir yang sebenarnya (siswa/guru), bukan oleh pengembang yang sudah "bias" terhadap desainnya. Metode pengujian usability yang umum meliputi:

1) Protokol Berpikir Keras (Think-Aloud Protocol)

Ini adalah standar emas. Seorang siswa diberi skenario (misal: "Gunakan aplikasi ini untuk mencari tahu mengapa katup aorta pasien ini rusak") dan diminta untuk menyuarakan semua yang mereka pikirkan saat mereka menggunakan aplikasi ("Oke, saya mencari tombol... saya tidak tahu harus menekan apa... oh, ikon ini mungkin..."). Penguji hanya mengamati dan mencatat di mana pengguna mengalami kebingungan, tetapi tidak membantu.

2) Pengukuran Kuantitatif: Mengukur metrik spesifik seperti:

- a) Time-on-Task: Berapa lama (detik/menit) yang dibutuhkan siswa untuk menyelesaikan skenario? Semakin cepat, semakin baik.
- b) Success Rate: Berapa persen siswa yang berhasil menyelesaikan tugas tanpa bantuan?

3) Kuesioner Standar

Setelah sesi pengujian, siswa diminta mengisi kuesioner standar. Alat yang paling umum adalah System Usability Scale (SUS), sebuah kuesioner 10 pertanyaan yang

menghasilkan skor numerik (0-100) yang mengukur persepsi subjektif tentang kemudahan penggunaan.

Tinjauan sistematis terhadap penelitian AR di dunia pendidikan secara konsisten mengidentifikasi usability sebagai salah satu faktor penelitian yang paling sering dievaluasi. Hal ini menegaskan bahwa komunitas akademik memandang kemudahan penggunaan bukan sebagai tambahan, melainkan sebagai komponen inti yang setara pentingnya dengan efektivitas pembelajaran itu sendiri (Sirakaya and Alsancak Sirakaya 2018).

2. Metode

Setelah kita memahami jenis pengujian (Fungsional vs. Usability), kita perlu metode spesifik untuk melaksanakannya. Metode untuk menemukan bug teknis sangat berbeda dengan metode untuk menemukan kelemahan desain dari perspektif manusia.

a. Pengujian Black-Box (Metode Fungsional)

Metode pengujian fungsional yang paling umum untuk aplikasi AR adalah pengujian black-box (kotak hitam). Dalam metode ini, penguji (biasanya tim QA atau pengembang) memperlakukan aplikasi seperti "kotak hitam" yang buram. Mereka tidak perlu tahu atau peduli tentang bagaimana kode internal bekerja; mereka hanya peduli pada satu hal: apakah input menghasilkan output yang diharapkan?

Proses ini berjalan secara sistematis menggunakan daftar kasus uji (test cases) yang diturunkan langsung dari *storyboard* dan spesifikasi teknis:

1) Kasus Uji 1 (Pemicu AR):

a) Input

Saya mengarahkan kamera ke penanda "Processor".

b) Output yang Diharapkan

Model processor 3D muncul dalam 2 detik, stabil, dan menghadap pengguna.

c) Hasil Aktual

(Penguji mengisi)- > Misal "GAGAL. Model muncul, tetapi terbalik." (Ini dicatat sebagai bug).

2) Kasus Uji 2 (Interaksi):

a) Input

Saya mengetuk hotspot "Processor".

b) Output yang Diharapkan

Panel info Aorta muncul dan audio narasi processor diputar.

c) Hasil Aktual

(Penguji mengisi) -> Misal: "LULUS."

3) Kasus Uji 3 (Animasi):

a) Input

Saya menekan tombol "Putar Animasi".

b) Output yang Diharapkan

Animasi pemasangan processor diputar.

c) Hasil Aktual

(Penguji mengisi) -> Misal: "GAGAL. Aplikasi crash ke layar utama." (Ini dicatat sebagai bug kritis).

Metode black-box ini secara metodis memverifikasi setiap fungsi aplikasi terhadap daftar persyaratan yang telah disetujui sebelumnya.

b. Uji Coba Terbatas (Metode Usability)

Metode ini sangat berbeda. Tujuannya bukan untuk menemukan bug kode, tetapi untuk menemukan kelemahan desain dari perspektif pengguna. Metode ini harus melibatkan pengguna akhir yang sesungguhnya (siswa dan guru), karena

pengembang sudah terlalu "ahli" dan bias terhadap desain mereka sendiri.

Metode standar emas untuk ini adalah uji coba terbatas yang dimoderasi, yang sering menggunakan Protokol Berpikir Keras (Think-Aloud Protocol):

1) Rekrutmen

Tim memilih sampel kecil namun representatif dari target audiens (misalnya, 5-8 siswa dan 2 guru). Pakar usability Jakob Nielsen berteori bahwa pengujian dengan 5 pengguna saja sudah dapat mengungkap sekitar 85% masalah usability utama.

2) Skenario Tugas

Pengguna tidak diberi instruksi cara kerja aplikasi. Sebaliknya, mereka diberi skenario tugas (misalnya: "Bayangkan Anda sedang belajar untuk ujian biologi. Gunakan aplikasi ini untuk mencari tahu apa fungsi dari ventrikel kiri.")

3) Observasi (Think-Aloud)

Pengguna diminta untuk terus berbicara dan menyuarakan apa yang mereka pikirkan saat mereka mencoba menyelesaikan tugas. Fasilitator (peneliti) hanya mengamati, mendengarkan, dan mencatat "titik kesulitan" (pain points).

(Pengguna berkata) "Oke, saya buka... saya tidak yakin harus apa. Saya cari tombol 'Mulai'... oh ini dia. Sekarang saya lihat *Motherboard*. Saya harus cari Processor... saya coba ketuk... oh, bukan itu..."

4) Pengumpulan Data

Peneliti mencatat setiap kebingungan, kesalahan klik, atau frustrasi. Setelah sesi, pengguna sering diminta mengisi kuesioner standar seperti System Usability Scale (SUS) untuk mendapatkan skor kuantitatif tentang persepsi kemudahan penggunaan.

Hasil dari uji coba terbatas inilah yang memberikan wawasan desain yang tak ternilai, seperti "Tombol 'Mulai' tidak terlihat oleh 4 dari 5 siswa," yang mengarah pada iterasi dan perbaikan desain. Tinjauan sistematis studi AR di bidang pendidikan (Sirakaya and Alsancak Sirakaya 2018) mengonfirmasi bahwa evaluasi usability (menggunakan metode seperti ini) adalah tren penelitian yang dominan, yang menekankan pentingnya memastikan bahwa siswa dapat menggunakan alat tersebut dengan mudah.

3. Kriteria Keberhasilan

Setelah metode pengujian (fungsional dan *usability*) dilaksanakan, kita memerlukan rubrik yang jelas untuk menilai hasilnya. Kriteria keberhasilan adalah serangkaian standar terukur yang menentukan apakah aplikasi AR telah "lulus" pengujian dan siap untuk diluncurkan ke siswa. Keberhasilan ini diukur pada tiga pilar utama: stabilitas fungsional, kelancaran kinerja, dan kejelasan pedagogis.

a. Kriteria Fungsional: Stabilitas dan Minim Bug

Ini adalah kriteria teknis paling dasar. Sebuah aplikasi yang sukses harus stabil. Ini tidak berarti nol bug (yang hampir mustahil dalam perangkat lunak kompleks), tetapi berarti nol bug kritis. Dalam pengujian fungsional, bug biasanya dikategorikan:

1) Blocker / Kritis

Bug yang menghentikan alur pembelajaran. Misalnya, aplikasi crash saat memindai penanda, atau tombol interaksi utama tidak berfungsi sama sekali. Kriteria keberhasilan di sini adalah toleransi nol: aplikasi tidak boleh dirilis jika masih memiliki satu bug kritis.

2) Major

Bug yang sangat mengganggu tetapi memiliki solusi (misalnya, model 3D tidak mau berputar, tetapi dapat diatasi dengan me-reset adegan). Kriteria keberhasilan adalah mengurangi ini sebanyak mungkin.

3) Minor / Trivial

Bug kosmetik (misalnya, teks salah ketik, label bergeser 2 piksel). Ini dapat ditoleransi untuk rilis awal dan diperbaiki kemudian.

Aplikasi dianggap "berhasil" secara fungsional ketika 100% dari kasus uji kritis dan mayor telah lulus.

b. Kriteria Kinerja: Interaksi Berjalan Lancar

Kriteria ini menjembatani aspek fungsional dan usability. Sebuah fitur mungkin "berfungsi" (lulus tes black-box), tetapi terasa mengerikan untuk digunakan. "Kelancaran" adalah ukuran kinerja teknis yang dirasakan langsung oleh pengguna.

1) Frame Rate (FPS) Stabil

Interaksi yang lancar secara harfiah berarti frame rate yang tinggi dan stabil (ideal 60 FPS, minimal 30 FPS). Jika aplikasi patah-patah (stutter) setiap kali pengguna memutar model 3D, kriteria ini gagal.

2) Latensi Interaksi Rendah

Saat pengguna mengetuk tombol, respons visual atau audio harus terjadi seketika. Penundaan (latensi) bahkan sepersekian detik antara aksi (sentuhan) dan reaksi (animasi) dapat merusak ilusi interaktivitas dan membuat aplikasi terasa "berat" atau rusak.

3) Pelacakan Stabil

Ini khusus AR. Model 3D harus "terkunci" dengan stabil pada penanda atau permukaannya. Jika model bergetar, melayang, atau hanyut (drifting), pengalaman belajar terganggu dan kriteria kelancaran gagal.

c. Kriteria Usability: Konten Mudah Dipahami

Ini adalah kriteria pedagogis inti yang diukur melalui uji coba terbatas dengan pengguna. Aplikasi hanya berhasil jika siswa dapat menggunakannya untuk belajar tanpa frustrasi.

1) Kejelasan Navigasi

Apakah pengguna dapat menyelesaikan skenario tugas (misalnya, "temukan aorta") tanpa bertanya atau kebingungan? Ini diukur melalui observasi think-aloud. Keberhasilan berarti sebagian besar pengguna (misal, >80%) dapat menyelesaikan tugas inti tanpa bantuan.

2) Pengelolaan Beban Kognitif

Apakah pengguna melaporkan bahwa aplikasi "membingungkan" atau "terlalu banyak informasi sekaligus"? Jika ya, kriteria ini gagal. Konten yang mudah dipahami berarti label jelas, instruksi ringkas, dan desain visual tidak berantakan.

3) Skor SUS (System Usability Scale)

Ini adalah metrik kuantitatif yang kuat. Aplikasi yang berhasil secara usability harus mencapai skor SUS di atas 68 (rata-rata industri) dan idealnya di atas 80 (dianggap "luar biasa").

Kegagalan untuk memenuhi kriteria ini (baik fungsional maupun usability) adalah inti dari tantangan yang diidentifikasi dalam banyak studi AR. Tinjauan sistematis seperti oleh (Akçayır and Akçayır 2016) mengidentifikasi "masalah teknis" (bug, kinerja buruk) dan "masalah usability" (desain yang membingungkan) sebagai dua penghalang terbesar adopsi AR di pendidikan. Oleh karena itu, kriteria keberhasilan ini dirancang secara eksplisit untuk memverifikasi bahwa aplikasi telah mengatasi kedua tantangan utama tersebut.

E. Optimasi untuk Perangkat Mobile dan Desktop

Salah satu tantangan terbesar sekaligus kriteria keberhasilan utama dalam pengembangan aplikasi *Augmented Reality* (AR) adalah memastikan bahwa aplikasi tersebut dapat berjalan lancar di berbagai perangkat. Dalam konteks pendidikan, ekosistem perangkat keras sangatlah terfragmentasi; siswa mungkin menggunakan smartphone *Android* kelas atas, tablet *iOS* keluaran lama, atau bahkan laptop di

laboratorium komputer. Pengalaman belajar AR yang efektif secara pedagogis dapat hancur total jika secara teknis aplikasi tersebut patah-patah (laggy), lambat merespons, menguras baterai secara ekstrem, atau menyebabkan perangkat menjadi terlalu panas.

Oleh karena itu, optimasi bukanlah langkah opsional yang dilakukan di akhir, melainkan sebuah filosofi desain dan proses teknis berkelanjutan yang harus diintegrasikan ke dalam setiap tahapan pengembangan. Optimasi adalah seni untuk mengurangi jumlah sumber daya komputasi (siklus CPU, beban GPU, dan penggunaan RAM) yang dibutuhkan oleh aplikasi seminimal mungkin, tanpa mengorbankan kualitas visual dan interaktivitas yang esensial bagi tujuan pembelajaran. Keseimbangan ini adalah kunci untuk aksesibilitas dan usability.

Fokus terbesar dari optimasi adalah pada perangkat seluler (mobile), yang merupakan lingkungan paling menantang karena keterbatasan baterai, manajemen termal, dan sumber daya perangkat keras yang bervariasi. Sub-bab ini akan menguraikan teknik-teknik fundamental yang digunakan untuk mengoptimalkan aset dan kode guna memastikan bahwa aplikasi AR yang dihasilkan memberikan pengalaman yang stabil dan lancar bagi sebanyak mungkin siswa, di sebanyak mungkin perangkat.

1. Optimasi Performa

Optimasi performa adalah proses teknis yang berkelanjutan untuk memastikan aplikasi AR berjalan lancar. Ini adalah salah satu tahapan paling kritis, karena performa yang buruk (lag, panas, boros baterai) akan secara langsung menghancurkan pengalaman belajar dan menyebabkan frustrasi pada siswa. Proses ini menyentuh setiap bagian dari aplikasi, mulai dari ukuran file hingga cara grafis ditampilkan.

a. Mengurangi Ukuran File Aplikasi (Aksesibilitas)

Ini adalah optimasi hambatan pertama. Jika ukuran file aplikasi terlalu besar (misalnya, di atas 200 MB), banyak siswa (terutama yang menggunakan data seluler atau memiliki

penyimpanan ponsel terbatas) bahkan tidak akan mengunduhnya.

1) Kompresi Tekstur

Tekstur adalah penyebab terbesar ukuran file. Gunakan format kompresi modern yang dipercepat perangkat keras seperti ASTC (Adaptive Scalable Texture Compression), yang memberikan keseimbangan terbaik antara kualitas dan ukuran file dan didukung oleh hampir semua perangkat modern (*iOS* dan *Android*).

2) Optimasi Audio

Jangan pernah menyertakan file audio .WAV yang tidak terkompresi dalam rilis final. Gunakan format terkompresi seperti MP3 atau Ogg Vorbis. Untuk narasi suara, gunakan pengaturan "Force to Mono" di Unity, karena suara stereo tidak diperlukan dan menggandakan ukuran file.

3) Konten Sesuai Permintaan (On-Demand Content)

Ini adalah strategi terbaik. Jangan memaketkan semua aset (model 3D, video, audio untuk setiap bab) ke dalam unduhan awal. Gunakan sistem seperti Unity Addressables untuk menghosting aset Anda di server. Aplikasi awal yang diunduh siswa berukuran sangat kecil (misalnya, 50 MB). Saat mereka membuka "Bab 4", aplikasi baru akan mengunduh aset khusus untuk Bab 4 tersebut.

b. Optimasi Aset Real-time (Models, Textures, Audio)

Optimasi ini berfokus pada pengurangan beban kerja CPU dan GPU setiap frame untuk menjaga Frame Rate (FPS) tetap tinggi (minimal 30 FPS, ideal 60 FPS).

1) Model 3D (Optimasi CPU)

a) Jumlah *Poligon*

Seperti dibahas sebelumnya, jaga jumlah *poligon* tetap rendah (*Low-Poly*) dan gunakan Normal Maps untuk memalsukan detail.

b) Draw Calls (Panggilan Gambar)

Ini adalah konsep optimasi yang krusial. Seringkali, masalah performa bukan karena GPU menggambar *poligon*, tetapi karena CPU kewalahan menyuruh GPU untuk menggambar. Setiap objek terpisah dalam adegan biasanya memerlukan setidaknya satu draw call. Sebuah model mesin yang terdiri dari 500 baut terpisah bisa berarti 500 draw call, yang akan menghancurkan performa CPU seluler.

c) Solusi (Batching)

Untuk semua objek yang tidak perlu bergerak secara individual (misalnya, baut, blok mesin, casing), gunakan teknik seperti Static Batching di Unity. Ini menggabungkan semua mesh statis tersebut menjadi satu mesh gabungan raksasa, mengurangi 500 draw call menjadi satu.

2) Tekstur (Optimasi GPU)

a) Texture Atlasin

Daripada memiliki 20 objek kecil (baut, kabel, tombol) yang masing-masing menggunakan material dan peta teksturnya sendiri (20 draw calls), seniman 3D akan menggabungkan semua tekstur tersebut ke dalam satu lembar tekstur besar (Atlas). Ini memungkinkan GPU untuk menggambar semua 20 objek tersebut hanya dalam satu draw call, memberikan peningkatan performa yang sangat besar.

b) Resolusi

Jaga resolusi tekstur serendah mungkin (mis. 1K atau 2K), jangan gunakan 4K kecuali benar-benar diperlukan untuk objek pahlawan (*hero object*).

3) Audio (Optimasi RAM)

Untuk file audio yang panjang (musik latar, narasi lebih dari 30 detik), atur ke "Stream from Disc" di Unity. Ini memutar audio langsung dari penyimpanan perangkat tanpa memuat seluruh file ke dalam RAM, sehingga menghemat memori yang sangat berharga.

c. Mengatur Resolusi Grafis (Skalabilitas)

Tidak semua perangkat diciptakan sama. Sebuah aplikasi AR harus dapat beradaptasi. Memaksa iPhone 8 untuk merender adegan yang sama dengan iPhone 15 Pro adalah resep kegagalan.

1) Penskalaan Resolusi (Resolution Scaling)

Ini adalah teknik optimasi paling efektif. Antarmuka Pengguna (UI) seperti tombol dan teks tetap ditampilkan pada resolusi asli perangkat (agar terlihat tajam), tetapi adegan 3D di-render pada resolusi yang lebih rendah (misalnya, 75% atau 50% dari resolusi asli) dan kemudian direntangkan (upscaled) agar pas di layar. Ini secara drastis mengurangi jumlah piksel yang harus digambar GPU setiap frame dan memberikan peningkatan FPS yang besar dengan penurunan kualitas visual yang minimal.

2) Pengaturan Kualitas Adaptif

Aplikasi yang baik menyediakan menu Pengaturan Grafis (Rendah, Sedang, Tinggi). Pengaturan "Rendah" mungkin akan mematikan bayangan real-time, mengurangi resolusi tekstur, atau menonaktifkan efek pasca-pemrosesan, memastikan bahwa siswa dengan perangkat spesifikasi rendah masih dapat menjalankan aplikasi dengan lancar.

Semua teknik optimasi ini sangat penting untuk mencapai *rendering* real-time yang efektif. Seperti yang dijelaskan dalam teks fundamental AR (Schmalstieg & Hollerer, 2016), seluruh paradigma AR bergantung pada kemampuan sistem untuk melakukan komputasi dan *rendering* adegan virtual yang selaras

dengan dunia nyata pada frame rate yang tinggi. Kegagalan untuk mengoptimalkan aset secara agresif (mengelola *poligon*, mengurangi draw call, dan mengompres tekstur) membuat *rendering* real-time yang lancar menjadi tidak mungkin di perangkat seluler yang terbatas.

2. Kompatibilitas Multi-Platform

Di lingkungan pendidikan modern, hampir tidak mungkin untuk menjamin bahwa semua siswa dan pendidik menggunakan satu jenis perangkat atau satu sistem operasi yang sama. Kita akan menemukan ekosistem yang terfragmentasi: siswa mungkin membawa ponsel *Android*, guru menggunakan iPad (*iOS*), dan laboratorium komputer sekolah mungkin berjalan di Windows. Oleh karena itu, agar media pembelajaran AR dapat diakses secara merata dan berkelanjutan, aplikasi harus dirancang untuk kompatibilitas multi-platform.

Di sinilah letak alasan strategis utama mengapa *Unity 3D* mendominasi pengembangan AR. *Unity* adalah engine lintas-platform sejati, yang bertindak sebagai "penerjemah universal". Pengembang membangun satu proyek inti, dan *Unity* menyediakan alat untuk mengkompilasi dan mengekspor proyek tersebut ke hampir semua format yang ada.

a. Platform Mobile: *Android* (.APK) & *iOS* (.IPA)

Ini adalah target utama untuk aplikasi AR pendidikan. *Android* dan *iOS* adalah dua dunia yang sama sekali berbeda; mereka menggunakan bahasa asli yang berbeda, API grafis yang berbeda (seperti Vulkan/OpenGL ES di *Android* vs. Metal di *iOS*), dan teknologi AR native yang bersaing (*ARCore* vs. *ARKit*).

1) Tantangan

Membuat aplikasi terpisah untuk masing-masing platform dari awal akan menggandakan waktu, biaya, dan upaya pengembangan.

2) Solusi (Unity + AR Foundation)

Seperti yang telah dibahas, pengembang tidak lagi perlu memilih antara *ARCore* atau *ARKit*. Mereka membangun aplikasi satu kali di Unity menggunakan plugin AR Foundation.

a) Saat menargetkan *Android*

Unity mengambil proyek tersebut, menggabungkannya dengan pustaka *ARCore*, dan mengkompilasinya menjadi file .APK (atau .AAB untuk Google Play Store) yang dapat diinstal di perangkat *Android* yang kompatibel.

b) Saat menargetkan *iOS* (di Mac)

Pengembang beralih target, dan Unity mengkompilasi proyek yang sama, menggabungkannya dengan pustaka *ARKit*, dan menghasilkan sebuah Proyek Xcode. Pengembang kemudian harus membuka proyek ini di macOS untuk langkah kompilasi terakhir yang menghasilkan file .IPA yang dapat didistribusikan ke iPhone dan iPad.

Alur kerja ini memungkinkan pemeliharaan satu basis kode untuk melayani lebih dari 99% pasar smartphone.

b. Platform Desktop: Windows (.EXE) & macOS (.APP)

Meskipun AR paling umum digunakan di perangkat seluler, ada alasan kuat mengapa kompatibilitas desktop juga penting dalam proses pengembangan:

1) Pengujian Cepat (Iterasi)

Menunggu 5-10 menit setiap kali untuk mengkompilasi dan mengirim aplikasi ke ponsel hanya untuk menguji apakah satu tombol berfungsi sangatlah tidak efisien. Pengembang dapat secara instan menekan "Play" di dalam *Unity Editor* di PC Windows atau Mac mereka untuk

menguji sebagian besar logika, UI, dan interaksi menggunakan kamera web yang disimulasikan.

2) Pengembangan Headset

Aplikasi AR/MR yang lebih canggih (misalnya untuk Microsoft HoloLens atau Meta Quest) sering kali dikembangkan dan dijalankan pada platform berbasis Windows. Build standalone Windows (.EXE) adalah format output untuk jenis aplikasi ini.

3) Simulasi Cadangan

Aplikasi dapat diekspor sebagai program .EXE (Windows) atau .APP (macOS) standar yang berjalan sebagai simulator 3D non-AR. Ini memungkinkan siswa di laboratorium komputer (yang tidak memiliki ponsel atau kamera) untuk tetap berinteraksi dengan model 3D dan pembelajaran, meskipun tanpa komponen AR-nya.

Kemampuan untuk menargetkan semua platform ini dari satu proyek adalah alasan mengapa engine seperti Unity sangat penting. Tinjauan sistematis terhadap aplikasi AR yang sukses di bidang STEM, seperti oleh (Ibáñez and Delgado-Kloos 2018), menemukan bahwa banyak intervensi yang berhasil bergantung pada alat authoring (seperti Unity) justru karena fleksibilitas ini, yang memungkinkan para pendidik dan peneliti untuk membuat pengalaman yang dapat diakses oleh populasi siswa mereka yang beragam secara teknologi.

3. Output Akhir

Hasil akhir (output) dari keseluruhan alur kerja pengembangan dan optimasi bukanlah sekadar aplikasi yang "jadi", melainkan sebuah produk digital yang telah diasah secara teknis, divalidasi secara fungsional, dan diuji usability-nya. Output ideal ini adalah aplikasi AR yang siap didistribusikan dan dicirikan oleh tiga pilar kualitas utama: ringan, responsif, dan dapat digunakan lintas perangkat. Ini adalah produk yang dirancang untuk mengatasi hambatan teknis agar dapat fokus memberikan nilai pedagogis

a. Ringan (*Lightweight*)

Dalam konteks perangkat seluler, "ringan" memiliki dua arti krusial yang berdampak langsung pada aksesibilitas siswa:

1) Ukuran File Unduhan yang Kecil

Aplikasi final harus memiliki jejak penyimpanan yang minimal. Ini dicapai melalui semua teknik optimasi aset yang telah dibahas: kompresi tekstur (menggunakan format modern seperti ASTC), kompresi audio (MP3/Ogg), dan yang terpenting, strategi konten sesuai permintaan (on-demand) menggunakan sistem seperti Addressables di Unity. Output yang ideal adalah aplikasi "cangkang" yang kecil (<100MB) yang hanya mengunduh *aset 3D* untuk bab yang sedang dipelajari siswa.

2) Penggunaan Memori (RAM) yang Efisien

Aplikasi tidak boleh memonopoli RAM perangkat, yang dapat menyebabkan sistem operasi menutup aplikasi penting lainnya atau membuat aplikasi AR itu sendiri crash. Ini dicapai dengan memuat dan membongkar (load/unload) aset secara dinamis, bukan menyimpan semua model 3D di memori sekaligus.

b. Responsif (*Responsive*)

Responsivitas adalah ukuran kualitas performa real-time dan merupakan kunci untuk usability dan imersi. Aplikasi yang "lambat" atau "patah-patah" akan membuat siswa frustrasi dan merusak proses belajar. Output yang responsif ditentukan oleh:

1) Frame Rate (FPS) Stabil

Aplikasi akhir harus mampu mempertahankan frame rate yang stabil (minimal 30 FPS, ideal 60 FPS) bahkan ketika menampilkan model 3D yang kompleks. Ini adalah hasil langsung dari optimasi real-time yang sukses: anggaran *poligon* yang ketat, penggunaan Normal Maps secara

ekstensif, dan teknik canggih seperti Draw Call Batching dan Texture Atlasing.

2) Latensi Interaksi Rendah

Saat siswa menyentuh layar untuk memutar objek atau menekan tombol hotspot, respons visual dan audio harus terjadi seketika. Penundaan (lag) antara input dan output merusak rasa interaktivitas langsung yang merupakan keunggulan utama AR.

c. Dapat Digunakan Lintas Perangkat (Cross-Device)

Output akhir bukanlah satu file tunggal, melainkan serangkaian paket aplikasi yang dikompilasi dari satu basis kode proyek yang sama, untuk memastikan jangkauan audiens yang maksimal. Ini adalah hasil dari strategi pengembangan multi-platform yang dipilih di awal. Paket pengiriman akhir harus mencakup:

1) File .APK atau .AAB (*Android App Bundle*)

Siap untuk didistribusikan ke Google Play Store atau diinstalasi langsung di perangkat *Android*.

2) Proyek Xcode / File .IPA

Siap untuk dikirim ke App Store Apple untuk pengguna iPhone dan iPad.

3) (Opsional) Build Standalone (.EXE / .APP)

Untuk penggunaan di desktop (Windows/macOS) sebagai simulator atau untuk headset AR/MR.

Mencapai output akhir yang ideal yang ringan, responsif, dan lintas-platform adalah tujuan utama dari keseluruhan proses desain teknis. Output ini secara langsung dirancang untuk mengatasi tantangan terbesar yang diidentifikasi dalam literatur pendidikan AR. Tinjauan sistematis seperti oleh Akçayır & Akçayır (2017) menunjukkan bahwa "masalah teknis" (termasuk kinerja buruk dan masalah kompatibilitas) dan "masalah usability" adalah

penghalang utama bagi adopsi AR. Oleh karena itu, output akhir yang telah dioptimalkan secara menyeluruh adalah solusi langsung untuk mengatasi hambatan-hambatan tersebut.



BAB

7

IMPLEMENTASI DAN EVALUASI MEDIA AR

Bab ini membahas strategi implementasi media AR dalam pembelajaran tatap muka maupun daring. Materi mencakup persiapan guru dan siswa, teknik fasilitasi pembelajaran berbasis AR, serta langkah-langkah evaluasi efektivitas media. Selain itu, dibahas metode pengukuran hasil belajar dan pengumpulan umpan balik untuk mengetahui keberhasilan penggunaan media. Bab ini menekankan pentingnya evaluasi berkelanjutan guna memastikan media AR memberikan dampak positif terhadap proses dan hasil pembelajaran.

A. Strategi Implementasi AR di Kelas dan Pembelajaran Daring

Keberhasilan pengembangan media pembelajaran berbasis *Augmented Reality* (AR) tidak hanya ditentukan oleh kualitas desain, kelengkapan fitur, atau kecanggihan teknologi yang digunakan, tetapi juga sangat bergantung pada bagaimana media tersebut diimplementasikan dalam proses pembelajaran. Setelah melalui tahapan analisis kebutuhan, perancangan, pengembangan, pengujian, dan evaluasi, media AR pada akhirnya harus diterapkan dalam situasi pembelajaran yang nyata agar dapat memberikan manfaat bagi peserta didik. Pada tahap inilah strategi implementasi memegang peranan yang sangat penting sebagai penghubung antara teknologi yang telah dikembangkan dengan tujuan pembelajaran yang ingin dicapai.

Dalam praktik pendidikan, tidak sedikit media pembelajaran yang secara teknis telah dikembangkan dengan baik, namun kurang memberikan dampak yang signifikan terhadap hasil belajar karena implementasinya tidak direncanakan secara optimal. Media pembelajaran yang inovatif dapat kehilangan nilai edukatifnya apabila digunakan tanpa mempertimbangkan tujuan pembelajaran, karakteristik peserta didik, metode pembelajaran yang digunakan, serta konteks lingkungan belajar. Oleh karena itu, implementasi media AR tidak boleh dipandang sekadar sebagai kegiatan memperkenalkan teknologi baru kepada siswa, melainkan sebagai bagian integral dari strategi pembelajaran yang dirancang untuk mendukung pencapaian kompetensi tertentu.

Strategi implementasi merupakan serangkaian perencanaan dan langkah sistematis yang mengatur bagaimana media AR digunakan dalam proses pembelajaran agar dapat memberikan pengalaman belajar yang efektif, efisien, dan bermakna. Strategi ini mencakup berbagai aspek, mulai dari penentuan waktu penggunaan media, pengelolaan aktivitas belajar, pembagian peran antara guru dan peserta didik, hingga mekanisme evaluasi hasil belajar. Dengan adanya strategi implementasi yang jelas, penggunaan media AR dapat terintegrasi secara harmonis dengan kurikulum, metode pembelajaran, dan kebutuhan peserta didik.

Salah satu aspek penting dalam implementasi media AR adalah penentuan posisi media tersebut dalam alur pembelajaran. Penggunaan AR dapat dilakukan pada berbagai tahap kegiatan belajar, tergantung pada tujuan yang ingin dicapai. Pada tahap pendahuluan, AR dapat digunakan untuk menarik perhatian siswa, membangun motivasi belajar, dan memberikan gambaran awal mengenai materi yang akan dipelajari. Pada tahap inti, AR dapat berfungsi sebagai media eksplorasi, observasi, simulasi, maupun praktik virtual yang membantu siswa memahami konsep secara lebih mendalam. Sementara itu, pada tahap penutup, AR dapat digunakan untuk memperkuat pemahaman siswa melalui kegiatan refleksi, diskusi, atau evaluasi pembelajaran.

Implementasi media AR juga mengubah peran guru dalam proses pembelajaran. Dalam model pembelajaran konvensional, guru sering kali berperan sebagai sumber utama informasi. Namun, dalam pembelajaran yang memanfaatkan teknologi AR, peran guru bergeser menjadi fasilitator, pembimbing, dan pengelola pengalaman belajar. Guru bertugas menciptakan lingkungan belajar yang mendukung eksplorasi, memberikan arahan yang diperlukan, membantu siswa mengatasi kesulitan, serta memfasilitasi diskusi dan refleksi setelah penggunaan media. Dengan demikian, guru tetap memiliki peran sentral dalam memastikan bahwa penggunaan AR benar-benar mendukung pencapaian tujuan pembelajaran.

Selain itu, implementasi media AR perlu dirancang sebagai bagian dari rangkaian aktivitas pembelajaran yang utuh. Penggunaan aplikasi AR sebaiknya tidak berdiri sendiri, melainkan diintegrasikan dengan kegiatan pra-pembelajaran dan pascapembelajaran. Sebelum menggunakan aplikasi AR, siswa perlu diberikan pengantar mengenai tujuan pembelajaran, konsep dasar yang akan dipelajari, serta petunjuk penggunaan media. Tahap ini penting untuk mempersiapkan siswa agar dapat memanfaatkan media secara optimal. Setelah kegiatan AR selesai dilakukan, siswa perlu diberikan kesempatan untuk melakukan diskusi, menyusun laporan, menjawab pertanyaan reflektif, atau mengerjakan tugas yang berkaitan dengan pengalaman belajar yang telah diperoleh. Aktivitas lanjutan tersebut berfungsi untuk memperkuat pemahaman konsep dan membantu proses internalisasi pengetahuan.

Perencanaan implementasi juga harus mempertimbangkan aspek teknis yang dapat memengaruhi kelancaran penggunaan media AR. Faktor-faktor seperti ketersediaan perangkat, kompatibilitas aplikasi, kapasitas penyimpanan, kualitas koneksi internet, kondisi jaringan sekolah, serta kesiapan pengguna perlu diperhatikan sebelum media digunakan dalam pembelajaran. Persiapan teknis yang baik akan meminimalkan potensi gangguan yang dapat menghambat proses belajar. Oleh karena itu, guru dan pengembang media perlu melakukan uji coba serta memastikan bahwa seluruh perangkat dan aplikasi berfungsi dengan baik sebelum kegiatan pembelajaran dilaksanakan.

Pentingnya strategi implementasi menjadi semakin nyata ketika media AR digunakan dalam berbagai model pembelajaran yang berbeda. Saat ini, pembelajaran tidak lagi terbatas pada ruang kelas fisik, tetapi juga mencakup pembelajaran daring (online) dan pembelajaran hybrid yang mengombinasikan kegiatan tatap muka dengan aktivitas digital. Masing-masing model pembelajaran memiliki karakteristik, tantangan, dan kebutuhan implementasi yang berbeda sehingga memerlukan pendekatan yang disesuaikan.

Pada pembelajaran tatap muka, guru memiliki kesempatan untuk memberikan bimbingan secara langsung selama penggunaan media AR. Guru dapat mengamati aktivitas siswa, memberikan bantuan ketika terjadi kesulitan, serta mengarahkan diskusi secara langsung berdasarkan pengalaman yang diperoleh siswa saat berinteraksi dengan media. Interaksi langsung ini memungkinkan proses pembelajaran berlangsung lebih terkontrol dan memudahkan guru dalam melakukan penyesuaian strategi pembelajaran sesuai dengan kondisi kelas.

Sebaliknya, dalam pembelajaran daring, penggunaan media AR memerlukan perencanaan yang lebih rinci karena siswa mengakses media secara mandiri dari lokasi yang berbeda. Guru perlu menyediakan panduan penggunaan yang jelas, materi pendukung yang mudah diakses, serta mekanisme komunikasi yang memungkinkan siswa memperoleh bantuan ketika menghadapi kendala. Selain itu, kegiatan refleksi dan evaluasi perlu dirancang sedemikian rupa agar tetap mampu mengukur ketercapaian tujuan pembelajaran meskipun proses belajar berlangsung tanpa interaksi tatap muka secara langsung.

Pada model pembelajaran hybrid, media AR memiliki potensi yang sangat besar karena dapat digunakan baik di lingkungan kelas maupun di luar kelas. Siswa dapat melakukan eksplorasi awal secara mandiri di rumah menggunakan aplikasi AR, kemudian melanjutkan diskusi, praktik, atau kegiatan pemecahan masalah bersama guru dan teman-temannya di kelas. Pendekatan ini memungkinkan terciptanya pengalaman belajar yang lebih fleksibel, berkesinambungan, dan berpusat pada peserta didik.

Dengan demikian, strategi implementasi merupakan komponen yang tidak dapat dipisahkan dari keberhasilan penggunaan media pembelajaran berbasis *Augmented Reality*. Strategi yang dirancang dengan baik akan memastikan bahwa teknologi AR tidak hanya menjadi alat visualisasi yang menarik, tetapi juga menjadi sarana yang efektif dalam mendukung proses pembelajaran dan pencapaian kompetensi peserta didik. Melalui perencanaan yang matang, integrasi yang tepat dengan kurikulum, serta pengelolaan aktivitas pembelajaran yang sistematis, media AR dapat dimanfaatkan secara optimal untuk menciptakan pengalaman belajar yang interaktif, kontekstual, dan bermakna baik dalam pembelajaran tatap muka, daring, maupun hybrid. Oleh karena itu, pemahaman mengenai strategi implementasi menjadi langkah penting yang harus dikuasai oleh guru, pengembang media, dan seluruh pihak yang terlibat dalam pemanfaatan teknologi AR di bidang pendidikan.

1. Implementasi di Kelas Tatap Muka

Implementasi *Augmented Reality* (AR) di kelas tatap muka menawarkan peluang unik untuk menggabungkan interaksi digital dengan lingkungan fisik, menciptakan pengalaman belajar yang mendalam dan kolaboratif. Dalam konteks pembelajaran perangkat keras komputer, AR dapat berfungsi sebagai jembatan yang sangat efektif antara teori abstrak dan komponen fisik yang kompleks, terutama dalam situasi di mana komponen fisik mungkin langka atau terlalu rapuh untuk dibongkar-pasang berulang kali.

a. Penggunaan AR Saat Praktikum (Perakitan Komputer atau Diagnosis Masalah)

Salah satu aplikasi AR paling kuat di kelas tatap muka adalah selama kegiatan praktikum, di mana siswa perlu memahami struktur spasial dan urutan prosedural.

1) Simulasi Perakitan Komputer Virtual:

a) Skenario

Siswa dapat menggunakan aplikasi AR untuk memproyeksikan komponen komputer virtual (misalnya,

motherboard, CPU, RAM, GPU, HDD/SSD) ke atas meja fisik mereka.

b) Prosedur

Aplikasi dapat memandu siswa langkah demi langkah dalam merakit komponen-komponen ini secara virtual, misalnya:

- Instruksi AR

"Ambil CPU virtual dan pasang ke soket ini." Model 3D soket CPU di *motherboard* virtual akan berkedip atau diberi panah AR.

- Umpan Balik Instan

Jika siswa mencoba memasang CPU pada orientasi yang salah, aplikasi dapat memberikan umpan balik visual (misalnya, X merah AR) dan audio ("Orientasi salah. Periksa pin keying!").

- Tampilan Meledak

Setelah dirakit, siswa dapat memicu tampilan meledak AR untuk melihat bagaimana semua komponen saling terhubung di dalam casing virtual.

c) Manfaat

Ini memungkinkan siswa melakukan kesalahan dan belajar darinya dalam lingkungan tanpa risiko, membangun kepercayaan diri sebelum bekerja dengan perangkat keras fisik yang mahal.

2) Diagnosis Masalah Perangkat Keras dengan AR:

a) Skenario

Aplikasi AR dapat digunakan untuk "melapisi" informasi diagnostik pada komponen komputer fisik.

b) Prosedur

Siswa mengarahkan kamera ponsel/tablet mereka ke *motherboard* fisik yang sedang bermasalah. Aplikasi AR dapat:

- Menampilkan Indikator

Memberi label AR pada komponen kunci seperti kapasitor yang rusak (misalnya, "Kapasitor C475 - Tegangan Rendah") atau chipset yang terlalu panas (misalnya, "Chipset Northbridge - Suhu 85°C").

- Visualisasi Aliran Data/Daya

Mensimulasikan aliran daya atau data virtual di sepanjang jalur sirkuit, membantu siswa memahami di mana kemacetan terjadi.

c) Manfaat

Memvisualisasikan data diagnostik yang tidak terlihat di dunia nyata, mempercepat proses pembelajaran diagnosis masalah.

b. Integrasi dengan Metode Diskusi, Presentasi, dan Pembelajaran Berbasis Proyek

Media AR tidak boleh menjadi aktivitas soliter. Kekuatannya diperbesar ketika diintegrasikan dengan pedagogi kolaboratif.

1) Diskusi Kelompok dengan Model Bersama:

a) Skenario

Setelah praktikum perakitan AR, kelompok siswa dapat menggunakan aplikasi untuk memproyeksikan model 3D komponen penting (misalnya, CPU dan Heat Sink) ke meja yang sama.

b) Prosedur

Siswa dapat memanipulasi model secara kolektif (satu siswa memutar CPU, yang lain melakukan zoom pada heat sink) sambil mendiskusikan prinsip kerja dan tantangan pemasangan. Guru dapat memfasilitasi dengan pertanyaan seperti, "Mengapa penting untuk menggunakan pasta termal di antara CPU dan heat sink ini?"

c) Manfaat

Mendorong percakapan yang mendalam, pemikiran kritis, dan pemahaman bersama tentang objek yang sedang dipelajari.

2) Presentasi Berbasis AR oleh Siswa:

a) Skenario

Siswa ditugaskan untuk mempresentasikan cara kerja komponen komputer tertentu (misalnya, cara kerja RAM).

b) Prosedur

Alih-alih hanya menggunakan slide datar, siswa dapat menggunakan aplikasi AR untuk memproyeksikan model 3D interaktif dari modul RAM, memutarnya, dan menyorot bagian-bagiannya (misalnya, chip memori, pin konektor) saat mereka menjelaskan fungsinya kepada teman sekelas.

c) Manfaat

Meningkatkan keterlibatan audiens, memvisualisasikan konsep abstrak, dan memberdayakan siswa untuk menjadi ahli dalam materi.

3) Pembelajaran Berbasis Proyek (PBL):

a) Skenario

Siswa ditugaskan proyek untuk "merancang" komputer gaming ideal.

b) Prosedur

Aplikasi AR dapat menjadi bagian dari riset mereka. Siswa dapat menggunakan AR untuk membandingkan ukuran fisik komponen (misalnya, GPU berukuran penuh vs. GPU mini) yang diproyeksikan ke dalam casing komputer virtual untuk melihat apakah akan muat. Mereka juga dapat menggunakan AR untuk memvisualisasikan potensi aliran udara (airflow) virtual di dalam casing dengan berbagai konfigurasi kipas.

c) Manfaat

Mendorong penerapan pengetahuan ke masalah dunia nyata, mendukung desain dan pemecahan masalah.

Integrasi AR ke dalam praktik kelas telah berulang kali terbukti efektif dalam meningkatkan motivasi dan keterlibatan siswa. Dalam tinjauan sistematis oleh (Akçayır and Akçayır 2016), studi menunjukkan bahwa pengalaman interaktif AR, terutama yang menggabungkan manipulasi dan visualisasi 3D, secara signifikan mendukung pembelajaran kognitif, terutama ketika diintegrasikan ke dalam aktivitas praktikum dan diskusi.

2. Implementasi dalam Pembelajaran Daring

Pembelajaran daring (*online Learning*) menghadirkan tantangan unik dibandingkan kelas tatap muka, terutama dalam memfasilitasi pengalaman praktis dan interaktif. Di sinilah *Augmented Reality* (AR) memiliki potensi besar untuk mengurangi "gap" antara pengalaman virtual dan fisik. Dalam pembelajaran daring, AR dapat memungkinkan siswa untuk berinteraksi dengan komponen perangkat keras komputer secara virtual dari lokasi mana pun, kapan pun, tanpa memerlukan perangkat keras fisik yang mahal atau bimbingan langsung guru.

a. Pemanfaatan Aplikasi AR Berbasis Mobile/Desktop

Aksesibilitas adalah kunci dalam pembelajaran daring.

1) Aplikasi Mobile AR (*Android/iOS*)

a) Skenario

Siswa dapat mengunduh aplikasi AR pembelajaran perangkat keras komputer ke smartphone atau tablet mereka.

b) Penggunaan

Aplikasi ini dapat menyediakan modul interaktif mandiri. Misalnya, satu modul memungkinkan siswa memindai penanda di buku elektronik mereka untuk menampilkan model 3D CPU virtual. Siswa kemudian dapat memutar, memperbesar, melihat penampang inti, dan membaca deskripsi tentang arsitektur mikro prosesor tersebut. Modul lain mungkin memungkinkan siswa menempatkan model 3D *motherboard* virtual di meja mereka untuk berlatih mengidentifikasi berbagai port dan slot (PCIe, RAM, SATA) dengan label AR yang muncul saat diketuk.

c) Manfaat

Memungkinkan siswa untuk belajar dengan kecepatan mereka sendiri, kapan saja, di mana saja, dengan visualisasi 3D yang kaya, mengatasi keterbatasan fisik laboratorium di lingkungan daring.

2) Aplikasi Desktop AR (Simulasi / WebAR):

a) Skenario

Untuk siswa yang tidak memiliki perangkat mobile yang kompatibel atau lebih suka belajar di komputer, aplikasi dapat disediakan sebagai standalone build (misalnya, .EXE) atau melalui WebAR.

b) Penggunaan

- Simulasi 3D Interaktif (non-AR)

Versi desktop dari aplikasi AR dapat berfungsi sebagai simulator 3D interaktif yang memungkinkan siswa memanipulasi model komputer virtual sepenuhnya dalam lingkungan digital, bahkan tanpa kemampuan AR (menggunakan mouse dan keyboard).

- WebAR

Jika materi pembelajaran hanya memerlukan interaksi AR yang sederhana (misalnya, melihat model 3D kartu grafis yang berputar di atas meja melalui browser), WebAR dapat menjadi solusi cepat tanpa perlu menginstal aplikasi.

- c) Manfaat

Memastikan inklusivitas bagi siswa dengan berbagai jenis perangkat, mengurangi hambatan teknis.

- b. Integrasi dengan *Learning Management System* (LMS)

Integrasi dengan LMS (seperti Moodle, Canvas, Google Classroom) sangat penting untuk mengelola pengalaman belajar secara kohesif.

- 1) Penyediaan Materi & Panduan:

- a) Prosedur

Guru dapat mengunggah tautan unduhan aplikasi AR atau penanda gambar (jika menggunakan *marker-based* AR) langsung ke LMS. Setiap modul AR dapat disertai dengan instruksi tertulis, video tutorial, dan pertanyaan refleksi di LMS.

- b) Contoh

Sebuah unit tentang "Memori Komputer" di LMS dapat memiliki sub-bagian "Aktivitas AR: Menjelajahi RAM." Di sana, siswa menemukan tautan ke aplikasi AR dan file gambar penanda untuk RAM.

c) Manfaat

Sentralisasi semua sumber daya pembelajaran, memudahkan siswa menemukan dan mengakses alat AR.

2) Penilaian & Pelacakan Kemajuan:

a) Prosedur

Aplikasi AR dapat diintegrasikan dengan LMS untuk melaporkan data penggunaan. Misalnya, aplikasi dapat mencatat berapa lama siswa berinteraksi dengan model CPU, berapa kali mereka mencoba memasang komponen dengan benar, atau apakah mereka berhasil menyelesaikan simulasi perakitan virtual.

b) Manfaat

Memberikan guru wawasan tentang keterlibatan dan pemahaman siswa, memungkinkan penilaian formatif, dan personalisasi pembelajaran.

c. Model Flipped Classroom Berbasis AR

Model flipped classroom (kelas terbalik) sangat cocok untuk AR karena memindahkan konsumsi informasi dasar ke luar kelas dan menggunakan waktu di kelas untuk aplikasi pengetahuan dan diskusi.

1) Skenario

Untuk unit tentang "Struktur Internal Komputer."

2) Prosedur

a) Sebelum Kelas (di rumah)

Siswa ditugaskan untuk menggunakan aplikasi AR mereka untuk secara mandiri mengeksplorasi model 3D *motherboard*, CPU, dan RAM yang telah disediakan. Mereka harus mengidentifikasi komponen kunci, membaca deskripsi AR, dan menyelesaikan kuis singkat (terintegrasi dalam aplikasi atau LMS) tentang fungsi dasar komponen-komponen tersebut.

b) Selama Kelas (daring/tatap muka)

Waktu kelas digunakan untuk diskusi yang lebih mendalam, pemecahan masalah (misalnya, guru memberikan skenario masalah diagnosis), atau praktikum yang lebih canggih (misalnya, membandingkan efisiensi termal berbagai heat sink menggunakan model AR yang berbeda). Guru dapat bertanya, "Dari eksplorasi AR Anda, mengapa penting untuk mencocokkan jenis RAM dengan slot di *motherboard*?"

3) Manfaat

Memaksimalkan waktu interaksi yang berharga, memungkinkan siswa datang ke kelas dengan pengetahuan dasar yang solid, dan memfasilitasi pembelajaran aktif.

Literatur AR secara konsisten mendukung penggunaan AR dalam model pembelajaran daring dan flipped classroom. Tinjauan oleh (Garzón 2019) menyoroti bahwa AR mempromosikan motivasi dan hasil belajar di lingkungan ini dengan menyediakan pengalaman visual yang mendalam dan interaktif yang melampaui media 2D tradisional, asalkan implementasi tersebut terintegrasi dengan baik ke dalam kurikulum dan ekosistem pembelajaran yang ada.

B. Persiapan Guru dan Siswa

1. Guru

Aplikasi AR yang paling sempurna sekalipun akan gagal secara pedagogis jika guru yang mengelolanya tidak siap. Guru bertransisi dari seorang "penyampai informasi" menjadi "fasilitator" atau "orkestrator" pengalaman belajar. Persiapan mereka mutlak diperlukan dan mencakup tiga domain: teknis, pedagogis, dan logistik.

a. Pelatihan Penggunaan Aplikasi AR (Penguasaan Teknis)

Sebelum memperkenalkan aplikasi kepada siswa, guru harus mencapai tingkat penguasaan dan kenyamanan teknis yang

tinggi. Ketidakpercayaan diri guru terhadap teknologi akan menular kepada siswa dan dapat menghentikan pelajaran jika terjadi kesalahan kecil.

1) Penguasaan Fitur

Guru harus sudah mencoba setiap tombol dan setiap interaksi dalam aplikasi perangkat keras komputer. Mereka harus tahu persis bagaimana memicu model 3D (baik memindai penanda *motherboard* atau mendeteksi permukaan meja), cara mengaktifkan tampilan meledak (*exploded view*), cara memutar dan memperbesar CPU, dan cara mengakses setiap label informasi.

2) Antisipasi Masalah (Troubleshooting)

Guru harus dilatih untuk menangani skenario kegagalan yang paling umum: Apa yang harus dilakukan jika penanda tidak terdeteksi? (Solusi: Periksa pencahayaan, pastikan penanda datar, bersihkan kamera). Apa yang harus dilakukan jika aplikasi lag? (Solusi: Tutup aplikasi latar belakang lain, mulai ulang perangkat). Kesiapan teknis ini mencegah kepanikan dan menjaga alur pelajaran tetap berjalan.

b. Perencanaan Skenario Pembelajaran (Penguasaan Pedagogis)

Ini adalah bagian terpenting. Guru tidak bisa hanya berkata, "Anak-anak, mainkan aplikasi ini." Mereka harus merancang skenario pembelajaran yang terstruktur yang menempatkan aplikasi AR sebagai alat untuk mencapai tujuan kurikulum yang spesifik. Skenario ini harus memiliki alur "Sebelum, Selama, dan Sesudah". Contoh Skenario (Perakitan PC):

1) Sebelum (10 Menit)

Guru mengaktifkan pengetahuan awal. "Kita akan membangun PC virtual. Menurut kalian, komponen apa yang paling penting? Apa fungsi RAM?"

2) Selama (25 Menit - Aktivitas AR)

Guru memberikan tugas yang spesifik dan terarah, bukan hanya bermain bebas. "Dalam kelompok Anda, gunakan aplikasi AR untuk memindai penanda *motherboard*. Tugas Anda adalah: (1) Temukan soket CPU. (2) Jalankan simulasi pemasangan CPU dan perhatikan bagaimana pin harus sejajar. (3) Temukan slot RAM dan pasang kedua stik RAM. Diskusikan: Mengapa ada 'lekukan' (notch) di stik RAM itu?"

3) Sesudah (10 Menit)

Guru memimpin diskusi sintesis. "Apa yang kalian amati tentang lekukan pada RAM? Mengapa pabrikan membuatnya seperti itu?" (Jawaban: Untuk mencegah pemasangan yang salah/terbalik yang dapat merusak komponen). Ini menghubungkan pengamatan visual AR dengan konsep teknik di dunia nyata.

c. Pengelolaan Waktu dan Integrasi Materi (Penguasaan Logistik)

Guru harus secara realistis mengintegrasikan aktivitas baru ini ke dalam kurikulum yang sudah padat.

1) Manajemen Waktu

Aktivitas AR hampir selalu memakan waktu lebih lama dari yang diperkirakan. Ada waktu yang diperlukan untuk transisi: membagikan tablet, membuka aplikasi, memindai penanda, ditambah waktu eksplorasi "faktor wow" awal siswa. Guru harus mengalokasikan waktu yang cukup agar aktivitas tidak terasa terburu-buru.

2) Integrasi Materi (*Blended Learning*)

Guru harus memetakan kapan AR digunakan. AR tidak menggantikan buku teks atau penjelasan guru, tetapi melengkapinya. Strateginya adalah: Gunakan buku teks/LMS untuk mempelajari "Apa" (Apa itu RAM? Teks dan definisi). Kemudian, gunakan AR untuk mempelajari

"Di mana" dan "Bagaimana" (Di mana RAM dipasang? Bagaimana cara kerjanya secara spasial?).

Penelitian secara konsisten menunjukkan bahwa salah satu tantangan terbesar dalam adopsi AR bukanlah teknologinya, melainkan kurangnya kepercayaan diri dan kesiapan pedagogis guru. Sebuah tinjauan sistematis oleh (Akçayır and Akcayir 2016) mengidentifikasi bahwa sikap guru dan persiapan mereka adalah faktor kunci yang memengaruhi keberhasilan implementasi AR di kelas.

2. Siswa

Kita tidak bisa berasumsi bahwa karena siswa adalah "digital natives" yang mahir menggunakan *smartphone*, mereka secara otomatis tahu *cara belajar* secara efektif menggunakan media AR. Persiapan siswa, atau *onboarding*, adalah proses krusial untuk mengurangi hambatan teknis dan mental, sehingga mereka dapat fokus pada konten pembelajaran (perangkat keras komputer), bukan pada cara kerja aplikasinya.

a. Pengenalan Perangkat AR dan Teknis Penggunaan

Ini adalah "lima menit pertama" yang kritis dari implementasi. Tujuannya adalah untuk mengurangi beban kognitif asing (upaya yang diperlukan hanya untuk menggunakan alat). Jika siswa frustrasi secara teknis di awal, motivasi mereka akan langsung anjlok. Persiapan ini harus mencakup:

1) Instalasi dan Akses

Panduan yang sangat jelas dari guru tentang cara mendapatkan aplikasi (misalnya, "Buka LMS kita, klik tautan ini," atau "Pindai QR code di papan tulis").

2) Pelatihan Mekanisme Pemicu

Siswa harus dilatih cara kerja pemicu AR spesifik yang digunakan:

a) Jika Berbasis Penanda (*Marker-Based*)

Guru harus mendemonstrasikan, "Kalian harus memastikan seluruh gambar penanda *motherboard* di buku modul terlihat jelas di kamera. Jangan menutupi sebagian dengan jari Anda, dan pastikan pencahayaan di ruangan cukup."

b) Jika Tanpa Penanda (*Markerless*)

Guru harus menunjukkan, "Arahkan kamera ke lantai atau meja kosong di depan Anda dan gerakkan ponsel Anda perlahan dalam lingkaran kecil sampai Anda melihat jaring-jaring biru. Ini artinya aplikasi sudah mengenali permukaan. Ketuk jaring itu untuk menempatkan PC virtual Anda."

3) Navigasi UI Inti

Demonstrasi cepat dari 3-4 tombol utama: "Ini adalah tombol untuk memutar, ini untuk memperbesar, dan tombol 'X' ini adalah untuk fitur Exploded View yang akan kita gunakan nanti."

b. Penyesuaian dengan Pola Belajar Berbasis Teknologi

Menggunakan AR menuntut pola belajar yang berbeda dari membaca buku teks atau mendengarkan ceramah. Siswa sering dilatih untuk menjadi penerima pasif; AR menuntut mereka untuk menjadi penjelajah aktif.

1) Dari Pasif ke Aktif

Guru perlu secara eksplisit mendorong pergeseran ini. Alih-alih menunggu guru memberi tahu jawabannya, siswa harus didorong untuk mencarinya sendiri di dalam model AR.

2) Mengelola "Faktor Wow"

AR itu keren, dan "faktor wow" atau novelty effect (efek kebaruan) dapat menjadi gangguan. Siswa mungkin hanya

fokus pada teknologinya ("Wow, ini bisa melayang!") daripada kontennya. Persiapan guru (memberikan skenario tugas yang jelas, seperti "Temukan slot RAM") sangat penting untuk mengarahkan antusiasme siswa dari teknologi itu sendiri ke materi pelajaran (misalnya, "Wow, jadi begitu cara kerja pin RAM!").

c. Penguatan Motivasi dan Kesiapan Belajar Mandiri

AR adalah alat yang luar biasa untuk pembelajaran mandiri (self-directed *Learning*), terutama dalam skenario flipped classroom atau pembelajaran daring. Aplikasi AR perangkat keras komputer bertindak sebagai laboratorium virtual pribadi yang tersedia 24/7.

1) Memanfaatkan Motivasi

AR secara konsisten terbukti meningkatkan motivasi siswa. Aplikasi interaktif jauh lebih menarik daripada diagram statis. Meta-analisis oleh (Garzón 2019) mengonfirmasi bahwa aplikasi AR memiliki dampak positif yang signifikan terhadap motivasi siswa di berbagai tingkat pendidikan. Tugas guru adalah mempersiapkan siswa untuk memanfaatkan lonjakan motivasi ini menjadi upaya belajar yang nyata.

2) Kesiapan Belajar Mandiri

Guru harus membekali aplikasi AR sebagai alat latihan utama mereka. Contoh instruksi: "Untuk persiapan kuis minggu depan, saya tidak hanya ingin kalian membaca bab 5. Saya ingin kalian masing-masing menjalankan 'Simulasi Perakitan Virtual' di aplikasi AR setidaknya tiga kali sampai kalian dapat melakukannya tanpa kesalahan. Aplikasi ini adalah tutor pribadi kalian."

C. Teknik Fasilitasi Pembelajaran Berbasis AR

Keberhasilan implementasi *Augmented Reality* (AR) di dalam kelas tidak hanya bergantung pada kualitas aplikasi atau kesiapan teknis, tetapi juga sangat bergantung pada peran aktif pendidik selama

proses pembelajaran. Media AR yang interaktif dan berpusat pada siswa secara fundamental mengubah dinamika kelas. Oleh karena itu, penerapan AR memerlukan metode fasilitasi yang tepat, yang berbeda secara signifikan dari metode instruksi langsung tradisional.

Peran guru bergeser dari "pemberi informasi utama" (*sage on the stage*) menjadi "pembimbing di sisi" (*guide on the side*). Karena AR mendorong pembelajaran berbasis penemuan (*discovery Learning*) dan *konstruktivisme*, siswa akan secara aktif menjelajahi, membuat hipotesis, dan bahkan mungkin menghadapi kebingungan. Tanpa fasilitasi yang terarah, siswa berisiko terjebak dalam "faktor wow" teknologi tanpa melakukan koneksi kognitif ke materi pembelajaran inti, atau mungkin mengambil kesimpulan yang salah dari eksplorasi mereka.

Fasilitasi yang efektif adalah seni mengajukan pertanyaan yang tepat pada waktu yang tepat, mendorong kolaborasi antar siswa, dan secara strategis memandu perhatian siswa dari pengalaman virtual kembali ke tujuan pembelajaran abstrak. Sub-bab ini akan membahas teknik-teknik fasilitasi spesifik yang dapat digunakan guru untuk mengorkestrasi pengalaman belajar berbasis AR, memastikan bahwa aktivitas yang menarik secara teknologi juga efektif secara pedagogis.

1. Pendekatan

Seorang fasilitator tidak hanya mengelola kelas; mereka secara aktif menerapkan strategi pedagogis untuk memaksimalkan interaksi antara siswa, konten AR, dan tujuan pembelajaran. Tiga pendekatan berikut adalah yang paling fundamental dan efektif dalam konteks AR.

a. Pembelajaran Kolaboratif: Membangun Pengetahuan Bersama

AR secara alami mendukung kolaborasi dengan menyediakan objek studi bersama yang dapat dilihat dan dimanipulasi oleh banyak siswa sekaligus. Alih-alih setiap siswa menatap layar mereka sendiri secara terisolasi, fasilitator harus secara aktif mendorong kerja kelompok di sekitar pengalaman AR. Teknik Fasilitasi (Perangkat Keras Komputer)

1) Objek sebagai "Api Unggun Digital"

Guru meminta siswa dalam kelompok (misalnya, 3 orang) untuk menempatkan satu model *motherboard* virtual di tengah meja mereka. Model ini menjadi pusat fokus diskusi, seperti api unggun.

2) Penetapan Peran (Role-Playing)

Untuk mencegah satu siswa mendominasi, fasilitator dapat menetapkan peran:

- a) "Pilot" (Pengemudi): Satu siswa yang memegang tablet.
- b) "Navigator": Siswa lain yang memegang lembar kerja/skenario tugas dan memberi instruksi ("Oke, sekarang cari slot PCIE. Perbesar bagian itu.").
- c) "Pencatat": Siswa ketiga yang mencatat temuan atau jawaban atas pertanyaan pemantik.

3) Pertanyaan Pemantik Kelompok

Fasilitator berkeliling antar kelompok dan mengajukan pertanyaan terbuka: "Mengapa menurut kalian CPU harus ditempatkan di soket khusus itu? Diskusikan di kelompok kalian apa yang akan terjadi jika pin-nya bengkok."

b. Pembelajaran Kontekstual: Menjembatani Virtual dan Fisik

Kekuatan terbesar AR adalah kemampuannya menempatkan data digital di dunia nyata. Tugas fasilitator adalah membuat koneksi ini menjadi eksplisit dan bermakna. Pembelajaran menjadi jauh lebih efektif ketika siswa dapat menghubungkan model virtual dengan situasi nyata. Teknik Fasilitasi (Perangkat Keras Komputer):

1) Transfer Virtual-ke-Fisik

Ini adalah teknik yang sangat kuat. Setelah siswa berhasil merakit PC virtual di aplikasi AR (termasuk memasang RAM dan GPU), fasilitator kemudian mengeluarkan *motherboard* fisik (mungkin yang sudah tua atau rusak). Tugasnya: "Baik, kalian sudah berhasil di AR. Sekarang,

tunjukkan pada saya, di *motherboard* fisik ini, di mana tepatnya kalian akan memasang stik RAM ini?" Ini memaksa transfer pengetahuan langsung.

2) Menjadikan yang Tak Terlihat Menjadi Terlihat

Saat melihat PC fisik yang sedang menyala, siswa hanya melihat kipas berputar. Fasilitator dapat menggunakan ini sebagai pemicu: "Kita bisa melihat kipasnya, tapi kita tidak bisa melihat panas atau aliran udaranya. Sekarang, gunakan aplikasi AR dan arahkan ke casing untuk melihat simulasi aliran udara virtual (*virtual airflow simulation*).\" Ini menghubungkan dunia nyata (kipas) dengan konsep fisika tak terlihat (aliran udara/termodinamika).

c. Scaffolding: Memberikan Bantuan Bertahap

AR bisa jadi sangat kaya informasi dan berpotensi membebani kognitif siswa (*Cognitive overload*). Scaffolding (perancah) adalah teknik fasilitasi di mana guru memberikan dukungan penuh di awal, dan kemudian secara bertahap menarik dukungan tersebut seiring siswa menjadi lebih kompeten. Teknik Fasilitasi (Perangkat Keras Komputer):

1) Tahap 1

Dukungan Penuh (*Guided Exploration*): Di awal, aplikasi AR berjalan dalam "Mode Tutorial." Semua label komponen muncul, narasi audio memandu setiap langkah, dan hotspot berkedip jelas. Peran fasilitator di sini adalah memastikan semua orang secara teknis bisa mengikuti.

2) Tahap 2

Dukungan Sebagian (*Inquiry*): Fasilitator meminta siswa mematikan narasi dan label. Tugasnya berubah: "Saya ingin kalian menemukan 3 port SATA di *motherboard* hanya berdasarkan bentuknya. Diskusikan dengan teman kelompok Anda." Di sini, scaffold (label) dihilangkan untuk mendorong penemuan.

3) Tahap 3

Tanpa Dukungan (Demonstrasi Kompetensi): Fasilitator meminta siswa menjalankan "Mode Ujian" di aplikasi. Aplikasi menyajikan *motherboard* kosong (tanpa label, tanpa hotspot) dan memberi perintah: "Pasang CPU." Siswa sekarang harus mengingat dari memori di mana soket CPU berada, bagaimana orientasinya, dan cara menguncinya. Ini adalah asesmen performa yang otentik.

Tinjauan literatur yang ekstensif tentang AR dalam pendidikan secara konsisten mengidentifikasi kemampuannya untuk mendukung pembelajaran kontekstual (*situated Learning*) dan menyediakan scaffolding visual sebagai dua manfaat pedagogis terbesarnya. Kemampuan AR untuk menyajikan informasi tepat di tempat yang dibutuhkan, tepat pada saat dibutuhkan, menjadikannya alat scaffolding yang ideal (Wu et al. 2013).

2. Peran Guru

Implementasi teknologi pembelajaran yang berpusat pada siswa seperti *Augmented Reality* (AR) menuntut pergeseran paradigma paling fundamental dalam pendidikan: evolusi peran guru. Dalam model kelas tradisional, guru adalah "Pemberi Materi" (*Sage on the Stage*) sumber utama pengetahuan yang mentransmisikan informasi secara searah kepada siswa yang pasif. Namun, ketika media AR (seperti aplikasi perangkat keras komputer kita) yang mengambil alih tugas penyampaian informasi visual dan data, peran guru tidak lagi relevan sebagai "sumber fakta". Sebaliknya, peran mereka berevolusi menjadi sesuatu yang jauh lebih penting: "Fasilitator Pembelajaran" (*Guide on the Side*).

Peran fasilitator ini multifaset dan jauh lebih aktif daripada sekadar mengawasi siswa bermain dengan teknologi.

a. Sebagai Perancang Pengalaman Belajar

Sebelum kelas dimulai, fasilitator adalah seorang arsitek pembelajaran. Mereka tidak hanya "menggunakan" aplikasi AR; mereka merancang skenario yang membungkus aplikasi

tersebut. Mereka merumuskan pertanyaan pemantik, lembar kerja terstruktur, dan masalah dunia nyata (misalnya, "Bagaimana kita memilih GPU yang tepat untuk kebutuhan *rendering* video?") yang memaksa siswa menggunakan alat AR untuk menyelesaikan masalah, bukan hanya untuk melihat model.

b. Sebagai Pemantik Pemikiran Kritis (Pertanyaan Socrates)

Selama aktivitas AR berlangsung, fasilitator terus berkeliling (bukan duduk di meja guru). Mereka tidak memberikan jawaban; mereka mengajukan pertanyaan yang lebih baik. Ketika sebuah kelompok siswa berhasil memasang CPU virtual ke soketnya di AR:

1) Pemberi Materi (Lama)

Akan berkata, "Bagus, itu soket LGA 1700."

2) Fasilitator (Baru)

Akan bertanya, "Kerja bagus. Kenapa menurut kalian ada begitu banyak pin emas di bawah CPU itu? Apa hubungannya dengan 'lekukan' di sisi soket yang baru saja kalian cocokkan?"

Pertanyaan fasilitator dirancang untuk memaksa siswa menghubungkan observasi visual (apa yang mereka lihat di AR) dengan konsep inti (transfer data, pencegahan kesalahan pemasangan, listrik).

c. Sebagai Manajer Konteks dan Kolaborasi

Fasilitator secara aktif mengelola lingkungan belajar. Mereka yang mendorong kolaborasi dengan membentuk kelompok dan menetapkan peran. Yang terpenting, mereka yang terus-menerus menghubungkan yang virtual dengan yang fisik. Fasilitator akan mengambil model RAM virtual yang baru dijelajahi siswa di AR, lalu memegang stik RAM fisik dan bertanya, "Oke, apa perbedaan fisik utama yang kalian lihat antara RAM DDR4 ini dengan model DDR5 virtual yang baru

saja kalian putar di AR?" Ini adalah peran menjembatani konteks yang tidak dapat dilakukan oleh aplikasi itu sendiri.

d. Sebagai Asesor Formatif (Proses)

Seorang instruktur tradisional menilai di akhir (asesmen sumatif). Seorang fasilitator menilai selama proses berlangsung (asesmen formatif). Dengan berkeliling dan mendengarkan diskusi kelompok saat mereka menggunakan aplikasi AR, guru dapat secara real-time mendiagnosis miskonsepsi. Jika seorang guru mendengar sebuah kelompok salah mengidentifikasi slot PCIe sebagai slot RAM, mereka dapat langsung melakukan intervensi dan mengajukan pertanyaan pemandu untuk mengoreksi pemahaman tersebut saat itu juga.

Pergeseran peran ini sangat penting. Studi tentang implementasi AR dalam pendidikan sering kali menekankan bahwa agar AR berhasil, ia harus mendukung model pedagogis seperti pembelajaran konstruktivis dan pembelajaran kontekstual (*situated Learning*). Kedua model ini secara inheren mengurangi peran guru sebagai pemberi ceramah dan menuntut mereka untuk mengambil peran baru sebagai fasilitator yang aktif, yang membimbing siswa saat mereka membangun pengetahuan mereka sendiri (Wu et al. 2013).

D. Evaluasi Efektivitas Media Pembelajaran AR

Setelah media *Augmented Reality* (AR) diimplementasikan di kelas atau dalam pembelajaran daring, siklus perancangan belum selesai. Tahap terakhir dan mungkin yang paling penting adalah evaluasi efektivitas, yang secara langsung menjawab pertanyaan fundamental: "Apakah siswa benar-benar belajar lebih baik menggunakan media ini?" Jika pengujian fungsional dan usability berfokus pada apakah aplikasi bekerja dengan benar dan mudah digunakan, maka evaluasi efektivitas berfokus pada dampak pedagogis dari aplikasi tersebut.

Proses evaluasi ini adalah satu-satunya cara untuk mengukur secara objektif sejauh mana media AR yang dikembangkan telah berhasil mendukung atau mencapai tujuan pembelajaran yang telah ditetapkan di awal fase perancangan. Evaluasi ini memvalidasi (atau

menyangkal) asumsi kita bahwa penggunaan AR lebih unggul daripada metode tradisional untuk konsep tertentu. Tanpa evaluasi efektivitas, media AR hanyalah sebuah eksperimen teknologi tanpa bukti hasil belajar.

Pengukuran ini penting tidak hanya untuk membenarkan investasi waktu dan biaya dalam pengembangan media, tetapi juga untuk menyediakan data konkret bagi siklus perbaikan selanjutnya. Data dari evaluasi inilah yang akan menginformasikan revisi pada desain aplikasi, perbaikan strategi fasilitasi guru, dan penyesuaian kurikulum di masa depan. Sub-bab ini akan membahas model dan metode utama yang digunakan untuk mengukur dampak AR terhadap hasil belajar kognitif dan afektif siswa.

1. Metode Evaluasi

Ini adalah inti dari proses pembuktian nilai sebuah media. Untuk mengukur efektivitas, kita memerlukan pendekatan multi-metode yang mengumpulkan data kuantitatif (angka) dan kualitatif (wawasan). Tiga metode berikut adalah standar dalam penelitian media pembelajaran.

a. Observasi Aktivitas Siswa (Data Kualitatif)

Metode ini menjawab pertanyaan: "Bagaimana siswa menggunakan aplikasi ini dan bagaimana mereka berperilaku saat belajar?" Ini adalah pengumpulan data kualitatif yang berfokus pada *proses*, bukan hanya *hasil*.

1) Pelaksanaan

Selama sesi implementasi AR (misalnya, saat siswa bekerja kelompok menggunakan aplikasi perangkat keras komputer), guru atau peneliti bertindak sebagai pengamat non-partisipan. Mereka menggunakan lembar rubrik observasi untuk mencatat perilaku spesifik.

2) Apa yang Diobservasi:

a) Keterlibatan (Engagement)

Berapa lama siswa tetap fokus pada tugas (*on-task*)? Apakah mereka menunjukkan tanda-tanda verbal semangat ("Wow, keren!") atau frustrasi ("Ini tidak berhasil!")?

b) Kolaborasi

Saat bekerja kelompok, apakah mereka benar-benar berdiskusi tentang konten ("Coba putar *motherboard*-nya, saya mau lihat port SATA") atau mereka hanya bekerja individu secara diam-diam?

c) Strategi Inkuiri

Apakah siswa secara metodis menjelajahi setiap *hotspot*, atau apakah mereka hanya melompat-lompat secara acak? Apakah mereka menggunakan fitur simulasi (seperti pemasangan RAM virtual) berulang kali untuk berlatih?

3) Hasil

Observasi memberikan wawasan kontekstual yang kaya yang tidak dapat ditangkap oleh angka. Ini membantu kita memahami *mengapa* siswa mungkin mendapat nilai tinggi atau rendah di tes akhir.

b. Angket Persepsi Guru dan Siswa (Data Afektif)

Metode ini mengukur ranah afektif dan persepsi *usability*. Apakah mereka *menyukai* pengalaman itu? Apakah mereka *merasa* itu membantu? Motivasi dan persepsi kemudahan penggunaan adalah prediktor kuat keberhasilan belajar.

1) Pelaksanaan

Setelah sesi AR selesai, guru dan siswa diminta mengisi angket (survei) anonim.

2) Apa yang Diukur (Siswa):

a) Motivasi

Sering menggunakan kerangka kerja seperti model ARCS (Attention, Relevance, Confidence, Satisfaction). Pertanyaan dapat berupa: "Apakah penggunaan AR membuat pelajaran perangkat keras komputer lebih menarik daripada membaca buku teks?"

b) Penerimaan Teknologi (TAM)

Mengukur *Perceived Usefulness* (Persepsi Kebergunaan: "Saya merasa aplikasi ini berguna untuk belajar") dan *Perceived Ease of Use* (Persepsi Kemudahan Penggunaan: "Saya merasa aplikasi ini mudah digunakan").

3) Apa yang Diukur (Guru)

Persepsi tentang utilitas pedagogis: "Seberapa mudah mengintegrasikan aplikasi AR ini ke dalam RPP Anda?" atau "Seberapa efektif alat ini membantu siswa yang kesulitan memahami konsep spasial?"

c. Analisis Hasil Belajar (Pre-Test dan Post-Test)

Ini adalah metode kuantitatif "standar emas" untuk mengukur perolehan kognitif (pengetahuan) secara objektif. Metode ini menjawab pertanyaan: "Apakah siswa benar-benar belajar lebih banyak?"

1) Pelaksanaan (Desain Eksperimental/Quasi-Eksperimental)

a) Pre-Test (Tes Awal)

Sebelum pelajaran dimulai, semua siswa (misalnya, di Kelompok Kontrol dan Kelompok Eksperimen) diberikan tes yang sama untuk mengukur pengetahuan dasar mereka tentang perangkat keras komputer. Ini menetapkan baseline.

b) Intervensi

1) Kelompok Kontrol

Belajar tentang perangkat keras komputer menggunakan metode tradisional (misalnya, membaca buku teks, melihat diagram 2D, atau menonton video YouTube pasif).

2) Kelompok Eksperimen

Belajar materi yang sama persis tetapi menggunakan aplikasi AR perangkat keras komputer yang interaktif.

c) Post-Test (Tes Akhir)

Setelah intervensi selesai, kedua kelompok diberikan tes akhir (yang identik atau setara secara konseptual dengan pre-test).

2) Analisis

Peneliti kemudian membandingkan skor perolehan (gain score) (Post-Test dikurangi Pre-Test) antara kedua kelompok. Jika Kelompok Eksperimen (AR) menunjukkan peningkatan skor yang secara statistik signifikan lebih tinggi daripada Kelompok Kontrol (tradisional), kita memiliki bukti empiris yang kuat bahwa media AR tersebut lebih efektif.

3) Contoh Pertanyaan Tes

Pertanyaan yang ideal adalah yang menguji pemahaman spasial, yang merupakan keunggulan AR (misalnya, meminta siswa untuk mengidentifikasi slot yang benar untuk GPU pada diagram *motherboard* yang kosong).

Tinjauan sistematis yang paling komprehensif di bidang ini, seperti oleh (Ibáñez and Delgado-Kloos 2018), menyintesis hasil dari puluhan penelitian individu yang hampir semuanya menggunakan metodologi gabungan ini. Mereka mengonfirmasi bahwa studi yang menggunakan desain pre-test/post-test dan

kelompok kontrol secara konsisten menemukan bahwa siswa yang menggunakan AR (terutama untuk tugas STEM yang kompleks dan spasial) menunjukkan perolehan belajar yang lebih tinggi dan motivasi yang lebih besar.

2. Indikator Efektivitas

Untuk menyatakan bahwa media AR "efektif", kita perlu mendefinisikan "efektivitas" itu sendiri. Efektivitas bukanlah satu hal tunggal, melainkan konstruksi multi-dimensi yang mencakup hasil kognitif (apa yang siswa ketahui), hasil afektif (apa yang siswa rasakan), dan hasil perilaku (apa yang siswa lakukan). Empat indikator berikut adalah yang paling penting untuk diukur dalam konteks media pembelajaran AR.

a. Motivasi Belajar (Indikator Afektif)

Salah satu dampak AR yang paling sering dilaporkan adalah kemampuannya untuk meningkatkan motivasi.

1) Mengapa Penting

Pembelajaran perangkat keras komputer secara tradisional dianggap kering, teknis, dan membosankan oleh banyak siswa. Aplikasi AR mengubah ini dengan memperkenalkan interaktivitas dan gamifikasi.

2) Konteks Perangkat Keras Komputer

Kemampuan untuk "secara ajaib" memunculkan *motherboard* 3D di atas meja mereka, atau melakukan simulasi perakitan PC virtual, memberikan "faktor wow" (novelty effect) yang berfungsi sebagai pengait motivasi awal yang sangat kuat. Motivasi yang meningkat ini membuat siswa lebih bersedia untuk menghabiskan waktu pada tugas (time-on-task) dan mengatasi materi yang sulit.

3) Pengukuran

Diukur menggunakan angket persepsi yang didasarkan pada model motivasi seperti ARCS (Attention, Relevance, Confidence, Satisfaction).

b. Pemahaman Konsep (Indikator Kognitif Utama)

Ini adalah indikator inti dari hasil belajar: apakah siswa benar-benar memahami materinya? AR secara khusus unggul dalam konsep-konsep yang bersifat spasial, relasional, dan abstrak/tidak terlihat. Konteks Perangkat Keras Komputer:

1) Pemahaman Spasial

Sebuah buku teks mungkin mengatakan "Stik RAM memiliki takik (notch) yang harus sejajar dengan tonjolan di slot DIMM." Namun, siswa sering gagal memahaminya sampai mereka mencoba memasangnya secara fisik (dan mungkin merusaknya). Aplikasi AR memungkinkan siswa secara virtual mengambil stik RAM, memutarnya 360 derajat, melihat takiknya, dan secara interaktif mencoba memasangnya. Mereka akan gagal (secara virtual) sampai orientasinya benar. Ini membangun pemahaman spasial dan prosedural yang mendalam yang tidak bisa diberikan oleh teks.

2) Memvisualisasikan yang Tak Terlihat

AR dapat menunjukkan simulasi "aliran udara" (konsep tak terlihat) yang bergerak dari kipas depan, melewati heatsink CPU, dan keluar dari kipas belakang.

3) Pengukuran

Diukur secara kuantitatif menggunakan selisih skor antara pre-test dan post-test.

c. Keterlibatan Siswa (Indikator Perilaku)

Motivasi adalah niat (internal), keterlibatan adalah tindakan (eksternal). Keterlibatan adalah sejauh mana siswa secara aktif terlibat dalam proses belajar.

1) Mengapa Penting

AR bukanlah media pasif seperti video. Ia menuntut interaksi. Jika siswa hanya menatap layar tanpa bergerak atau menyentuh, mereka tidak terlibat.

2) Konteks Perangkat Keras Komputer

Aplikasi AR yang baik mendorong keterlibatan perilaku (memindahkan tablet untuk melihat bagian belakang port I/O virtual), keterlibatan kognitif (memecahkan teka-teki pemasangan CPU), dan keterlibatan sosial (berdebat dengan teman sekelompok tentang di mana slot PCIe berada pada model AR bersama).

3) Pengukuran

Diukur secara kualitatif melalui observasi aktivitas siswa (mencatat frekuensi interaksi, durasi fokus pada tugas, dan kualitas diskusi kolaboratif).

d. Kemampuan Pemecahan Masalah (Indikator Kognitif Tingkat Tinggi)

Ini adalah puncak dari pembelajaran: dapatkah siswa menerapkan pengetahuan mereka untuk memecahkan masalah baru?

1) Konteks Perangkat Keras Komputer

Alih-alih hanya mengidentifikasi komponen (mengingat fakta), aplikasi AR dapat menjalankan skenario simulasi pemecahan masalah.

Contoh Skenario: Aplikasi memuat PC virtual yang sudah dirakit, tetapi menampilkan layar "Error: RAM not detected." Tugas siswa adalah menggunakan alat diagnostik AR (seperti "Exploded View") untuk membongkar PC virtual, memeriksa stik RAM, dan menemukan bahwa salah satu stik RAM tidak terpasang dengan benar di slot-nya.

2) Manfaat

Ini mengajarkan keterampilan diagnostik dunia nyata dalam lingkungan yang aman untuk gagal (safe-to-fail).

3) Pengukuran

Diukur melalui asesmen berbasis kinerja di dalam aplikasi atau melalui pertanyaan skenario pada post-test.

Tinjauan sistematis dan meta-analisis di bidang ini secara konsisten menggunakan indikator-indikator ini. Penelitian oleh (Garzón 2019) yang menganalisis puluhan studi, secara kuantitatif mengonfirmasi bahwa intervensi AR (bila dibandingkan dengan metode non-AR) memiliki dampak positif yang signifikan pada hasil belajar (pemahaman konsep) dan, secara khusus, pada motivasi siswa.

E. Pengukuran Hasil Belajar dan Umpan Balik

Evaluasi efektivitas tidak lengkap tanpa proses formal pengukuran hasil belajar. Jika indikator (seperti motivasi dan pemahaman konsep) adalah apa yang kita cari, maka pengukuran adalah proses sistematis untuk mengumpulkan data yang membuktikan keberadaan indikator tersebut. Pengukuran ini adalah jembatan yang menghubungkan implementasi teknologi dengan akuntabilitas pedagogis, yang memungkinkan kita untuk secara objektif menilai pencapaian siswa terhadap tujuan pembelajaran yang telah ditetapkan.

Namun, pengukuran dalam pendidikan memiliki dua tujuan: (1) untuk menilai pencapaian di akhir (sumatif), dan (2) untuk memperbaiki proses belajar saat sedang berlangsung (formatif). Dalam pembelajaran modern, tujuan kedua inilah yang paling kuat. Data pengukuran tidak banyak berguna bagi siswa jika hanya berakhir sebagai angka di rapor. Nilai terbesarnya terletak pada saat data tersebut dikembalikan kepada siswa dalam bentuk umpan balik (feedback) yang konstruktif dan tepat waktu.

Di sinilah media *Augmented Reality* (AR) yang dirancang dengan baik memiliki keunggulan yang unik. Tidak seperti buku teks atau bahkan video, AR adalah lingkungan interaktif yang dapat mengukur

tindakan siswa secara real-time dan memberikan umpan balik instan. Ketika seorang siswa salah memasang RAM virtual, aplikasi tidak perlu menunggu guru untuk mengoreksinya; aplikasi dapat memberikan umpan balik (visual atau audio) pada detik itu juga, menciptakan siklus belajar (aksi-kesalahan-koreksi) yang sangat cepat. Sub-bab ini akan membahas metode untuk mengukur hasil belajar dan merancang sistem umpan balik yang efektif dalam lingkungan AR.

1. Pengukuran Hasil Belajar

a. Tes Formatif dan Sumatif

Pengukuran hasil belajar dapat dibagi berdasarkan waktu dan tujuannya: formatif (selama proses) dan sumatif (di akhir proses).

1) Tes Formatif (Penilaian untuk Belajar)

Tujuannya adalah untuk memantau pembelajaran siswa secara real-time dan memberikan umpan balik langsung untuk perbaikan. Media AR sangat unggul dalam hal ini.

Aplikasi AR dapat menyediakan umpan balik formatif instan. Saat siswa mencoba memasang stik RAM virtual ke slot PCIe, aplikasi tidak akan mengizinkannya dan akan menampilkan pesan "Komponen Salah!" atau "Tidak Cocok!". Ini adalah asesmen formatif yang terjadi pada detik itu juga, mengoreksi miskonsepsi sebelum mengakar. Kuis singkat di dalam aplikasi (in-app quizzes) setelah siswa mengidentifikasi semua port I/O juga merupakan bentuk tes formatif.

2) Tes Sumatif (Penilaian pada Belajar)

Tujuannya adalah untuk mengevaluasi penguasaan siswa di akhir unit pembelajaran. Ini adalah "ujian akhir" tradisional.

Setelah siswa menyelesaikan seluruh modul perakitan PC virtual, mereka akan mengambil Tes Akhir (Post-Test). Tes ini

bisa berupa tes tertulis (menggunakan diagram 2D, menanyakan fungsi komponen) atau tes performa (dijelaskan di bawah). Hasil ini mengukur secara definitif pengetahuan yang dipertahankan.

b. Penilaian Berbasis Kompetensi

Metode ini adalah evolusi dari tes berbasis pengetahuan. Alih-alih hanya bertanya, "Apa itu CPU?", penilaian berbasis kompetensi bertanya, "Pasanglah CPU dengan benar." Metode ini tidak mengukur apa yang siswa ketahui, tetapi apa yang bisa mereka lakukan.

AR adalah alat yang sempurna untuk jenis penilaian ini. Kita dapat membuat Simulasi Asesmen Kinerja di dalam aplikasi:

1) Mode Ujian

Aplikasi memberikan siswa sebuah *motherboard* virtual kosong dan "kotak suku cadang" virtual (CPU, RAM, GPU, Kipas).

2) Tugas

"Pasang semua komponen ini dalam urutan yang benar."

3) Pengukuran

Aplikasi menilai siswa tidak hanya pada hasil akhir (apakah berhasil terpasang?), tetapi juga pada proses dan kompetensi mereka: Apakah mereka mengikuti urutan yang logis (misalnya, memasang CPU sebelum memasang kipas pendinginnya)? Apakah mereka mencoba memasang komponen yang salah ke slot yang salah (menunjukkan kurangnya pemahaman)? Berapa lama waktu yang mereka butuhkan? Ini adalah pengukuran otentik dari keterampilan perakitan.

c. Analisis Skor Perbandingan (Metode Konvensional)

Ini adalah metode penelitian kuantitatif utama untuk membuktikan secara empiris bahwa media AR lebih efektif

daripada metode lama. Ini adalah desain Pre-Test / Post-Test dengan Kelompok Kontrol, yang merupakan standar emas dalam penelitian pendidikan.

1) Metodologi

a) Baseline (Pre-Test)

Dua kelas yang sebanding (misalnya, dua kelas Jaringan Komputer Dasar) diberikan tes awal tentang perangkat keras PC. Skor rata-rata mereka harus serupa.

b) Intervensi

- Kelompok Eksperimen (AR)

Kelas A belajar merakit PC menggunakan aplikasi AR interaktif selama 60 menit.

- Kelompok Kontrol

Kelas B belajar materi yang sama persis selama 60 menit menggunakan metode konvensional (misalnya, membaca manual PDF dengan diagram statis 2D dan menonton video non-interaktif).

c) Evaluasi (Post-Test): Kedua kelompok diberikan tes akhir yang sama persis dengan pre-test.

2) Analisis

Kita kemudian membandingkan skor perolehan (gain score) (nilai Post-Test dikurangi nilai Pre-Test) antara kedua kelompok. Jika skor perolehan Kelompok AR secara statistik jauh lebih tinggi daripada skor perolehan Kelompok Kontrol, kita memiliki bukti objektif bahwa intervensi AR secara pedagogis lebih unggul untuk mengajarkan keterampilan spasial dan prosedural ini.

Desain penelitian inilah (pre-test, post-test, kelompok kontrol) yang digunakan oleh sebagian besar studi yang ditinjau dalam meta-analisis utama. Tinjauan sistematis seperti oleh (Ibáñez and Delgado-Kloos 2018) menyintesis data dari lusinan studi yang menggunakan metodologi ini untuk menyimpulkan bahwa aplikasi

AR (khususnya untuk STEM) secara konsisten menghasilkan perolehan belajar kognitif yang lebih tinggi daripada pendekatan non-interaktif.

2. Umpan Balik

Pengukuran hasil belajar memberikan data objektif, tetapi umpan balik adalah yang memberikan wawasan dan arahan untuk perbaikan. Umpan balik adalah proses mengumpulkan informasi tentang pengalaman dan kinerja dari berbagai pemangku kepentingan (siswa, guru) dan menggunakan informasi tersebut untuk menyempurnakan media AR dan strategi implementasinya. Ini adalah komponen penting dari model pengembangan iteratif dan agile.

a. Feedback Siswa Terhadap Penggunaan AR

Siswa adalah konsumen utama dari media pembelajaran AR. Perspektif mereka sangat penting, tidak hanya tentang apa yang mereka pelajari, tetapi juga bagaimana pengalaman tersebut memengaruhi mereka.

1) Metode Pengumpulan:

a) Angket/Survei

Seperti yang dibahas, angket persepsi (misalnya, System Usability Scale, kuesioner motivasi) memberikan data terukur.

b) Wawancara Kelompok Terfokus (Focus Group Discussions)

Lebih kaya dari survei, FGD memungkinkan siswa untuk mengungkapkan pandangan mereka secara mendalam dan mendiskusikan pengalaman mereka dengan teman sebaya. Pertanyaan bisa meliputi: "Apa bagian yang paling membantu dari aplikasi AR saat kalian belajar tentang CPU?" atau "Apa yang paling membingungkan saat pertama kali mencoba memasang RAM virtual?"

c) Komentar Bebas

Aplikasi AR itu sendiri dapat memiliki fitur sederhana untuk "Feedback" di mana siswa dapat mengetikkan komentar atau saran langsung

2) Fokus (Perangkat Keras Komputer): Siswa mungkin memberikan umpan balik tentang:

a) Kejelasan Interaksi

"Tombol Exploded View agak kecil, saya sering salah tekan."

b) Kecukupan Informasi

"Saya ingin ada lebih banyak penjelasan tentang mengapa kapasitor penting, bukan hanya penempatannya."

c) Realismenya

"Model kipas pendingin CPU terlihat sangat asli, membantu saya membayangkan cara kerjanya."

d) Kebergunaan Asesmen

"Simulasi perakitan sangat menantang, tapi saya belajar banyak dari kesalahan yang saya buat di sana."

b. Refleksi Guru dalam Proses Pembelajaran

Guru adalah fasilitator utama dan memiliki pandangan unik dari "garis depan" implementasi. Refleksi mereka sangat berharga untuk memahami konteks di mana AR digunakan.

1) Metode Pengumpulan:

a) Jurnal Refleksi

Guru secara teratur mencatat pengamatan mereka setelah setiap sesi AR. Misalnya, "Hari ini siswa A sangat kesulitan memindai penanda, saya perlu memberikan tutorial lebih pribadi," atau "Diskusi kelompok tentang port I/O setelah sesi AR sangat aktif."

b) Wawancara atau Diskusi Guru

Peneliti dapat mewawancarai guru secara individu atau melakukan pertemuan tim guru untuk mendiskusikan pengalaman mereka.

c) Angket/Survei Khusus Guru

Berfokus pada aspek pedagogis dan logistik.

2) Fokus (Perangkat Keras Komputer): Guru mungkin merefleksikan tentang:

a) Efektivitas Pedagogis

"Saya melihat siswa yang biasanya pasif di kelas menjadi sangat terlibat saat menggunakan AR untuk merakit PC."

b) Tantangan Implementasi

"Sulit mengatur agar semua siswa memiliki perangkat yang berfungsi pada saat bersamaan."

c) Peran Fasilitasi

"Saya menyadari saya terlalu banyak bicara. Saya harus lebih banyak mengajukan pertanyaan dan membiarkan siswa menjelajahi sendiri."

d) Kesesuaian Kurikulum

"Materi tentang PSU (Power Supply Unit) tidak terlalu didukung oleh AR, mungkin lebih baik menggunakan metode lain untuk bab itu."

c. Perbaikan Desain Media AR Berdasarkan Hasil Evaluasi

Ini adalah langkah aksi yang paling penting. Umpan balik tidak ada gunanya jika tidak digunakan untuk melakukan perbaikan. Proses ini bersifat iteratif: evaluasi menginformasikan perbaikan, yang kemudian mengarah pada evaluasi baru, dan seterusnya.

1) Proses Iteratif:

a) Analisis Data

Kumpulkan semua data (skor tes, observasi, angket, refleksi guru).

b) Identifikasi Masalah

Temukan pola. Jika 80% siswa melaporkan bahwa "tombol info kecil," itu adalah masalah desain. Jika skor tes menunjukkan siswa masih kesulitan memahami fungsi GPU, itu adalah masalah konten/pedagogis.

c) Prioritaskan

Masalah mana yang paling mendesak untuk diperbaiki? (Misalnya, bug kritis teknis selalu lebih prioritas daripada masalah estetika kecil).

d) Desain Ulang & Pengembangan

Tim pengembang dan desainer pembelajaran bekerja untuk mengimplementasikan perubahan (misalnya, memperbesar tombol, menambahkan lebih banyak narasi audio ke model GPU, membuat simulasi baru untuk pemecahan masalah GPU).

e) Rilis & Evaluasi Kembali

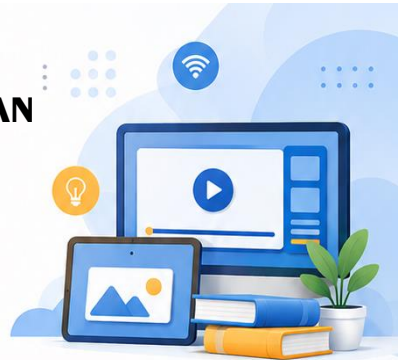
Aplikasi versi baru dirilis, dan siklus evaluasi dimulai lagi untuk memverifikasi bahwa perbaikan memang efektif.

Model ini, yang menekankan evaluasi dan umpan balik berkelanjutan, adalah standar dalam pengembangan perangkat lunak pendidikan. Tinjauan studi AR oleh (Akçayır and Akçayır 2016) secara eksplisit merekomendasikan pendekatan desain iteratif di mana "evaluasi dan pengujian pengguna merupakan bagian integral dari proses pengembangan untuk terus meningkatkan kualitas dan efektivitas aplikasi AR."

BAB

8

ETIKA DAN KEAMANAN PENGUNAAN AR DALAM PENDIDIKAN



Bab ini mengulas berbagai aspek etika dan keamanan yang harus diperhatikan dalam penggunaan teknologi AR di lingkungan pendidikan. Pembahasan mencakup hak cipta dan lisensi aset digital, perlindungan privasi dan keamanan data siswa, batasan penggunaan teknologi, serta prinsip aksesibilitas bagi seluruh peserta didik. Bab ini menekankan pentingnya penggunaan teknologi secara bertanggung jawab agar manfaat AR dapat dirasakan secara optimal tanpa mengabaikan aspek hukum, etika, dan inklusivitas.

A. Hak Cipta dan Lisensi Konten 3D

Media pembelajaran *Augmented Reality* (AR) secara fundamental dibangun di atas konten digital, dengan model 3D sebagai aset intinya. Dalam *ekosistem digital* di mana aset dapat disalin dan diunduh dengan mudah, pemahaman mendalam mengenai perlindungan hak cipta menjadi landasan etika dan hukum yang tidak dapat ditawar. Setiap model 3D, tidak peduli seberapa sederhana, adalah karya kreatif yang dilindungi oleh undang-undang kekayaan intelektual (HKI), sama seperti sebuah foto, lagu, atau artikel buku.

Mengabaikan hak cipta dalam pengembangan media pendidikan tidak hanya mencederaikan prinsip integritas akademik karena pada dasarnya itu adalah pencurian karya orang lain tetapi juga menempatkan pengembang dan institusi pendidikan (sekolah atau

universitas) pada risiko hukum dan finansial yang serius. Sangat mudah bagi pengembang untuk mencari "Model 3D *Motherboard* Gratis" di internet dan menggunakannya, tanpa menyadari bahwa lisensi model tersebut mungkin secara eksplisit melarang penggunaan komersial atau bahkan penggunaan edukasi tanpa izin.

Oleh karena itu, setiap *aset 3D* yang akan diintegrasikan ke dalam aplikasi AR harus memiliki jalur hukum yang jelas. Perancang harus dapat menjawab pertanyaan: "Siapa yang membuat model ini, dan izin apa yang kita miliki untuk menggunakannya?" Memahami perbedaan antara berbagai jenis lisensi mulai dari domain publik, *Creative Commons*, hingga lisensi komersial berbayar adalah langkah pertama yang krusial dalam proses penyiapan materi yang etis dan legal. Sub-bab ini akan membahas pertimbangan utama seputar hak cipta *aset 3D* dan cara mengelola lisensi secara bertanggung jawab.

1. Hak Cipta Konten AR

Setiap elemen digital yang menciptakan pengalaman AR dari objek visual hingga suara dan tulisan adalah subjek hak cipta. Dalam konteks aplikasi pembelajaran, ini menjadi sangat penting karena institusi pendidikan memiliki standar etika yang tinggi dan berisiko menghadapi tuntutan hukum jika melanggar hak kekayaan intelektual.

a. Model 3D, Audio, Animasi, dan Teks dalam Aplikasi AR

1) Model 3D

Ini adalah inti visual dari aplikasi AR. Setiap model 3D (misalnya, CPU, *motherboard*, RAM) yang dibuat oleh seorang seniman adalah karya seni yang dilindungi hak cipta. Hak cipta mencakup geometri (bentuk), tekstur (gambar yang melapisi model), dan bahan (material) yang mendefinisikan tampilannya.

2) Audio

Termasuk efek suara (misalnya, suara "klik" saat memasang komponen), musik latar, dan terutama narasi suara (voice-over) yang menjelaskan fungsi komponen.

Setiap rekaman suara dan komposisi musik memiliki hak cipta.

3) Animasi

Setiap gerakan atau urutan visual (misalnya, simulasi detak jantung, animasi perakitan komponen) adalah karya kreatif dan dilindungi hak cipta.

4) Teks

Instruksi, label komponen, deskripsi informasi, dan skrip narasi dalam aplikasi AR dilindungi hak cipta sebagai karya tulis.

Hukum hak cipta secara umum memberikan pembuatnya hak eksklusif untuk mereproduksi, mendistribusikan, memodifikasi, dan menampilkan karya mereka kepada publik. Menggunakan salah satu dari elemen-elemen ini tanpa izin yang jelas adalah pelanggaran hak cipta.

b. Risiko Plagiarisme atau Penggunaan Konten Tanpa Izin

Dalam dunia digital yang serba cepat, godaan untuk menggunakan aset yang sudah ada sangat besar. Namun, risiko yang menyertainya juga signifikan, terutama bagi institusi pendidikan.

1) Risiko Hukum

Pelanggaran hak cipta dapat mengakibatkan tuntutan hukum yang mahal, denda yang besar, dan perintah pengadilan untuk menghentikan distribusi aplikasi. Bagi institusi pendidikan, ini dapat mencapai puluhan hingga ratusan juta rupiah per pelanggaran.

2) Risiko Reputasi

Institusi pendidikan diharapkan menjunjung tinggi integritas akademik. Tuduhan plagiarisme atau penggunaan konten tanpa izin dapat merusak reputasi sekolah atau

universitas, merusak kepercayaan publik, dan mencoreng citra inovasi mereka.

3) Pembatasan Distribusi

Jika aplikasi AR akan didistribusikan melalui toko aplikasi resmi (Google Play Store, Apple App Store), proses peninjauan mereka sering kali mencakup pemeriksaan pelanggaran hak cipta. Aplikasi yang melanggar dapat ditolak atau dihapus dari toko, yang berarti seluruh upaya pengembangan menjadi sia-sia.

Dalam konteks yang lebih luas, masalah hak cipta *aset digital* ini telah menjadi perhatian utama dalam domain realitas virtual (VR) dan *Augmented Reality* (AR). Sebuah studi oleh (Lochhead et al. 2020) yang membahas tantangan hukum dalam dunia XR (Extended Reality) menekankan bahwa isu hak cipta *aset 3D* adalah salah satu area paling kompleks yang membutuhkan kerangka kerja hukum yang jelas, terutama dengan mudahnya *aset digital* dimodifikasi dan didistribusikan. Mereka menyoroti bahwa "kurangnya pemahaman yang jelas tentang kepemilikan dan lisensi aset virtual dapat menghambat inovasi dan adopsi teknologi XR yang sah."

2. Lisensi Konten 3D

Setelah memahami risiko hak cipta, langkah selanjutnya adalah memahami lisensi, yang merupakan "kontrak" atau izin legal dari pembuat konten yang memberi tahu Anda secara pasti bagaimana Anda boleh (dan tidak boleh) menggunakan karya mereka. Setiap *aset 3D* yang Anda peroleh harus memiliki lisensi yang jelas. Berikut adalah kategori utama lisensi yang akan Anda temui.

a. Tipe Lisensi Utama

1) Lisensi Komersial (Royalty-Free):

Ini adalah model paling umum di situs marketplace *aset 3D* profesional (seperti TurboSquid, Sketchfab Premium, atau Unity Asset Store).

a) Cara Kerja

Anda membayar biaya satu kali untuk membeli lisensi aset tersebut. Setelah dibeli, Anda dapat menggunakannya dalam proyek Anda (aplikasi AR Anda) berkali-kali tanpa harus membayar royalti tambahan per unduhan atau per pengguna aplikasi Anda.

b) Batasan

"Royalty-Free" tidak berarti "bebas melakukan apa saja". Lisensi ini memberi Anda hak untuk menggunakan model di dalam proyek Anda, tetapi Anda hampir pasti dilarang untuk menjual kembali atau memberikan file 3D model itu sendiri secara terpisah.

2) Lisensi *Creative Commons* (CC):

Ini bukanlah satu lisensi, melainkan sebuah kerangka kerja lisensi "beberapa hak dilindungi" yang dirancang untuk berbagi. Seniman memilih lisensi CC untuk memberikan izin otomatis kepada publik agar karyanya dapat digunakan, selama aturan spesifiknya dipatuhi. Ini sangat umum di platform seperti Sketchfab (untuk model 3D) dan Freesound (untuk audio). Komponen kuncinya adalah:

a) BY (Atribusi)

Ini adalah syarat paling umum. Anda wajib memberikan kredit (penghargaan) kepada pembuat aslinya (misalnya, "Model CPU oleh Seniman X, Lisensi CC BY 4.0"). Anda harus merencanakan halaman "Kredit" atau "Tentang" di dalam aplikasi Anda untuk mencantumkan semua atribusi ini.

b) NC (Non-Commercial / Non-Komersial)

Ini krusial untuk pendidikan. Aset ini tidak boleh digunakan dalam proyek yang bertujuan menghasilkan uang. Jika aplikasi AR Anda adalah proyek sekolah gratis,

Anda aman. Jika Anda berencana menjual aplikasi Anda (bahkan seharga Rp1.000), Anda melanggar lisensi ini.

c) ND (No-Derivatives / Tanpa Turunan)

Anda dapat menggunakan model 3D tersebut, tetapi Anda tidak boleh mengubahnya sedikit pun. Anda tidak bisa mengecat ulang teksturnya, memotong modelnya, atau menggabungkannya dengan model lain. Ini sangat membatasi.

d) SA (Share-Alike / Berbagi Serupa)

Jika Anda menggunakan aset ini, proyek Anda (karya turunan Anda) harus dirilis di bawah lisensi yang sama persis (misalnya, CC BY-SA).

e) CC0 (Domain Publik)

Ini adalah lisensi terbaik untuk kebebasan. Pembuat telah melepaskan semua haknya. Anda dapat melakukan apa saja dengan aset tersebut tanpa perlu atribusi.

3) Open Source

Lisensi ini (seperti MIT, GNU GPL) lebih umum untuk kode, tetapi terkadang *aset 3D* (terutama di platform seperti GitHub) dirilis di bawah lisensi ini. Lisensi ini umumnya sangat permisif, mirip dengan *Creative Commons*.

b. Prinsip Pemilihan Konten Sesuai Kebutuhan Pendidikan

Berdasarkan opsi lisensi di atas, berikut adalah prinsip yang harus dipegang oleh pengembang media pembelajaran AR:

1) Aturan Emas

Selalu Periksa Lisensi. Jika sebuah model 3D di internet tidak memiliki file lisensi yang jelas atau tautan ke lisensi CC, asumsikan itu dilindungi hak cipta penuh (All Rights Reserved) dan Anda tidak boleh menggunakannya.

2) Siapkan Sistem Atribusi dari Hari Pertama.

Karena hampir semua aset gratis berkualitas tinggi (CC) memerlukan Atribusi (BY), buatlah sebuah spreadsheet untuk melacak setiap aset yang diunduh: nama pembuatnya, sumber tautannya, dan jenis lisensinya. Ini akan digunakan untuk membuat halaman "Kredit" di aplikasi Anda.

3) Utamakan Akurasi Pedagogis di Atas Biaya.

Sebuah model *motherboard* "gratis" (CC0) tidak ada gunanya jika secara teknis tidak akurat dan mengajarkan konsep yang salah kepada siswa. Sering kali, lebih baik mengeluarkan anggaran untuk membeli aset Royalty-Free seharga \$40 yang 100% akurat secara teknis, daripada menggunakan aset gratis yang salah secara pedagogis.

4) Hati-hati dengan Lisensi "NC" dan "ND".

Selalu pilih aset CC yang tidak memiliki batasan "Non-Komersial" (NC) jika ada kemungkinan sekecil apa pun aplikasi Anda akan dijual. Hindari aset "Tanpa Turunan" (ND) karena Anda mungkin perlu mengoptimalkan atau mengubah model (misalnya, memisahkannya menjadi komponen-komponen) agar sesuai dengan skenario pembelajaran Anda.

Isu HKI (Hak Kekayaan Intelektual) untuk data 3D sangat kompleks. Penelitian di bidang terkait seperti pencetakan 3D yang juga berurusan dengan file model 3D telah menyoroti pentingnya lisensi seperti *Creative Commons* sebagai mekanisme vital untuk memungkinkan inovasi dan penggunaan pendidikan yang sah, sambil tetap menghormati hak-hak pembuat asli dalam ekonomi digital (Lochhead et al. 2020).

3. Implikasi Hukum

Pengabaian terhadap hak cipta dan lisensi dalam pengembangan media pembelajaran AR bukanlah sekadar kelalaian etis; ini adalah pelanggaran hukum yang membawa implikasi serius. Dalam konteks pendidikan, dalih "ini hanya untuk pendidikan" atau "saya

tidak tahu" bukanlah pembelaan hukum yang sah, terutama jika aplikasi tersebut didistribusikan secara publik (bahkan jika gratis). Tanggung jawab untuk memastikan kepatuhan hukum tidak terletak pada satu orang saja, melainkan terbagi dalam rantai antara pengembang, pendidik, dan institusi.

a. Tanggung Jawab Pengembang (Developer)

Pengembang adalah garis depan pertahanan terhadap pelanggaran hak cipta. Mereka adalah pihak yang secara teknis mengambil *aset digital* dan mengintegrasikannya ke dalam aplikasi.

1) Audit Aset

Pengembang profesional wajib memelihara "daftar aset" (asset manifest) sebuah spreadsheet rinci yang mencantumkan sumber, lisensi (misalnya, "CC BY 4.0" atau "Lisensi TurboSquid RF"), dan persyaratan atribusi untuk setiap aset pihak ketiga yang digunakan (model 3D, ikon, file audio, cuplikan kode).

2) Implementasi Atribusi

Pengembang bertanggung jawab secara teknis untuk memenuhi persyaratan lisensi. Jika lisensi CC-BY (Atribusi) digunakan, pengembanglah yang harus membuat halaman "Kredit" atau "Tentang" di dalam aplikasi dan memastikan nama kreator dicantumkan sesuai permintaan lisensi.

3) Kewajiban Kontrak

Jika pengembang adalah vendor eksternal yang disewa oleh sekolah, mereka secara hukum bertanggung jawab atas orisinalitas karya mereka. Kontrak mereka harus mencakup klausul yang menjamin bahwa semua aset yang digunakan adalah asli atau dilisensikan dengan benar, dan mereka membebaskan sekolah dari tuntutan hukum terkait pelanggaran HKI yang mereka lakukan.

b. Tanggung Jawab Guru (Pendidik/Perancang Instruksional)

Guru, sebagai ahli materi dan perancang pedagogis, bertindak sebagai manajer proyek atau editor konten.

1) Penyedia Konten

Jika guru yang memberikan aset kepada pengembang (misalnya, "Saya menemukan model CPU ini di Google Images, tolong pakai ini"), maka tanggung jawab hukum untuk membersihkan hak cipta aset tersebut beralih kepada guru.

2) Uji Tuntas (Due Diligence)

Guru atau perancang pembelajaran harus meminta dan meninjau "daftar aset" dari pengembang. Mereka harus memverifikasi bahwa lisensi aset tersebut sesuai dengan tujuan penggunaan. (Misalnya, guru harus memastikan pengembang tidak menggunakan aset dengan lisensi "Non-Komersial" jika ada rencana untuk menjual aplikasi tersebut).

3) Panutan Digital

Secara etis, guru memiliki tanggung jawab utama untuk mencontohkan kewargaan digital (digital citizenship) yang benar kepada siswa mereka.

c. Tanggung Jawab Institusi (Sekolah atau Universitas)

Institusi adalah penerbit (publisher) akhir dari aplikasi dan pemegang tanggung jawab hukum dan finansial tertinggi. Dalam gugatan pelanggaran hak cipta, penggugat hampir selalu menargetkan institusi, bukan individu guru atau pengembang, karena institusilah yang memiliki "kantong paling dalam" dan namanya tertera di App Store.

1) Kewajiban sebagai Penerbit

Ketika sekolah merilis "Aplikasi Biologi SMAN 1" di Google Play Store, sekolah tersebut bertindak sebagai

penerbit komersial di mata hukum. Institusi bertanggung jawab secara penuh atas segala konten yang melanggar di dalam aplikasi tersebut.

2) Kebijakan dan Pengawasan

Institusi bertanggung jawab untuk memiliki kebijakan Kekayaan Intelektual (KI) internal yang jelas yang mengatur pengembangan perangkat lunak pendidikan. Mereka juga harus menyediakan sumber daya (seperti penasihat hukum atau tim kepatuhan) untuk meninjau proyek sebelum dirilis ke publik.

Studi yang meninjau tantangan hukum seputar XR (Extended Reality, yang mencakup AR/VR) menyoroti bahwa masalah kepemilikan aset virtual dan pelanggaran hak cipta adalah salah satu hambatan hukum utama yang harus dinavigasi oleh institusi. Kurangnya pemahaman tentang kerangka kerja hukum ini dapat secara serius menghambat inovasi atau mengekspos institusi pendidikan pada litigasi yang merugikan (Lochhead et al. 2020).

B. Privasi dan Keamanan Data Siswa

Berbeda dengan media digital pasif seperti e-book atau video, media *Augmented Reality* (AR) secara fundamental adalah teknologi berbasis sensor. Agar dapat berfungsi, hampir setiap aplikasi AR memerlukan akses berkelanjutan ke kamera perangkat. Lebih jauh lagi, banyak pengalaman AR yang canggih juga meminta izin untuk mengakses data lokasi (GPS) (untuk pengalaman kontekstual di luar ruangan) serta data interaksi dan data pribadi siswa untuk pelacakan kemajuan yang terintegrasi dengan LMS. Ini menciptakan tantangan privasi yang unik dan signifikan yang harus ditangani secara proaktif.

Implikasinya sangat besar: ketika seorang siswa menggunakan aplikasi AR di rumah untuk pembelajaran daring, aplikasi tersebut secara teknis "melihat" ke dalam ruang pribadi mereka, memetakan lingkungan kamar mereka, dan berpotensi menangkap data visual atau audio dari anggota keluarga. Di dalam kelas, aplikasi tersebut mungkin secara tidak sengaja menangkap gambar atau suara siswa lain yang tidak berpartisipasi. Pengumpulan data sensorik yang

konstan ini menimbulkan pertanyaan etis dan keamanan yang kritis: Di mana data visual ini disimpan? Siapa yang memiliki akses ke data tersebut? Apakah data tersebut dianalisis untuk tujuan selain pembelajaran, seperti penargetan iklan?

Institusi pendidikan memiliki kewajiban hukum dan etis tertinggi untuk melindungi data pribadi dan privasi peserta didik mereka. Oleh karena itu, setiap adopsi teknologi AR harus disertai dengan kebijakan tata kelola data yang ketat dan transparan. Sub-bab ini akan membahas risiko privasi spesifik yang terkait dengan penggunaan AR dan langkah-langkah keamanan yang harus diambil oleh pengembang, guru, dan sekolah untuk melindungi data siswa dan mematuhi peraturan perlindungan data.

1. Isu Privasi

a. Pengumpulan Data Siswa Saat Menggunakan Aplikasi AR

Aplikasi AR, pada dasarnya, adalah alat pengumpul data yang jauh lebih invasif daripada aplikasi pendidikan tradisional. Agar dapat berfungsi, aplikasi ini perlu "melihat" dan "memahami" dunia di sekitarnya. Pengumpulan data ini dapat dikategorikan menjadi beberapa tingkatan:

- 1) Data Sensor Aktif (Video, Audio, dan Lokasi): Ini adalah data yang paling sensitif.
 - a) Aliran Video (Kamera)

Aplikasi AR memerlukan akses konstan ke kamera. Pertanyaan keamanan utamanya adalah: Apakah aliran video ini diproses secara eksklusif secara lokal di perangkat (seperti yang dilakukan *ARKit* dan *ARCore* untuk melacak permukaan) dan kemudian langsung dibuang? ATAU, apakah aliran video mentah (atau tangkapan layar) dikirim ke server cloud untuk diproses? Jika dikirim ke cloud, ini menciptakan risiko privasi besar, karena video dari ruang kelas atau kamar tidur siswa kini berada di server pihak ketiga.

b) Lokasi (GPS)

Aplikasi AR kontekstual melacak lokasi fisik siswa secara presisi untuk memicu konten.

2) Data Pemetaan Lingkungan (Data SLAM)

Saat AR *markerless* memindai ruangan, ia membuat peta geometris 3D dari lingkungan tersebut. Ini secara efektif adalah "denah" virtual dari rumah atau ruang kelas siswa, termasuk lokasi furnitur dan tata letak ruangan, yang merupakan data yang sangat pribadi.

3) Data Interaksi dan Kinerja

Ini adalah data pembelajaran. Aplikasi mencatat setiap ketukan, berapa lama siswa melihat model CPU, berapa kali mereka gagal memasang RAM virtual, dan skor kuis mereka.

4) Data Identitas Pribadi (PII)

Jika aplikasi terhubung ke LMS, aplikasi tersebut menyimpan PII seperti nama siswa, email, dan nomor induk siswa.

5) Risikonya terletak pada agregasi data ini. Kombinasi PII, data kinerja, data lokasi, dan data pemetaan lingkungan dapat menciptakan profil siswa yang sangat invasif dan mendetail.

b. Potensi Kebocoran Data (Ancaman Keamanan)

Mengumpulkan data adalah satu risiko; kehilangan kendali atas data tersebut (kebocoran data atau data breach) adalah risiko kedua yang bersifat bencana. Kebocoran ini dapat terjadi pada tiga titik lemah utama:

1) Di Perangkat (Endpoint)

Dalam skenario *Bring Your Own Device* (BYOD), jika ponsel siswa hilang atau dicuri, dan aplikasi menyimpan data sensitif (seperti kredensial LMS) secara tidak terenkripsi di memori lokal, data tersebut akan langsung terekspos. Selain

itu, malware lain di ponsel berpotensi mencoba mengakses data dari aplikasi AR yang tidak diamankan dengan baik.

2) Dalam Perjalanan (In-Transit)

Ketika aplikasi perlu berkomunikasi dengan server (misalnya, untuk mengunduh model 3D perangkat keras komputer, atau mengunggah skor kuis ke LMS), data tersebut bergerak melintasi internet. Jika koneksi ini tidak menggunakan enkripsi standar industri (seperti HTTPS/SSL), peretas di jaringan yang sama (misalnya, di Wi-Fi sekolah yang tidak aman) dapat "mengendus" dan mencuri data tersebut dalam perjalanan (serangan Man-in-the-Middle).

3) Di Platform Online (Database Server)

Ini adalah risiko terbesar. Di mana server yang menyimpan data PII dan kemajuan belajar siswa? Jika database backend ini tidak diamankan dengan benar, dikonfigurasi secara keliru, atau menggunakan kata sandi yang lemah, database tersebut rentan terhadap peretasan. Satu kebocoran server dapat mengekspos data pribadi seluruh siswa yang menggunakan aplikasi tersebut.

Tinjauan sistematis yang modern tentang privasi dan keamanan di *Augmented Reality* secara konsisten mengidentifikasi tantangan ini. Studi seperti oleh (Alismail et al. 2022) menyoroti bahwa meskipun AR memiliki potensi besar, pengumpulan data sensorik yang masif (dari kamera, mic, dan GPS) dan pemrosesan data lingkungan 3D menciptakan celah privasi yang signifikan yang belum sepenuhnya ditangani oleh kerangka kerja hukum atau praktik pengembangan standar, sehingga menempatkan pengguna (terutama anak-anak) pada risiko.

2. Keamanan Data

Menanggapi risiko privasi yang signifikan dari aplikasi AR, baik pengembang maupun institusi pendidikan harus menerapkan langkah-langkah keamanan berlapis. Perlindungan data siswa

bukanlah sebuah pilihan, melainkan persyaratan hukum dan etis. Perlindungan ini terbagi menjadi dua domain: solusi teknis (yang membangun benteng) dan solusi kebijakan (yang menetapkan aturan penggunaan).

a. Solusi Teknis Enkripsi, Autentikasi, dan Server yang Aman

Ini adalah tanggung jawab utama pengembang untuk membangun keamanan langsung ke dalam aplikasi, melindungi data di tiga titik rawan: di perangkat, dalam perjalanan, dan di server.

1) Enkripsi Data "Saat Diam" (At-Rest)

Data apa pun yang disimpan secara lokal di perangkat siswa (seperti token login atau kemajuan yang disimpan sementara) tidak boleh disimpan sebagai teks biasa. Data tersebut harus dienkripsi. Ini berarti jika perangkat hilang atau dicuri, data yang ada di dalamnya tidak dapat dibaca oleh pihak yang tidak berwenang.

2) Sistem Autentikasi yang Kuat

Aplikasi tidak boleh membuat sistem login baru yang lemah. Praktik terbaik adalah menggunakan Otentikasi Terfederasi atau Single Sign-On (SSO). Siswa harus masuk menggunakan akun yang sudah ada dan dikelola oleh sekolah (seperti akun Google Workspace/Classroom atau Microsoft 365 mereka). Ini memindahkan beban keamanan autentikasi ke penyedia besar (Google/Microsoft) dan mengurangi jumlah kata sandi yang harus diingat (dan mungkin hilang) oleh siswa.

3) Enkripsi Data "Dalam Perjalanan" (In-Transit)

Ini adalah persyaratan yang tidak dapat ditawar. Setiap komunikasi antara aplikasi AR di ponsel siswa dan server backend (untuk mengunggah skor kuis atau mengunduh aset) wajib menggunakan enkripsi HTTPS (SSL/TLS). Ini mencegah peretas di jaringan Wi-Fi sekolah (serangan Man-

in-the-Middle) untuk "mengendus" atau mencuri data saat sedang dikirimkan.

4) Server yang Aman

Database backend tempat data PII dan data kinerja siswa disimpan harus dilindungi dengan standar industri: dilindungi firewall yang ketat, menggunakan kontrol akses yang terbatas (hanya mengizinkan alamat IP yang dikenal), dan data di dalam database itu sendiri juga harus dienkripsi (encryption-at-rest).

b. Solusi Kebijakan Peran Institusi (Sekolah)

Teknologi yang aman sekalipun dapat disalahgunakan tanpa kebijakan yang jelas. Institusi pendidikan (sekolah/universitas) harus menetapkan aturan main yang ketat.

1) Transparansi dan Izin (Consent)

Kebijakan sekolah harus mewajibkan transparansi penuh. Orang tua dan siswa (tergantung usia) harus menerima pemberitahuan yang jelas dan mudah dipahami (bukan tulisan hukum yang rumit) yang menyatakan data apa yang dikumpulkan oleh aplikasi AR perangkat keras komputer, mengapa data itu dikumpulkan (misalnya, "untuk melacak kemajuan kuis Anda"), dan siapa yang dapat melihatnya. Izin tertulis dari orang tua mungkin diperlukan sebelum aplikasi dapat digunakan oleh siswa di bawah umur.

2) Prinsip Minimalisasi Data (Data Minimization)

Ini adalah prinsip keamanan inti. Kebijakan sekolah harus menantang pengembang: "Apakah Anda benar-benar perlu mengumpulkan data ini?" Jika aplikasi perakitan PC dapat berfungsi penuh tanpa memerlukan data GPS siswa, maka kebijakan harus melarang aplikasi tersebut untuk meminta izin GPS. Kumpulkan hanya data minimum absolut yang diperlukan untuk fungsi pedagogis.

3) Kebijakan Penyimpanan dan Penghapusan Data

Data siswa tidak boleh disimpan selamanya. Kebijakan institusi harus mendefinisikan:

a) Kedaulatan Data

Di mana data disimpan? (Idealnya di server di dalam negeri yang tunduk pada hukum nasional).

b) Siklus Hidup Data

Berapa lama data kinerja siswa disimpan? Kebijakan harus menetapkan siklus penghapusan data secara otomatis (misalnya, semua data kinerja siswa dihapus secara permanen 30 hari setelah semester berakhir).

Tinjauan sistematis yang berfokus pada privasi dan keamanan di AR, seperti oleh Christofi et al. (2021), menyimpulkan bahwa sementara teknologi ini menciptakan risiko privasi baru (terutama melalui data sensorik), banyak dari risiko ini dapat dimitigasi melalui penerapan solusi teknis yang kuat (seperti enkripsi dan minimalisasi data) dan kerangka kerja kebijakan yang transparan yang berpusat pada persetujuan pengguna.

3. Etika Penggunaan

Di luar perlindungan teknis seperti enkripsi, terdapat kewajiban etis fundamental dalam penggunaan AR di pendidikan: Persetujuan yang Diinformasikan (Informed Consent). Karena aplikasi AR, pada dasarnya, adalah teknologi penginderaan yang menggunakan kamera (dan terkadang mikrofon serta lokasi) di lingkungan pribadi siswa, kita tidak dapat secara etis memaksa siswa atau keluarga mereka untuk menerima pengumpulan data ini. Ini menjadi sangat penting ketika berhadapan dengan peserta didik di bawah umur.

a. Prinsip Informed Consent

Persetujuan dalam konteks AR harus lebih dari sekadar kotak centang "Saya Setuju" yang diklik siswa. Untuk dianggap etis, persetujuan harus memenuhi tiga kriteria:

1) Transparansi

Sekolah dan pengembang wajib menyediakan Kebijakan Privasi yang jelas dan mudah dibaca (bukan jargon hukum yang rumit). Kebijakan ini harus secara eksplisit menyatakan dalam bahasa sederhana:

- a) Data apa yang dikumpulkan (Misal: "Aplikasi ini menggunakan kamera Anda untuk melacak permukaan, tetapi video tidak pernah disimpan atau dikirim." ATAU "Skor kuis Anda akan disimpan di server sekolah.")
- b) Mengapa data itu dikumpulkan (Misal: "Skor kuis dikumpulkan agar guru dapat memantau kemajuan belajar Anda.")

2) Pemahaman

Siswa dan orang tua harus benar-benar memahami apa yang mereka setuju.

3) Sukarela

Persetujuan harus diberikan secara sukarela tanpa paksaan.

b. Peran Orang Tua dan Siswa

Dalam sebagian besar yurisdiksi hukum (termasuk yang diatur oleh UU PDP di Indonesia atau GDPR di Eropa), data pribadi anak di bawah umur memiliki perlindungan tertinggi.

1) Persetujuan Orang Tua

Untuk siswa di bawah umur legal, persetujuan yang sah secara hukum harus datang dari orang tua atau wali. Sekolah harus mendapatkan formulir persetujuan yang ditandatangani yang menguraikan pengumpulan data aplikasi AR sebelum siswa diizinkan menggunakan aplikasi tersebut.

2) Persetujuan Siswa (Assent)

Selain persetujuan hukum dari orang tua, praktik etis yang baik juga mencakup perolehan "persetujuan" (assent) dari siswa itu sendiri. Ini berarti menjelaskan kepada siswa dalam bahasa yang sesuai dengan usia mereka tentang apa yang dilakukan aplikasi dan mengapa, serta menghormati keinginan mereka.

c. Kewajiban Menyediakan Jalur Alternatif (Opsi Keluar)

Inilah inti dari implementasi etis: Apa yang terjadi jika orang tua atau siswa menolak memberikan persetujuan? (misalnya, karena alasan privasi, agama, atau pribadi).

Kewajiban etis dan hukum sekolah adalah untuk memastikan siswa tersebut tidak dihukum secara akademis. Sekolah wajib menyediakan jalur pembelajaran alternatif yang setara bagi siswa tersebut untuk mencapai tujuan pembelajaran yang sama tanpa menggunakan AR. Contoh (Perangkat Keras Komputer)

1) Jalur AR

Siswa menggunakan aplikasi AR untuk merakit PC virtual secara interaktif.

2) Jalur Alternatif

Siswa yang memilih keluar diberi tugas alternatif dengan bobot yang sama, seperti: menggunakan simulator 3D non-AR di desktop (jika tersedia), menganalisis manual perakitan teknis yang mendetail, atau menonton serangkaian video instruksional dan menulis laporan prosedural langkah-demi-langkah. Siswa tidak boleh dipaksa memilih antara privasi pribadi mereka dan nilai akademik mereka.

Para peneliti di bidang keamanan AR telah lama berargumen bahwa model persetujuan "sekali klik" yang kita gunakan untuk aplikasi web standar sama sekali tidak memadai untuk AR. Karena AR dapat mengakses input sensorik yang begitu kaya (apa yang dilihat dan didengar pengguna), diperlukan kerangka kerja

persetujuan baru yang lebih transparan dan granular (Alismail et al. 2022).

C. Batasan Penggunaan AR di Lingkungan Pendidikan

Setelah mengeksplorasi potensi transformatif *Augmented Reality* (AR), penting bagi kita untuk mengambil langkah mundur dan bersikap realistis. Seperti halnya teknologi canggih lainnya, AR bukanlah obat mujarab (*panacea*) untuk semua tantangan pendidikan. Antusiasme terhadap inovasi harus diimbangi dengan pemahaman kritis tentang keterbatasannya. Agar efektif dan etis, AR harus digunakan secara proporsional dan strategis; penggunaan yang berlebihan atau tidak tepat sasaran justru berpotensi menimbulkan dampak negatif yang dapat menghambat, alih-alih mendukung, proses pembelajaran.

Penggunaan yang proporsional berarti memahami bahwa tidak setiap topik pelajaran memerlukan intervensi AR. Memaksakan penggunaan AR untuk mengajarkan konsep yang dapat dijelaskan secara efektif melalui dialog guru-siswa, diskusi kelompok, atau membaca teks sederhana adalah pemborosan sumber daya dan berpotensi menjadi gimmick pedagogis. Media AR harus dicadangkan untuk tugas-tugas di mana ia memberikan nilai tambah yang unik dan jelas terutama dalam memvisualisasikan yang tak terlihat, abstrak, atau berbahaya.

Selain itu, penggunaan AR di lingkungan pendidikan yang padat dan dinamis membawa serangkaian tantangan praktis dan kognitif. Mulai dari risiko keamanan fisik siswa yang bergerak sambil terpaku pada layar, hingga potensi beban kognitif yang berlebihan akibat antarmuka yang terlalu rumit, kita harus menyadari batasan-batasan ini. Sub-bab ini akan membahas batasan fisik, kognitif, dan kontekstual dari AR untuk membantu para pendidik membuat keputusan yang tepat tentang kapan, dan kapan tidak, mengintegrasikan teknologi ini.

1. Batasan Waktu

Meskipun keterlibatan (*engagement*) tinggi adalah salah satu keunggulan AR, keterlibatan yang terlalu lama tanpa jeda dapat

menimbulkan risiko kesehatan fisik yang nyata. Guru sebagai fasilitator memiliki tanggung jawab etis untuk memastikan bahwa antusiasme siswa tidak mengarah pada dampak negatif. Penggunaan AR harus proporsional dan dibatasi waktu untuk melindungi kesejahteraan fisik siswa.

a. Kelelahan Mata dan Vergence-Accommodation Conflict (VAC)

Masalah kesehatan paling umum yang terkait dengan penggunaan layar seluler yang intensif adalah Kelelahan Mata Digital (Digital Eye Strain), yang gejalanya meliputi mata kering (karena berkurangnya frekuensi berkedip), sakit kepala, dan penglihatan kabur.

Namun, AR (dan terutama VR/Stereoscopic 3D) memperkenalkan masalah neurologis yang lebih dalam yang dikenal sebagai Konflik Akomodasi-Vergensi (VAC).

1) Bagaimana Terjadinya

Di dunia nyata, jika Anda melihat objek yang dekat, mata Anda secara alami melakukan dua hal bersamaan: (1) Vergensi: Kedua mata berputar sedikit ke dalam (konvergen) untuk fokus pada titik tersebut, dan (2) Akomodasi: Lensa mata Anda berubah bentuk (menebal) untuk memfokuskan cahaya dari jarak tersebut. Kedua tindakan ini terhubung erat di otak Anda.

2) Masalah di AR

Saat melihat model 3D virtual (seperti CPU) yang "melayang" 50 cm di depan siswa, mata mereka berkonvergen ke titik 50 cm tersebut. Namun, lensa mata mereka harus berakomodasi secara paksa ke jarak fisik layar ponsel, yang mungkin hanya 30 cm dari wajah mereka.

3) Dampak

Ketidakcocokan antara di mana mata menunjuk (virtual) dan di mana mereka fokus (fisik) ini mengirimkan sinyal

yang bertentangan ke otak, yang dapat menyebabkan kelelahan visual yang cepat, pusing, dan mual (mabuk simulasi) jika digunakan terlalu lama.

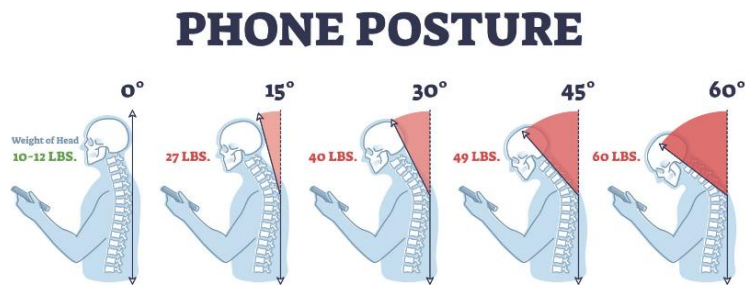
Solusi (Aturan 20-20-20): Fasilitator harus menerapkan aturan ergonomi standar: setiap 20 menit penggunaan layar, siswa harus beristirahat selama 20 detik dan melihat sesuatu yang berjarak 20 kaki (sekitar 6 meter) untuk merelaksasi otot mata.

b. Masalah Postur Tubuh dan Ergonomi ("Text Neck")

Penggunaan AR handheld (berbasis ponsel/tablet) memaksa siswa untuk mempertahankan postur yang tidak alami dalam waktu lama.

1) Masalah

Siswa sering kali harus menahan tablet (yang bisa jadi berat) dengan stabil untuk menjaga pelacakan penanda, sambil menundukkan leher mereka ("text neck") untuk melihat meja atau buku modul mereka.



Gambar 10. Postur Tubuh yang Baik Saat Menggunakan Gadget

2) Dampak

Postur statis yang membungkuk ini memberikan tekanan besar pada tulang belakang leher dan bahu, yang dapat menyebabkan nyeri muskuloskeletal, ketegangan leher, dan sakit punggung.

3) Solusi (Aktivitas "Meledak" / *Blended*)

Kunci proporsionalitas adalah jangan pernah menjadikan AR sebagai aktivitas selama 60 menit penuh. Strategi implementasi yang baik menggunakan AR dalam "ledakan" (burst) singkat dan terfokus.

Contoh Alur 10 menit (Instruksi guru) -> 15 menit (Aktivitas AR intensif) -> 5 menit (Istirahat/Peregangan) -> 20 menit (Diskusi kelompok atau mengerjakan lembar kerja berbasis temuan AR perangkat diletakkan).

Ulasan sistematis tentang tantangan implementasi AR di pendidikan sering kali mengidentifikasi batasan kognitif dan fisik ini sebagai hambatan. (Wu et al. 2013) mencatat bahwa meskipun AR menawarkan peluang besar, masalah seperti usability perangkat (termasuk kenyamanan fisik) dan potensi kelebihan beban kognitif (yang diperburuk oleh ketidaknyamanan fisik) adalah tantangan signifikan yang harus dikelola oleh pendidik melalui desain instruksional yang cermat (seperti membatasi durasi penggunaan).

2. Batasan Konten

Salah satu keunggulan terbesar *Augmented Reality* (AR) kemampuannya untuk sangat menarik, imersif secara visual, dan "menyenangkan" sekaligus merupakan salah satu risiko pedagogis terbesarnya. Ada garis tipis antara keterlibatan yang bermakna (meaningful engagement) dan hiburan yang mengganggu (distracting entertainment). Batasan utama penggunaan AR adalah bahwa ia harus selalu mendukung materi pembelajaran secara langsung, dan tidak boleh dibiarkan menjadi sekadar gimmick atau mainan teknologi.

a. Prioritas Utama Didorong oleh Pedagogi, Bukan Teknologi

Setiap elemen interaktif, animasi, dan model 3D yang dimasukkan ke dalam aplikasi AR harus dapat dijustifikasi secara pedagogis. Perancang dan pendidik harus terus-menerus bertanya:

"Apakah fitur ini secara langsung mendukung salah satu Tujuan Pembelajaran Khusus (TPK) kita?"

Jika sebuah fitur (misalnya, menambahkan animasi percikan api yang keren saat CPU dipasang) tidak dapat dipetakan kembali ke tujuan pembelajaran yang spesifik, maka fitur tersebut kemungkinan besar adalah "hiburan" yang harus dihilangkan.

1) Konten AR yang Baik (Mendukung Pembelajaran)

Dalam aplikasi perangkat keras komputer, ini adalah simulasi yang menunjukkan stik RAM gagal masuk jika orientasi notch-nya salah. Ini secara langsung mengajarkan konsep keying fisik.

2) Konten AR yang Buruk (Sekadar Hiburan)

Ini adalah menambahkan model robot menari di atas *motherboard* virtual setiap kali siswa menjawab kuis dengan benar. Ini mungkin "menarik" dalam jangka pendek, tetapi tidak menambah pemahaman tentang perangkat keras komputer.

b. Risiko "Detail yang Menggoda" dan Beban Kognitif

Ketika "hiburan" mengalahkan "pembelajaran", kita menghadapi masalah yang dalam Teori Beban Kognitif (CLT) disebut sebagai "detail yang menggoda" (*seductive details*). Ini adalah elemen grafis atau audio yang menarik dan menyenangkan, tetapi tidak relevan dengan tujuan pembelajaran inti.

Otak siswa memiliki kapasitas memori kerja yang sangat terbatas. Jika aplikasi AR penuh dengan animasi yang tidak perlu, efek suara yang berlebihan, dan elemen visual yang mencolok (*gimmick*), otak siswa dipaksa untuk memproses semua rangsangan yang tidak relevan tersebut (meningkatkan beban kognitif asing). Akibatnya, lebih sedikit sumber daya

kognitif yang tersisa untuk benar-benar memproses dan memahami materi inti (beban relevan), yang pada akhirnya justru dapat menghambat pemahaman.

Banyak penelitian tentang AR membahas "efek kebaruan" (novelty effect) peningkatan motivasi siswa hanya karena mereka menggunakan teknologi baru yang keren. Meskipun pengait awal ini berguna, tinjauan sistematis seperti oleh (Akçayır and Akçayır 2016) memperingatkan bahwa pembelajaran yang efektif membutuhkan desain yang melampaui kebaruan belaka dan harus secara hati-hati mengelola beban kognitif untuk memastikan fokus tetap pada pembelajaran.

3. Peran Guru

Dalam konteks Batasan Konten (AR sebagai hiburan vs. pembelajaran) dan Batasan Waktu (risiko kesehatan), peran guru sebagai fasilitator (yang dibahas di Bab 7) kini diperluas dengan tanggung jawab kritis sebagai pengawas atau regulator. Jika aplikasi AR adalah "laboratorium virtual" yang menarik, maka guru adalah kepala laboratorium yang memastikan semua prosedur diikuti dengan aman dan semua aktivitas tetap fokus pada tujuan ilmiah (pembelajaran), bukan hanya pada keseruan "ledakan" (hiburan).

a. Menjaga Fokus dari "Hiburan" ke "Tujuan Pembelajaran"

"Faktor wow" dari AR adalah pedang bermata dua. Ia meraih perhatian siswa dengan instan, tetapi juga dapat dengan mudah menjebak mereka dalam lingkaran interaksi tanpa tujuan. Siswa mungkin menghabiskan 10 menit hanya memutar-mutar model *motherboard* virtual atau memperbesar-kecilkan GPU karena teknologinya terasa ajaib, tanpa sedikit pun memikirkan fungsi komponen tersebut. Di sinilah peran pengawas guru sangat vital:

1) Penegak Skenario

Guru harus secara aktif "menjaga pagar" skenario pembelajaran. Jika tugasnya adalah "Temukan 3 port

SATA," guru harus berkeliling dan secara aktif mengarahkan kembali siswa yang teralihkan.

Intervensi: "Saya lihat kamu sudah bisa memutar modelnya, itu bagus. Sekarang, coba gunakan lembar kerjamu. Tugas nomor 1 adalah menemukan port SATA. Bisakah kamu tunjukkan di mana itu di model AR-mu?"

2) Penghubung Konsep

Guru bertindak sebagai jembatan konstan yang menarik siswa kembali dari interaksi visual ke tujuan kognitif.

Intervensi: Saat siswa mengagumi animasi perakitan PC yang keren, guru mengajukan pertanyaan yang memaksa berpikir: "Perhatikan, mengapa aplikasi ini memintamu memasang CPU sebelum memasang kipas pendinginnya? Apa yang akan terjadi di dunia nyata jika urutannya terbalik?"

b. Regulator Kesehatan Fisik dan Kognitif

Selain mengawasi fokus belajar, guru secara harfiah harus mengawasi kondisi fisik siswa.

1) Manajemen Waktu (Ergonomi)

Guru adalah manajer waktu yang menerapkan batasan kesehatan. Mereka harus menjadi orang yang secara tegas mengatakan, "Oke, waktu eksplorasi AR 15 menit selesai. Letakkan tablet di meja," untuk menegaskan jeda istirahat mata dan postur.

2) Mengawasi Frustrasi (Beban Kognitif)

Guru harus mengawasi tanda-tanda kelelahan kognitif atau frustrasi teknis. Jika seorang siswa terlihat kesulitan memindai penanda, guru harus segera turun tangan untuk membantu (troubleshoot), sebelum frustrasi tersebut menyebabkan siswa menyerah pada pelajaran.

Peran pengawas ini sangat penting. Tinjauan sistematis oleh (Akçayır and Akçayır 2016) menyoroti bahwa salah satu tantangan terbesar dalam implementasi AR adalah masalah manajemen kelas (classroom management issues) dan potensi gangguan (distraction) yang ditimbulkan oleh teknologi baru. Keberhasilan implementasi AR sangat bergantung pada kemampuan guru untuk mengelola tantangan ini, menetapkan aturan yang jelas, dan secara aktif mengawasi proses untuk memastikan teknologi tetap menjadi alat pendukung pembelajaran, bukan tujuan akhir dari aktivitas itu sendiri.

4. Kebijakan Sekolah

Untuk mengelola semua batasan, risiko hukum (hak cipta), dan risiko etika (privasi data) secara efektif, implementasi AR tidak dapat dibiarkan bersifat ad-hoc atau diserahkan sepenuhnya pada inisiatif masing-masing guru. Institusi pendidikan (sekolah atau universitas) wajib membuat dan memberlakukan pedoman resmi atau Kebijakan (Pedoman Operasional Standar/POS) yang jelas terkait pengembangan dan penggunaan AR.

Kebijakan ini berfungsi sebagai "pagar pengaman" legal dan etis bagi institusi, sekaligus memberikan panduan yang jelas bagi pengembang, guru, siswa, dan orang tua. Kebijakan ini mengubah prinsip-prinsip etika menjadi aturan yang dapat ditindaklanjuti. Sebuah pedoman yang komprehensif harus mencakup setidaknya empat area kritis berikut:

- a. Akuisisi Konten dan Kepatuhan Hak Cipta:
 - 1) Kebijakan harus secara eksplisit melarang penggunaan *aset digital* apa pun (3D model, audio, gambar) yang status hak ciptanya tidak jelas atau melanggar hukum.
 - 2) Kebijakan harus mewajibkan semua proyek AR untuk memelihara "daftar aset" (asset manifest) yang mendokumentasikan sumber dan lisensi dari setiap komponen pihak ketiga.
 - 3) Kebijakan ini harus mendefinisikan prosedur untuk persetujuan penggunaan aset berlisensi (misalnya, CC-BY,

Komersial RF) dan mewajibkan implementasi halaman "Kredit/Atribusi" dalam aplikasi.

b. Perlindungan Data dan Privasi Siswa:

- 1) Ini adalah bagian paling penting. Kebijakan harus mengadopsi prinsip Minimalisasi Data (hanya mengumpulkan data siswa yang mutlak diperlukan untuk tujuan pembelajaran).
- 2) Kebijakan harus mewajibkan proses Persetujuan yang Diinformasikan (Informed Consent) dari orang tua/wali untuk siswa di bawah umur, yang dengan jelas menjelaskan data apa yang dikumpulkan oleh kamera/sensor dan mengapa.
- 3) Kebijakan harus menjamin ketersediaan jalur pembelajaran alternatif yang setara bagi siswa yang orang tuanya menolak memberikan persetujuan privasi.
- 4) Kebijakan harus menetapkan standar teknis (misalnya, HTTPS wajib untuk semua transmisi data) dan kebijakan penghapusan data (misalnya, semua data PII siswa harus dihapus 30 hari setelah semester berakhir).

c. Kesehatan, Keselamatan, dan Ergonomi:

- 1) Kebijakan harus mengatasi batasan fisik. Kebijakan ini dapat menetapkan batasan waktu maksimum yang direkomendasikan untuk sesi AR tanpa jeda (misalnya, "Sesi AR interaktif tidak boleh melebihi 20 menit tanpa jeda istirahat mata terstruktur").
- 2) Kebijakan harus mencakup aturan keselamatan fisik, seperti "Aktivitas AR yang membutuhkan pergerakan siswa hanya boleh dilakukan di area yang telah ditentukan (misalnya, gymnasium atau aula) yang bebas dari hambatan."

d. Aksesibilitas dan Ekuitas:

- 1) Kebijakan harus membahas "kesenjangan digital". Jika sekolah mengadopsi strategi BYOD (*Bring Your Own Device*), kebijakan harus menjelaskan solusi bagi siswa yang tidak memiliki perangkat yang kompatibel (lagi-lagi, kembali ke pentingnya jalur pembelajaran alternatif).
- 2) Kebijakan harus mendorong (atau mewajibkan) pengembang untuk mengikuti standar aksesibilitas

(misalnya, memastikan semua video AR memiliki teks, dan semua instruksi visual juga memiliki narasi audio).

Pembuatan kebijakan semacam ini adalah respons institusional langsung terhadap tantangan hukum dan etika yang ditimbulkan oleh teknologi baru. Seperti yang ditunjukkan oleh penelitian hukum (Wu et al. 2013), lanskap hukum untuk XR (AR/VR) masih berkembang, sehingga menempatkan tanggung jawab yang lebih besar pada institusi untuk secara proaktif membuat kerangka kerja tata kelola internal mereka sendiri untuk melindungi pengguna dan mengurangi risiko hukum.

D. Aksesibilitas untuk Semua Peserta Didik

Prinsip fundamental dari pendidikan adalah menyediakan kesempatan yang setara bagi setiap individu untuk belajar dan berkembang. Saat kita mengadopsi teknologi baru yang kuat seperti *Augmented Reality* (AR), kita memiliki tanggung jawab etis dan seringkali hukum untuk memastikan bahwa inovasi tersebut tidak meninggalkan siapa pun. Oleh karena itu, pendidikan berbasis AR harus dirancang agar inklusif, memberikan semua peserta didik, terlepas dari kemampuan fisik, kognitif, atau latar belakang ekonomi mereka, kesempatan untuk berpartisipasi dan mendapatkan manfaat.

Sayangnya, AR sebagai teknologi yang sangat visual, interaktif, dan bergantung pada perangkat keras modern, secara inheren berisiko menciptakan hambatan akses yang signifikan. Hambatan ini muncul dalam dua bentuk utama. Pertama adalah "kesenjangan digital" ekonomi dan teknis: tidak semua siswa memiliki akses ke smartphone atau tablet terbaru yang diperlukan untuk menjalankan aplikasi AR, sehingga menciptakan masalah ekuitas yang serius. Kedua adalah hambatan disabilitas: bagaimana pengalaman AR dapat diakses oleh siswa dengan gangguan penglihatan, pendengaran, atau keterbatasan motorik yang mungkin kesulitan memegang perangkat atau melakukan interaksi berbasis gestur?

Memastikan aksesibilitas (sering disingkat "a11y") bukanlah fitur tambahan yang "bagus untuk dimiliki"; itu adalah komponen inti dari desain pendidikan yang bertanggung jawab. Ini menuntut

perencanaan yang proaktif, mulai dari penerapan prinsip-prinsip Universal Design for *Learning* (UDL) dalam desain aplikasi itu sendiri, hingga keharusan menyediakan jalur pembelajaran alternatif yang setara bagi mereka yang tidak dapat menggunakan AR. Sub-bab ini akan membahas tantangan spesifik seputar aksesibilitas dan ekuitas serta strategi untuk mengatasinya.

1. Aspek Aksesibilitas

Prinsip inti dari desain pendidikan yang etis adalah inklusivitas. Sebuah media pembelajaran, secanggih apa pun, gagal secara fundamental jika ia menciptakan atau memperburuk kesenjangan belajar. Dalam konteks *Augmented Reality* (AR), tantangan aksesibilitas (sering disingkat a11y) muncul dalam dua bentuk utama: (1) aksesibilitas untuk siswa dengan keterbatasan fisik atau sensorik, dan (2) aksesibilitas ekonomi atau teknis, yang sering disebut sebagai kesenjangan digital (*digital divide*).

a. Dukungan untuk Keterbatasan Fisik atau Sensorik

AR secara bawaan adalah media yang sangat visual dan kinestetik, yang secara otomatis menciptakan hambatan besar bagi siswa dengan keterbatasan tertentu. Merancang untuk aksesibilitas berarti secara proaktif membangun fitur-fitur yang menyediakan cara alternatif untuk mengakses informasi, sesuai dengan prinsip Universal Design for *Learning* (UDL).

1) Keterbatasan Penglihatan (Tunanetra atau Low Vision):

a) Tantangan

Siswa tunanetra tidak dapat melihat model 3D (inti pengalaman AR). Siswa low vision mungkin kesulitan melihat detail kecil atau teks antarmuka.

b) Solusi:

- Kompatibilitas Screen Reader (Wajib)

Semua elemen UI yang dapat diketuk (tombol, panel info) harus memiliki label aksesibilitas yang "tidak terlihat" yang dapat dibaca dengan jelas oleh pembaca

layar bawaan (VoiceOver di *iOS*, TalkBack di *Android*).

- Audio Deskripsi

Untuk model 3D (seperti *motherboard*), aplikasi harus menyediakan opsi audio deskriptif yang mendalam, yang secara verbal melukiskan gambaran spasial. (Misal: "Model *motherboard* virtual kini di depan Anda. Di bagian tengah atas terdapat soket CPU perak yang besar. Di sebelah kanannya terdapat empat slot RAM hitam yang panjang dan ramping.")

- Mode Kontras Tinggi & Ukuran Teks

Aplikasi harus menawarkan opsi di pengaturan untuk memperbesar semua teks UI dan mengubahnya ke mode kontras tinggi (misal, teks putih tebal di latar belakang hitam) untuk keterbacaan maksimal.

2) Keterbatasan Pendengaran (Tunarungu):

a) Tantangan

Semua informasi yang disampaikan melalui narasi audio penjelasan atau efek suara umpan balik akan hilang.

b) Solusi (Wajib)

Semua konten audio harus memiliki padanan visual yang setara.

- Closed Captions (Teks Tertutup)

Setiap klip narasi audio (misalnya, penjelasan fungsi GPU) harus disertai dengan opsi captioning yang akurat dan tersinkronisasi.

- Umpan Balik Visual

Umpan balik audio (seperti suara "klik" saat RAM terpasang) harus didampingi umpan balik visual

(misalnya, komponen berkedip hijau atau tanda centang).

3) Keterbatasan Motorik:

a) Tantangan

Siswa dengan gangguan motorik mungkin kesulitan memegang tablet dengan stabil (yang diperlukan untuk pelacakan AR) atau melakukan gestur multi-touch yang rumit (seperti mencubit untuk zoom).

b) Solusi

Sediakan alternatif input. Alih-alih hanya mengandalkan gestur cubit untuk zoom, sediakan juga tombol "+" dan "-" yang besar di layar. Pastikan semua target ketukan (tombol) cukup besar dan diberi jarak yang baik.

b. Ketersediaan Perangkat dan Kesenjangan Digital (Digital Divide)

Ini adalah hambatan aksesibilitas yang paling umum di dunia pendidikan: ekuitas. AR, terutama AR *markerless* (*ARCore/ARKit*), membutuhkan perangkat smartphone atau tablet yang relatif modern dan bertenaga.

1) Tantangan

Di kelas mana pun (terutama di sekolah negeri), akan ada kesenjangan ekonomi. Beberapa siswa mungkin memiliki perangkat terbaru, sementara siswa lain mungkin memiliki perangkat entry-level yang sudah tua (yang tidak kompatibel dengan *ARCore/ARKit*) atau bahkan tidak memiliki perangkat pribadi sama sekali. Jika strategi implementasi bergantung penuh pada BYOD (*Bring Your Own Device*), kita secara efektif mengucilkan siswa yang tidak mampu dari pengalaman belajar tersebut.

2) Solusi (Tingkat Kebijakan Sekolah):

a) Menyediakan Perangkat Sekolah

Solusi terbaik untuk ekuitas adalah sekolah menginvestasikan dana untuk satu set perangkat (misalnya, 15 tablet) yang disimpan di perpustakaan atau laboratorium. Ketika pelajaran AR perangkat keras komputer berlangsung, semua siswa menggunakan perangkat sekolah yang identik, memastikan pengalaman yang setara.

b) Jalur Pembelajaran Alternatif yang Setara

Ini adalah kewajiban etis. Seperti yang dibahas dalam kebijakan privasi, sekolah harus menjamin bahwa ada jalur non-AR yang setara bagi siswa yang tidak dapat berpartisipasi (baik karena alasan privasi, disabilitas, atau ketersediaan perangkat). Untuk pelajaran perangkat keras komputer, alternatif ini bisa berupa:

- Simulator 3D interaktif non-AR yang dapat dijalankan di laptop/PC laboratorium komputer.
- Lembar kerja mendalam berbasis video dan diagram berkualitas tinggi.
- Praktikum langsung menggunakan perangkat keras fisik (jika tersedia).

Tantangan aksesibilitas dan ekuitas ini diakui secara luas dalam literatur. Tinjauan sistematis seperti oleh (Wu et al. 2013) mengidentifikasi "masalah usabilitas" (yang mencakup desain aksesibilitas) dan "masalah manajemen kelas" (yang mencakup ketersediaan perangkat) sebagai dua dari tantangan utama yang menghambat adopsi AR secara luas.

2. Strategi Inklusif

Menyatakan bahwa AR harus inklusif (prinsip) tidak ada artinya tanpa strategi yang dapat ditindaklanjuti (praktik). Institusi dan pengembang harus secara proaktif merancang strategi untuk

mengatasi kesenjangan perangkat keras (ekuitas) dan kesenjangan sensorik (aksesibilitas).

a. Penggunaan Perangkat Mobile Umum (Strategi Ekuitas Perangkat)

Hambatan terbesar adopsi AR adalah "kesenjangan digital". Strategi implementasi tidak boleh dirancang hanya untuk perangkat flagship terbaru. Sebaliknya, strategi inklusif harus memprioritaskan jangkauan maksimum.

1) Prioritaskan AR Berbasis Penanda (*Marker-Based*)

Seperti dibahas sebelumnya, teknologi AR *markerless* (*ARCore/ARKit*) membutuhkan sensor canggih (seperti sensor LiDAR atau ToF) dan CPU/GPU yang kuat, yang hanya ada di ponsel kelas menengah ke atas. Sebaliknya, AR berbasis penanda (seperti yang ditenagai oleh Vuforia atau AR.js) jauh lebih ringan secara komputasi. Teknologi ini sering kali dapat berjalan dengan lancar di perangkat smartphone *Android* yang lebih tua atau lebih murah karena hanya perlu melakukan pengenalan gambar 2D, bukan pemetaan ruang 3D (SLAM). Memilih alur kerja berbasis penanda adalah keputusan desain strategis yang secara signifikan meningkatkan ekuitas dan akses bagi siswa dengan keterbatasan sumber daya.

2) Manfaatkan WebAR

Jika memungkinkan, menggunakan WebAR (AR berbasis browser) dapat menghilangkan hambatan instalasi aplikasi sepenuhnya, membuatnya lebih mudah diakses.

3) Menyediakan Perangkat Sekolah & Jalur Non-AR

Strategi inklusif utama tetap pada kebijakan sekolah: (1) Menyediakan satu set perangkat tablet milik sekolah yang telah teruji dan kompatibel sehingga tidak bergantung pada perangkat siswa, dan (2) Selalu menyediakan jalur

pembelajaran non-AR yang setara (misalnya, simulator 3D berbasis web di PC lab) untuk mereka yang tetap tidak dapat berpartisipasi.

b. Adaptasi Konten Multi-Modal (Strategi Aksesibilitas UDL)

Strategi ini mengatasi hambatan sensorik dan kognitif dengan mengadopsi prinsip-prinsip Desain Universal untuk Pembelajaran (Universal Design for *Learning* - UDL). Prinsip inti UDL adalah menyediakan berbagai cara representasi (Multiple Means of Representation). Aplikasi AR tidak boleh hanya mengandalkan satu indra (visual). Konten yang sama harus dapat diakses melalui berbagai saluran.

1) Untuk Keterbatasan Pendengaran (Tunarungu)

a) Teks Tertutup (Closed Captions)

Ini adalah persyaratan wajib. Semua konten audio naratif (misalnya, penjelasan fungsi CPU) harus memiliki opsi teks tertutup (CC) yang akurat dan tersinkronisasi yang dapat diaktifkan oleh pengguna.

b) Umpan Balik Visual

Semua umpan balik audio (seperti bunyi "bip" kegagalan pemasangan RAM) harus didampingi oleh umpan balik visual yang jelas (misalnya, komponen berkedip merah).

2) Untuk Keterbatasan Penglihatan (Tunanetra/Low Vision)

a) Kompatibilitas Screen Reader

Semua tombol dan panel teks UI harus diberi label yang benar di backend agar dapat dibaca oleh layanan aksesibilitas native (TalkBack/VoiceOver).

b) Audio Deskripsi

Aplikasi harus menyertakan trek audio deskriptif opsional yang tidak hanya menarasikan materi, tetapi juga mendeskripsikan adegan visual utama untuk pengguna tunanetra.

c) Opsi Kontras Tinggi

Menyediakan mode kontras tinggi dan kemampuan untuk memperbesar ukuran font UI bagi pengguna low vision.

3) Untuk Kesulitan Belajar (misalnya, Disleksia):

Strategi multi-modal ini juga sangat membantu siswa dengan kesulitan belajar. Siswa yang kesulitan membaca teks deskripsi yang panjang dapat memilih untuk mendengarkan narasi audio sambil tetap melihat model 3D-nya. Ini mengurangi beban kognitif membaca dan memungkinkan mereka untuk fokus pada pemahaman konsep.

Strategi-strategi ini secara langsung mengatasi tantangan yang diidentifikasi dalam penelitian AR. Tinjauan sistematis seperti oleh (Wu et al. 2013) menyoroti "masalah usabilitas" dan "beban kognitif" sebagai hambatan utama. Dengan menyediakan beberapa jalur untuk mengakses informasi (teks, audio, visual) dan memastikan aplikasi dapat berjalan di perangkat yang lebih umum, strategi inklusif ini secara langsung mengurangi beban kognitif dan mengatasi tantangan usabilitas bagi semua peserta didik.

3. Prinsip Keadilan

Prinsip etis tertinggi yang harus dipegang oleh setiap institusi pendidikan adalah prinsip keadilan (*equity*). Prinsip ini menegaskan bahwa setiap siswa berhak mendapatkan kesempatan yang sama untuk berhasil, terlepas dari latar belakang ekonomi, kemampuan fisik, atau sumber daya teknologi pribadi mereka. Saat memperkenalkan teknologi canggih seperti *Augmented Reality* (AR), kita memiliki kewajiban moral untuk memastikan tidak ada siswa yang tertinggal dalam proses pembelajaran karena keterbatasan akses teknologi. Jika tidak dikelola dengan hati-hati, AR berisiko menjadi "akselerator kesenjangan", di mana siswa yang sudah memiliki keunggulan (dengan perangkat baru) mendapatkan pengalaman belajar yang lebih kaya, sementara yang lain semakin tertinggal.

a. Membedakan Kesetaraan (Equality) vs. Keadilan (*Equity*)

Sangat penting untuk memahami perbedaan antara dua konsep ini dalam implementasi AR:

1) Kesetaraan (Equality)

Adalah memberikan sumber daya yang sama kepada semua orang. Contoh: "Semua siswa boleh menggunakan aplikasi AR ini di ponsel mereka masing-masing (BYOD)." Ini terdengar adil, tetapi tidak, karena mengabaikan fakta bahwa beberapa siswa tidak memiliki ponsel yang kompatibel.

2) Keadilan (*Equity*)

Adalah memberikan sumber daya yang berbeda kepada setiap siswa sesuai kebutuhan mereka agar semua dapat mencapai hasil yang sama. Keadilan mengakui bahwa beberapa siswa memulai dengan perangkat yang lebih tua atau tanpa perangkat sama sekali.

b. Kesenjangan Digital 2.0 Hambatan Perangkat Keras

Prinsip keadilan menuntut kita untuk secara langsung menghadapi "Kesenjangan Digital 2.0". Kesenjangan ini bukan lagi hanya tentang siapa yang memiliki akses internet, tetapi siapa yang memiliki perangkat keras yang cukup kuat untuk menjalankan *ARCore/ARKit*. Jika pelajaran inti tentang perakitan PC hanya tersedia melalui aplikasi AR *markerless* yang canggih, siswa dengan ponsel *Android* berusia 4 tahun secara efektif dikunci keluar dari pelajaran tersebut. Ini adalah kegagalan institusional yang tidak etis.

c. Solusi Wajib Jalur Pembelajaran Alternatif yang Setara

Prinsip keadilan menuntut solusi yang telah dibahas sebelumnya menjadi sebuah kewajiban:

Untuk setiap aktivitas pembelajaran yang menggunakan AR, sekolah wajib menyediakan jalur pembelajaran alternatif yang non-AR namun setara secara pedagogis.

"Setara secara pedagogis" berarti alternatif tersebut harus dirancang untuk mencapai Tujuan Pembelajaran Khusus (TPK) yang sama dengan aktivitas AR. Jalur alternatif ini tidak boleh bersifat hukuman atau berkualitas lebih rendah.

1) Jalur A (AR)

Siswa menggunakan tablet untuk merakit PC virtual secara interaktif di meja mereka. (Mencapai TPK: Pemahaman Spasial Perakitan).

2) Jalur B (Alternatif Keadilan)

Siswa yang tidak memiliki perangkat (atau memilih keluar karena privasi/disabilitas) menggunakan laboratorium komputer sekolah untuk mengakses simulator 3D interaktif berbasis web (non-AR) yang mengajarkan proses perakitan yang sama.

3) Hasil

Kedua siswa dari kedua jalur tersebut dapat mengikuti ujian akhir yang sama tentang prosedur perakitan.

BAB

9

INOVASI DAN MASA DEPAN AR DI PENDIDIKAN



Bab ini membahas arah perkembangan teknologi AR di masa depan serta potensinya dalam transformasi pendidikan. Topik yang dibahas meliputi integrasi AR dengan Artificial Intelligence (AI), pemanfaatan AR dalam lingkungan pembelajaran berbasis metaverse, serta penerapan AR untuk pembelajaran adaptif dan personalisasi. Selain itu, bab ini menyajikan prediksi perkembangan teknologi AR dalam lima hingga sepuluh tahun mendatang dan implikasinya terhadap model pembelajaran, peran guru, serta pengalaman belajar peserta didik.

A. Integrasi AR dengan *Artificial Intelligence* (AI)

Jika *Augmented Reality* (AR) adalah teknologi yang mengubah cara kita melihat dunia, maka *Artificial Intelligence* (AI) adalah teknologi yang mengubah cara kita memahami dunia. Secara terpisah, keduanya adalah alat yang kuat. Namun, ketika digabungkan, mereka menciptakan sinergi yang berpotensi merevolusi lanskap pendidikan. Kunci untuk memahami masa depan inovasi ini terletak pada bagaimana AR dan AI saling melengkapi: AR berfungsi sebagai "mata" dan "antarmuka" (interface), sementara AI berfungsi sebagai "otak" (brain) di baliknya.

AR unggul dalam menangkap data dunia nyata secara real-time (melalui kamera dan sensor) dan memvisualisasikan data digital (model 3D) di atasnya. Namun, tanpa AI, sebagian besar aplikasi AR

bersifat "pasif" atau telah diprogram sebelumnya; aplikasi tersebut tidak benar-benar memahami apa yang dilihatnya ia hanya mengenali penanda spesifik atau permukaan datar generik. Sebaliknya, AI (khususnya computer vision dan machine *Learning*) unggul dalam mengenali pola, memahami konteks, dan membuat keputusan, tetapi ia "buta" tanpa data sensorik.

Kombinasi AR+AI menjembatani kesenjangan ini. AR memberikan AI "mata" untuk melihat dunia nyata, dan AI memberikan AR "kecerdasan" untuk memahami apa yang dilihatnya dan merespons secara adaptif. Ini mengubah media AR dari sekadar alat visualisasi 3D menjadi mitra belajar yang cerdas dan personal. Sub-bab ini akan mengeksplorasi bagaimana fusi teknologi ini menciptakan bentuk-bentuk baru pembelajaran yang lebih dinamis, adaptif, dan responsif terhadap kebutuhan individu siswa.

1. Peran AI

AI memainkan dua peran transformatif dalam pengalaman pembelajaran AR: pertama, sebagai "otak" yang membuat konten AR lebih relevan bagi setiap siswa; kedua, sebagai "mata" yang memahami apa yang dilakukan siswa dan bagaimana mereka belajar.

a. Personalisasi Materi Belajar Berbasis Data Siswa

Salah satu janji terbesar AI dalam pendidikan adalah kemampuan untuk memberikan pembelajaran yang dipersonalisasi (*personalized Learning*). Ini adalah pendekatan yang menyesuaikan materi, kecepatan, dan metode pengajaran dengan kebutuhan, gaya belajar, dan tingkat pemahaman individu setiap siswa.

1) Pengumpulan Data Kaya (Rich Data Collection)

Aplikasi AR yang diperkuat AI dapat mengumpulkan data yang jauh lebih kaya dan granular daripada metode tradisional. Bukan hanya "skor kuis 80%", tetapi juga: "Siswa A menghabiskan 30 detik lebih lama melihat diagram aliran data CPU, mencoba memasang RAM 5 kali sebelum

berhasil, dan menjawab pertanyaan tentang GPU dengan benar 90% waktu."

2) Analisis AI Algoritma machine *Learning* menganalisis data ini untuk mengidentifikasi pola belajar individu:

a) Kesenjangan Pengetahuan

AI dapat mendeteksi bahwa Siswa A secara konsisten kesulitan memahami peran Northbridge pada *motherboard* virtual.

b) Gaya Belajar

AI mungkin menyimpulkan bahwa Siswa B belajar paling baik dari animasi interaktif daripada teks naratif yang panjang.

c) Zona Keterampilan Berikutnya

AI dapat memetakan "zona pengembangan proksimal" (ZPD) siswa yaitu, apa yang siap dipelajari siswa berikutnya.

3) Adaptasi Konten AR Secara Real-time

Berdasarkan analisis ini, sistem AI kemudian secara dinamis menyesuaikan pengalaman AR untuk siswa tersebut:

a) Jika Siswa A kesulitan dengan Northbridge, aplikasi AR dapat secara otomatis memicu tutorial singkat AR tambahan yang menjelaskan fungsi Northbridge dengan animasi 3D yang lebih sederhana, atau menghadirkan model 3D alternatif yang lebih visual.

b) Jika Siswa B lebih suka animasi, AI akan memprioritaskan visualisasi 3D atau simulasi AR daripada panel teks.

c) Jika Siswa C telah menguasai dasar-dasar, AI dapat memperkenalkan tugas yang lebih kompleks, seperti mendiagnosis "PC virtual yang rusak" (pemecahan masalah tingkat lanjut).

Penelitian telah menunjukkan bahwa AI memiliki potensi signifikan untuk meningkatkan personalisasi dalam pendidikan. Misalnya, (Yufei et al. 2020) menyoroti bagaimana AI dapat menganalisis jejak pembelajaran siswa (termasuk interaksi dengan AR) untuk memberikan adaptasi konten yang efektif, meningkatkan efektivitas pembelajaran secara keseluruhan.

b. Analisis Perilaku dan Kinerja Siswa Secara Real-time

Ini adalah "mata" dan "pemahaman" AI yang memungkinkan personalisasi. AI dapat memantau bukan hanya hasil akhir, tetapi proses pembelajaran siswa.

1) Deteksi Tindakan dan Kesalahan

Melalui computer vision (yang ditingkatkan oleh AR), AI dapat memonitor apa yang dilihat siswa dan bagaimana mereka berinteraksi dengan model AR. Misalnya, saat siswa mencoba memasang CPU virtual, AI dapat mendeteksi:

- a) Apakah mereka mencoba memasangnya dengan orientasi yang salah?
- b) Apakah mereka menekan terlalu keras (secara virtual)?
- c) Apakah mereka ragu-ragu di langkah tertentu?

2) Pelacakan Perhatian (Attention Tracking)

Beberapa sistem AR dan AI yang lebih canggih dapat menggunakan eye-tracking (pelacakan mata, jika ada di perangkat AR) untuk memahami ke mana arah pandangan siswa. Jika siswa terus-menerus melihat ke luar jendela saat model AR *motherboard* sedang dijelaskan, AI dapat menandai bahwa perhatian siswa terganggu.

3) Umpan Balik Instan dan Adaptif

Berdasarkan analisis real-time ini, AI dapat memberikan umpan balik yang jauh lebih cerdas daripada sekadar "Benar" atau "Salah":

- a) "Anda mencoba memasang CPU terbalik. Ingat, takik pada CPU harus sejajar dengan tanda segitiga di soket." (Umpan balik korektif)
- b) "Saya lihat Anda berhasil memasang RAM dengan cepat. Apakah Anda sudah terbiasa dengan komponen ini?" (Umpan balik penguatan)

Dengan AI, AR berubah dari sekadar media interaktif menjadi tutor cerdas yang memahami bagaimana siswa belajar, berinteraksi, dan membuat kesalahan, kemudian secara adaptif membimbing mereka ke arah pemahaman yang lebih baik.

2. Integrasi dengan AR

Ketika "otak" AI digabungkan dengan "mata" AR, kita mendapatkan dua aplikasi inovatif yang secara fundamental mengubah cara siswa berinteraksi dengan materi pembelajaran: *chatbot* cerdas sebagai pendamping, dan pengenalan objek real-time sebagai pemandu praktikum.

a. *Chatbot* AR Berbasis AI untuk Pendampingan Belajar

Ini adalah evolusi dari narasi audio statis. Alih-alih hanya mendengarkan penjelasan yang telah direkam sebelumnya, siswa dapat bertanya dan berdiskusi dengan aplikasi AR secara real-time.



Gambar 11. Fitur *Chat* Ai Dalam Aplikasi Pembelajaran

1) Cara Kerja

Sebuah interface percakapan (bisa berupa avatar 3D atau jendela obrolan sederhana) muncul di samping model 3D AR. Di belakang layar, *chatbot* ini didukung oleh Large Language Model (LLM) atau model AI percakapan yang telah dilatih secara khusus tentang kurikulum perangkat keras komputer.

2) Konteks Perangkat Keras Komputer (Contoh Skenario)

- a) Siswa melihat model AR *motherboard* dan mengetuk hotspot slot RAM.
- b) Audio Statis (Lama) "Ini adalah slot RAM, tempat Anda memasang memori."
- c) *Chatbot* AI (Baru):
 - Siswa (via suara/teks)
"Kenapa ada dua warna slot, hitam dan biru?"
 - *Chatbot* AI
"Itu pertanyaan bagus. Itu untuk menandakan Dual-Channel. Memasang stik RAM di slot dengan warna yang sama (biru dan biru) memungkinkan CPU berkomunikasi dengan kedua stik secara bersamaan, yang hampir menggandakan kecepatan transfer data memori."
 - Siswa
"Apa yang terjadi jika saya pasang di slot hitam dan biru?"
 - *Chatbot* AI
"Komputer akan tetap berfungsi, tetapi akan berjalan dalam mode Single-Channel yang lebih lambat karena bandwidth-nya tidak digabungkan."

3) Manfaat

Ini mengubah pembelajaran dari proses pasif menerima informasi menjadi proses inkuiri aktif di mana siswa dapat mengikuti rasa ingin tahu mereka, mendapatkan jawaban instan yang mendalam, dan membangun pemahaman yang lebih kaya.

b. AR dan AI dalam Pengenalan Objek (Object Recognition)

Ini adalah lompatan besar dari AR berbasis penanda (marker) atau berbasis permukaan (plane). Di sini, AI (Computer Vision) tidak lagi memerlukan gambar pemicu yang jelas atau lantai yang datar. AI dilatih untuk mengenali objek-objek dunia nyata itu sendiri.

1) Cara Kerja

Model *machine Learning* dilatih menggunakan ribuan gambar berbagai komponen PC (CPU, GPU, RAM) hingga ia dapat mengidentifikasi "RAM" dari berbagai sudut, pencahayaan, atau merek.

2) Konteks Perangkat Keras Komputer (Contoh Skenario):

a) Situasi

Seorang siswa memiliki tumpukan komponen PC fisik (nyata) di meja mereka untuk praktikum perakitan.

b) Intervensi AR+AI:

- Siswa mengarahkan kamera tablet AR ke tumpukan komponen tersebut.
- Aplikasi tidak memerlukan penanda apa pun. AI secara real-time menganalisis aliran video.
- Overlay AR digital muncul di layar, melabeli setiap komponen fisik: "Ini CPU Intel Anda," "Ini stik RAM DDR4," "Ini *motherboard* Anda."
- Aplikasi kemudian beralih ke mode pemandu: "Baik, mari kita mulai. Ambil CPU." (AI memverifikasi siswa mengambil komponen yang benar).
- "Sekarang, temukan soket CPU di *motherboard* Anda." (Aplikasi menyorot soket fisik di layar).
- Siswa secara fisik memasang CPU. Kamera AI mengamati. "Berhenti! Orientasi Anda salah 90 derajat. Cocokkan tanda panah emas di CPU dengan tanda di soket."

3) Manfaat

Ini adalah pembelajaran kontekstual (*situated Learning*) yang paling puncak. AR+AI bertindak sebagai instruktur ahli pribadi yang membimbing tangan siswa dalam tugas fisik di dunia nyata, memberikan umpan balik korektif instan.

Kombinasi AI sebagai "otak" (baik untuk percakapan maupun pengenalan visual) yang menggerakkan antarmuka AR adalah inti dari sistem pembelajaran cerdas di masa depan. Seperti yang diuraikan oleh (Yufei et al. 2020), peran AI dalam pendidikan adalah untuk menganalisis data (termasuk input visual) dan menyediakan sistem yang adaptif. Ketika diterapkan pada AR, ini menciptakan alat yang tidak hanya menunjukkan *apa*, tetapi *memahami* apa yang dilihatnya dan *beradaptasi* dengan apa yang dilakukan siswa.

3. Manfaat

Kombinasi *Augmented Reality* (AR) sebagai antarmuka (mata) dan *Artificial Intelligence* (AI) sebagai kecerdasan (otak) menghasilkan manfaat sinergis yang jauh melampaui apa yang dapat ditawarkan oleh masing-masing teknologi secara terpisah. Manfaat utamanya adalah transformasi dari pembelajaran statis menjadi pengalaman yang benar-benar efektif, adaptif, dan "cerdas" secara imersif.

a. Meningkatkan Efektivitas (Melalui Umpan Balik Instan)

Efektivitas pembelajaran dalam AR standar bergantung pada siswa untuk menjelajahi model dan menarik kesimpulan mereka sendiri. Efektivitas dalam AR+AI bersifat proaktif.

Siklus Umpan Balik Korektif: Manfaat terbesar datang dari kemampuan AI untuk menyediakan umpan balik korektif instan. Dalam skenario perakitan PC fisik yang dipandu oleh AR+AI (object recognition), sistem dapat mendeteksi kesalahan procedural seperti siswa yang mencoba memasang stik RAM dengan orientasi yang salah pada saat kesalahan itu terjadi. Sistem dapat langsung menginterupsi dengan peringatan

("Berhenti! Takik pada RAM Anda tidak sejajar dengan tonjolan di slot"). Siklus belajar (aksi-kesalahan-koreksi) yang dipercepat secara instan ini secara drastis mengurangi waktu untuk mencapai penguasaan dan mencegah terbentuknya miskonsepsi.

b. Adaptivitas (Pembelajaran Personal Skala Besar)

Ini adalah perubahan paradigma dari "satu ukuran untuk semua". Sistem AR tradisional menyajikan konten yang sama persis kepada setiap siswa. Sistem AR+AI menyajikan pengalaman yang unik untuk setiap siswa.

1) Tutor Pribadi 1:1

Seperti dibahas, sistem AI menganalisis data kinerja siswa secara real-time. Ini memungkinkan adaptivitas instan.

- a) Jika AI mendeteksi siswa A menguasai perakitan dasar dengan cepat, AI dapat secara proaktif "membuka" modul lanjutan: "Kerja bagus. Sekarang mari kita coba skenario pemecahan masalah: PC ini tidak mau booting. Gunakan alat diagnostik AR untuk mencari tahu mengapa."
- b) Jika AI mendeteksi siswa B ragu-ragu selama 45 detik sebelum memilih CPU, AI dapat secara adaptif menawarkan bantuan (scaffolding): "Perlu petunjuk? Ingat, CPU adalah 'otak' komputer. Cari komponen persegi di tengah *motherboard*."

2) Respon Inkuiri

Chatbot AI memungkinkan siswa untuk mengikuti rasa ingin tahu mereka sendiri, mengubah pembelajaran dari jalur linier yang kaku menjadi eksplorasi yang dipersonalisasi.

c. Pengalaman Belajar Imersif yang "Cerdas"

AR sudah bersifat imersif (menempatkan objek di dunia nyata). AI menambahkan lapisan kecerdasan pada imersi tersebut, membuatnya lebih relevan dan reaktif.

1) Dari Imersi Pasif ke Reaktif

a) Imersi AR Standar

"Wow, ada model 3D *motherboard* virtual di meja saya." (Pengalaman pasif, model tidak tahu apa-apa tentang lingkungannya selain lantai).

b) Imersi AR+AI "Cerdas"

"Saya memegang *motherboard* fisik saya, dan aplikasi AR saya mengenalinya secara instan, melabeli chipset spesifiknya, dan memberi tahu saya bahwa driver BIOS saya sudah kedaluwarsa."

2) Kesadaran Kontekstual

Pengalaman imersif menjadi jauh lebih kuat ketika aplikasi memahami apa yang sedang dilakukan siswa dan apa yang ada di dunia nyata. AI menyediakan kesadaran kontekstual ini, membuat jembatan antara digital dan fisik terasa mulus dan cerdas, bukan hanya tipuan visual.

Berbagai tinjauan literatur tentang peran AI di bidang pendidikan, seperti oleh (Yufei et al. 2020), menyimpulkan bahwa teknologi AI unggul dalam menyediakan sistem pembelajaran yang adaptif dan personal. Ketika kemampuan adaptif ini digabungkan dengan antarmuka visual AR yang kaya, hasilnya adalah alat pembelajaran yang dapat meningkatkan efektivitas dan motivasi jauh melampaui metode *e-Learning* tradisional.

B. AR dalam Pembelajaran *Metaverse*

Ketika kita membahas masa depan pendidikan, istilah *Metaverse* sering muncul, seringkali disalahartikan sebagai dunia *Virtual Reality* (VR) yang sepenuhnya terisolasi. Namun, visi *Metaverse* yang sesungguhnya jauh lebih luas: ia adalah sebuah internet spasial yang persisten; sebuah konvergensi antara realitas fisik dan dunia digital yang berjalan secara simultan. Dalam visi ini, *Metaverse* adalah ruang belajar baru yang fundamental berbasis realitas campuran (mixed reality) sebuah spektrum yang mencakup VR di satu ujung dan *Augmented Reality* (AR) di ujung lainnya.

Jika VR berfungsi dengan "memindahkan" siswa sepenuhnya ke dalam lingkungan virtual (misalnya, berjalan-jalan di Roma Kuno), maka AR berfungsi sebagai jembatan kritis yang "membawa" elemen-elemen *Metaverse* ke dalam dunia fisik siswa. AR adalah teknologi yang memungkinkan ruang kelas fisik kita berinteraksi secara mulus dengan lapisan data, objek, dan bahkan avatar dari ruang digital yang dibagikan. Ini adalah portal yang memungkinkan data virtual "hidup" bersama kita di lingkungan nyata.

Dalam konteks pendidikan, ini membuka kemungkinan adanya ruang kelas hibrida yang persisten, di mana batas antara pembelajaran fisik dan daring menjadi kabur. *Metaverse* bukanlah pengganti sekolah, melainkan perluasan dari ruang belajar, dan AR adalah teknologi kunci yang membuatnya dapat diakses, kontekstual, dan terintegrasi dengan realitas kita. Sub-bab ini akan mengeksplorasi bagaimana AR berfungsi sebagai pintu gerbang utama untuk pengalaman belajar kolaboratif di dalam *Metaverse*.

1. Peran AR

a. Menghubungkan Dunia Nyata dengan Virtual (Kelas Hibrida)

Peran fundamental AR dalam *Metaverse* adalah bertindak sebagai jembatan atau portal yang memungkinkan dunia digital yang persisten dan dunia fisik kita untuk saling tumpang tindih dan berinteraksi. Tidak seperti *Virtual Reality* (VR) yang menuntut pengguna meninggalkan realitas fisik untuk masuk sepenuhnya ke dunia digital, AR memungkinkan pengguna untuk tetap berpijak di dunia nyata (misalnya, di ruang kelas) sambil "menarik" data, objek, dan bahkan orang dari *Metaverse* ke dalam ruang fisik mereka.

Ini membuka kemungkinan terciptanya ruang kelas hibrida sejati. Bayangkan sebuah skenario pembelajaran perangkat keras komputer:

- 1) Lima belas siswa hadir secara fisik di kelas, sementara sepuluh siswa lainnya bergabung dari rumah (pembelajaran daring).

- 2) Guru (yang bisa jadi hadir secara fisik atau sebagai avatar) mengumumkan, "Mari kita tinjau desain prototipe *motherboard* baru."
- 3) Di ruang kelas fisik, siswa menggunakan tablet AR mereka untuk melihat model 3D *motherboard* berskala 1:1 muncul di tengah ruangan.
- 4) Secara bersamaan, siswa di rumah (baik melalui AR di meja mereka atau melalui headset VR) melihat model 3D yang sama persis di ruang mereka.
- 5) Yang terpenting, avatar dari sepuluh siswa yang belajar daring kini muncul di ruang kelas fisik (terlihat melalui tablet AR), berdiri mengelilingi model 3D yang sama bersama teman sekelas mereka yang hadir secara fisik.

Dalam skenario ini, AR telah menghancurkan dinding ruang kelas fisik. Ia menciptakan satu "ruang" bersama di mana peserta fisik dan digital dapat berkumpul dan berinteraksi dengan data yang sama pada saat yang sama.

b. Kolaborasi dalam Lingkungan 3D Interaktif

Setelah AR membangun jembatan dan menciptakan ruang bersama, peran selanjutnya adalah memfasilitasi kolaborasi tingkat tinggi di dalam ruang tersebut. *Metaverse* bukanlah pengalaman solo; ia pada dasarnya bersifat sosial dan kolaboratif. AR memungkinkan kolaborasi yang berpusat pada objek 3D dengan cara yang tidak mungkin dilakukan oleh panggilan video 2D (seperti Zoom atau Google Meet). Menggunakan contoh perangkat keras komputer yang sama.

- 1) Seluruh kelas (fisik dan avatar) kini berkumpul di sekitar model *motherboard* virtual yang sama. Ruang AR ini disinkronkan; jika satu siswa membuat perubahan, semua orang melihatnya secara real-time.
- 2) Seorang siswa di kelas fisik menggunakan tabletnya untuk "mengambil" model GPU virtual dan mencoba memasangnya di slot yang salah.
- 3) Seorang siswa dari rumah (sebagai avatar) melihat kesalahan ini. Dia mengulurkan tangan virtualnya (atau menggunakan

penunjuk) dan menyorot slot PCIe yang benar pada model bersama tersebut, sambil berkata, "Bukan di sana, kamu harus memasangnya di slot PCIe x16 yang ini." Sorotan yang dibuat oleh avatar tersebut terlihat oleh semua orang.

- 4) Guru (sebagai fasilitator) kemudian dapat memberikan tugas: "Desain GPU ini terlalu panjang dan menghalangi port SATA. Sebagai kelompok, diskusikan dan desain ulang penempatan port SATA di *motherboard* virtual ini."

Ini adalah inti dari apa yang disebut *Augmented Reality* Kolaboratif. Seperti yang dijelaskan oleh (Billinghurst and Kato 2003) dalam penelitian fundamentalnya, AR memungkinkan kolaborasi tatap muka yang alami di mana peserta dapat melihat isyarat non-verbal satu sama lain (dalam dunia nyata) sambil secara bersamaan berbagi dan memanipulasi data virtual (objek 3D). Ini mengubah pembelajaran dari konsumsi pasif menjadi pemecahan masalah desain 3D yang aktif dan partisipatif.

2. Implementasi

a. Kelas Virtual 3D dan Simulasi Bersama

Di sinilah peran AR sebagai portal *Metaverse* menjadi nyata. AR memungkinkan kita melampaui model 3D tunggal dan memproyeksikan seluruh lingkungan belajar interaktif ke dalam ruang fisik kita, yang dapat dibagikan secara real-time dengan peserta lain.

1) Kelas Virtual 3D dan Eksperimen Laboratorium Bersama

Ini adalah evolusi dari pembelajaran kolaboratif. Dalam *Metaverse* berbasis AR, siswa di lokasi fisik yang berbeda dapat berkumpul di laboratorium virtual yang sama. Misalnya, dalam praktikum fisika (alih-alih hanya perakitan PC), sekelompok siswa dapat melihat meja kerja virtual yang sama di meja mereka. Menggunakan perangkat AR mereka, Siswa A "menempatkan" baterai virtual, Siswa B "menghubungkan" kabel virtual, dan Siswa C "memasang" sakelar. Mereka semua akan melihat sirkuit yang sama itu menyala secara real-time sebuah praktikum laboratorium

bersama yang sepenuhnya digital namun bersifat spasial dan kinestetik.

2) Simulasi Sejarah

Daripada hanya membaca tentang sejarah, AR dalam *Metaverse* memungkinkan siswa untuk "berjalan di dalamnya". Fasilitator dapat meluncurkan simulasi di mana ruang kelas fisik dipetakan ulang sebagai, misalnya, pasar Romawi Kuno. Siswa dapat berjalan di antara pedagang virtual (avatar AI) dan berinteraksi dengan artefak 3D, semuanya sambil tetap sadar akan meja dan kursi fisik di sekitar mereka, menciptakan pengalaman belajar kontekstual (*situated Learning*) yang imersif.

b. Potensi Integrasi Teknologi Pendukung

Metaverse berfungsi karena didukung oleh tumpukan teknologi (tech stack) yang kompleks, di mana AR hanyalah lapisan antarmuka. Keajaiban sesungguhnya terjadi ketika AR berintegrasi dengan teknologi masa depan lainnya:

1) Integrasi Mulus dengan VR (Spektrum Realitas Campuran)

Di ruang kelas *Metaverse* sejati, platform harus agnostik terhadap perangkat. Ini berarti seorang siswa yang menggunakan tablet AR (melihat model 3D di meja nyata mereka) dapat berkolaborasi secara mulus dengan siswa yang menggunakan headset VR (yang melihat ruangan kelas virtual penuh dan model yang sama). Mereka berdua berada di sesi bersama yang sama, hanya melihatnya melalui lensa yang berbeda.

2) Avatar Digital (Representasi dan Kehadiran Sosial)

Avatar adalah perwujudan digital kita di dalam *Metaverse*. Dalam skenario kelas hibrida yang kita bahas sebelumnya, avatar digital inilah yang memungkinkan siswa jarak jauh untuk hadir di ruang kelas fisik. Avatar ini lebih dari sekadar gambar profil; avatar ini menunjukkan kehadiran, arah pandang (ke mana mereka melihat), dan

gestur, memberikan rasa "kehadiran sosial" (social presence) yang sangat penting, yang hampir mustahil dicapai melalui kotak-kotak video 2D di Zoom.

3) Integrasi dengan Blockchain (Verifikasi dan Kepemilikan)

Ini adalah salah satu implikasi jangka panjang yang paling mendalam. Ketika siswa menyelesaikan tugas kompleks di *Metaverse* (seperti berhasil merakit dan mendiagnosis PC virtual, atau merancang sirkuit yang efisien), bagaimana mereka membuktikan kompetensi tersebut? Blockchain dapat berfungsi sebagai buku besar yang tidak dapat diubah. Institusi pendidikan dapat menerbitkan kredensial mikro (micro-credentials) atau lencana digital (digital badges) sebagai NFT (Non-Fungible Token) yang aman secara kriptografis. Siswa "memiliki" catatan pembelajaran terverifikasi ini selamanya, menciptakan portofolio keterampilan yang dapat dibuktikan yang jauh lebih kaya daripada transkrip nilai tradisional.

Berbagai tinjauan literatur baru tentang *Metaverse* dalam pendidikan, seperti oleh (Kye et al. 2021), telah mengidentifikasi potensi besar dalam penggunaan ruang virtual bersama, simulasi realistis, dan penggunaan avatar untuk menciptakan pengalaman belajar yang imersif dan partisipatif melampaui batasan kelas fisik.

3. Tantangan

Visi *Metaverse* pendidikan yang didukung AI+AR di mana siswa dari lokasi berbeda berkolaborasi secara mulus dalam simulasi 3D interaktif sangatlah menarik, namun untuk mencapainya secara massal, kita harus menghadapi tiga tantangan fundamental yang sangat besar: infrastruktur, biaya, dan regulasi.

a. Tantangan Infrastruktur Teknologi

Metaverse adalah pengalaman yang "selalu aktif" (always-on), persisten, dan berbasis data. Ini menuntut tingkat infrastruktur teknologi yang saat ini tidak dimiliki oleh sebagian besar institusi pendidikan.

1) Kebutuhan Jaringan (Bandwidth dan Latensi)

Ini adalah penghalang terbesar. Untuk menyinkronkan ruang 3D bersama secara real-time bagi 30 siswa lengkap dengan pergerakan avatar, manipulasi objek 3D yang kompleks, dan aliran data audio/video membutuhkan koneksi internet dengan bandwidth sangat tinggi dan latensi sangat rendah (ultra-low latency). Jaringan Wi-Fi sekolah tradisional yang dirancang untuk browsing web akan langsung runtuh. Visi *Metaverse* ini secara fundamental bergantung pada ketersediaan luas jaringan 5G (untuk akses seluler) dan Wi-Fi 6E/7 (untuk lingkungan padat seperti ruang kelas).

2) Kekuatan Perangkat Keras

Seperti dibahas di Bab 8, AR/MR sangat membebani perangkat keras. Headset AR/MR yang ringan, bertenaga, dengan daya tahan baterai sepanjang hari belumlah menjadi komoditas umum atau murah.

3) Interoperabilitas

Saat ini, "*Metaverse*" adalah sekumpulan "taman bertembok" yang terpisah. Apa yang dibuat di ekosistem Meta (Horizon) tidak dapat dipindahkan ke ekosistem Microsoft (Mesh) atau Google. Untuk *Metaverse* pendidikan yang sejati, kita memerlukan standar terbuka (seperti OpenXR) agar aset dan avatar dapat dioperasikan di berbagai platform, sama seperti situs web yang dapat dibuka di peramban apa pun.

b. Tantangan Biaya

Implementasi skala penuh dari visi ini membutuhkan investasi finansial yang sangat besar, yang sering kali berada di luar jangkauan anggaran sekolah negeri.

1) Biaya Perangkat Keras

Biaya headset AR/MR canggih (seperti HoloLens atau Meta Quest Pro) jauh melampaui biaya Chromebook atau tablet. Mengadakan satu set perangkat kelas (30 unit) adalah pengeluaran modal yang masif.

2) Biaya Pengembangan Konten

Ini adalah biaya tersembunyi terbesar. Seperti yang telah kita bahas di Bab 5, membuat satu *aset 3D* (seperti *motherboard*) sudah rumit. Membangun seluruh simulasi laboratorium virtual 3D interaktif, kolaboratif, dan didukung AI adalah tugas pengembangan perangkat lunak skala besar yang membutuhkan tim spesialis (seniman 3D, pengembang AI, desainer UX) dan biaya ratusan juta, bahkan miliaran rupiah

c. Tantangan Regulasi Pendidikan dan Etika

Regulasi dan kebijakan pendidikan selalu bergerak jauh lebih lambat daripada teknologi. *Metaverse* memperbesar setiap masalah etika yang telah kita bahas di Bab 8.

1) Privasi Data Ekstrem

Jika AR seluler yang "hanya" menggunakan kamera sudah menjadi masalah privasi, headset MR/*Metaverse* mengumpulkan data yang jauh lebih intim, termasuk data biometrik seperti pelacakan mata (eye-tracking), pemindaian retina, dan pelacakan gestur tangan penuh. Bagaimana sekolah mengelola, mengamankan, dan mendapatkan izin untuk "data pikiran" siswa ini?

2) Keamanan dan Moderasi Siswa

Siapa yang memoderasi ruang kelas virtual bersama? Bagaimana guru mencegah cyberbullying antar avatar? Bagaimana kita memastikan "tamu tak diundang" (peretas atau penyusup) tidak dapat memasuki simulasi laboratorium virtual siswa?

3) Regulasi dan Akreditasi

Bagaimana badan akreditasi akan menilai "kredensial mikro berbasis blockchain"? Bagaimana mereka memverifikasi bahwa 40 jam yang dihabiskan dalam simulasi lab kimia virtual setara dengan 40 jam di lab fisik?

Semua tantangan ini nyata dan signifikan. Tinjauan literatur tentang aplikasi *Metaverse* di dunia pendidikan, seperti oleh (Kye et al. 2021), meskipun optimis tentang kemungkinannya (seperti yang kita bahas sebelumnya), juga secara eksplisit menyimpulkan bahwa biaya tinggi, keterbatasan infrastruktur teknis, dan masalah etika/sosial adalah batasan (limitations) utama yang harus diatasi sebelum visi ini dapat diadopsi secara luas dan adil.

C. Potensi AR dalam Pembelajaran Adaptif

Salah satu keterbatasan terbesar dari model pendidikan tradisional adalah pendekatannya yang bersifat "satu ukuran untuk semua". Setiap siswa dipaksa mengikuti kecepatan dan konten yang sama, terlepas dari pengetahuan awal, gaya belajar, atau minat mereka. Pembelajaran Adaptif adalah model pedagogis yang bertujuan untuk memecahkan masalah ini dengan menggunakan teknologi untuk secara dinamis menyesuaikan alur pembelajaran agar sesuai dengan kebutuhan unik setiap individu.

Dalam ekosistem ini, *Augmented Reality* (AR) berfungsi sebagai media antarmuka yang ideal untuk menyampaikan pembelajaran adaptif, terutama untuk konsep yang kompleks dan spasial. Jika *e-Learning* 2D tradisional dapat menyesuaikan pertanyaan kuis atau bacaan teks, sistem AR adaptif dapat menyesuaikan keseluruhan pengalaman 3D interaktif. Bayangkan sebuah aplikasi perakitan PC virtual: sistem dapat mendeteksi bahwa seorang siswa kesulitan, lalu secara otomatis menyederhanakan model, menambahkan lebih banyak label pemandu, dan memperlambat animasi. Sebaliknya, untuk siswa yang unggul, sistem dapat menghilangkan semua pemandu dan langsung memberikan skenario pemecahan masalah yang lebih menantang.

Tentu saja, AR tidak dapat melakukan ini sendirian. Kemampuan adaptif ini hanya mungkin terjadi melalui integrasi mendalam dengan *Artificial Intelligence* (AI), seperti yang telah kita bahas. AI bertindak sebagai "mesin" adaptasi yang menganalisis kinerja siswa secara real-time, sementara AR bertindak sebagai "penyampai" yang fleksibel yang menyajikan konten yang telah disesuaikan. Sub-bab ini akan mengeksplorasi bagaimana sinergi AR dan AI ini menciptakan jalur pembelajaran yang benar-benar dipersonalisasi.

1. Fitur Adaptif

a. Penyesuaian Tingkat Kesulitan Materi (Dynamic Difficulty Adjustment)

Fitur adaptif yang paling kuat adalah kemampuan sistem untuk menyesuaikan tingkat kesulitan secara dinamis, memastikan siswa selalu bekerja dalam "Zona Pengembangan Proksimal" (ZPD) mereka titik ideal di mana tugas tidak terlalu mudah (sehingga membosankan) dan tidak terlalu sulit (sehingga membuat frustrasi). Sistem AR+AI secara konstan memantau kinerja siswa dalam tugas.

1) Skenario Siswa A (Membutuhkan Bantuan)

Siswa A mencoba simulasi perakitan PC virtual. AI mencatat bahwa mereka gagal memasang CPU ke soket sebanyak 3 kali dan salah memilih slot RAM.

2) Respons Adaptif (Penurunan Kesulitan)

Sistem tidak membiarkan siswa gagal terus menerus. Pada percobaan ke-4, aplikasi secara otomatis menambahkan scaffolding. Tiba-tiba, panah holografik yang jelas muncul, menunjukkan orientasi pin CPU yang benar, dan narasi audio tambahan diputar ("Perhatikan tanda segitiga emas di sudut CPU dan soket"). Kesulitan diturunkan untuk memastikan penguasaan.

3) Skenario Siswa B (Unggul)

Siswa B menyelesaikan perakitan virtual dalam 2 menit tanpa kesalahan.

4) Respons Adaptif (Peningkatan Kesulitan)

AI menandai siswa ini sebagai "ahli". Alih-alih mengulang pelajaran yang sama, aplikasi langsung membuka "Modul Tantangan": sebuah skenario pemecahan masalah baru muncul, "PC virtual ini tidak mau menyala. Gunakan alat diagnostik AR Anda untuk mencari tahu mengapa." (Mungkin AI menyimulasikan stik RAM yang longgar).

b. Rekomendasi Belajar Berbasis Interaksi

Fitur adaptif ini lebih halus. Sistem tidak hanya melacak "benar" atau "salah", tetapi juga perilaku, minat, dan keraguan siswa untuk memberikan rekomendasi yang dipersonalisasi. Ini mengubah AR dari alat instruksi linear menjadi sistem rekomendasi cerdas.

1) Cara Kerja (Analisis Perilaku)

AI menganalisis data interaksi: Berapa lama siswa menghabiskan waktu melihat *motherboard*? Apakah mereka memperbesar chipset Northbridge selama 45 detik (menunjukkan minat atau kebingungan)? Apakah mereka melewati modul PSU (Power Supply Unit) sepenuhnya?

2) Respons Adaptif (Rekomendasi):

a) Rekomendasi Pengayaan

Berdasarkan data perilaku, *chatbot* AI dapat berkata di akhir sesi: "Saya perhatikan Anda menghabiskan banyak waktu mempelajari slot PCIe. Sebagai materi lanjutan, saya merekomendasikan video ini tentang perbedaan antara PCIe 4.0 dan 5.0." Ini memanfaatkan minat yang ditunjukkan siswa.

b) Rekomendasi Perbaikan (Remediasi)

AI mendeteksi bahwa siswa melewati modul PSU. Sebelum mengizinkan siswa mencoba "simulasi perakitan penuh", AI akan merekomendasikan: "Tunggu dulu. Anda belum meninjau modul PSU. Sangat disarankan Anda menyelesaikan modul itu terlebih dahulu agar Anda memahami cara menyalakan komponen Anda."

Dalam kedua kasus tersebut, AI mengubah pengalaman AR menjadi unik bagi setiap siswa. Seperti yang ditekankan dalam ulasan tentang AI di dunia pendidikan (misalnya, Hwang et al., 2020), kemampuan AI untuk menganalisis data perilaku belajar dan menyediakan sistem pembelajaran adaptif dan sistem rekomendasi adalah salah satu kontribusi terbesarnya untuk menciptakan lingkungan belajar yang lebih efisien dan personal.

2. Kelebihan

Kombinasi AR yang imersif dengan "otak" AI yang adaptif menciptakan keunggulan pedagogis yang signifikan, terutama dalam mendukung keragaman pembelajar di dalam kelas.

a. Mendukung Berbagai Gaya Belajar (Desain Multi-Modal Adaptif)

Secara tradisional, aplikasi AR multi-modal akan menyajikan semua opsi sekaligus (visual 3D, narasi audio, dan teks deskripsi), membiarkan siswa memilih. Namun, sistem adaptif yang didukung AI membawanya selangkah lebih maju: ia belajar dan menyesuaikan modalitas pengiriman konten agar sesuai dengan preferensi siswa yang terbukti. Cara Kerja Sistem AI melacak bagaimana siswa berinteraksi.

- 1) Jika AI mendeteksi Siswa A (pembelajar visual/kinestetik) selalu melewati narasi audio dan langsung membongkar pasang model perangkat keras komputer, sistem akan belajar. Untuk pelajaran berikutnya, AI akan memprioritaskan penyajian simulasi interaktif terlebih dahulu dan mengurangi instruksi berbasis teks/audio.

- 2) Jika AI mendeteksi Siswa B (pembelajar auditori/membaca) selalu menjeda model, mendengarkan seluruh narasi, dan membaca setiap panel info sebelum berinteraksi, sistem akan beradaptasi. Untuk pelajaran berikutnya, AI akan menyajikan penjelasan audio dan poin-poin teks terlebih dahulu untuk membangun fondasi konseptual sebelum memperkenalkan interaksi kinestetik yang kompleks.

Ini adalah implementasi sejati dari Universal Design for Learning (UDL), di mana sistem tidak hanya menyediakan opsi, tetapi secara cerdas membimbing siswa ke jalur yang paling sesuai bagi mereka.

b. Membantu Siswa dengan Kebutuhan Khusus (Special Needs Education)

Di sinilah potensi pembelajaran adaptif berbasis AR menjadi yang paling transformatif. Siswa dengan kebutuhan belajar khusus sering kali kesulitan dengan model kelas "satu ukuran untuk semua". Sistem AR+AI dapat berfungsi sebagai asisten pengajar pribadi yang sabar dan dapat disesuaikan 1:1.

1) Untuk Siswa dengan ADHD (*Attention Deficit Hyperactivity Disorder*)

Pelajaran buku teks yang panjang dan pasif adalah tantangan besar. Aplikasi perakitan PC berbasis AR bersifat gamified, interaktif, dan memberikan umpan balik instan, yang semuanya terbukti sangat efektif untuk mempertahankan fokus. AI dapat beradaptasi dengan memecah tugas besar ("Rakit PC") menjadi "misi-misi" kecil yang dapat dikelola ("Level 1: Pasang CPU!").

2) Untuk Siswa dengan Kesulitan Belajar (misalnya, Disleksia)

Mempelajari manual teknis perangkat keras komputer bisa jadi mustahil. Dalam sistem AR adaptif, AI dapat mendeteksi bahwa siswa kesulitan dengan instruksi berbasis teks. Sistem dapat secara proaktif beradaptasi dengan sepenuhnya beralih ke jalur audio-visual, membacakan

semua instruksi dengan keras dan mengandalkan visual 3D untuk penyampaian informasi, sehingga menghilangkan hambatan membaca untuk mempelajari konsep teknis.

3) Untuk Siswa dengan Gangguan Spektrum Autisme (ASD)

Interaksi sosial di kelas fisik bisa jadi sangat melelahkan dan penuh kecemasan. Aplikasi AR menyediakan lingkungan belajar yang sangat terstruktur, dapat diprediksi, dan dapat dikontrol secara individual. *Chatbot* AI adalah pendamping sosial yang logis dan non-judgmental. Bagi siswa dengan minat khusus yang mendalam (seperti sistem komputer), aplikasi AR yang mendetail ini dapat menjadi alat pembelajaran yang sangat memotivasi.

Banyak dari keunggulan inti AR yang diidentifikasi oleh para peneliti seperti "peningkatan motivasi," "sikap positif terhadap pembelajaran," dan "peningkatan kolaborasi" adalah faktor-faktor yang secara khusus sangat bermanfaat bagi siswa dengan kebutuhan khusus, yang sering kali paling kesulitan dengan metode pengajaran tradisional (Akçayır and Akçayır 2016).

3. Contoh Implementasi

Bayangkan sebuah aplikasi AR tunggal bernama "Ayo Rakit" yang dirancang untuk mengajarkan perakitan perangkat keras komputer kepada audiens yang beragam, mulai dari siswa SMP (pengenalan dasar) hingga siswa SMK Teknik Komputer Jaringan (pelatihan vokasi). Aplikasi ini didukung oleh mesin AI di backend untuk menyesuaikan pengalaman secara real-time.

a. Adaptasi Berbasis Usia dan Kemampuan Awal

Saat siswa pertama kali masuk (mungkin menggunakan akun LMS sekolah mereka), AI langsung mengidentifikasi level mereka (misalnya, "Kelas 7" vs. "Kelas 11 - Jurusan TKJ"). Aplikasi kemudian menyajikan materi yang sama sekali berbeda.

1) Skenario A (Siswa SMP - Pemula):

a) Visual

Model 3D PC yang ditampilkan bersifat stylized (kartunis) dan disederhanakan. Hanya 5 komponen utama yang terlihat (CPU, RAM, GPU, *Motherboard*, PSU).

b) Konten

Bahasa yang digunakan sangat sederhana. Saat mengetuk CPU, narasi berkata: "Ini CPU, Otak dari komputer! Semua perintah dimulai dari sini."

c) Tujuan

Hanya identifikasi dasar dan gamifikasi (mengumpulkan 5 komponen).

2) Skenario B (Siswa SMK - Ahli):

a) Visual

Aplikasi memuat model 3D yang fotorealistis dan akurat secara teknis. Semua 40+ komponen terlihat, termasuk chipset, kapasitor, dan header pin yang rumit.

b) Konten

Bahasa teknis digunakan. "Ini adalah soket LGA 1700. Perhatikan bagaimana Land Grid Array akan melakukan kontak dengan pin pada soket."

c) Tujuan

Simulasi perakitan presisi dan diagnostik teknis.

b. Adaptasi Berbasis Progres Siswa (Kesulitan Dinamis)

Selama siswa menggunakan aplikasi, AI terus memantau kinerja. Skenario: Seorang siswa SMK (Skenario B) sedang dalam simulasi perakitan. AI memantau metrik (waktu, kesalahan).

- 1) Respons Adaptif (Jika Kesulitan) AI mendeteksi siswa mencoba memasang stik RAM DDR4 virtual ke slot DDR5

sebanyak tiga kali. Aplikasi mengenali ini sebagai miskonsepsi kritis.

Adaptasi: Aplikasi menjeda simulasi. Sebuah modul mikro-pembelajaran AR dipicu: "STOP. Saya melihat Anda kesulitan dengan RAM. Mari kita lihat perbedaan keying (takik) antara DDR4 dan DDR5." Aplikasi kemudian menampilkan kedua model RAM secara berdampingan, menyoroti perbedaan fisik yang mencegah kompatibilitas.

- 2) Respons Adaptif (Jika Unggul) AI mendeteksi siswa menyelesaikan perakitan dasar dalam 90 detik tanpa kesalahan. AI tidak akan membuang waktu mengulang materi.

Adaptasi: Sebuah "Tantangan Bonus" terbuka: "Perakitan Anda sempurna. TANTANGAN: PC ini sekarang gagal boot. Dengarkan kode beep ini... Gunakan alat diagnostik AR untuk menemukan komponen yang gagal."

c. Adaptasi Berbasis Gaya Belajar (Modalitas Pilihan)

Sistem AI tidak hanya memantau skor, tetapi juga perilaku interaksi.

1) Skenario

AI mengamati Siswa A selama 15 menit. Siswa A selalu melewati narasi audio dan tidak pernah membaca panel teks, tetapi mereka menghabiskan 90% waktunya menggunakan fitur rotasi, zoom, dan exploded view (pembelajar kinestetik/visual yang kuat).

2) Adaptasi AI

Untuk sisa sesi, AI berhenti menawarkan panel teks atau audio yang panjang. Sebaliknya, AI beradaptasi dengan memprioritaskan jalur kinestetik. AI akan mengubah petunjuknya menjadi: "Coba Anda bongkar modul PSU ini sendiri dan lihat bagaimana komponen di dalamnya

terhubung," alih-alih "Bacalah paragraf ini tentang cara kerja PSU."

Contoh "Ayo Rakit" ini menunjukkan bagaimana AR dan AI bergerak melampaui media statis. Ini adalah realisasi dari apa yang dianalisis oleh berbagai penelitian tentang AI di bidang pendidikan. Tinjauan seperti oleh (Yufei et al. 2020) mengidentifikasi bahwa peran utama AI adalah untuk memungkinkan pembelajaran adaptif, sistem rekomendasi cerdas, dan analisis pola belajar siswa. Ketika antarmuka AR yang imersif digunakan sebagai kendaraan pengiriman untuk sistem AI yang cerdas ini, hasilnya adalah pengalaman belajar yang dipersonalisasi secara mendalam.

D. Prediksi Perkembangan AR 5–10 Tahun ke Depan

Memprediksi masa depan teknologi secara akurat adalah tugas yang sulit, namun dalam kasus *Augmented Reality*, arah lintasannya sudah sangat jelas. Selama ini, kita telah membahas AR sebagian besar dalam konteksnya saat ini: sebagai pengalaman berbasis layar seluler (handheld) yang kuat namun terkadang kaku, di mana kita harus memegang ponsel atau tablet untuk melihat dunia digital. Namun, perkembangan dalam 5 hingga 10 tahun ke depan menjanjikan lompatan besar dari AR sebagai "aplikasi yang kita gunakan" menjadi AR sebagai "lapisan yang selalu aktif" (always-on layer) yang kita alami.

Tiga kekuatan utama akan mendorong evolusi ini. Pertama adalah perangkat keras: pergeseran monumental dari handheld (ponsel) ke head-worn (dapat dipakai di kepala), dengan munculnya kacamata AR/MR (Mixed Reality) yang ringan, terjangkau secara sosial, dan memiliki daya tahan baterai sepanjang hari. Kedua adalah konektivitas: adopsi universal 5G dan 6G yang akan memungkinkan cloud *rendering*, di mana pemrosesan grafis yang berat terjadi di server, dan hasilnya di-streaming ke kacamata ringan kita dengan latensi nol. Ketiga, tentu saja, adalah kecerdasan: integrasi total AI.

Bagi dunia pendidikan, konvergensi ketiga tren ini berarti bahwa konsep *Metaverse* dan pembelajaran adaptif berbasis AI yang kita

diskusikan sebelumnya akan beralih dari eksperimen teoretis menjadi kenyataan praktis di dalam kelas. Sub-bab ini akan mengeksplorasi bagaimana kemajuan spesifik dalam perangkat keras dan infrastruktur ini kemungkinan akan membentuk kembali media pembelajaran AR dalam dekade mendatang.

1. Tren Teknologi

a. Peningkatan Perangkat AR (Dari Genggaman ke Wajah)

Evolusi terbesar dalam 5-10 tahun ke depan adalah pada perangkat keras (*hardware*), yang akan bergerak dari "interupsi" (kita harus mengeluarkan ponsel) menjadi "integrasi" (selalu ada bersama kita).

1) Kacamata Pintar (*Smart Glasses*) yang Ringan

Ini adalah tujuan akhir dari AR. Saat ini, headset AR/MR (seperti Apple Vision Pro atau Meta Quest 3) masih terlalu besar, berat, mahal, dan canggung secara sosial untuk penggunaan sehari-hari di kelas. Tren 5-10 tahun ke depan akan berfokus pada miniaturisasi mengemas sensor, baterai, dan proyektor ke dalam bingkai kacamata yang terlihat normal. Begitu ini tercapai, AR menjadi "selalu aktif". Seorang siswa yang belajar perangkat keras komputer tidak perlu lagi memindai penanda; mereka cukup melihat ke PC fisik, dan AI (melalui object recognition) akan secara otomatis menampilkan label dan diagnostik holografik di depan mata mereka.

2) Peningkatan Perangkat Mobile (Sensor Kedalaman)

Ponsel akan tetap menjadi pintu masuk utama ke AR. Tren utamanya adalah demokratisasi sensor canggih seperti LiDAR (yang saat ini eksklusif untuk model iPhone Pro). Sensor kedalaman ini memungkinkan pemindaian lingkungan 3D yang instan dan sangat akurat. Ini berarti: (1) Tidak perlu lagi "menggoyang-goyangkan ponsel untuk mencari permukaan," dan (2) Terjadinya oklusi (occlusion) yang sempurna, di mana objek virtual dapat secara realistis

menghilang di belakang objek nyata (misalnya, kabel virtual menghilang di belakang casing PC fisik), yang sangat meningkatkan realisme.

3) Tampilan "Hologram" Sejati (Mengatasi VAC)

Teknologi tampilan itu sendiri akan berevolusi untuk memecahkan masalah kesehatan inti: Konflik Akomodasi-Vergensi (VAC). Teknologi baru seperti tampilan medan cahaya (light-field displays) sedang dikembangkan. Alih-alih hanya menampilkan gambar 2D datar di layar, tampilan ini memproyeksikan cahaya pada beberapa bidang fokus, memungkinkan mata manusia untuk secara alami mengakomodasi (memfokuskan lensa) pada kedalaman virtual objek tersebut. Ini akan menghilangkan kelelahan mata dan membuat "hologram" terasa benar-benar solid dan nyata.

b. AR Berbasis Cloud (Cloud AR)

Ini adalah tren infrastruktur yang akan membuat perangkat keras ringan di atas menjadi mungkin. Saat ini, perangkat seluler kita melakukan semua pekerjaan berat: melacak, mengenali objek, dan me-render grafis 3D. Ini menghabiskan baterai dan membutuhkan chip yang mahal. Masa depan adalah Cloud AR (disebut juga *Cloud Rendering* atau *Remote Rendering*).

1) Cara Kerja: Alur kerjanya terbalik.

- a) Input: Kacamata AR ringan Anda hanya bertindak sebagai kamera dan sensor. Ia menangkap video dunia nyata.
- b) Transmisi: Video itu di-streaming secara instan melalui jaringan 5G atau 6G (dengan latensi sangat rendah) ke server cloud yang sangat kuat.
- c) Proses (di Cloud): Server superkomputer di cloud (yang menjalankan AI dan engine grafis canggih) melakukan semua pekerjaan berat: menganalisis video, menjalankan

AI object recognition, dan me-render adegan 3D fotorealistis yang kompleks.

- d) Output: Server kemudian meng-kompres gambar yang sudah jadi itu dan me-streaming-nya kembali ke kacamata Anda sebagai aliran video latensi rendah.

2) Manfaat

Ini berarti kacamata Anda bisa hampir "bodoh" sangat ringan, murah, dan hemat baterai namun mampu menampilkan grafis sekelas film Pixar dan simulasi AI yang masif, karena semua pekerjaan berat dilakukan di tempat lain. Ini adalah teknologi infrastruktur yang akan membuat *Metaverse* pendidikan berskala besar yang kita bahas (kelas virtual bersama, simulasi kompleks) menjadi mungkin secara teknis dan mudah diakses.

Visi *Metaverse* pendidikan yang dijelaskan oleh para peneliti, seperti oleh (Kye et al. 2021), yang mencakup ruang virtual bersama, simulasi imersif, dan avatar, sangat bergantung pada terwujudnya kemajuan infrastruktur dan perangkat keras ini. Tantangan perangkat keras dan infrastruktur jaringan yang mereka identifikasi sebagai "batasan" adalah masalah yang secara langsung ingin dipecahkan oleh tren Cloud AR dan kacamata pintar ini.

2. Prediksi di Pendidikan

Didorong oleh kemajuan perangkat keras (kacamata ringan), infrastruktur (Cloud AR), dan kecerdasan (AI), peran *Augmented Reality* dalam 5-10 tahun ke depan akan beralih dari "eksperimen inovatif" yang dilakukan oleh beberapa guru, menjadi alat pedagogis standar yang tertanam dalam kurikulum inti.

a. AR sebagai Standar Praktikum Sains, Sejarah, dan Teknik

AR akan menjadi alat laboratorium standar, sama fundamentalnya dengan mikroskop di kelas biologi atau kalkulator di kelas matematika, terutama untuk bidang-bidang yang sebelumnya dibatasi oleh biaya, keamanan, atau sifat abstrak materi.

1) Sains (Kimia/Biologi)

Siswa tidak akan hanya membaca tentang reaksi kimia; mereka akan mengenakan kacamata AR ringan mereka dan melakukan simulasi pencampuran bahan kimia berbahaya secara virtual di atas meja lab fisik mereka, mengamati reaksi eksotermik virtual tanpa risiko apa pun. Di biologi, alih-alih membedah katak, setiap siswa akan dapat melakukan pembedahan virtual holografik yang berlapis-lapis dan dapat diulang tanpa batas.

2) Teknik (Perangkat Keras Komputer)

Praktikum perakitan PC tidak akan lagi membutuhkan satu unit komputer fisik yang mahal untuk dibagikan oleh 30 siswa. Setiap siswa akan memiliki "meja kerja" AR mereka sendiri, dengan akses ke inventaris tak terbatas dari setiap CPU, GPU, dan *motherboard* virtual yang pernah dibuat. Mereka akan merakit, mendiagnosis, dan menguji konfigurasi secara instan, dipandu oleh tutor AI.

3) Sejarah dan Seni

Kelas sejarah tidak akan lagi hanya melihat gambar 2D piramida. Guru akan mengaktifkan "Mode Simulasi Sejarah," dan ruang kelas akan bertransformasi menjadi replika 1:1 dari Forum Romawi, memungkinkan siswa (fisik dan avatar) untuk berjalan-jalan di dalamnya sebagai bagian dari pelajaran standar.

b. Pembelajaran Berbasis AR yang Terintegrasi Penuh dengan LMS

Perubahan terbesar bukanlah teknologinya, tetapi integrasi datanya. Aplikasi AR tidak akan lagi menjadi aplikasi mandiri yang terisolasi. Mereka akan menjadi "modul konten" yang terintegrasi penuh ke dalam sistem manajemen inti sekolah (*Learning Management System* - LMS), menciptakan siklus data yang mulus.

- 1) Alur Kerja Masa Depan (Siswa)
 - a) Siswa masuk ke LMS (Google Classroom, Canvas, dll.) dan melihat tugas mereka: "Modul 4: Perakitan CPU."
 - b) Siswa mengklik tugas tersebut. LMS secara otomatis meluncurkan pengalaman WebAR (atau aplikasi streaming Cloud AR) tanpa perlu instalasi manual.
 - c) Siswa menyelesaikan simulasi perakitan PC virtual di AR.
- 2) Siklus Data (Guru)
 - a) Saat siswa bekerja, AI di dalam aplikasi AR menilai kinerja mereka secara real-time berdasarkan matriks kompetensi (misal: "Keberhasilan: 100%. Waktu: 3:45. Kesalahan Orientasi RAM: 2 kali.").
 - b) Setelah siswa menyelesaikan modul AR, data kinerja tersebut secara otomatis dikirim kembali dari aplikasi AR ke gradebook (buku nilai) LMS.
 - c) Guru membuka dasbor LMS mereka dan dapat langsung melihat dasbor kelas: 70% siswa telah "Menguasai" perakitan RAM, tetapi 30% masih kesulitan dengan orientasi CPU, memungkinkan intervensi yang ditargetkan.

Visi tentang *Metaverse* pendidikan ini, seperti yang diuraikan oleh para peneliti seperti (Kye et al. 2021), bukanlah tentang dunia fantasi yang terpisah, melainkan tentang penciptaan "ruang kelas yang diperluas" (*extended classroom*) di mana data dan pengalaman digital terintegrasi secara mulus dengan kurikulum fisik. Integrasi LMS yang mendalam inilah yang akan mengubah AR dari alat tambahan menjadi komponen infrastruktur inti pendidikan.

3. Potensi Dampak

Konvergensi dari tren-tren ini perangkat keras yang lebih ringan, AI yang lebih cerdas, dan infrastruktur Cloud AR yang ada di mana-mana menjanjikan dua dampak transformasional jangka panjang bagi peradaban: ia akan mengubah cara generasi

berikutnya berpikir, dan siapa yang memiliki akses ke pendidikan berkualitas tinggi.

a. Membentuk Generasi Pembelajar Digital-Natif yang Imersif

Dampak kognitif dari AR yang ada di mana-mana akan sangat mendalam. Generasi saat ini adalah "digital-native" mereka mahir bernavigasi dalam informasi 2D di layar datar. Generasi berikutnya, yang tumbuh dengan AR sebagai alat belajar standar, akan menjadi "spatial-natives" (pribumi spasial).

1) Pergeseran Kognitif

Otak mereka akan dilatih untuk memproses dan memecahkan masalah secara alami dalam tiga dimensi. "Literasi" tidak lagi hanya berarti membaca teks; itu akan mencakup literasi spasial kemampuan intuitif untuk memahami, memanipulasi, dan menganalisis sistem 3D yang kompleks, baik itu mesin, arsitektur molekuler, atau model data ekonomi.

2) Dari Menghafal ke Simulasi

Dampak pedagogis terbesarnya adalah pergeseran permanen dari pembelajaran berbasis penghafalan (rote memorization) ke pembelajaran berbasis simulasi dan pemecahan masalah. Siswa masa depan tidak akan belajar tentang perangkat keras komputer dengan menghafal diagram; mereka akan belajar dengan secara virtual merakit dan memecahkan masalah pada model 3D yang tak terhitung jumlahnya. Mereka akan mengharapkan untuk mengalami dan berinteraksi dengan pengetahuan, bukan hanya membacanya.

b. Memperluas Akses Pendidikan Global dengan AR Berbasis Mobile

Ini adalah dampak demokratisasi terbesar. Secara historis, pendidikan berkualitas tinggi terutama dalam sains dan Teknik dibatasi oleh geografi dan kekayaan. Laboratorium teknik,

sekolah kedokteran (dengan kadaver), dan bengkel perakitan yang canggih sangatlah mahal dan hanya ada di beberapa tempat.

1) Demokratisasi Laboratorium

Cloud AR menghancurkan penghalang ini. Sebuah simulasi perakitan PC virtual yang akurat secara teknis dan dibimbing oleh AI (yang pengembangannya mungkin memakan biaya miliaran rupiah) dapat didistribusikan secara virtual tanpa biaya ke jutaan siswa.

2) Mengatasi Kesenjangan Perangkat

Karena tren Cloud AR memindahkan semua pemrosesan berat ke server, siswa di masa depan tidak lagi memerlukan iPhone atau tablet seharga puluhan juta rupiah. Mereka hanya memerlukan perangkat "terminal" dasar yang ringan (kacamata pintar murah) dan koneksi 5G. Ini berarti seorang siswa di desa terpencil di Indonesia, secara teoretis, dapat menjalankan simulasi laboratorium fisika kuantum yang sama persis dengan seorang siswa di Harvard, karena kedua perangkat mereka hanya me-streaming hasilnya dari cloud.

3) Akses ke Keahlian

Avatar AI atau guru virtual berarti keahlian guru terbaik dunia dapat direplikasi dan didistribusikan secara global, memberikan pendampingan belajar 1:1 kepada siapa saja, di mana saja.

Visi *Metaverse* pendidikan, seperti yang diuraikan oleh para peneliti (misalnya, Kye et al., 2021), pada intinya adalah visi tentang demokratisasi. Ini adalah tentang menciptakan ruang belajar global yang persisten dan imersif di mana batasan fisik, geografis, dan ekonomi dari ruang kelas tradisional tidak lagi berlaku.



Bab ini menjelaskan langkah-langkah penggunaan aplikasi AR Komputerku sebagai media pembelajaran berbasis Augmented Reality untuk mengenal perangkat keras komputer. Pembahasan meliputi proses instalasi aplikasi, pengenalan menu dan fitur utama, penggunaan kamera AR untuk menampilkan objek tiga dimensi, akses materi pembelajaran, simulasi perakitan komputer, penggunaan fitur kuis dan evaluasi, serta pemanfaatan fitur pendukung lainnya. Melalui panduan ini, pengguna diharapkan dapat mengoperasikan aplikasi secara mandiri dan memaksimalkan pemanfaatannya sebagai media pembelajaran yang interaktif, menarik, dan efektif dalam mendukung proses belajar.

Aplikasi AR Komputerku merupakan media pembelajaran berbasis *Augmented Reality* (AR) yang dikembangkan untuk mendukung proses pembelajaran pada materi perangkat keras komputer. Aplikasi ini dirancang sebagai sarana pembelajaran interaktif yang memadukan teknologi visualisasi tiga dimensi dengan materi pembelajaran yang sistematis sehingga peserta didik dapat mempelajari komponen-komponen komputer secara lebih menarik, mudah dipahami, dan mendekati kondisi nyata. Pemanfaatan teknologi AR memungkinkan objek virtual ditampilkan secara langsung pada lingkungan nyata melalui perangkat *smartphone* sehingga pengguna dapat berinteraksi dengan

objek pembelajaran secara lebih aktif dibandingkan dengan penggunaan media konvensional.

Pengembangan aplikasi AR Komputerku dilatarbelakangi oleh kebutuhan akan media pembelajaran yang mampu membantu peserta didik memahami berbagai komponen perangkat keras komputer yang sering kali sulit dipelajari hanya melalui gambar dua dimensi atau penjelasan verbal. Dalam pembelajaran konvensional, keterbatasan jumlah perangkat praktik, biaya pengadaan komponen komputer, serta keterbatasan waktu pembelajaran sering menjadi kendala dalam memberikan pengalaman belajar yang optimal kepada peserta didik. Melalui aplikasi ini, berbagai komponen perangkat keras komputer dapat divisualisasikan dalam bentuk objek tiga dimensi yang dapat diamati secara langsung dari berbagai sudut pandang sehingga membantu peserta didik memahami bentuk, fungsi, dan hubungan antar komponen secara lebih komprehensif.

Aplikasi AR Komputerku tidak hanya berfungsi sebagai media visualisasi objek tiga dimensi, tetapi juga menyediakan berbagai fitur pendukung pembelajaran yang dirancang untuk meningkatkan keterlibatan dan pemahaman peserta didik. Pengguna dapat mengakses materi pembelajaran, mengeksplorasi model tiga dimensi perangkat keras komputer, melihat informasi detail mengenai setiap komponen, mengikuti simulasi pembelajaran interaktif, serta mengerjakan evaluasi untuk mengukur tingkat pemahaman terhadap materi yang telah dipelajari. Dengan adanya berbagai fitur tersebut, aplikasi ini diharapkan mampu menciptakan pengalaman belajar yang lebih aktif, mandiri, dan berpusat pada peserta didik.

Salah satu keunggulan utama aplikasi AR Komputerku adalah kemampuannya dalam menghadirkan pengalaman belajar yang lebih konkret dan kontekstual. Melalui teknologi *Augmented Reality*, peserta didik dapat melihat objek perangkat keras komputer seolah-olah berada di hadapan mereka secara nyata. Pengguna dapat memutar objek, memperbesar tampilan, mengamati detail komponen, dan memahami struktur perangkat keras komputer dengan lebih mudah. Pengalaman belajar seperti ini dapat membantu mengurangi kesulitan siswa dalam

memahami konsep-konsep yang bersifat abstrak sekaligus meningkatkan minat dan motivasi belajar.

Agar seluruh fitur yang tersedia dalam aplikasi dapat dimanfaatkan secara optimal, pengguna perlu memahami prosedur penggunaan aplikasi secara benar dan sistematis. Pemahaman terhadap langkah-langkah penggunaan sangat penting untuk memastikan bahwa proses pembelajaran dapat berlangsung dengan lancar tanpa mengalami kendala teknis yang dapat mengganggu aktivitas belajar. Oleh karena itu, pengguna perlu mengetahui tahapan mulai dari proses instalasi aplikasi, pengaturan awal perangkat, penggunaan kamera untuk pemindaian marker, navigasi menu utama, eksplorasi objek *Augmented Reality*, hingga pemanfaatan fitur evaluasi yang tersedia di dalam aplikasi.

Selain membantu pengguna dalam mengoperasikan aplikasi, panduan penggunaan juga bertujuan untuk memastikan bahwa setiap fitur digunakan sesuai dengan tujuan pembelajaran yang telah dirancang. Dengan mengikuti petunjuk penggunaan secara sistematis, peserta didik dapat memperoleh manfaat maksimal dari setiap aktivitas yang tersedia dalam aplikasi. Guru juga dapat menggunakan panduan ini sebagai acuan dalam mengintegrasikan aplikasi AR Komputerku ke dalam kegiatan pembelajaran di kelas maupun pembelajaran mandiri di luar kelas.

Pada bagian berikut akan dijelaskan secara rinci langkah-langkah penggunaan aplikasi AR Komputerku, mulai dari proses instalasi hingga penggunaan berbagai fitur pembelajaran yang tersedia. Penjelasan disusun secara bertahap agar pengguna dapat mengikuti setiap prosedur dengan mudah sehingga pengalaman belajar menggunakan aplikasi AR Komputerku dapat berlangsung secara efektif, efisien, dan menyenangkan.

1. Silahkan download terlebih dahulu aplikasi AR Komputerku



Gambar 12. QR Code Aplikasi AR Komputerku

2. Silahkan install aplikasi AR Komputerku di perangkat *android*
3. Buka aplikasi AR Komputerku, dan akan muncul tampilan splashscreen berupa icon aplikasi



Gambar 13. Tampilan Spalsh Screen Aplikasi

4. Selanjutnya akan tampil halaman utama dari aplikasi AR Komputerku yang berisi berbagai fitur seperti pada gambar berikut



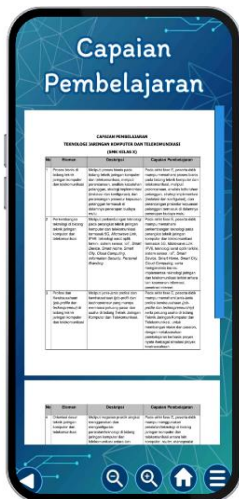
Gambar 14. Tampilan Main Menu

5. Pertama pada tombol materi akan ditampilkan beberapa pilihan untuk melihat materi apa yang ingin dipilih



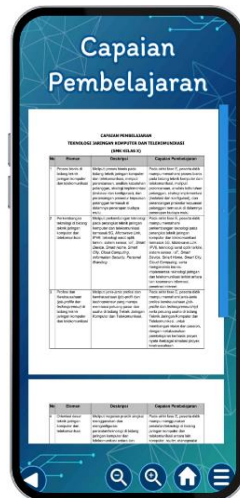
Gambar 15. Halaman Materi

6. Jika memilih pilihan “Capaian Pembelajaran” maka akan ditampilkan halaman capaian pembelajaran dan dapat dibaca untuk capaian pembelajaran yang berfokus pada capaian pembelajaran kurikulum Merdeka



Gambar 16. Halaman Capaian Pembelajaran

7. Selanjutnya jika memilih pilihan “Perangkat Keras” maka akan ditampilkan icon perangkat keras computer dalam bentuk 2D(2 Dimensi)



Gambar 17. Halaman Perangkat Keras

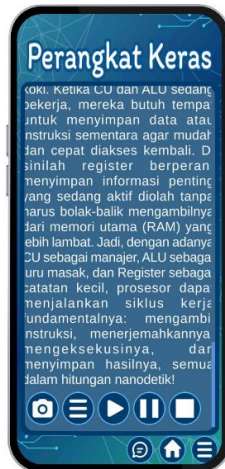
8. Jika memilih salah satu dari pilihan perangkat keras yang ada, maka akan muncul popup informasi dari perangkat keras computer yang ingin dipelajari, jika menekan tombol AI maka akan dibuatkan penjelasan materi berdasarkan hasil AI yang menggunakan API Gemini



Gambar 18. Tampilan Popup Materi

9. Selanjutnya jika telah membaca keseluruhan materi hingga akhir, maka akan ada tombol dengan icon kamera dan menu, untuk tombol menu jika ditekan akan menampilkan tombol pemutar suara, dengan

menekan tombol play maka teks yang ada di popup materi yang dipilih akan dibuatkan kedalam bentuk suara dan dapat didengar dengan seksama, dan suara ini dihasilkan dengan AI Azure



Gambar 19. Pengenalan fungsi TTS

10. Jika menekan tombol kamera, maka akan dialihkan ke tampilan kamera AR, dan perlu untuk mempersiapkan marker, lalu arahkan kamera ke marker untuk menampilkan objek 3D dari perangkat yang dipilih, untuk interaksi terhadap objek dapat dilakukan dengan menggunakan sentuhan jari untuk memutar objek ke segala arah, dan sentuhan 2 jari untuk melakukan pembesaran terhadap objek, terdapat fungsi tombol yang sama jika ingin menggunakan tombol



Gambar 20. Tampilan Kamera AR

11. Selanjutnya kembali ke halaman sebelumnya, pada bagian bawah menu terdapat tombol *chat*, jika ingin menanyakan hal yang sulit dimerngerti maka dapat ditanyakan dengan menggunakan fitur *chat* Ai



Gambar 21. Penjelasan Fungsi Chat AI

12. Setelah itu kembali ke halaman materi terdapat tombol “Tahapan Rakit”, nantinya akan ditampilkan halaman proses tahapan dalam merakit computer



Gambar 22. Tampilan Halaman Tahapan Rakit

13. Setelah melihat halaman materi selanjutnya pilih tombol “Ayo Rakit” lalu tekan tombol “Lets Go”, pada halaman ini akan diarahkan ke kamera AR dan diminta untuk mengidentifikasi marker tertentu untuk menampilkan proses rakit computer secara bertahap



Gambar 23. Tampilan Kamera Ayo Rakit

14. Setelah melihat halaman materi serta tahapan rakit komputer, selanjutnya untuk mengasah hasil pembelajaran dapat dilakukan dengan memilih tombol “Kuis” terdapat 2 fitur kuis yakni Latihan dan Pengayaan, dalam latihan akan diberikan soal pilihan ganda dengan jumlah soal 10, dan dapat diulang berkali-kali hingga mendapatkan skor yang maksimal



Gambar 24. Tampilan Halaman Kuis

-
- The image displays three sequential screenshots of a mobile application interface for a game called 'Wayground'.
 - The first screenshot shows a blue background with a geometric pattern. At the top, it says 'Ayo Tunjukan Kemampuan Mu!'. Below this is a white input field containing the number '123456'. At the bottom, there is a blue oval button labeled 'Start'.
 - The second screenshot shows a solid black background with a large, stylized pink 'W' logo in the center.
 - The third screenshot shows a dark purple background. At the top, it says 'Quizzzz Quiz'. Below this is a small icon of a person and the text 'Daftar lagi'. In the center, the word 'WAYGROUND' is written in orange. Below that is a white input field containing the number '123456'. Below the input field is an orange button labeled 'Gabung'. At the bottom, there is a pink button labeled 'Main game bisa nanti'. At the very bottom, there are links for 'Berlangganan', 'Lembar kerja', 'Simbol daya guru', and 'Pusat guru', along with logos for the App Store and Google Play.

Gambar 25. Tampilan Halaman Quiziz

-
- The image shows four smartphone screens displaying the 'Petunjuk Penggunaan Aplikasi' (Application Usage Guide) for 'Tas Laku'. Each screen has a blue background with a pattern of white dots and lines. The text is in Indonesian.
- Screen 1 (Leftmost):**
 - Title: **Petunjuk Penggunaan Aplikasi**
 - Section: **Petunjuk Penggunaan Tombol Materi**
 - Text:

Buku Menu Utama
Petunjuk materi aplikasi, tekan tombol "Materi" untuk masuk ke halaman petunjuk materi pembelajaran.

PDS Menu Utama
Di halaman materi, tersedia juga tombol utama: Capaian Pembelajaran, Pengetahuan, dan Sikap.

Capaian Pembelajaran
Terdapat 3 (tiga) Capaian Pembelajaran yang memiliki indikator. Untuk mengetahui lebih lanjut mengenai Capaian Pembelajaran, tekan tombol "Capaian Pembelajaran".

Pengetahuan
Terdapat 3 (tiga) Capaian Pembelajaran yang memiliki indikator. Untuk mengetahui lebih lanjut mengenai Capaian Pembelajaran, tekan tombol "Capaian Pembelajaran".
 - Screen 2:**
 - Title: **Petunjuk Penggunaan Aplikasi**
 - Section: **Petunjuk Penggunaan Tombol Ayo Rakit**
 - Text:

Masa "Ayo Rakit" merupakan fitur pembelajaran berbasis Augmented Reality (AR) yang menggunakan kamera 3D untuk membantu pengguna memahami konsep yang disajikan.

Membaca Menu Ayo Rakit
Di halaman materi aplikasi, tekan tombol "Ayo Rakit" untuk masuk ke fitur AR pembelajaran.

Menggunakan Kamera 3D
Tekan tombol "Ayo Rakit" untuk mengaktifkan kamera 3D. Setelah kamera aktif, pengguna akan melihat tampilan AR yang menunjukkan objek 3D yang dapat diinteraksi.
 - Screen 3:**
 - Title: **Petunjuk Penggunaan Aplikasi**
 - Section: **Petunjuk Penggunaan Tombol Kuis**
 - Text:

Buku Menu Utama
Petunjuk materi aplikasi, tekan tombol "Kuis" untuk masuk ke halaman petunjuk kuis.

Ayo Jawab Kuis
Di halaman kuis, tersedia dua tombol utama: Kuis dan Jawaban.

Ayo Jawab Kuis
Tekan tombol "Kuis" untuk memulai kuis. Setelah kuis selesai, pengguna akan melihat hasil kuis.
 - Screen 4 (Rightmost):**
 - Title: **Petunjuk Penggunaan Aplikasi**
 - Section: **Marker**
 - Text:

Marker adalah gambar yang digunakan untuk mengaktifkan fitur AR. Terdapat beberapa jenis marker yang dapat digunakan, yaitu: QR Code, Barcode, dan Image Marker.

QR Code
QR Code adalah gambar yang digunakan untuk mengaktifkan fitur AR. Pengguna dapat mengaktifkan fitur AR dengan mengarahkan kamera ke QR Code.

Barcode
Barcode adalah gambar yang digunakan untuk mengaktifkan fitur AR. Pengguna dapat mengaktifkan fitur AR dengan mengarahkan kamera ke Barcode.

Image Marker
Image Marker adalah gambar yang digunakan untuk mengaktifkan fitur AR. Pengguna dapat mengaktifkan fitur AR dengan mengarahkan kamera ke Image Marker.

Gambar 26. Tampilan Halaman Petunjuk

17. Selanjutnya jika ingin mengenal terkait pembuat aplikasi, dapat menekan tombol tentang, nantinya akan ditampilkan informasi dari si pembuat aplikasi “AR Komputerku”



Gambar 27. Tampilan Halaman Informasi (Tentang)

18. Jika ingin mengatur volume music dan sfx, dapat di atur ketika menekan tombol pengaturan, dan untuk tombol power berfungsi jika ingin keluar dari aplikasi



Gambar 28. Popup Pengaturan Volume dan Tutup Aplikasi

Melalui aplikasi AR Komputerku, peserta didik dapat memperoleh pengalaman belajar yang lebih interaktif, visual, dan kontekstual dalam mempelajari perangkat keras komputer. Berbagai fitur yang tersedia,

mulai dari materi pembelajaran, visualisasi objek 3D berbasis *Augmented Reality*, simulasi perakitan komputer, fitur kecerdasan buatan (AI), hingga kuis evaluasi, dirancang untuk membantu siswa memahami materi secara lebih mendalam dan menyenangkan.

Pemanfaatan aplikasi ini diharapkan tidak hanya meningkatkan pemahaman konseptual peserta didik, tetapi juga mendorong kemandirian belajar, kemampuan eksplorasi, serta keterampilan berpikir kritis yang dibutuhkan pada era digital. Dengan mengikuti langkah-langkah penggunaan yang telah dijelaskan, pengguna dapat memanfaatkan seluruh fitur aplikasi secara optimal sehingga proses pembelajaran menjadi lebih efektif, menarik, dan bermakna. Kehadiran aplikasi AR Komputerku merupakan salah satu contoh implementasi nyata teknologi *Augmented Reality* dalam pendidikan yang mendukung transformasi pembelajaran menuju pengalaman belajar yang lebih inovatif dan berpusat pada peserta didik.

DAFTAR PUSTAKA

- Akçayır, Murat, and Gokce Akcayir. 2016. "Advantages and Challenges Associated with *Augmented Reality* for Education: A Systematic Review of the Literature." *Educational Research Review* 20. doi:10.1016/j.edurev.2016.11.002.
- Al-Busaidi, Kamla Ali, and Hafedh Al-Shihi. 2012. "Key Factors to Instructors' Satisfaction of *Learning Management Systems* in *Blended Learning*." *Journal of Computing in Higher Education* 24(1):18–39. doi:10.1007/s12528-011-9051-x.
- Alismail, Abrar, Esra Altulaihan, M. M. Rahman, and Abu Sufian. 2022. "A Systematic Literature Review on Cybersecurity Threats of *Virtual Reality* (VR) and *Augmented Reality* (AR)." Pp. 761–74 in.
- Alzahrani, Nouf. 2020. "*Augmented Reality*: A Systematic Review of Its Benefits and Challenges in E-Learning Contexts." *Applied Sciences* 10:5660. doi:10.3390/app10165660.
- Ananda, Yulia, Usmeldi, Muhammad Giatman, and Hansi Effendi. 2024. "Emerging Trends and Impacts of Mobile *Learning* in Education: A Bibliometric Analysis." *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA* 10:806–17. doi:10.29303/jppipa.v10i11.9112.
- Andi Kristanto, S.Pd., M. P. 2016. "Media Pembelajaran." *Bintang Sutabaya* 1–129.
- Arifin, Nurul. 2021. "Pengembangan Multimedia Interaktif Berbasis Guided Discovery Pada Materi Lingkaran Kelas Viii Sekolah Menengah Pertama Negeri 10 Pekanbaru." *Pharmacognosy Magazine* 75(17):399–405.
- Arth, Clemens, Raphael Grasset, Lukas Gruber, Tobias Langlotz, Alessandro Mulloni, and Daniel Wagner. 2015. "The History of Mobile *Augmented Reality*."
- Athiyah, Nurul, Nala Maula, Abdul Khobir, and Juwita Rini. 2024. "*Augmented Reality* (AR) *Learning*: Improving Students Memory in Science *Learning* at the Elementary School Level." *Madako Elementary School* 3:152–64. doi:10.56630/mes.v3i2.273.

- Azuma, Ronald T. 1997. "A Survey of *Augmented Reality*." *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6(4):355–85. doi:10.1162/pres.1997.6.4.355.
- Bacca-Acosta, Jorge, Silvia Baldiris, Ramón Fabregat, Sabine Graf, and Dr Kinshuk. 2014. "*Augmented Reality* Trends in Education: A Systematic Review of Research and Applications." *Educational Technology and Society* 17:133–49.
- Bamanger, Ebrahim. 2025. "*Augmented Reality* in EFL Education: Transforming High School Student Achievement Through *Interactive Learning Tools*." *Journal of Technology Studies* 50(1):30–41. doi:10.21061/jts.439.
- Bates, A. W.; Poole, Gary. 2004. "Effective Teaching with Technology in Higher Education: Foundation for Success (Review)." *Portal: Libraries and The Academy* 4:300–302. doi:10.1353/pla.2004.0034.
- Billinghurst, Mark, Adrian Clark, and Gun A. Lee. 2015. "A Survey of *Augmented Reality*." *Found. Trends Hum. Comput. Interact.* 8:73–272.
- Billinghurst, Mark, and Andreas Duenser. 2012. "*Augmented Reality* in the Classroom." *Computer* 45(7):56–63. doi:10.1109/MC.2012.111.
- Billinghurst, Mark, and Hirokazu Kato. 2003. "Collaborative *Augmented Reality*." *Communications of the ACM* 45. doi:10.1145/514236.514265.
- Billinghurst, Mark Nathan. 2023. "Elevated to Fellow of the IEEE for Contributions to *Augmented and Virtual Reality*." *IEEE Fellowships Announcement*.
- Bower, Matt, Cathie Howe, Nerida McCredie, Austin Robinson, and David Grover. 2014. "*Augmented Reality* in Education - Cases, Places and Potentials." *Educational Media International* 51(1):1–15. doi:10.1080/09523987.2014.889400.
- Cáceres-Nakiche, Karim, Wilfredo Carcausto-Calla, Silvia Arrieta, and

- Ruth Tupiño. 2024. "The SAMR Model in Education Classrooms: Effects on Teaching Practice, Facilities, and Challenges." *Journal of Higher Education Theory and Practice* 24. doi:10.33423/jhetp.v24i2.6816.
- Cai, Su, Xu Wang, and Forite Chiang. 2014. "A Case Study of *Augmented Reality* Simulation System Application in a Chemistry Course." *Computers in Human Behavior* 37:31–40. doi:10.1016/j.chb.2014.04.018.
- Carmigniani, Julie, Borko Furht, Marco Anisetti, Paolo Ceravolo, Ernesto Damiani, and Misa Ivkovic. 2010. "*Augmented Reality* Technologies, Systems and Applications." *Multimedia Tools and Applications* 51:341–77. doi:10.1007/s11042-010-0660-6.
- Chen, Chih-Ming, and Yen-Nung Tsai. 2012. "*Interactive Augmented Reality* Game for Enhancing Library Instruction in Elementary Schools." *Computers & Education* 59:638–652. doi:10.1016/j.compedu.2012.03.001.
- Chen, Gaoyu, Haijun Wang, Anni Liang, Mohamed Oubibi, and Yueliang Zhou. 2025. "From Detached Observer to Immersive Participant: An *Augmented Reality*-Based Experiential Learning Approach to Promote Academic Performance and Learning Behaviors in Science Education." *Computers in Human Behavior Reports* 19:100756. doi:https://doi.org/10.1016/j.chbr.2025.100756.
- Chen, Lijia, Pingping Chen, and Zhijian Lin. 2020. "*Artificial Intelligence* in Education: A Review." *IEEE Access* 8:75264–78. doi:10.1109/ACCESS.2020.2988510.
- Chen, Peng, Xiaolin Liu, Wei Cheng, and Ronghuai Huang. 2017. "A Review of Using *Augmented Reality* in Education from 2011 to 2016 BT - Innovations in Smart Learning." Pp. 13–18 in, edited by E. Popescu, Kinshuk, M. K. Khribi, R. Huang, M. Jemni, N.-S. Chen, and D. G. Sampson. Singapore: Springer Singapore.
- Cheng, Kun-Hung, and Chin-Chung Tsai. 2019. "A Case Study of Immersive Virtual Field Trips in an Elementary Classroom: Students' *Learning* Experience and Teacher-Student Interaction

- Behaviors.” *Computers & Education* 140:103600. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103600>.
- Chiang, Tosti, Stephen Yang, and Gwo-Jen Hwang. 2014. “An *Augmented Reality*-Based Mobile *Learning* System to Improve Students’ *Learning* Achievements and Motivations in Natural Science Inquiry Activities.” *Educational Technology and Society* 17:352–65.
- Chotib, Sjahidul Haq. 2018. “Prinsip Dasar Pertimbangan Pemilihan Media Pembelajaran.” *Awwaliyah: Jurnal PGMI* 1(2):110.
- Craig, Alan B. 2013. *Understanding Augmented Reality: Concepts and Applications*. Amsterdam: Morgan Kaufmann (Elsevier Science & Technology).
- Dede, Chris, and Rebecca Mitchell. 2009. “Affordances and Limitations of Immersive Participatory *Augmented Reality* Simulations for Teaching and *Learning*.” *Journal of Science Education and Technology* 18:7–22. doi:10.1007/s10956-008-9119-1.
- Dr. Siti Nurhasanah, M. P., M. P. Dr.(cdt) Agus Jayadi, M. P. Dr. Rika Sa’diyah, and Ph. .. Syafrimen, M.Ed. 2019. “Strategi Pembelajaran.” *Cv. Reka Karya Amerta* (April):1–107.
- Dunleavy, Matt. 2014. “Design Principles for *Augmented Reality Learning*.” *TechTrends* 58. doi:10.1007/s11528-013-0717-2.
- Endra, Robby Yuli, and Michael Saputra. 2022. “Media Pembelajaran Berbasis *Augmented Reality* Metode Marker Untuk Alternatif Pembelajaran Praktek Perakitan Komputer.” *Media ElektriKa* 15(2):50. doi:10.26714/me.v15i2.8479.
- Estapa, Anne, and Larysa Nadolny. 2015. “The Effect of an *Augmented Reality* Enhanced Mathematics Lesson on Student Achievement and Motivation.” *Journal of STEM Education* 16:40.
- Fatahillah, Axl, and Ayu Faradillah. 2023. “Project-Based *Learning* Assisted *Augmented Reality* in Increasing Students’ Mathematical Understanding of Concepts.” *Jurnal Elemen* 9:450–63. doi:10.29408/jel.v9i2.12703.

- Fiorentino, Michele, Francesco Laera, Alessandro Evangelista, Antonio Boccaccio, Vito Manghisi, Michele Gattullo, Antonio Uva, Joseph Gabbard, and Mario Foglia. 2021. "Sailing Data Visualization in *Augmented Reality*: Systematic Review, Issues, and Perspectives." *Marine Technology Society Journal* 55:64–80. doi:10.4031/MTSJ.55.2.2.
- Fiscal, Muhamad Amaral, Nida Handayani, Jl K. H. Ahmad Dahlan, Kec Cirendeu, Tim Ciputat, and Kota Tangerang Selatan. 2024. "Efektifitas Sistem Informasi Manajemen Nikah (SIMKAH) Berbasis Online Di Kota Tangerang Selatan." (4):40–55.
- Freina, Laura, and Michela Ott. 2015. "A Literature Review on Immersive *Virtual Reality* in Education: State Of The Art and Perspectives."
- Gagné, R. M., L. J. Briggs, and W. W. Wager. 1992. *Principles of Instructional Design*. Harcourt Brace Jovanovich College Publishers.
- Garzón, Juan. 2019. "A Meta-Analysis of the Impact of *Augmented Reality* on Students' Learning Effectiveness." *Educational Research Review* 27. doi:10.1016/j.edurev.2019.04.001.
- Gerlach, V. S., D. P. Ely, and R. Melnick. 1980. *Teaching and Media: A Systematic Approach*. Prentice-Hall.
- Guntur, Ikhsan, and Wahyu Setyaningrum. 2021. "The Effectiveness of *Augmented Reality* in Learning Vector to Improve Students' Spatial and Problem-Solving Skills." *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)* 15:159. doi:10.3991/ijim.v15i05.19037.
- Hajirasouli, Aso, and Saeed Banihashemi. 2022. "*Augmented Reality* in Architecture and Construction Education: State of the Field and Opportunities." *International Journal of Educational Technology in Higher Education* 19(1):39. doi:10.1186/s41239-022-00343-9.
- Hanifah, Dwiana Nur Rizki, Nanda Dewi Saputri, Septi Yulisetiani, and Sarwiji Suwandi. 2024. "Inovasi Pembelajaran Bahasa Indonesia Berbasis Digital Dalam Implementasi Kurikulum Merdeka Di SMP

- Tiga Bahasa Bina Widya Surakarta.” *Jurnal Onoma: Pendidikan, Bahasa, Dan Sastra* 10(2):1305–19. doi:10.30605/onoma.v10i2.3457.
- Heinich, R. 2002. *Instructional Media and Technologies for Learning*. Merrill.
- Herpich, Fabrício, Renan Guarese, and Liane Tarouco. 2017. “A Comparative Analysis of *Augmented Reality Frameworks* Aimed at the Development of Educational Applications.” *Creative Education* 08:1433–51. doi:10.4236/ce.2017.89101.
- Ibáñez, María-Blanca, and Carlos Delgado-Kloos. 2018. “*Augmented Reality for STEM Learning: A Systematic Review.*” *Computers & Education* 123:109–23. doi:https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.05.002.
- Ibáñez, María, Angela Di Serio, Diego Villarán, and Carlos Delgado-Kloos. 2014. “Experimenting with Electromagnetism Using *Augmented Reality*: Impact on Flow Student Experience and Educational Effectiveness.” *Computers & Education* 71:1–13. doi:10.1016/j.compedu.2013.09.004.
- Juwita, Juwita, Elania Saputri, and Ira Kusmawati. 2021. “Teknologi *Augmented Reality* (Ar) Sebagai Solusi Media Pembelajaran Sains Di Masa Adaptasi Kebiasaan Baru.” *Bioeduca : Journal of Biology Education* 3:124–34. doi:10.21580/bioeduca.v3i2.6636.
- Kamus Besar Bahasa Indonesia, KBBI 2020. n.d.“No Title.” <https://kbbi.kemdikbud.go.id/>.
- Kapp, K. M. 2012. *The Gamification of Learning and Instruction: Game-Based Methods and Strategies for Training and Education*. Wiley.
- Khan, Tasneem, Kevin Johnston, and Jacques Ophoff. 2019. “The Impact of an *Augmented Reality* Application on Learning Motivation of Students.” *Advances in Human-Computer Interaction* 2019:1–14. doi:10.1155/2019/7208494.
- Kirpes, Carl, Guiping Hu, and Dave Sly. 2022. “The 3D Product Model

- Research Evolution and Future Trends: A Systematic Literature Review.” *Applied System Innovation* 5:29. doi:10.3390/asi5020029.
- Kljun, Matjaž, Vladimir Geroimenko, and Klen Pucihar. 2020. “*Augmented Reality* in Education: Current Status and Advancement of the Field.” Pp. 3–21 in.
- Klopfer, Eric, and Kurt Squire. 2007. “Environmental Detectives—the Development of an *Augmented Reality* Platform for Environmental Simulations.” *Educational Technology Research and Development* 56:203–28. doi:10.1007/s11423-007-9037-6.
- Kye, Bokyoung, Nara Han, Eunji Kim, Yeonjeong Park, and Soyoung Jo. 2021. “Educational Applications of *Metaverse*: Possibilities and Limitations.” *Journal of Educational Evaluation for Health Professions* 18:32. doi:10.3352/jeehp.2021.18.32.
- Laurillard, Diana. 2012. *Teaching as a Design Science: Building Pedagogical Patterns for Learning and Technology*. 1st ed. Routledge.
- Lee, Kangdon. 2012. “*Augmented Reality* in Education and Training.” *TechTrends* 56. doi:10.1007/s11528-012-0559-3.
- Lochhead, Ian, Marguerite Madden, Sidonie Christophe, Alexandre Devaux, Christopher Pettit, Oliver Lock, Shashwat Shukla, Lukáš Herman, Zdeněk Stachoň, Petr Kubicek, Dajana Snopková, Sergio Bernardes, and Nicholas Hedley. 2020. “Extended Reality in Spatial Sciences: A Review of Research Challenges and Future Directions.” *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9. doi:10.3390/ijgi9070439.
- Mayer, R. E. 2009. *Multimedia Learning*. Cambridge University Press.
- Mayer, Richard. 2008. “Applying the Science of *Learning*: Evidence-Based Principles for the Design of Multimedia Instruction.” *The American Psychologist* 63:760–69. doi:10.1037/0003-066X.63.8.760.
- Miftah, Mohamad, and Nur Rokhman. 2022. “Kriteria Pemilihan Dan

- Prinsip Pemanfaatan Media Pembelajaran Berbasis TIK Sesuai Kebutuhan Peserta Didik.” *Educenter : Jurnal Ilmiah Pendidikan* 1(9):641–49. doi:10.55904/educenter.v1i9.92.
- Milgram, Paul, and Fumio Kishino. 1994. “A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays.” *IEICE Trans. Information Systems* E77-D:1321–29.
- Mukti, Fajar. 2019. “Pengembangan Media Pembelajaran *Augmented Reality* (AR) Di Kelas V MI Wahid Hasyim.” *ELEMENTARY: Islamic Teacher Journal* 7:299. doi:10.21043/elementary.v7i2.6351.
- Murtini, Sri, Bambang Sigit Widodo, Wiwik Sri Utami, Sukma Perdana Prasetya, Bambang Hariyanto, Ita Mardiani Zain, Agus Sutedjo, Sugeng Widodo, and Sabrina Azharia Sabitah. 2025. *Analysis Teacher and Student Responses Related Learning Media Development Augmented Reality (AR)-3D on Atmospheric Material for Students Class X in Surabaya*. Vol. 2024. Atlantis Press SARL.
- Muslim, Muslim, Ambiyar Ambiyar, Arwizet Karudin, Muhammad Ruslan, Hsu-Chan Kuo, Donny Fernandez, Doni Yanto, and Nuzul Hidayat. 2024. “*Augmented Reality-Enhanced 5-Step Project-Based Learning Framework for Advancing Technical Education*.” *Data and Metadata* 3. doi:10.56294/dm2024.647.
- Mustaqim, Ilmawan, and Nanang Kurniawan. 2022. “Pengembangan Media Pembelajaran Movie *Learning* Berbasis *Augmented Reality*.” *Jambura Journal of Informatics* 4(2):82–93. doi:10.37905/jji.v4i2.16448.
- Nee, Andrew, S. K. Ong, George Chryssolouris, and Dimitris Mourtzis. 2012. “*Augmented Reality Applications in Design and Manufacturing*.” *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61:657–679. doi:10.1016/j.cirp.2012.05.010.
- Norgaard, Cita, Lotte O’Neill, Kurt Nielsen, Søren Juul, and John Chemnitz. 2018. “*Learning Anatomy With Augmented Reality*.”
- Nursdiansyah, N., D. Apriliani, I. Nurlaela, and ... 2024. “Efektivitas Teknologi *Augmented Reality* Dalam Meningkatkan Minat Siswa

- Terhadap Mata Pelajaran IPS SD.” *Jurnal Pendidikan ...* 8:22415–22.
- Petrov, Plamen, and Tatiana Atanasova. 2022. “Enhancing Stem Education Through Project-Based *Learning* Combined With Virtual And *Augmented Reality*.” Pp. 5730–36 in.
- Prof. Dr. Yusufhadi Miarso, M. S. 2004. *Menyemai Benih Teknologi Pendidikan*. Diterbitkan atas kerja sama dengan Pustekkom-Diknas.
- Purboyo, Galih Aditya, Wasino Wasino, Sarwi Sarwi, Bambang Subali, and Nuni Widiarti. 2025. “Analisis Model Pengembangan Media Pembelajaran Berbasis *Augmented Reality* Di Sekolah Dasar.” *JIIP - Jurnal Ilmiah Ilmu Pendidikan* 8(2):1540–47. doi:10.54371/jiip.v8i2.6880.
- Rachim, Muhammad, Agus Salim, and Qomario Qomario. 2024. “Pemanfaatan *Augmented Reality* Sebagai Media Pembelajaran Terhadap Keaktifan Belajar Siswa Dalam Pendidikan Modern.” *Jurnal Riset Dan Inovasi Pembelajaran* 4:594–605. doi:10.51574/jrip.v4i1.1407.
- Radiani, Jaziar, Tim A. Majchrzak, Jennifer Fromm, and Isabell Wohlgenannt. 2020. “A Systematic Review of Immersive *Virtual Reality* Applications for Higher Education: Design Elements, Lessons Learned, and Research Agenda.” *Computers & Education* 147. doi:10.1016/j.compedu.2019.103778.
- Radu, Iulian. 2014. “*Augmented Reality* in Education: A Meta-Review and Cross-Media Analysis.” *Personal and Ubiquitous Computing* 18:1533–43. doi:10.1007/s00779-013-0747-y.
- Rajput, Abhinav. 2024. “*Augmented Reality*: A New Tool for Education.”
- Resti, Rahmadani, and Dea Mustika. 2025. “Analisis Tantangan Dan Solusi Dalam Penggunaan Media Pembelajaran IPAS Di Kelas V SD Negeri 17 Pekanbaru.” 4:1783–91.
- Sadiman, A. 1986. *Media Pendidikan: Pengertian, Pengembangan Dan*

Pemanfaatannya. Rajawali Pers.

Sanjaya, Wina. 2011. *Standar Pembelajaran Berorientasi Standar Proses Pendidikan*. Jakarta: Penerbit Kencana Prenada Media Group.

Schmalstieg, Dieter, and Tobias Höllerer. 2017. “*Augmented Reality: Principles and Practice*.” Pp. 425–26 in.

Di Serio, Angela, María Ibáñez, and Carlos Delgado-Kloos. 2013. “Impact of an *Augmented Reality* System on Students’ Motivation for a Visual Art Course.” *Computers & Education* 68:586–596. doi:10.1016/j.compedu.2012.03.002.

Shabrina, Arrifatul, Rosita Putri, and Achmad Khairi. 2025. “Pentingnya Pemilihan Media Pembelajaran Yang Tepat Untuk Meningkatkan Hasil Belajar Siswa.” *Zaheen : Jurnal Pendidikan, Agama Dan Budaya* 1(April):120.

Shoaib, Huma, and Syed Waqar Jaffry. 2015. “A Survey of *Augmented Reality*.”

Shoffa, Shoffan, Lis Holisin, Jozua F. Palandi, Sri Cacik, Dian Indriyani, Eko Eddy Supriyanto, Abdul Basith, and Yo Ceng Giap. 2021. *Perkembangan Media Pembelajaran Di Perguruan Tinggi*.

Sisouvong, Vilaythieng, and Khamsavay Pasanchay. 2024. “*Mobile Learning: Enhancing Self-Directed Education through Technology, Wireless Networks, and the Internet Anytime, Anywhere*.” *Journal of Education and Learning Reviews* 1:39–50. doi:10.60027/jelr.2024.752.

Sırakaya, Mustafa, and Didem Alsancak Sırakaya. 2018. “Trends in Educational *Augmented Reality* Studies: A Systematic Review.” *Malaysian Online Journal of Educational Technology* 6:60–74. doi:10.17220/mojet.2018.02.005.

Smaldino, S. E., D. L. Lowther, and J. D. Russell. 2014. *Instructional Technology & Media For Learning: Teknologi Pembelajaran Dan Media Untuk Belajar*.

- Steuer, Jonathan. 2000. "Defining *Virtual Reality*: Dimensions Determining Telepresence." *Journal of Communication* 42. doi:10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x.
- SÜNGER, İbrahim, and Serkan Çankaya. 2019. "Augmented Reality: Historical Development and Area of Usage." *Journal of Educational Technology and Online Learning* 2:118–33. doi:10.31681/jetol.615499.
- Tarigan, Rilensa Br. 2025. "Intelektual: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Mahasiswa Dan Akademisi Volume 1 Nomor 1 e-ISSN: 3090-9449 Hlm. 1-12 Pemanfaatan *Augmented Reality* (AR) Dalam Pembelajaran Ipa Untuk Menumbuhkan Pemahaman Konsep Sistem Tata Surya Di Sekolah Dasar." 1:1–2.
- Terzopoulos, George, Ioannis Kazanidis, Maya Satratzemi, and Avgoustos Tsinakos. 2020. "A Comparative Study of *Augmented Reality* Platforms for Building Educational Mobile Applications." Pp. 307–16 in.
- Thees, Michael, Sebastian Kapp, Martin Strzys, Fabian Beil, Paul Lukowicz, and Jochen Kuhn. 2020. "Effects of *Augmented Reality* on *Learning* and *Cognitive Load* in University Physics Laboratory Courses." *Computers in Human Behavior* 108:106316. doi:10.1016/j.chb.2020.106316.
- Walczak, Krzysztof, Rafał Wojciechowski, and Wojciech Cellary. 2006. "Dynamic *Interactive VR Network Services* for Education." Pp. 277–86 in.
- Wichert, Reiner. 2002. "A Mobile *Augmented Reality* Environment for Collaborative *Learning* and Training."
- Wu, Hsin-Kai, Silvia Wen-Yu Lee, Hsin-Yi Chang, and Jyh-Chong Liang. 2013. "Current Status, Opportunities and Challenges of *Augmented Reality* in Education." *Computers & Education* 62:41–49. doi:10.1016/j.compedu.2012.10.024.
- Yuen, Steve, Yin Yuen, Gallayanee Yaoyuneyong, and Erik Johnson. 2011. "*Augmented Reality*: An Overview and Five Directions for AR in Education." *Journal of Educational Technology*

Development and Exchange 119:119–40.
doi:10.18785/jetde.0401.10.

Yufei, Liu, Salmiza Saleh, Huang Jiahui, and Syed Abdullah. 2020.
“Review of the Application of *Artificial Intelligence* in Education.”
International Journal of Innovation, Creativity and Change 548–
62. doi:10.53333/IJICC2013/12850.

Zhou, Feng, Henry Been-Lirn Duh, and Mark Billingham. 2012.
“Augmented Satiety: *Interactive Nutritional Intake Controller*.”
SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies, SA 2012.
doi:10.1145/2407707.2407710.

GLOSARIUM

A

Adaptif (Pembelajaran Adaptif): Model pembelajaran di mana teknologi (biasanya didukung AI) secara dinamis menyesuaikan konten, kecepatan, atau tingkat kesulitan materi berdasarkan kinerja, perilaku, dan kebutuhan individual siswa secara real-time.

AI (*Artificial Intelligence*): Kecerdasan buatan yang digunakan untuk menganalisis data, memberikan rekomendasi, dan mempersonalisasi pembelajaran dalam media berbasis AR.

Aksesibilitas (*Accessibility* / a11y): Prinsip perancangan aplikasi atau sistem agar dapat digunakan oleh semua orang, terlepas dari keterbatasan fisik, sensorik (penglihatan, pendengaran), kognitif, atau ekonomi (kepemilikan perangkat).

Animasi 3D: Teknik visualisasi yang menampilkan objek bergerak dalam bentuk tiga dimensi untuk memperjelas konsep pembelajaran.

AR (*Augmented Reality*): Teknologi yang menggabungkan

dunia nyata dengan objek digital (teks, gambar, video, animasi) secara real-time.

ARCore: *Software Development Kit (SDK)* yang dikembangkan oleh Google untuk membangun aplikasi AR pada perangkat *Android* (umumnya *markerless*).

AR Foundation: *Framework* di dalam *Unity* yang berfungsi sebagai lapisan abstraksi, memungkinkan pengembang membuat satu aplikasi AR yang dapat berjalan di *ARKit* (*iOS*) dan *ARCore* (*Android*) secara bersamaan.

ARKit: SDK yang dikembangkan oleh Apple untuk membangun aplikasi AR pada perangkat *iOS* (*iPhone/iPad*) (umumnya *markerless*).

Atribusi (*Attribution* / BY): Salah satu syarat paling umum dari lisensi *Creative Commons* (CC) yang mewajibkan pengguna untuk memberikan kredit (penghargaan/nama pembuat) atas karya asli yang digunakan.

Avatar: Representasi digital atau inkarnasi 3D dari seorang pengguna di dalam lingkungan virtual atau *Metaverse*.

B

Beban Kognitif (*Cognitive Load*): Teori yang menjelaskan kapasitas terbatas memori kerja manusia dalam memproses informasi.

Beban Kognitif Asing (Extraneous): Beban mental yang tidak perlu yang disebabkan oleh desain instruksional yang buruk (misalnya, UI yang membingungkan).

Beban Kognitif Relevan (Germane): Upaya mental yang bermanfaat yang digunakan untuk membangun pemahaman jangka panjang.

***Black-Box Testing* (Pengujian Kotak Hitam):** Metode pengujian fungsional di mana penguji memverifikasi output berdasarkan input, tanpa perlu mengetahui cara kerja kode internal aplikasi.

***Blended Learning*:** Model pembelajaran yang menggabungkan pembelajaran tatap muka dengan pembelajaran berbasis teknologi, termasuk AR.

BYOD (*Bring Your Own Device*): Kebijakan di mana siswa menggunakan perangkat milik pribadi (seperti ponsel) untuk aktivitas kelas, yang

menimbulkan tantangan ekuitas dan teknis.

C

***Chatbot*:** Program AI yang dirancang untuk mensimulasikan percakapan cerdas dengan manusia (via teks atau suara) untuk berfungsi sebagai tutor virtual atau pendamping belajar.

Cloud AR: Teknologi AR yang berbasis pada pemrosesan cloud untuk mempercepat *rendering* objek digital dan mengurangi beban perangkat. Semua pemrosesan berat (AI, grafis) terjadi di server, dan hasilnya di-stream ke perangkat pengguna.

Constructivism

(*Konstruktivisme*): Teori belajar yang menekankan bahwa pengetahuan dibangun secara aktif oleh siswa melalui pengalaman langsung dan interaksi.

Content AR: Komponen utama AR yang berisi objek digital berupa 3D, audio, video, maupun animasi interaktif.

***Creative Commons* (CC):** Kerangka kerja lisensi hak cipta yang memungkinkan kreator untuk berbagi karya mereka dengan izin tertentu (misalnya,

Atribusi (BY), Non-Komersial (NC), Tanpa Turunan (ND)).

D

Desain Universal untuk Pembelajaran (Universal Design for *Learning* - UDL): Kerangka kerja desain pedagogis yang bertujuan mengoptimalkan pengajaran dengan menyediakan berbagai cara representasi (multi-modal), aksi, dan keterlibatan.

Device AR: Perangkat keras yang digunakan untuk menjalankan aplikasi AR, seperti smartphone, tablet, headset AR, dan kamera.

Diagram Perbandingan AR, VR, MR: Representasi visual yang membedakan karakteristik fitur, tingkat imersi, dan interaktivitas ketiga teknologi tersebut.

Draw Call: Perintah dari CPU (prosesor) yang menyuruh GPU (grafis) untuk menggambar satu objek. Mengurangi jumlah draw call (misalnya dengan batching atau texture atlasing) sangat penting untuk optimasi performa.

E

Efektivitas Pembelajaran: Tingkat keberhasilan proses belajar mengajar yang diukur melalui

peningkatan pemahaman, keterampilan, motivasi, dan hasil belajar siswa.

Ekuitas (*Equity*) vs. Kesetaraan (*Equality*): Kesetaraan berarti memberi semua orang sumber daya yang sama. Keadilan (Ekuitas) berarti memberi setiap orang sumber daya yang mereka butuhkan (yang mungkin berbeda) agar dapat mencapai hasil yang sama.

Eksperimen Virtual: Kegiatan pembelajaran berbasis simulasi digital yang memungkinkan siswa melakukan eksperimen tanpa menggunakan peralatan fisik.

Enkripsi: Proses teknis mengubah data menjadi kode rahasia untuk mencegah akses yang tidak sah. Melindungi data "saat diam" (di perangkat) dan "dalam perjalanan" (melalui HTTPS).

F

Fasilitator (Peran Guru): Pergeseran peran guru dari "Pemberi Materi" (Sage on the Stage) menjadi "Pembimbing di Sisi" (Guide on the Side), di mana tugas guru adalah mengajukan pertanyaan, membimbing eksplorasi, dan mengelola proses belajar siswa.

FBX (.fbx): Format file 3D standar industri milik Autodesk, yang mampu menyimpan data kompleks seperti model, material, dan animasi kerangka.

Feedback Real-Time: Umpan balik langsung yang diberikan oleh sistem AR kepada pengguna, memungkinkan perbaikan instan dalam proses belajar.

G

Gamifikasi: Integrasi elemen permainan (game elements) seperti poin, lencana, atau papan peringkat dalam konteks pembelajaran untuk meningkatkan motivasi dan keterlibatan siswa.

Gaya Belajar: Preferensi individu dalam menyerap, memahami, dan mengingat informasi, misalnya visual, auditori, dan kinestetik.

GLB / gLTF (.glb / .gltf): Format file 3D modern dan open-source yang sering disebut "JPEG-nya 3D", sangat efisien dan standar untuk WebAR dan *Metaverse*.

H

Hak Cipta (Copyright): Hak hukum eksklusif yang diberikan kepada pencipta karya orisinal

(termasuk model 3D, audio, teks) untuk mengatur penggunaan dan distribusi karya mereka.

Hardware AR: Perangkat keras yang digunakan untuk menjalankan teknologi AR, mencakup kamera, sensor, prosesor, smartphone, tablet, atau kacamata pintar. (Lihat juga: Device AR).

HTTPS: Protokol transfer data web yang aman. Menggunakan enkripsi SSL/TLS untuk melindungi data saat dikirim antara aplikasi dan server.

I

Imersi: Tingkat keterlibatan mendalam yang dirasakan pengguna ketika berinteraksi dengan media digital. (Lihat juga: Tingkat Imersi).

Informed Consent (Persetujuan yang Diinformasikan): Proses etis di mana pengguna (atau orang tua) diberikan informasi yang jelas dan transparan tentang data apa yang dikumpulkan oleh aplikasi dan mengapa, sebelum mereka secara sukarela setuju.

Integrasi Kurikulum: Proses penyelarasan teknologi AR ke dalam tujuan, materi, dan metode pembelajaran di sekolah.

Interaktivitas: Karakteristik AR yang memungkinkan pengguna berinteraksi langsung dengan objek virtual, seperti memutar, memperbesar, atau menggeser model 3D.

Interoperabilitas: Kemampuan sistem atau platform perangkat lunak yang berbeda untuk berkomunikasi dan bekerja sama secara mulus.

K

Kinestetik (Pembelajar Kinestetik): Gaya belajar di mana pemahaman dicapai melalui tindakan fisik, gerakan, dan pengalaman "belajar sambil melakukan" (*Learning by doing*).

Kolaborasi Virtual: Kerja sama antar siswa yang dilakukan dalam ruang digital berbasis AR untuk menyelesaikan suatu tugas atau proyek pembelajaran.

Komponen AR: Elemen utama yang membentuk sistem AR, terdiri atas *hardware*, *software*, dan content.

L

Latensi (Latency): Waktu tunda antara input pengguna (misalnya, gerakan kepala) dan respons

sistem (pembaruan gambar). Latensi rendah sangat penting untuk AR yang nyaman dan realistis.

Learning Management System (LMS): Platform digital untuk mengelola proses pembelajaran online (seperti Google Classroom atau Moodle), yang dapat diintegrasikan dengan AR.

LiDAR (Light Detection and Ranging): Sensor kedalaman canggih yang menggunakan laser untuk memetakan lingkungan 3D secara instan dan akurat, memungkinkan pelacakan AR dan oklusi yang lebih baik.

Lisensi: Izin hukum resmi (kontrak) dari pemilik hak cipta yang menetapkan bagaimana karya mereka dapat digunakan oleh orang lain.

M

Marker (Penanda): Gambar 2D spesifik (seperti QR code atau ilustrasi buku) yang digunakan oleh aplikasi AR berbasis penanda untuk memicu dan menambahkan konten 3D.

Marker-based AR: Sistem AR yang memanfaatkan penanda (marker) seperti gambar atau kode

QR untuk menampilkan objek digital.

Markerless AR: Sistem AR yang tidak memerlukan marker, melainkan menggunakan teknologi seperti SLAM, GPS, atau pemetaan spasial untuk menempatkan objek di lingkungan nyata.

Metaverse Pendidikan: Lingkungan belajar virtual berbasis AR dan VR yang persisten (selalu aktif) dan dibagikan, yang memungkinkan interaksi sosial dan kolaborasi dalam ruang tiga dimensi.

Minimalisasi Data (Data Minimization): Prinsip inti privasi yang menyatakan bahwa sebuah aplikasi hanya boleh mengumpulkan data minimum absolut yang diperlukan untuk menjalankan fungsinya.

Mixed Reality (MR): Teknologi yang menggabungkan dunia nyata dan virtual secara simultan, memungkinkan objek digital dan fisik berinteraksi satu sama lain secara real-time. Sering dianggap sebagai spektrum yang mencakup AR dan VR.

Motivasi Belajar: Dorongan internal maupun eksternal yang

membuat siswa aktif dalam proses pembelajaran.

Multi-Modal: Metode penyajian informasi yang menggunakan lebih dari satu saluran sensorik (modalitas), seperti menggabungkan visual, audio, dan teks secara bersamaan.

N

Normal Map: Peta tekstur teknis (biasanya berwarna ungu) yang menyimpan informasi detail permukaan palsu. Ini digunakan untuk membuat model *low-poly* (ringan) terlihat sangat detail, yang sangat penting untuk optimasi performa.

O

Oklusi (Occlusion): Dalam AR, ini adalah kemampuan objek virtual untuk secara realistis menghilang di belakang objek nyata (misalnya, hologram karakter berjalan di belakang meja fisik).

Optimasi: Proses teknis untuk mengurangi beban komputasi sebuah aplikasi (mengurangi *poligon*, mengompres tekstur, mengurangi *draw call*) agar dapat berjalan lancar (FPS tinggi) di perangkat keras yang terbatas.

P

PBR (Physically Based Rendering): Alur kerja *texturing* 3D modern yang mensimulasikan bagaimana cahaya berinteraksi dengan material di dunia nyata untuk menciptakan realisme tingkat tinggi.

Pedagogi Digital: Pendekatan pembelajaran yang memanfaatkan teknologi, termasuk AR, untuk mendukung pengalaman belajar siswa.

PII (Personally Identifiable Information): Data Identitas Pribadi. Informasi apa pun yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi individu secara spesifik (nama, NIK, email).

Poligon: Bentuk datar (biasanya segitiga) yang membentuk permukaan atau "jaring" (mesh) dari sebuah objek 3D. Jumlah *poligon* menentukan detail dan "berat" performa sebuah model.

Prefab (Unity): Objek game yang telah dikonfigurasi sebelumnya (berisi model, skrip, dan komponen) yang disimpan sebagai aset. Ini adalah template yang digunakan untuk memunculkan objek di dunia AR.

Prinsip Modalitas (Mayer): Prinsip pembelajaran multimedia yang menyatakan bahwa siswa belajar lebih mendalam dari grafik (visual) dan narasi (audio), daripada dari grafik dan teks di layar secara bersamaan.

Project-Based AR Learning: Model pembelajaran berbasis proyek yang menggunakan AR untuk menyelesaikan tugas nyata dan kontekstual.

R

Real-Time Processing: Proses pengolahan data AR secara langsung (dalam milidetik) sehingga interaksi pengguna dengan objek digital terasa alami dan instan.

Registration (AR): Proses teknis inti dalam AR untuk menyelaraskan dan menambatkan elemen digital (virtual) secara akurat pada posisi, skala, dan orientasi yang sesuai dengan dunia nyata.

S

Scaffolding (Perancah): Teknik fasilitasi di mana guru (atau aplikasi) memberikan dukungan penuh di awal, dan kemudian secara bertahap menarik

dukungan tersebut seiring siswa menjadi lebih kompeten.

SDK (Software Development Kit): Kumpulan alat perangkat lunak, pustaka, dan dokumentasi yang disediakan oleh pembuat platform (seperti Google, Apple, atau Vuforia) untuk membantu pengembang membangun aplikasi.

Simulasi Sejarah: Penggunaan AR untuk memvisualisasikan peristiwa atau lingkungan sejarah sehingga siswa dapat memahami konteks peristiwa secara lebih nyata.

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping): Teknologi inti di balik AR *markerless*. Proses algoritmik di mana aplikasi secara bersamaan membangun peta 3D dari lingkungan (Mapping) sambil melacak posisinya sendiri di dalam peta tersebut (Localization).

Software AR: Perangkat lunak yang digunakan untuk membangun aplikasi AR, seperti Unity, Vuforia, *ARKit*, dan *ARCore*.

SSO (Single Sign-On): Sistem autentikasi di mana siswa dapat masuk ke beberapa aplikasi

(termasuk AR) hanya dengan menggunakan satu kredensial (misalnya, akun Google sekolah).

Storyboard AR: Desain awal visual (seperti komik) yang memuat skenario, alur layar, serta interaksi pengguna dalam aplikasi AR.

SUS (System Usability Scale): Kuesioner standar industri 10 pertanyaan untuk mengukur persepsi subjektif pengguna tentang kemudahan penggunaan (usability) sebuah aplikasi.

T

Tampilan Meledak (Exploded View): Fitur interaktif 3D di mana sebuah model rakitan yang kompleks beranimasi terpisah-pisah, memungkinkan siswa untuk melihat setiap komponen individual.

Teknologi Pendidikan: Pemanfaatan perangkat dan aplikasi digital, termasuk AR, untuk meningkatkan kualitas pembelajaran.

Tekstur (Texture): Gambar 2D datar yang "dibungkus" di sekeliling model 3D untuk memberinya warna, pola, dan detail permukaan.

Tingkat Imersi: Derajat keterlibatan sensorik dan kognitif yang dialami pengguna saat menggunakan teknologi AR, VR, atau MR.

U

Unity: Platform pengembangan aplikasi game dan AR/VR (*game engine*) yang banyak digunakan dalam pembuatan media pembelajaran interaktif berbasis AR.

Usability: Ukuran tentang seberapa mudah, efisien, dan menyenangkan sebuah aplikasi untuk digunakan oleh pengguna akhir untuk mencapai tujuan mereka.

Usability Testing: Pengujian untuk memastikan aplikasi AR mudah digunakan, intuitif, dan sesuai kebutuhan pengguna (misalnya, menggunakan metode think-aloud atau survei SUS).

V

VAC (Vergence-Accommodation Conflict): Ketidakcocokan sensorik pada mata yang terjadi saat melihat layar 3D (AR/VR), di mana mata berkonvergensi ke kedalaman virtual objek tetapi berakomodasi ke jarak fisik layar,

yang dapat menyebabkan kelelahan mata.

Virtual Reality (VR): Teknologi yang menciptakan lingkungan virtual sepenuhnya yang imersif, menggantikan dunia nyata dan seringkali memblokir pandangan pengguna dari lingkungan fisik.

Visualisasi Perakitan Komputer: Penerapan AR untuk membantu siswa memahami langkah-langkah dan konsep spasial dalam merakit perangkat keras komputer secara visual dan interaktif.

Vuforia: SDK populer dari PTC untuk mengembangkan aplikasi AR, sangat dikenal karena teknologi *marker-based*-nya yang stabil, dan juga mendukung *markerless*.

W

WebAR: Teknologi AR yang berjalan langsung di peramban web (browser) seluler, menghilangkan kebutuhan pengguna untuk mengunduh atau menginstal aplikasi terpisah.

INDEKS

A

- Aksesibilitas v, 26, 28, 159,
160, 165, 199, 200, 235, 242,
254, 310, 311, 312, 314, 315,
316, 317, 378, 393
- Animasi 3D..... 73, 80, 81, 113,
323, 378
- AR Foundation 56, 93, 158,
162, 199, 201, 222, 240, 378
- ARCore..... 56, 57, 59, 93, 159,
162, 165, 166, 195, 198, 199,
200, 222, 223, 227, 239, 240,
294, 314, 316, 319, 378, 385,
393
- ARKit 56, 57, 93, 159, 162,
165, 166, 195, 198, 199, 200,
222, 227, 239, 240, 294, 314,
316, 319, 378, 385
- Artificial Intelligence. 321, 328,
339, 368, 377, 378
- Atribusi 288, 289, 290, 291,
310, 378, 380
- Attribution / BY 378
- Augmented Reality ...i, iii, iv, v,
4, 5, 7, 8, 10, 12, 16, 21, 22,
31, 32, 34, 38, 40, 44, 46, 48,
52, 53, 55, 56, 57, 59, 60, 61,
62, 63, 66, 67, 69, 70, 72, 73,
74, 79, 81, 83, 84, 85, 86, 88,
89, 90, 91, 92, 94, 96, 97, 98,
99, 100, 103, 104, 105, 113,
115, 117, 119, 120, 121, 123,
125, 126, 129, 133, 134, 136,
138, 147, 149, 152, 155, 157,
165, 168, 177, 181, 183, 186,
193, 196, 204, 213, 218, 223,
234, 249, 253, 262, 266, 268,
276, 284, 287, 293, 296, 302,
305, 311, 312, 318, 321, 328,
330, 333, 338, 346, 349, 365,
366, 367, 368, 369, 370, 371,
372, 373, 374, 375, 376, 378,
392, 393
- Avatar. 326, 331, 332, 333, 334,
335, 336, 337, 349, 350, 353,
378

B

- Black-Box Testing 379
- Blended Learning..... 100, 101,
102, 259, 366, 379
- Bring Your Own Device 149,
295, 310, 314, 379
- BYOD .. 28, 149, 150, 295, 310,
314, 319, 379

C

- Chatbot... 33, 34, 325, 326, 329,
340, 343, 379
- Cloud AR ... 348, 349, 351, 353,
379
- Cognitive Load.... 113, 376, 379
- Constructivism 379
- Content AR 379

Copyright..... 381
Creative Commons 285, 288,
289, 290, 378, 379

D

Device AR 380, 381
Draw Call... 237, 239, 243, 380,
383

E

Efektivitas Pembelajaran 14, 16,
21, 60, 71, 75, 83, 84, 89,
101, 107, 204, 229, 324, 328,
380, 393
Eksperimen Virtual.. 47, 60, 61,
81, 121, 132, 380
Enkripsi..... 295, 296, 297, 298,
299, 380, 381
Equality..... 319, 380
Equity v, 318, 319, 380, 393
Exploded View .. 206, 209, 258,
261, 275, 281, 345, 385
Extraneous 113, 117, 379

F

Fasilitator ... 231, 263, 264, 265,
266, 267, 268, 281, 303, 304,
307, 334, 380
FBX 202, 216, 219, 381
Feedback Real-Time..... 50, 381

G

Gamifikasi.... 18, 31, 33, 35, 52,
68, 69, 75, 146, 273, 344,
381
Gaya Belajar... 8, 11, 13, 14, 17,
24, 25, 27, 28, 29, 45, 46, 52,
67, 70, 71, 73, 74, 82, 85, 87,
101, 133, 134, 145, 322, 323,
338, 341, 345, 381, 382
Germane..... 117, 379
GLB..... 202, 216, 217, 219, 381
gLTF (..... 381

H

Hardware 29, 53, 54, 59, 60, 75,
149, 166, 347, 381, 382
HTTPS 296, 297, 310, 368, 369,
371, 380, 381

I

Imersi ... 4, 8, 10, 12, 13, 14, 20,
21, 31, 32, 34, 42, 45, 46, 47,
48, 49, 50, 51, 52, 53, 55, 57,
58, 59, 61, 62, 64, 66, 67, 69,
70, 72, 75, 79, 82, 83, 84, 87,
88, 98, 100, 101, 102, 106,
107, 108, 114, 134, 137, 162,
167, 171, 181, 183, 196, 204,
242, 305, 328, 329, 330, 334,
335, 341, 346, 349, 352, 353,
380, 381, 386
Informed Consent 299, 310, 381
Integrasi Kurikulum 125, 381

Interaktivitas .. 7, 23, 25, 29, 30,
32, 41, 44, 46, 48, 49, 50, 51,
52, 56, 58, 59, 82, 84, 85, 99,
100, 106, 120, 149, 152, 158,
177, 186, 197, 218, 220, 224,
225, 233, 235, 243, 273, 380,
382

Interoperabilitas 336, 382

K

Kinestetik..... 17, 20, 25, 27, 73,
138, 139, 146, 186, 224, 342,
382

Kolaborasi Virtual .. 71, 75, 382

Komponen AR..... 54, 241, 382

L

Latency 336, 382

Learning Management System
11, 12, 16, 21, 31, 33, 34, 67,
69, 101, 255, 350, 366, 382

LiDAR 55, 316, 347, 382

Lisensi.... 92, 93, 151, 161, 201,
202, 204, 208, 284, 285, 287,
288, 289, 290, 291, 292, 309,
378, 379, 382

M

Marker 56, 57, 59, 62, 222, 360,
362, 363, 369

Marker-based AR . 56, 255, 382

Markerless AR..... 56, 57, 383

Metaverse Pendidikan 335, 336,
349, 351, 353, 383

Minimalisasi Data 298, 299,
310, 383

Mixed Reality..... 41, 43, 48, 51,
52, 75, 196, 330, 346, 373,
383

Motivasi Belajar... 7, 12, 17, 18,
36, 42, 43, 66, 67, 70, 73, 83,
99, 105, 106, 107, 146, 273,
383

Multi-Modal 114, 134, 145,
317, 318, 341, 380, 383

N

Normal Map 179, 210, 212, 215,
216, 219, 236, 242, 383

O

Occlusion 347, 383

Optimasi . v, 178, 180, 181, 195,
196, 204, 205, 210, 213, 214,
215, 216, 218, 234, 235, 236,
237, 238, 241, 242, 380, 383,
393

P

PBR 212, 384

Pedagogi Digital..... 384

Perancah 265, 384

PII..... 295, 296, 298, 310, 384

Poligon 167, 168, 178, 179, 181,
206, 208, 210, 213, 214, 215,
216, 236, 237, 239, 242, 383,
384

Prefab 220, 221, 222, 384

Prinsip Modalitas 181, 183, 186, 384

Project-Based AR Learning. 97, 98, 384

R

Real-Time Processing... 45, 384

Registration..... 42, 43, 62, 384

S

Scaffolding 148, 265, 266, 329, 339, 384

SDK . 56, 92, 93, 159, 161, 162, 163, 166, 197, 198, 199, 201, 378, 385, 386, 393

Simulasi Sejarah .. 89, 334, 350, 385

Simultaneous Localization and Mapping 162, 198, 385

Single Sign-On 297, 385

SLAM 162, 164, 165, 198, 295, 316, 373, 383, 385

Software... 6, 18, 53, 54, 55, 56, 57, 59, 60, 67, 68, 70, 75, 91, 93, 150, 151, 160, 161, 166, 189, 195, 196, 197, 200, 201, 202, 205, 378, 382, 385

Software Development Kit .. 56, 161, 197, 378, 385

SSO 229, 230, 231, 297, 366, 369, 373, 374, 385

Storyboard AR 169, 170, 385

SUS.. 12, 24, 44, 50, 53, 55, 57, 87, 88, 96, 103, 104, 107, 125, 130, 131, 132, 133, 149, 152, 153, 155, 156, 158, 159,

161, 162, 171, 173, 174, 176, 178, 179, 183, 188, 194, 195, 200, 201, 203, 207, 224, 228, 229, 230, 231, 233, 234, 236, 264, 274, 276, 280, 282, 306, 320, 322, 326, 341, 342, 343, 346, 385, 386

System Usability Scale 130, 156, 228, 231, 234, 280, 385

T

Tampilan Meledak 206, 224, 250, 258, 385

Teknologi Pendidikan . 374, 385

Tekstur 163, 166, 167, 168, 179, 181, 194, 197, 202, 206, 210, 211, 212, 213, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 227, 236, 237, 238, 239, 242, 285, 289, 383, 385

Texture 211, 213, 236, 237, 243, 380, 385

Tingkat Imersi 52, 204, 380, 381, 386

U

Unity .. v, 55, 56, 57, 59, 92, 93, 150, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 194, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 210, 212, 214, 215, 216, 218, 219, 220, 221, 222, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 287, 378, 384, 385, 386, 393

Universal Design for Learning 312, 317, 342, 380

Usability 130, 156, 225, 226,
 228, 229, 230, 231, 232, 233,
 234, 235, 241, 242, 268, 270,
 280, 305, 385, 386, 393
 Usability Testing 386

V

VAC..... 303, 348, 386
 Vergence-Accommodation
 Conflict 303, 386
 Virtual Reality . 4, 8, 12, 16, 21,
 31, 32, 34, 41, 48, 49, 50, 52,

63, 75, 105, 330, 331, 366,
 367, 370, 374, 376, 386
 Visualisasi Perakitan Komputer
 60, 89, 386
 Vuforia . 56, 57, 59, 92, 93, 104,
 163, 176, 198, 201, 202, 222,
 223, 227, 316, 385, 386, 393

W

WebAR 160, 164, 199, 200,
 202, 217, 223, 254, 255, 316,
 351, 381, 386

TENTANG PENULIS

© Dr. Asrul Huda, S.Kom., M.Kom.



Dr. Asrul Huda, S.Kom., M.Kom., adalah seorang dosen di Universitas Negeri Padang, Indonesia. Saat ini, beliau ditugaskan untuk mengajar Pendidikan Komputer di Departemen Teknik Elektronika. Beliau meraih gelar Magister di bidang Ilmu Komputer dari Universitas Putra Indonesia "YPTK" Padang pada tahun 2008, dan memperoleh gelar doktor di bidang Pendidikan Teknologi dan Kejuruan dari Universitas Negeri Padang pada tahun 2016. Beliau sangat tertarik pada Pendidikan Kejuruan, Kecerdasan Buatan dalam Pendidikan Kejuruan, Multimedia, dan Pendidikan Komputer. Asrul Hudadapat dihubungi melalui email: asrulhuda@gmail.com.

© Firdaus, S.Pd. M.Pd.T.



Firdaus, S.Pd., M.Pd.T., lahir di Parit Rodi pada tanggal 17 Oktober 1998. Beliau adalah seorang mahasiswa pada program studi Doktor (S3) Pendidikan Teknologi dan Kejuruan di Universitas Negeri Padang. Firdaus menyelesaikan pendidikan Sarjana Pendidikan (S.Pd.) di Universitas Negeri Padang dengan fokus pada bidang Pendidikan Teknik Informatika. Selanjutnya, beliau meraih gelar Magister Pendidikan (M.Pd.T.) di universitas yang sama dengan bidang keahlian dalam Pendidikan Teknologi dan Kejuruan. Dengan latar belakang akademik yang kuat di bidang teknologi dan pendidikan kejuruan, Firdaus memiliki minat yang mendalam terhadap pengembangan teknologi dalam pembelajaran serta peningkatan kualitas pendidikan vokasi di Indonesia. Saat ini, Firdaus berkomitmen untuk memperluas wawasan dan keahliannya melalui penelitian dan inovasi yang relevan di bidang ini. Firdaus dapat dihubungi melalui email: firdaus171098@gmail.com.

© **Dr. Murni Sukmawati, S.Kom., M.Pd.**



Murni Sukmawati, S.Kom., M.Pd., lahir di Padang pada tanggal 26 April 1971. Beliau menyelesaikan pendidikan Sarjana (S.Kom.) di Universitas Putra Indonesia "YPTK" Padang pada tahun 2001 dengan bidang keahlian Manajemen Informatika. Selanjutnya, pada tahun 2005, beliau meraih gelar Magister Pendidikan (M.Pd.) di Universitas Negeri Padang dengan bidang keahlian Administrasi Pendidikan. Saat ini, Murni Sukmawati tengah melanjutkan studi doktoralnya pada program Pendidikan Teknologi dan Kejuruan di Universitas Negeri Padang. Dengan latar belakang pendidikan yang beragam di bidang manajemen, administrasi, dan pendidikan teknologi, beliau memiliki komitmen untuk berkontribusi pada pengembangan pendidikan, khususnya di bidang teknologi dan kejuruan. Beliau dapat dihubungi melalui email: murni.doang@unp.ac.id.

© **Ferdiansyah Gubang.**



Ferdiansyah Gubang, adalah mahasiswa Program Studi Pendidikan Teknik Informatika (angkatan 2021) di Universitas Negeri Padang. Ia merupakan pengembang "AR Komputerku", sebuah aplikasi pembelajaran inovatif berbasis *Augmented Reality* (AR) yang dirancang untuk memvisualisasikan komponen komputer secara interaktif.

RINGKASAN ISI BUKU

Mengatasi tantangan media pembelajaran konvensional dan keterbatasan praktik langsung, buku ini menyajikan *Augmented Reality* (AR) sebagai solusi pedagogis yang inovatif. Implementasi AR didasarkan pada landasan teoretis yang kuat, terutama *Konstruktivisme* (belajar melalui interaksi aktif) dan Teori Beban Kognitif (mengurangi beban mental dengan menyajikan info kontekstual), yang terbukti efektif meningkatkan motivasi dan pemahaman konsep siswa.

Buku ini memandu pembaca melalui siklus hidup lengkap perancangan dan pengembangan media AR. Proses ini dimulai secara sistematis dari analisis kebutuhan, penetapan tujuan pembelajaran, perancangan *storyboard*, hingga alur kerja teknis. Pengembangan mencakup penyiapan aset (terutama optimasi model 3D untuk seluler), integrasi menggunakan engine seperti Unity dan SDK (Vuforia/ARCore), serta siklus pengujian fungsional dan usability untuk menjamin kualitas.

Lebih dari sekadar alat, adopsi AR menuntut strategi implementasi yang matang, termasuk pergeseran fundamental peran guru dari instruktur menjadi fasilitator. Efektivitas pembelajaran kemudian divalidasi melalui metode evaluasi formal, seperti analisis perbandingan pre-test/post-test.

Terakhir, buku ini mengkaji secara mendalam aspek kritis etika dan keamanan, mencakup kepatuhan hak cipta *aset digital*, urgensi perlindungan privasi data siswa (mengingat AR menggunakan kamera), serta kewajiban untuk memastikan keadilan (*equity*) dan aksesibilitas bagi semua peserta didik, termasuk penyediaan jalur pembelajaran alternatif. Buku ini ditutup dengan visi masa depan, memprediksi bagaimana konvergensi AR+AI akan menciptakan sistem pembelajaran adaptif yang personal dan bagaimana AR akan menjadi gerbang utama menuju ruang belajar kolaboratif di dalam *Metaverse*.