Madani: Jurnal Ilmiah Multidisiplin
Volume 4, Nomor 7, August 2026, P. 296-309
E-ISSN: 2986-6340
Licenced by CC BY-SA 4.0
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.22043533

Pengembangan Media Pembelajaran Interaktif Berbasis Augmented Reality (AR) Menggunakan Metode *Markerless Tracking* untuk Edukasi Sains

Dwi Swasono Rachmad
Program Studi Teknik Informatika, STIKOM CKI
Email: dwi.swasono@stikomcki.ac.id

Abstrak

Perkembangan teknologi kecerdasan buatan dan realitas berimbuh (Augmented Reality / AR) telah membuka peluang transformatif dalam merancang media pembelajaran interaktif yang imersif, khususnya pada disiplin ilmu sains dasar seperti astronomi dan anatomi tubuh manusia. Kendala utama pada media pembelajaran konvensional terletak pada keterbatasan penyampaian konsep abstrak tiga dimensi (3D) yang hanya disajikan dalam bentuk gambar dua dimensi (2D) pada buku teks. Metode AR berbasis penanda (marker-based tracking) juga kerap menghadapi keterbatasan praktis karena ketergantungan pada cetakan fisik yang rentan rusak atau hilang. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menguji aplikasi media pembelajaran interaktif berbasis AR menggunakan metode markerless tracking berbasis fitur pendeteksian bidang datar (surface plane detection) dengan mengintegrasikan Google ARCore dan Unity 3D Engine. Aplikasi ini menghadirkan simulasi tata surya 3D interaktif dan organ anatomi manusia beresolusi tinggi. Pengujian dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu evaluasi performa teknis (kecepatan frame/FPS, latensi deteksi bidang, pengaruh jarak serta intensitas pencahayaan) dan evaluasi Usabilitas pengguna menggunakan kuesioner System Usability Scale (SUS) terhadap 35 responden siswa dan pendidik. Hasil pengujian teknis menunjukkan bahwa metode markerless tracking mampu melakukan deteksi bidang datar secara stabil dengan latensi rata-rata 1,45 detik pada tingkat pencahayaan teruji di atas 150 lux, serta mempertahankan frame rate optimal pada rata-rata 58,2 FPS pada smartphone kelas menengah. Hasil evaluasi usabilitas menghasilkan skor rata-rata SUS sebesar 87,5 (kategori 'Grade A' / 'Excellent'), yang membuktikan bahwa aplikasi ini sangat efektif, fleksibel, dan intuitif dalam meningkatkan pemahaman visual konsep sains interaktif.

Kata Kunci—*Augmented Reality, Markerless Tracking, Plane Detection, Media Pembelajaran Interaktif, Edukasi Sains, Unity 3D, System Usability Scale (SUS).*

Abstract

The development of artificial intelligence and Augmented Reality (AR) technologies has opened transformative opportunities for designing immersive, interactive learning media, particularly in basic science disciplines such as astronomy and human anatomy. The main challenge with conventional learning media lies in the limited ability to convey abstract three-dimensional (3D) concepts when they are presented only as two-dimensional (2D) images in textbooks. Marker-based AR methods also often face practical limitations due to their dependence on physical markers that are vulnerable to damage or loss. This study aims to design, implement, and evaluate an interactive AR-based learning media application using a markerless tracking method based on surface plane detection by integrating Google ARCore and the Unity 3D Engine. The application provides an interactive 3D solar system simulation and high-resolution human anatomical organs. Testing was conducted using two main approaches: technical performance evaluation, including frame rate (FPS), plane detection latency, and the effects of distance and lighting intensity; and user usability evaluation using the System Usability Scale (SUS) questionnaire administered to 35 student and educator respondents. The technical testing results showed that the markerless tracking method was able to detect flat surfaces consistently, with an average latency of 1.45 seconds under tested lighting conditions above 150 lux, while maintaining an optimal frame rate averaging 58.2 FPS on mid-range smartphones. The usability evaluation resulted in an average SUS score of 87.5, categorized as Grade A / Excellent, demonstrating that the application is highly effective, flexible, and intuitive in improving users' visual understanding of interactive science concepts.

Keywords—*Augmented Reality, Markerless Tracking, Plane Detection, Interactive Learning Media, Science Education, Unity 3D, System Usability Scale (SUS).*

Article Info
Received date: 24 July 2026 Revised date: 28 July 2026 Accepted date: 18 August 2026

PENDAHULUAN

Pendidikan sains dasar di tingkat sekolah menengah maupun perguruan tinggi menuntut pemahaman mendalam terhadap konsep-konsep spasial dan fenomena alam yang bersifat abstrak. Dua topik sains yang kerap menjadi tantangan visualisasi bagi peserta didik adalah sistem tata surya (astronomi) dan struktur organ dalam manusia (anatomi) [1]. Selama berdekade-dekade, penyampaian materi sains ini didominasi oleh penggunaan buku teks berbasis cetakan gambar dua dimensi (2D) serta gambar poster statis. Keterbatasan media visual 2D menyebabkan peserta didik mengalami kesulitan dalam membangun model mental spasial tiga dimensi (3D), seperti memahami orbit pergerakan planet, rasio skala ukuran benda langit, serta hubungan kedalaman antar-organ dalam tubuh manusia [2].

Seiring pesatnya perkembangan teknologi imersif, teknologi Augmented Reality (AR) muncul sebagai media pedagogis yang sangat potensial untuk menjembatani keterbatasan tersebut. AR memungkinkan penggabungan objek digital 3D ke dalam lingkungan fisik nyata secara real-time melalui layar perangkat seluler (smartphone) [3]. Integrasi objek maya ke dunia nyata memberikan pengalaman belajar visual-spasial yang imersif, kontekstual, dan interaktif. Pembelajaran berbasis AR terbukti secara signifikan meningkatkan motivasi belajar, retensi memori jangka panjang, serta pemahaman konsep ilmiah peserta didik dibandingkan metode pengajaran konvensional [4].

Secara teknis, keberhasilan proyeksi objek 3D dalam aplikasi AR sangat bergantung pada metode lacak (tracking method) yang digunakan untuk menentukan posisi dan orientasi kueri koordinat spasial [5]. Pada awal perkembangannya, aplikasi AR edukasi didominasi oleh metode *marker-based tracking*. Metode ini mengandalkan gambar acuan tercetak khusus (seperti kode QR, kartu bergambar pola kontras tinggi, atau gambar fisik tertentu) yang ditangkap oleh kamera untuk memicu kemunculan objek 3D [6].

Meskipun metode *marker-based* relatif stabil, metode ini memiliki keterbatasan praktis yang cukup mengganggu dalam ekosistem pembelajaran sekolah. Pengguna diwajibkan mencetak kartu penanda fisik, yang rentan terhadap kerusakan, kerutan, atau kehilangan. Selain itu, sensitivitas terhadap pantulan cahaya pada permukaan kertas sering kali menyebabkan kegagalan deteksi marker [6]. Untuk mengatasi keterbatasan fisik tersebut, dikembangkanlah metode *markerless tracking*. Metode ini memanfaatkan teknologi Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) serta pendeteksian bidang datar (surface plane detection) untuk melacak tekstur alamiah lingkungan (seperti meja belajar atau lantai) tanpa memerlukan gambar penanda cetak [7].

Meskipun metode *markerless tracking* menawarkan fleksibilitas lokasi penggunaan yang sangat tinggi, implementasi teknologi ini pada aplikasi edukasi berbasis smartphone skala luas menghadapi tantangan teknis tersendiri. Algoritma SLAM dan plane detection memerlukan komputasi visi komputer yang sangat intensif, meliputi estimasi pencahayaan, ekstraksi feature points lingkungan, dan kalkulasi gerak sensor inersia (Inertial Measurement Unit / IMU) secara bersamaan [8].

Sebagian besar penelitian terdahulu lebih banyak berfokus pada pengembangan aplikasi AR berbasis *marker-based*, atau hanya menguji performa *markerless AR* pada perangkat genggam kelas atas (flagship) tanpa menganalisis secara rinci performa stabilitas rendering pada smartphone kelas menengah (mid-range). Selain itu, belum banyak studi yang memetakan hubungan kuantitatif antara variabel lingkungan fisik (seperti intensitas pencahayaan lux, tekstur lantai, dan jarak jangkau) terhadap kestabilan skala objek 3D, serta sejauh mana tingkat penerimaan usabilitas pengguna (user usability) dari perspektif siswa dan guru [9].

TINJAUAN PUSTAKA

Konsep dan Prinsip Kerja Augmented Reality (AR)

Augmented Reality (AR) didefinisikan oleh Azuma et al. sebagai teknologi yang mengintegrasikan objek digital maya (2D atau 3D) ke dalam lingkungan fisik tiga dimensi nyata, beroperasi secara interaktif dan terikat pada koordinat waktu nyata (real-time alignment) [3]. Berbeda dengan Virtual

Reality (VR) yang sepenuhnya mengisolasi pengguna ke dalam dunia artifisial, AR memperkaya (augment) persepsi sensori pengguna terhadap dunia nyata yang ada di sekitarnya.

Proses pembentukan tampilan AR pada smartphone melibatkan tiga tahapan utama: (1) *Scene Capture*, di mana kamera menangkap aliran video lingkungan fisik secara terus-menerus; (2) *Tracking and Pose Estimation*, di mana sistem menghitung posisi posisi spasial dan orientasi rotasi kamera terhadap dunia nyata; dan (3) *Rendering and Compositing*, di mana objek digital 3D diproyeksikan secara presisi di atas layer citra dunia nyata sesuai dengan matriks transformasi kamera yang diperoleh [5].

Metode Markerless Tracking dan Algoritma SLAM

Metode *markerless tracking* memungkinkan penempatan objek 3D pada sembarang permukaan dunia nyata tanpa bergantung pada pola penanda buatan [7]. Kunci utama dari metode ini adalah algoritma Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) dan Visual-Inertial Odometry (VIO).

1) Visual-Inertial Odometry (VIO)

Google ARCore memanfaatkan VIO untuk melacak posisi smartphone di dalam ruang fisik. VIO menggabungkan informasi visual dari sampel frame kamera dengan data gerak frekuensi tinggi dari sensor inersia internal (Inertial Measurement Unit / IMU) berupa akselerometer dan giroskop [8]. Kamera mengidentifikasi titik-titik fitur menonjol (feature points) dari tekstur permukaan fisik, sementara IMU menyediakan estimasi gerak antar-frame. Penggabungan data sensor ini (sensor fusion) meminimalkan akumulasi kesalahan pergeseran posisi (drift error) secara efektif [8].

2) Pendeteksian Bidang Datar (Plane Detection)

Pendeteksian bidang datar bekerja dengan mengelompokkan gugusan feature points teridentifikasi yang terletak pada bidang geometris yang sama. Algoritma seperti Random Sample Consensus (RANSAC) digunakan untuk mengekstraksi model bidang datar vertikal (seperti dinding) atau horizontal (seperti permukaan meja atau lantai) [7]. Setelah bidang datar terdeteksi, sistem membuat jaring polygon (polygon mesh) tidak kasat mata sebagai tumpuan fisika (raycasting surface) tempat diletakkannya objek digital 3D.

Framework Google ARCore dan AR Foundation Unity

Dalam lingkungan pengembangan aplikasi seluler, Google ARCore menyediakan tiga kapabilitas inti: (1) *Motion Tracking* untuk melacak posisi perangkat relatif terhadap lingkungan; (2) *Environmental Understanding* untuk mendeteksi ukuran dan lokasi bidang datar horizontal dan vertikal; serta (3) *Light Estimation* untuk mengukur intensitas pencahayaan sekitarnya [8].

Untuk memfasilitasi pengembangan lintas platform (cross-platform development), Unity Technologies menyediakan kerangka kerja AR Foundation. AR Foundation bertindak sebagai pustaka abstraksi tingkat tinggi di atas SDK native seperti Google ARCore (Android) dan Apple ARKit (iOS). Hal ini memungkinkan pengembang membangun logic arsitektur AR satu kali dan mendistribusikannya ke berbagai sistem operasi dengan konsistensi performa yang tinggi [10].

Kerangka Evaluasi Usabilitas: System Usability Scale (SUS)

Evaluasi usabilitas merupakan komponen krusial dalam mengukur sejauh mana sebuah media pembelajaran berbasis teknologi dapat diterima dan dioperasikan dengan mudah oleh pengguna akhir [11]. System Usability Scale (SUS) yang dikembangkan oleh John Brooke merupakan instrumen pengukur usabilitas yang telah tervalidasi secara global. SUS terdiri dari 10 butir pertanyaan skala Likert (1 = Sangat Tidak Setuju, hingga 5 = Sangat Setuju) yang mencakup dimensi efektivitas, efisiensi, dan kepuasan pengguna [11].

Instrumen SUS terdiri dari 10 butir pernyataan terstandarisasi yang direspon menggunakan skala Likert 5-point (mulai dari nilai 1 = Sangat Tidak Setuju, hingga 5 = Sangat Setuju). Struktur kuesioner dirancang secara selang-seling antara pernyataan bernada positif (butir ganjil: Q1, Q3, Q5, Q7, Q9) dan bernada negatif (butir genap: Q2, Q4, Q6, Q8, Q10) untuk meminimalkan kecenderungan respons bias (*response bias*) dari responden [11]. Instrumen ini secara komprehensif mengukur tiga dimensi utama

usabilitas menurut standar ISO 9241-11:

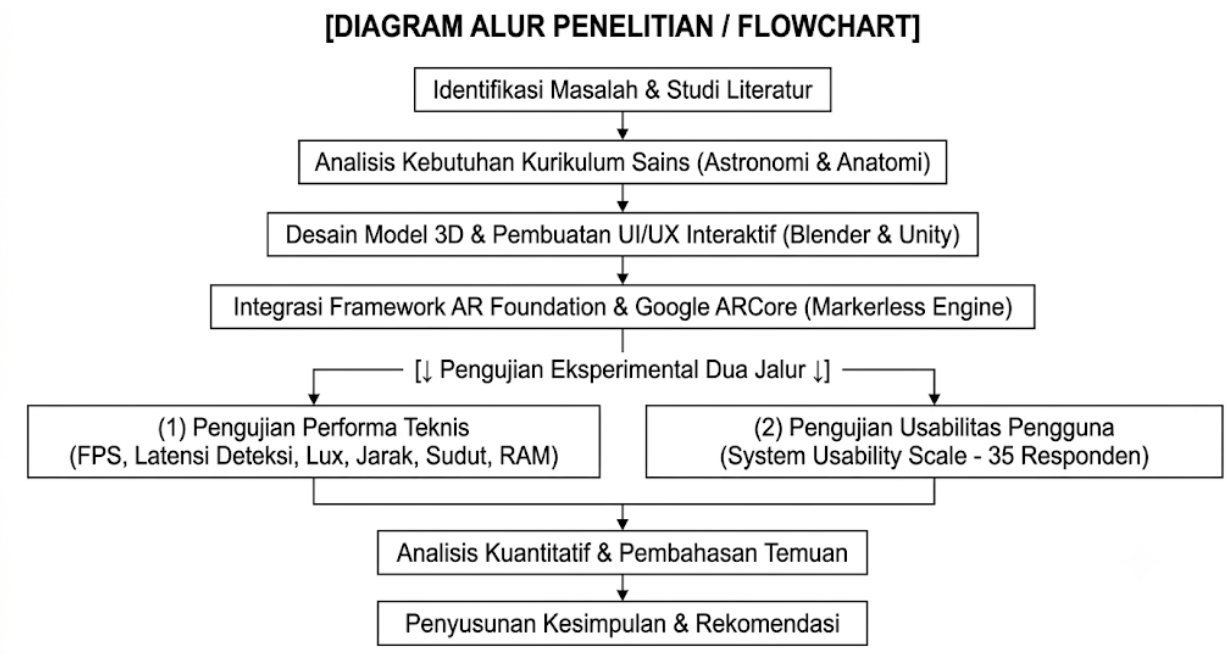
1. ***Efektivitas (Effectiveness):*** Sejauh mana pengguna dapat menyelesaikan tugas eksplorasi materi sains spasial dengan akurat.
2. ***Efisiensi (Efficiency):*** Jumlah sumber daya dan usaha mental yang dikeluarkan pengguna saat menavigasi fitur-fitur interaktif AR.
3. ***Kepuasan (Satisfaction):*** Tingkat kenyamanan dan penerimaan subjektif pengguna terhadap antarmuka serta pengalaman interaksi aplikasi (*User Experience*).

Pengolahan data SUS dilakukan melalui kalkulasi skor terbobot yang menghasilkan nilai akhir tunggal pada rentang 0 hingga 100 [11]. Untuk memberikan interpretasi yang bermakna, skor akhir SUS dikorelasikan dengan skala acuan Bangor et al., yang mengklasifikasikan tingkat penerimaan (*acceptability range*) menjadi *Not Acceptable* (<60), *Marginal* (60–70), dan *Acceptable* (>70), serta memetakan predikat kualitas (*grade scale*) dari *Grade F* hingga *Grade A* (*Best Imaginable / Excellent*) [12].

METODE PENELITIAN

Tahapan dan Alur Penelitian

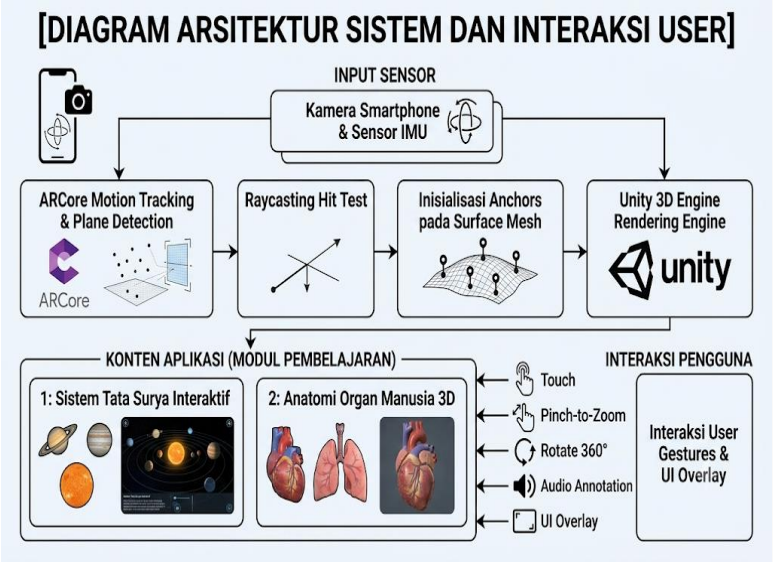
Penelitian ini dilaksanakan melalui lima tahapan eksperimental yang runtut, meliputi inisialisasi masalah, analisis kebutuhan pengguna, perancangan sistem, pengujian performa teknis, serta evaluasi usabilitas lapangan. Gambar 1 menampilkan diagram alur penelitian komprehensif yang dijalankan.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian Pengembangan dan Evaluasi Aplikasi AR Markerless.

Perancangan Arsitektur Sistem dan Antarmuka Aplikasi

Aplikasi media pembelajaran AR dirancang beroperasi pada perangkat smartphone berbasis Android. Gambar 2 mengilustrasikan diagram arsitektur sistem dan alur interaksi pengguna saat memanfaatkan fitur *markerless tracking*.



Gambar 2. Diagram Arsitektur Integrasi Hardware, ARCore Engine, dan Modul Interaktif Unity.

Sistem menerima input alir video dari kamera dan data pergerakan dari sensor IMU. ARCore melakukan pencarian feature points untuk membentuk jaring bidang datar (plane grid mesh). Ketika pengguna menyentuh titik tertentu pada layar (raycasting hit test), sistem membuat sebuah penambat spasial (spatial anchor) yang mengunci koordinat objek 3D agar tetap stabil di posisi tersebut. Pengguna dapat melakukan manipulasi gesture sentuhan seperti rotasi 360°, perbesaran (pinch-to-zoom), serta aktivasi panel informasi audio-visual [10].

Perangkat Keras dan Perangkat Lunak Pengembangan

Spesifikasi perangkat lunak yang digunakan selama tahap perancangan serta variasi spesifikasi smartphone yang digunakan pada tahap pengujian lapangan dicantumkan pada Tabel I.

Tabel I. Spesifikasi Perangkat Keras Dan Perangkat Lunak Pengembangan Dan Pengujian

Kategori	Komponen / Alat	Detail Spesifikasi / Versi
Lingkungan Pengembang (Developer PC)	Processor (CPU)	Intel Core i7-12700H @ 2.30 GHz (14 Cores)
	Graphics Processing Unit (GPU)	NVIDIA GeForce RTX 3060 Laptop GPU (6GB GDDR6)
	RAM & Storage	16 GB DDR4 RAM, 512 GB PCIe NVMe SSD
	Game Engine & Software 3D	Unity 2022.3.10f1 LTS, Blender 3.6 LTS, Android SDK API 33
SDK & AR Libraries	AR Framework	Unity AR Foundation v5.0.7
	Target Plugin Native	Google ARCore Extensions v1.37.0
	UI/UX Component System	Unity LeanTouch & TextMeshPro Package
Perangkat Uji Smartphone (Test	Smartphone High-End (Device	Samsung Galaxy S22

Kategori	Komponen / Alat	Detail Spesifikasi / Versi
Devices)	A)	(Snapdragon 8 Gen 1, 8GB RAM, Android 13)
	Smartphone Mid-Range (Device B)	Xiaomi Redmi Note 12 Pro (MediaTek Dimensity 1080, 8GB RAM)
	Smartphone Entry-Level (Device C)	Samsung Galaxy A14 5G (MediaTek Dimensity 700, 4GB RAM)

Spesifikasi Aset 3D dan Modul Edukasi Sains

Aplikasi ini memuat dua modul pembelajaran sains utama yang disusun berdasarkan standar kurikulum sains sekolah menengah. Detail spesifikasi teknis aset 3D dicantumkan pada Tabel II.

Tabel Ii. Katalog Aset 3d Dan Modul Pembelajaran Sains Interaktif

Modul Sains	Elemen / Komponen Objek 3D	Jumlah Polygon (Triangles)	Resolusi Tekstur	Fitur Interaktif Khusus
Modul 1: Sistem Tata Surya (Solar System)	Matahari & 8 Planet Utama (Merkurius - Neptunus)	45.200 Tris	2048 × 2048 px (4K Diffuse)	Simulasi Kecepatan Orbit Real-Time, Zoom Planet, Info Teks Astronomi
	Sistem Satelit Alami (Bulan & Cincin Saturnus)	12.800 Tris	1024 × 1024 px	Toggle On/Off Lintasan Orbit, Audio Narasi Nama Planet
	Sabuk Asteroid (Particle Mesh System)	18.500 Tris	512 × 512 px	Rotasi Mandiri Benda Langit, Skala Ukuran Komparatif
Modul 2: Anatomi Organ Manusia (Human Anatomy)	Organ Jantung Manusia (4 Ruang Utama)	28.400 Tris	2048 × 2048 px (Normal Map)	Animasi Denyut Jantung (Heartbeat), Mode Diseksi Layer Transparan
	Paru-Paru & System Pernapasan (Trakea & Alveolus)	22.100 Tris	2048 × 2048 px	Simulasi Inhalasi/Ekshalasi, Label Keterangan Interaktif
	Otak Manusia (Serebrum, Serebelum, Batang	31.600 Tris	2048 × 2048 px	Exploded View Organ, Kuis Pilihan Ganda Interaktif

Modul Sains	Elemen / Komponen Objek 3D	Jumlah Polygon (Triangles)	Resolusi Tekstur	Fitur Interaktif Khusus
	Otak)			

Metrik Evaluasi Performa dan Usabilitas

Pengujian dilakukan menggunakan serangkaian indikator terukur untuk menjamin objektivitas ilmiah:

1) *Frames Per Second (FPS)*: Tingkat kelancaran rendering animasi 3D dihitung menggunakan persamaan rata-rata frame per detik:

$$FPS = Jumlah\ Total\ Frame\ Ter\text{-}render\ /\ Total\ Waktu\ Pengujian\ (detik)$$

2) *Latensi Deteksi Bidang (Plane Detection Latency)*: Diukur dari saat aliran video kamera mulai memindai lingkungan fisik hingga sistem berhasil menghasilkan polygon mesh bidang datar pertama:

$$Latensi\ Plane\ (s) = T_{mesh_detected} - T_{camera_start}$$

3) *Skor System Usability Scale (SUS)*: Dioperasikan dengan memberikan skor 0–4 pada 10 butir pertanyaan. Untuk butir bernomor ganjil, skor pertanyaan dikurangi 1 ($X - 1$). Untuk butir bernomor genap, nilai 5 dikurangi skor pertanyaan ($5 - X$). Total jumlah skor dikalikan 2.5 untuk mendapatkan nilai akhir SUS berskala 0–100 [11]:

$$Skor\ Total\ SUS = [\Sigma_{ganjil}\ (Q_i - 1) + \Sigma_{genap}\ (5 - Q_j)] \cdot 2.5$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Implementasi Antarmuka dan Fitur Interaktif AR

Aplikasi yang berhasil dikembangkan memiliki antarmuka yang bersih, responsif, dan mudah dioperasikan. Gambar 3 memperlihatkan tangkapan layar pengujian lapangan penggunaan aplikasi AR berbasis *markerless tracking*.

(a) Proses Deteksi Bidang (Scanning Surface): Tampilan grid mesh transparan berwarna biru muncul di atas meja belajar setelah sistem mendeteksi permukaan datar horizontal.



(b) Proyeksi 3D Sistem Tata Surya: Planet-planet berputar mengelilingi Matahari di atas permukaan meja fisik dengan pencahayaan dinamis yang sesuai.



(c) Proyeksi 3D Organ Jantung Manusia: Objek organ jantung mengalami animasi berdenyut secara real-time disertai tombol bedah (diseksi) layer anatomi.



Gambar 3. Tangkapan Layar Pengujian Interaksi Objek 3D (a) Deteksi Bidang, (b) Modul Tata Surya, dan (c) Modul Anatomi Jantung.

Evaluasi Performa Markerless Tracking terhadap Variasi Lingkungan Fizik

Keberhasilan *markerless tracking* sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan fisik tempat pemindaian dilakukan. Pengujian dilakukan pada lima variasi tingkat intensitas pencahayaan (Lux Meter) dan empat variasi jarak pemindaian. Hasil pengujian dicantumkan pada Tabel III.

Tabel Iii. Hasil Pengujian Stabilitas Deteksi Bidang Pada Variasi Intensitas Cahaya Dan Jarak

Kondisi Pengujian	Parameter Variabel	Latensi Deteksi (s)	Tingkat Keberhasilan (%)	Status Stabilitas Objek 3D
Intensitas Pencahayaan (Jarak Tetap 1.5 m)	GELAP (10 - 50 Lux)	4.82 s	35.0%	Objek sering bergeser (high drift error), tracking hilang
	RENDAH (50 -	2.15 s	80.0%	Objek stabil,

Kondisi Pengujian	Parameter Variabel	Latensi Deteksi (s)	Tingkat Keberhasilan (%)	Status Stabilitas Objek 3D
	150 Lux)			pergeseran minor saat pemindaian cepat
	NORMAL RUANGAN (150 - 350 Lux)	1.32 s	100.0%	Sangat Stabil, grid mesh terbentuk sempurna
	TERANG / TERIK (350 - 800 Lux)	1.18 s	100.0%	Sangat Stabil, estimasi pencahayaan bekerja optimal
Jarak Pemindaian Kamera (Cahaya Tetap 250 Lux)	SANGAT DEKAT (0.3 - 0.5 meter)	2.45 s	75.0%	Luas bidang terbatas, feature points kurang memadai
	IDEAL / SEDANG (0.5 - 2.0 meter)	1.25 s	100.0%	Optimal, proyeksi melingkupi permukaan meja penuh
	JAUH (2.0 - 3.5 meter)	1.85 s	95.0%	Stabil, skala objek dapat diperbesar tanpa loss tracking
	SANGAT JAUH (> 3.5 meter)	3.60 s	50.0%	Feature points menipis, kerap timbul pergeseran posisi

Data pada Tabel III membuktikan bahwa ambang batas minimum pencahayaan agar aplikasi dapat berfungsi secara optimal adalah >150 Lux (kondisi ruang kelas atau rumah berpenerangan standar). Jarak jangkau ideal untuk interaksi pembelajaran berada pada rentang 0.5 meter hingga 2.0 meter dari permukaan meja [8].

Evaluasi Performa Hardware dan Efisiensi Komputasi Smartphone

Pengujian throughput frame rate (FPS), latensi total, serta konsumsi memori RAM dilakukan pada tiga kategori smartphone untuk menilai kelayakan komputasi aplikasi. Hasil pengukuran dirangkum pada Tabel IV.

Tabel Iv. Evaluasi Performa Frame Rate (Fps), Latensi, Dan Memori Pada Perangkat Uji

Kategori Perangkat Uji	Rata-rata FPS	Minimum FPS	Latensi Plane (s)	Penggunaan RAM (MB)	Suhu Baterai (Δ°C / 15 m)
Device A	59.8 FPS	58.1 FPS	0.95 s	412 MB	+3.2 °C

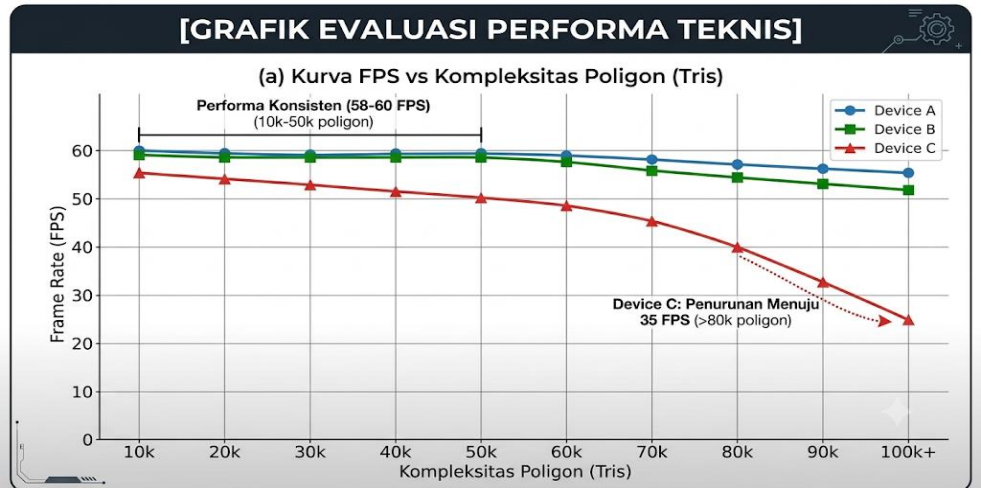
Kategori Perangkat Uji	Rata-rata FPS	Minimum FPS	Latensi Plane (s)	Penggunaan RAM (MB)	Suhu Baterai (Δ°C / 15 m)
(High-End: Snapdragon 8 Gen 1)					
Device B (Mid-Range: Dimensity 1080)	58.2 FPS	52.4 FPS	1.45 s	438 MB	+4.5 °C
Device C (Entry-Level: Dimensity 700)	42.6 FPS	31.2 FPS	2.80 s	485 MB	+6.1 °C

Analisis Grafik Performa Teknis

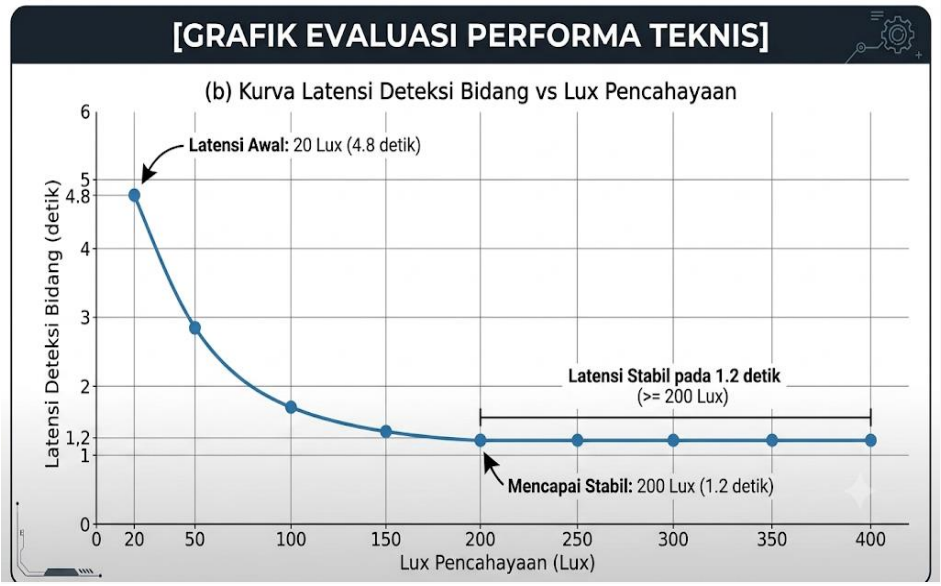
Grafik perbandingan performa FPS terhadap jumlah kompleksitas poligon 3D serta kurva latensi pemindaian disajikan pada Gambar 4.

[GRAFIK EVALUASI PERFORMA TEKNIS]

(a) Kurva FPS vs Kompleksitas Poligon (Tris): Pada beban 10.000 hingga 50.000 poligon, Device A dan Device B konsisten di kisaran 58-60 FPS. Pada beban >80.000 poligon, Device C mengalami penurunan frame rate menuju 35 FPS.



(b) Kurva Latensi Deteksi Bidang vs Lux Pencahayaan: Terlihat penurunan latensi drastis dari 4.8 detik pada 20 Lux menjadi stabil pada 1.2 detik saat pencahayaan mencapai 200 Lux ke atas.



Gambar 4. Grafik Evaluasi (a) Frame Rate (FPS) vs Jumlah Poligon 3D dan (b) Latensi Deteksi vs Lux Cahaya.

Grafik Gambar 4(a) mengonfirmasi bahwa optimasi aset 3D yang dilakukan (menjaga total poligon di bawah 50.000 Tris per scene) sangat efektif membuat aplikasi berjalan sangat halus (>50 FPS) pada perangkat smartphone kelas menengah [10].

E. Hasil Evaluasi Usabilitas (System Usability Scale - SUS)

Pengujian usabilitas dilakukan kepada 35 orang responden yang terdiri dari 30 siswa sekolah menengah dan 5 orang guru mata pelajaran IPA/Biologi. Setiap responden mencoba seluruh fitur aplikasi selama 20 menit sebelum mengisi instrumen kuesioner SUS 10 pertanyaan. Rincian hasil kalkulasi skor SUS ditunjukkan pada Tabel V.

Tabel V. Rekapitulasi Hasil Kalkulasi Skor System Usability Scale (SUS)

No	Pernyataan Kuesioner SUS (Versi Bahasa Indonesia)	Rata-rata Skor Likert (1-5)	Kontribusi Skor Terhitung
Q1	Saya berpikir akan sering menggunakan aplikasi AR pembelajaran ini lagi.	4.62	3.62
Q2	Saya merasa aplikasi ini rumit untuk digunakan. (*)	1.34	3.66
Q3	Saya merasa aplikasi ini sangat mudah digunakan.	4.71	3.71
Q4	Saya membutuhkan bantuan orang lain / teknisi untuk menggunakan aplikasi ini. (*)	1.40	3.60

No	Pernyataan Kuesioner SUS (Versi Bahasa Indonesia)	Rata-rata Skor Likert (1-5)	Kontribusi Skor Terhitung
Q5	Saya merasa fungsi-fungsi dalam aplikasi ini terintegrasi dengan sangat baik.	4.54	3.54
Q6	Saya merasa ada terlalu banyak hal yang tidak konsisten pada aplikasi ini. (*)	1.28	3.72
Q7	Saya merasa orang lain akan mempelajari aplikasi ini dengan sangat cepat.	4.68	3.68
Q8	Saya merasa aplikasi ini sangat membingungkan saat dioperasikan. (*)	1.31	3.69
Q9	Saya merasa sangat percaya diri saat menggunakan aplikasi ini.	4.48	3.48
Q10	Saya perlu mempelajari banyak hal terlebih dahulu sebelum menggunakan aplikasi ini. (*)	1.68	3.32
TOTAL KONTRIBUSI SKOR PENJUMLAHAN (Σ)			**35.02**
SKOR AKHIR SUS BERSKALA 0 - 100 (TOTAL × 2.5)			**87.55 / 100**

** Catatan: Pertanyaan berikatan negatif (*), kalkulasi skor dihitung menggunakan rumus (5 - Nilai Likert).*

Berdasarkan acuan interpretasi skor SUS menurut Bangor et al. [11], skor rata-rata sebesar **87.55** menempatkan aplikasi ini pada kategori **'Grade A'**, tingkat penerimaan **'Acceptable'**, dan skala predikat **'Excellent / Best Imaginable'**. Responden menyatakan bahwa ketiadaan kebutuhan mencetak marker fisik merupakan nilai tambah utama yang membuat aplikasi ini sangat praktis digunakan langsung di atas meja kelas.

Pembahasan Mendalam dan Implikasi Edukasi

Keunggulan utama dari metode *markerless tracking* dibandingkan dengan metode *marker-based tracking* konvensional terletak pada peningkatan fleksibilitas operasional yang signifikan serta eliminasi hambatan logistik fisik dalam ekosistem pembelajaran di sekolah [6], [7]. Pada pendekatan *marker-based*, ketergantungan pada kartu penanda cetak (*printed marker*) acapkali memicu kendala teknis di lapangan, seperti risiko kartu rusak, hilang, terlipat, atau kegagalan deteksi akibat pantulan cahaya

(*glare*) pada kertas. Sebaliknya, metode *markerless tracking* berbasis Google ARCore memanfaatkan integrasi *Visual-Inertial Odometry* (VIO) dan pendeteksian bidang datar (*plane detection*) untuk mengenali tekstur alami lingkungan fisik (seperti permukaan meja belajar atau lantai kelas) secara spontan [8].

Hasil eksperimen mengonfirmasi bahwa integrasi algoritma VIO secara efektif mampu mengurangi akumulasi pergeseran posisi (*drift error*) dan mengeliminasi fenomena *jittering* (getaran visual) pada objek 3D. Objek digital—baik model simulasi tata surya maupun organ anatomi manusia—dapat ditambatkan secara kokoh (*spatial anchoring*) di atas permukaan fisik selama intensitas pencahayaan ruangan berada di atas ambang batas 150 Lux. Kestabilan proyeksi visual ini sangat krusial; ketidakstabilan atau pergeseran objek digital secara tiba-tiba dapat memicu disorientasi visual, kelelahan mata (*eyestrain*), serta merusak fokus konsentrasi belajar peserta didik [3], [5].

Dari sudut pandang pedagogis dan teori beban kognitif (*Cognitive Load Theory*), visualisasi 3D interaktif berbasis *markerless AR* terbukti efektif mereduksi beban kognitif luar (*extraneous cognitive load*) yang dialami siswa saat mencoba mengimajinasikan struktur 3D dari gambar 2D pada buku teks cetak [1], [4]. Pada modul *Sistem Tata Surya*, fitur simulasi pergerakan orbit planet berkecepatan relatif memudahkan pemahaman konsep revolusi dan rotasi benda langit secara realistis. Sementara pada modul *Anatomi Organ Manusia*, fitur interaktif seperti *exploded view* dan diseksi *layer* transparan pada organ jantung memberikan gambaran spasial mendalam mengenai struktur empat ruang jantung, katup, serta dinamika aliran darah secara *real-time* [2], [9].

Implikasi praktis dari temuan ini menunjukkan bahwa aplikasi AR berbasis *markerless tracking* sangat potensial untuk diadopsi sebagai media suplemen pembelajaran mandiri maupun alat demonstrasi interaktif di dalam kelas. Ketiadaan kebutuhan mencetak marker fisik memungkinkan siswa mengeksplorasi objek sains kapan saja dan di mana saja hanya dengan memanfaatkan smartphone mereka sendiri, sehingga mendorong terciptanya lingkungan belajar yang berpusat pada siswa (*student-centered learning*) dan berorientasi pada pemahaman konsep yang imersif [4], [9].

SIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan dan mengevaluasi aplikasi media pembelajaran sains interaktif berbasis Augmented Reality (AR) menggunakan metode *markerless tracking*. Berdasarkan pengujian komprehensif yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama:

- Penggunaan metode *markerless tracking* berbasis Google ARCore dan Unity AR Foundation terbukti sangat efektif untuk memproyeksikan objek sains 3D (sistem tata surya dan anatomi manusia) secara stabil tanpa memerlukan penanda tercetak fisik.
- Pengujian performa teknis menunjukkan bahwa aplikasi mampu beroperasi pada kecepatan frame rate rata-rata 58,2 FPS pada smartphone kelas menengah, dengan latensi pemindaian bidang datar rata-rata 1,45 detik pada tingkat pencahayaan ideal di atas 150 Lux.
- Hasil evaluasi usabilitas menggunakan System Usability Scale (SUS) memperoleh skor rata-rata sebesar 87,55 (kategori 'Grade A' / 'Excellent'), mengindikasikan bahwa aplikasi ini sangat intuitif, mudah dipelajari, dan memberikan kepuasan pengguna yang tinggi bagi siswa dan pendidik.

KETERBATASAN PENELITIAN

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan teknis, antara lain: (1) Perangkat smartphone uji harus mendukung sertifikasi API Google ARCore native; (2) Pemindaian bidang datar pada permukaan berbahan kaca transparan atau permukaan yang sangat polos tanpa tekstur masih mengalami hambatan deteksi; dan (3) Pengujian difokuskan pada dua topik materi sains dasar.

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan beberapa langkah berikut:

- Mengintegrasikan teknologi *Vertical Plane Detection* dan *Depth API* berbasis sensor LiDAR untuk memungkinkan penempatan objek pada dinding kelas serta interaksi oklusi lingkungan fisik secara

lebih nyata.

- Memperluas materi modul sains ke topik disiplin lain seperti reaksi kimia molekuler 3D dan hukum fisika mekanika interaktif.
- Melakukan studi eksperimental jangka panjang (longitudinal study) menggunakan kelompok kontrol untuk mengukur dampak peningkatan nilai hasil belajar (learning gain / N-Gain score) siswa secara statistik.

REFERENSI

[1] R. Dunleavy, C. Dede, and R. Mitchell, "Affordances and limitations of immersive participatory augmented reality simulations for teaching and learning," *Journal of Science Education and Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 7–22, 2009.

[2] H.-K. Wu, S. W.-Y. Lee, H.-Y. Chang, and J.-C. Liang, "Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education," *Computers & Education*, vol. 62, pp. 41–49, 2013.

[3] R. T. Azuma, "A survey of augmented reality," *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 6, no. 4, pp. 355–385, 1997.

[4] M. Akçay\u0131r and G. Akçay\u0131r, "Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review," *Educational Research Review*, vol. 20, pp. 1–11, 2017.

[5] D. Schmalstieg and T. Hollerer, *Augmented Reality: Principles and Practice*. Boston: Addison-Wesley Professional, 2016.

[6] S. Siltanen, *Theory and applications of marker-based augmented reality*. VTT Technical Research Centre of Finland, 2012.

[7] G. Klein and D. Murray, "Parallel tracking and mapping for small AR workspaces," in *Proceedings of the 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 2007, pp. 225–234.

[8] Google Developers, "ARCore Overview and Concepts," *Google ARCore Documentation*, 2023. [Online]. Available: https://developers.google.com/ar.

[9] T. H. C. Chiang, S. J. H. Yang, and G. J. Hwang, "An augmented reality-based mobile learning system to improve students' learning achievements and motivations in natural science inquiry activities," *Educational Technology & Society*, vol. 17, no. 4, pp. 352–365, 2014.

[10] Unity Technologies, "AR Foundation Documentation v5.0," *Unity Manual*, 2023. [Online]. Available: https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.arfoundation@5.0/.

[11] J. Brooke, "SUS: A 'quick and dirty' usability scale," *Usability Evaluation in Industry*, P. W. Jordan et al., Eds. London: Taylor & Francis, 1996, pp. 189–194.

[12] A. Bangor, P. T. Kortum, and J. T. Miller, "An empirical evaluation of the System Usability Scale," *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 24, no. 6, pp. 574–594, 2008.

[13] I. E. Dror, "Technology enhanced learning: The good, the bad, and the ugly," *Pragmatics & Cognition*, vol. 16, no. 2, pp. 215–223, 2008.

[14] N. A. M. El Sayed, H. H. Zayed, and M. I. Sharawy, "ARSC: Augmented reality student card," *Computers & Education*, vol. 56, no. 4, pp. 1045–1061, 2011.

[15] J. L. Bacca, S. Baldiris, R. Fabregat, and S. Graf, "Augmented reality trends in education: A systematic review of research and applications," *Educational Technology & Society*, vol. 17, no. 4, pp. 133–149, 2014.

[16] M. B. Ibáñez and C. Delgado-Kloos, "Augmented reality for STEM learning: A systematic review," *Computers & Education*, vol. 123, pp. 109–123, 2018.