

Design and Initial Testing of Augmented Reality Learning Media for Manufacturing Engineering Drawing Materials

Tri Hannanto Saputra⁽¹⁾, Ignatius Henry Ismadi⁽²⁾, Fransiska Karlentina Hapsari⁽³⁾, Petrus Iwan Nugroho Cahyo Widodo⁽⁴⁾, Benedictus Alvin Prasetyo⁽⁵⁾ dan Muhammad Amin Aditomo⁽⁶⁾

^{1,2,3,4,5,6}Teknik Perancangan Mekanik dan Mesin, Politeknik ATMI Surakarta

E-mail: hannanto.saputra@atmi.ac.id¹, henry.ismadi@atmi.ac.id², fransiska.karlentina@atmi.ac.id³, cahyo.widodo@atmi.ac.id⁴, benedictus.20233008@student.atmi.ac.id⁵, muhammad.20233027@student.atmi.ac.id⁶

ABSTRACT

The rapid development of the manufacturing industry requires vocational graduates to possess high competence in technical drawing literacy according to the International Organization for Standardization (ISO). However, students often face cognitive barriers in visualizing 2D technical drawing representations into 3D forms, particularly in orthogonal projection and section view materials. This study aims to design and conduct initial testing of an Augmented Reality (AR)-based learning medium developed using the Rapid Application Development (RAD) method. The application is built on the Android platform using Unity 3D marker-based tracking method. This research produced a prototype application capable of projecting 3D models of machine components in real-time on top of printed technical drawing modules. Initial testing was conducted using the Black Box Testing method to validate system functionality. Test results indicate that key features such as marker detection, interactive object rotation, and visualization of hidden lines ran successfully under various lighting conditions. This application offers a potential solution to reduce students' cognitive load in understanding abstract spatial concepts.

Keywords: *Augmented Reality, Manufacturing Technical Drawing, ISO Standards, Rapid Application Development, Spatial Visualization.*

Perancangan dan Pengujian Awal Media Pembelajaran Augmented Reality pada Materi Gambar Teknik Manufaktur

ABSTRAK

Perkembangan teknologi industri manufaktur yang pesat menuntut lulusan pendidikan vokasi untuk memiliki kompetensi tinggi dalam literasi gambar teknik sesuai standar *International Organization for Standardization (ISO)*. Namun, mahasiswa sering mengalami hambatan kognitif dalam memvisualisasikan representasi gambar teknik 2D menjadi bentuk 3D, khususnya pada materi proyeksi ortogonal dan potongan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan melakukan pengujian awal terhadap media pembelajaran berbasis *Augmented Reality (AR)* yang dikembangkan menggunakan metode *Rapid Application Development (RAD)*. Aplikasi ini dibangun pada platform Android menggunakan Unity 3D dengan metode pelacakan berbasis penanda (*marker-based tracking*). Penelitian ini menghasilkan purwarupa aplikasi yang mampu memproyeksikan model 3D komponen mesin secara real-time di atas modul cetak gambar teknik. Pengujian awal dilakukan untuk memvalidasi fungsionalitas sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa fitur utama seperti deteksi penanda, rotasi objek interaktif, dan visualisasi garis tersembunyi (*hidden lines*) berjalan sukses pada berbagai kondisi pencahayaan. Aplikasi ini menawarkan solusi potensial untuk mengurangi beban kognitif mahasiswa dalam memahami konsep spasial yang abstrak.

Kata Kunci: *Augmented Reality, Gambar Teknik Manufaktur, Standar ISO, Rapid Application Development, Visualisasi Spasial.*

1. PENDAHULUAN

Dalam ekosistem pendidikan vokasi, mata kuliah Gambar Teknik Manufaktur memegang peranan sentral sebagai bahasa komunikasi universal yang

menghubungkan perancang (*designer*) dengan pelaksana produksi (*machinist*). Kompetensi utama yang harus dicapai mahasiswa adalah kemampuan membaca dan menginterpretasikan gambar kerja sesuai dengan standar

internasional, yaitu *International Organization for Standardization* (ISO), khususnya seri ISO 128 yang mengatur prinsip penyajian gambar (Puji, 2023). Ketepatan interpretasi ini krusial karena kesalahan pembacaan gambar dapat berakibat fatal pada cacat produksi dan kerugian material di industri (Damayanti, 2024). Meskipun demikian, data di lapangan dan berbagai literatur menunjukkan bahwa kemampuan visualisasi spasial menjadi hambatan terbesar bagi mahasiswa tingkat awal. Visualisasi spasial adalah kemampuan mental untuk memanipulasi, merotasi, dan membalik objek 2D dan 3D dalam pikiran (Khoriyani & Suhendra, 2023). Mahasiswa sering kesulitan membayangkan bentuk tiga dimensi dari sebuah gambar proyeksi ortogonal dua dimensi, terutama ketika gambar tersebut melibatkan fitur-fitur kompleks seperti lubang bertingkat, alur pasak, atau irisan dalam (*section view*). Metode pembelajaran konvensional yang mengandalkan buku teks statis dan papan tulis sering kali tidak cukup untuk menjembatani kesenjangan abstraksi ini (Childs dkk., 2023).

Berdasarkan Cognitive Load Theory (Teori Beban Kognitif), kesulitan mahasiswa dalam mempelajari gambar teknik terjadi karena memori kerja (*working memory*) menerima beban yang melebihi kapasitas pemrosesannya (Fauzan dkk., 2024). Pada proses pembelajaran, mahasiswa dituntut untuk melakukan dua aktivitas kognitif secara bersamaan. Pertama, mereka harus memahami dan mengingat aturan simbol dalam standar ISO—seperti penggunaan garis putus-putus, garis tipis, garis tebal, dan garis sumbu—yang masing-masing memiliki makna teknis tertentu. Kedua, mahasiswa harus mampu merekonstruksi bentuk tiga dimensi (3D) dari gambar dua dimensi (2D) secara mental. Proses rekonstruksi tersebut membutuhkan kemampuan spasial yang baik karena mahasiswa harus mampu membayangkan bentuk tiga dimensi dari gambar dua dimensi yang tersedia (Susanto, 2025). Aktivitas ini tidak hanya menuntut ketelitian, tetapi juga memerlukan fokus visual yang intens agar setiap detail garis, sudut, dan proporsi dapat dipahami dengan benar (Anggara dkk., 2025). Ketidakmampuan dalam memvisualisasikan objek secara utuh sering kali menyebabkan kesalahan interpretasi, yang berdampak pada rendahnya akurasi rekonstruksi gambar teknik. Oleh karena itu, proses ini menjadi salah satu tantangan utama dalam pembelajaran gambar teknik, terutama bagi mahasiswa yang belum terbiasa melakukan visualisasi mental terhadap objek-objek geometris yang kompleks. Dengan demikian, dukungan media pembelajaran yang mampu membantu proses visualisasi menjadi sangat penting untuk meningkatkan pemahaman dan keterampilan rekonstruksi spasial mahasiswa.

Kegiatan kognitif ganda tersebut menimbulkan extraneous cognitive load, yaitu beban kognitif tambahan yang tidak berkaitan langsung dengan inti materi, tetapi muncul akibat kompleksitas penyajian informasi (Rahmawati dkk., 2024). Beban ini kemudian

menghambat tercapainya *germane cognitive load*, yaitu proses berpikir yang seharusnya mendukung pemahaman mendalam dan pembentukan skema pengetahuan (Utomo dkk., 2025). Akibatnya, mahasiswa sering mengalami kebingungan, salah menafsirkan bentuk objek, atau membutuhkan waktu yang jauh lebih lama untuk memahami proyeksi teknik.

Dengan mempertimbangkan fenomena tersebut, diperlukan media pembelajaran yang mampu membantu mengalihkan sebagian beban visualisasi dari memori kerja mahasiswa. Media interaktif—seperti *Augmented Reality*—dapat menyediakan representasi 3D secara langsung, sehingga mahasiswa tidak perlu melakukan rekonstruksi mental yang kompleks (Nurannisa dkk., 2024). Hal ini diharapkan dapat mengurangi beban kognitif yang tidak perlu serta mendukung peningkatan pemahaman konsep secara lebih efektif dan efisien. Teknologi *Augmented Reality* (AR) hadir sebagai solusi teknologi yang relevan. AR memungkinkan penggabungan objek virtual 3D ke dalam lingkungan nyata secara real-time (Einsthendi dkk., 2024). Berbeda dengan *Virtual Reality* (VR) yang mengisolasi pengguna dari dunia nyata, AR mempertahankan konteks lingkungan fisik (seperti modul ajar kertas) namun memperkayanya dengan informasi digital (Wibowo, 2025). Hal ini menjadikan AR sangat praktis diterapkan di lingkungan laboratorium vokasi tanpa memerlukan perangkat keras khusus yang mahal.

Penelitian terdahulu telah menunjukkan potensi AR dalam pendidikan teknik. AR dapat meningkatkan efektivitas belajar dalam gambar teknik mesin (Satrianto dkk., 2024). Aryani & Fajri, (2022) mengembangkan AR untuk pengenalan mesin CNC, sementara Maulana dkk., (2024) menggunakan AR untuk simulasi praktikum bubut. Namun, mayoritas penelitian tersebut berfokus pada pengenalan alat atau prosedur operasi. Masih terdapat kesenjangan (*gap*) penelitian dalam pengembangan media AR yang secara spesifik difokuskan untuk memvalidasi pemahaman standar ISO pada gambar teknik (Naibaho, 2021). Kebanyakan aplikasi yang ada hanya menampilkan bentuk visual "cantik" tanpa akurasi dimensi dan kaidah proyeksi yang ketat sesuai standar industri.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun dan melakukan pengujian awal sistem media pembelajaran AR pada perangkat mobile *Android*. Penelitian ini menawarkan kebaruan (*novelty*) berupa integrasi materi gambar teknik berbasis ISO 128-1:2020 ke dalam visualisasi AR interaktif. Fokus utama makalah ini adalah memaparkan proses perancangan sistem menggunakan metode *Rapid Application Development* (RAD) dan hasil pengujian fungsionalitas purwarupa (*prototype*) sebagai tahap awal sebelum implementasi massal di kelas.

2. RUANG LINGKUP

Penelitian ini dibatasi pada ruang lingkup tertentu guna menjaga kedalaman analisis dan efektivitas

pengembangan. Fokus utama visualisasi adalah pemodelan objek 3D pada komponen-komponen mesin, seperti poros, *bracket*, dan *housing*, yang dipilih karena merepresentasikan kompleksitas aturan standar ISO meliputi Proyeksi Eropa serta tampilan potongan (*section view*). Untuk merealisasikan hal tersebut, lingkungan pengembangan perangkat lunak menggunakan software Unity. Sistem ini mengadopsi metode *Marker-Based Tracking*, yang memungkinkan aplikasi mendeteksi gambar 2D pada modul ajar cetak sebagai pemicu visualisasi objek digital.

Selanjutnya, batasan juga diterapkan pada tahapan pengujian dan target pengguna. Mengingat penelitian ini berada pada tahap pengembangan purwarupa dengan Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) level 3, pengujian dibatasi pada metode *Black Box Testing* untuk memvalidasi fungsionalitas fitur-fitur aplikasi tanpa menyentuh struktur kode internal. Implementasi dan uji coba awal media pembelajaran ini ditujukan secara spesifik bagi mahasiswa semester satu Politeknik ATMI Surakarta yang sedang menempuh mata kuliah dasar gambar teknik.

3. BAHAN DAN METODE

Pada penelitian ini bahan dan metode yang digunakan sebagai berikut :

3.1 Desain Penelitian

Pendekatan penelitian ini mengadopsi metode *Research and Development* (R&D) yang diintegrasikan dengan model pengembangan perangkat lunak *Rapid Application Development* (RAD). Pemilihan model RAD didasarkan pada karakteristik utamanya yang memprioritaskan kecepatan pengembangan melalui siklus iteratif dan *prototyping*. Pendekatan ini dinilai sangat relevan untuk pengembangan media visual yang menuntut adanya umpan balik cepat guna penyempurnaan fitur secara berkelanjutan (Adiya dkk., 2024). Mengacu pada diagram alir penelitian yang telah dirancang, implementasi RAD dilaksanakan melalui empat tahapan sistematis. Tahap pertama adalah Perencanaan Syarat (*Requirements Planning*), yang berfokus pada identifikasi kebutuhan pengguna dan analisis mendalam terhadap materi standar ISO. Tahap kedua, Desain Pengguna (*User Design*), mencakup perancangan antarmuka (UI/UX), alur sistem, serta pembuatan penanda (*marker*). Tahap ketiga adalah Konstruksi Cepat (*Rapid Construction*), yang melibatkan pembuatan aset 3D, pemrograman (*scripting*), dan integrasi seluruh komponen dalam engine Unity. Tahapan terakhir adalah Peralihan (*Cutover*), yang berisi prosedur pengujian sistem dan instalasi aplikasi pada perangkat target.

3.2 Prosedur Pelaksanaan

Dukungan infrastruktur perangkat keras dan perangkat lunak yang memadai sangat krusial dalam proses pengembangan ini. Dari sisi perangkat keras (*hardware*), pengembangan dilakukan menggunakan

Personal Computer (PC) dengan spesifikasi prosesor Intel Core i7, memori (RAM) 16GB, dan kartu grafis NVIDIA RTX 3060 untuk menangani komputasi rendering 3D. Sementara itu, perangkat uji yang digunakan adalah smartphone berbasis Android dengan spesifikasi minimal RAM 4GB dan telah dilengkapi sensor *Gyroscope*. Adapun ekosistem perangkat lunak (*software*) yang digunakan meliputi Solidworks 2023 untuk pemodelan presisi komponen mesin sesuai dimensi teknik, dan Blender 3.0 yang berfungsi untuk optimasi topologi model (*mesh decimation*) serta pemetaan tekstur (UV Mapping). Proses integrasi dan pengembangan aplikasi utama dilakukan menggunakan Unity 3D, , serta Visual Studio Code sebagai editor kode untuk bahasa pemrograman C#.

3.3 Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Secara teknis, sistem ini beroperasi berdasarkan prinsip Computer Vision. Mekanisme kerja dimulai ketika kamera perangkat bergerak menangkap aliran video (*video feed*) dari lingkungan fisik. Algoritma Vuforia Engine kemudian menganalisis setiap frame secara real-time untuk mendeteksi titik-titik fitur (*feature points*) dan mencocokkannya dengan basis data penanda (*marker database*) yang telah tersimpan. Apabila kecocokan pola teridentifikasi, sistem akan menghitung matriks transformasi yang mencakup data posisi dan rotasi penanda relatif terhadap kamera. Data transformasi ini kemudian digunakan untuk melakukan proses rendering objek 3D tepat di atas permukaan penanda secara presisi dan sinkron (Pramudwiatmoko & Armanda, 2025).

4. PEMBAHASAN

Pada penelitian ini membahas mengenai :

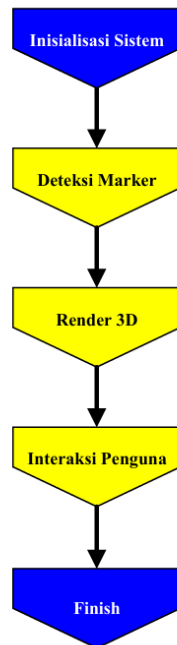
4.1 Perencanaan dan Analisis Kebutuhan

Tahap perencanaan diawali dengan studi literatur mendalam terhadap standar ISO serta wawancara dengan tim pengajar untuk memetakan spesifikasi teknis yang krusial. Berdasarkan analisis tersebut, diidentifikasi tiga kebutuhan fungsional utama yang harus dipenuhi oleh aplikasi. Pertama, aspek interaktivitas, di mana pengguna harus memiliki kemampuan memanipulasi rotasi objek 3D untuk memvisualisasikan sisi belakang benda yang dalam gambar teknik konvensional hanya direpresentasikan oleh garis putus-putus (*hidden lines*). Kedua, aspek akurasi visual, yang menuntut proporsi dan dimensi model 3D memiliki kesesuaian presisi dengan gambar kerja 2D. Ketiga, aspek aksesibilitas, yang mensyaratkan aplikasi untuk dapat beroperasi secara lancar dan ringan pada perangkat *smartphone* kelas menengah (*mid-range*), mengingat mayoritas mahasiswa menggunakan perangkat dengan spesifikasi tersebut.

4.2 Desain Sistem dan Antarmuka

Pada tahap perancangan sistem, pengembangan Antarmuka Pengguna (*User Interface*) difokuskan pada prinsip kesederhanaan dan ergonomi.

Mempertimbangkan konteks penggunaan di mana mahasiswa harus memegang perangkat seluler sekaligus modul ajar cetak secara bersamaan, tata letak navigasi dirancang dengan pendekatan *thumb-friendly*.



Gambar 1. Struktur Sistem
Figure 1. System Structure

Desain pada gambar 1 memastikan seluruh tombol fungsi dapat dijangkau dan dioperasikan dengan mudah menggunakan satu jari, sehingga tidak mengganggu fokus belajar mahasiswa.

4.3 Konstruksi dan Implementasi Teknis

Tahap konstruksi merupakan fase realisasi teknis yang melibatkan serangkaian proses rekayasa perangkat lunak yang mendalam untuk menerjemahkan desain menjadi produk fungsional. Proses ini mencakup pembuatan aset digital, penulisan kode program, hingga integrasi berbagai komponen sistem ke dalam mesin pengembangan.

1. Pembuatan Aset 3D Berbasis ISO

Objek 3D tidak sekadar dibuat artistik, tetapi direkonstruksi dari gambar teknik sesungguhnya. Proses ekspor dari CAD (Solidworks) ke format .FBX dilakukan dengan memperhatikan scale factor agar ukuran objek di layar AR sesuai dengan skala kertas.

2. Implementasi *Scripting* pada Unity

Untuk memungkinkan interaksi pengguna, skrip C# diterapkan pada objek sebagai berikut :

```

codeC#
// Code Snippet 1. Script Rotasi Objek (C#)

using UnityEngine;

public class RotateObject : MonoBehaviour
{
    float rotationSpeed = 10f;

    void OnMouseDown()
    {
        float xAxis = Input.GetAxis("Mouse X") * rotationSpeed;
        float yAxis = Input.GetAxis("Mouse Y") * rotationSpeed;

        transform.Rotate(Vector3.down, xAxis);
        transform.Rotate(Vector3.right, yAxis);
    }
}
  
```

Gambar 2. Kode Program 1
Figure 2. Program Code 1

Pada gambar 2 di atas adalah implementasi kode untuk fitur rotasi objek menggunakan input sentuhan layar. Selain rotasi, fitur *pinch-to-zoom* juga diimplementasikan untuk memungkinkan mahasiswa melihat detail kecil pada komponen, seperti alur ulir atau *chamfer*.

```

codeC#
// Code Snippet 2. Script Zooming (C#)

void Update()
{
    if (Input.touchCount == 2)
    {
        Touch touchZero = Input.GetTouch(0);
        Touch touchOne = Input.GetTouch(1);

        Vector2 touchZeroPrevPos = touchZero.position - touchZero.deltaPosition;
        Vector2 touchOnePrevPos = touchOne.position - touchOne.deltaPosition;

        float prevTouchDeltaMag = (touchZeroPrevPos - touchOnePrevPos).magnitude;
        float touchDeltaMag = (touchZero.position - touchOne.position).magnitude;

        float deltaMagnitudeDiff = prevTouchDeltaMag - touchDeltaMag;

        // Logika perubahan skala objek berdasarkan delta sentuhan
        transform.localScale += new Vector3(deltaMagnitudeDiff * 0.01f,
                                              deltaMagnitudeDiff * 0.01f,
                                              deltaMagnitudeDiff * 0.01f);
    }
}
  
```

Gambar 3. Kode Program 2
Figure 3. Program Code 2

Penggunaan kode program pada gambar 3 menunjukkan penerapan logika pemrograman berorientasi objek dalam pengembangan media pembelajaran, yang menjamin responsivitas aplikasi terhadap gestur pengguna.

4.4 Implikasi terhadap Standar ISO

Keunggulan utama dari media yang dikembangkan ini dibandingkan media pembelajaran generik adalah

ketaatannya pada standar. Dalam banyak aplikasi AR pendidikan, model 3D sering kali disederhanakan (*simplified*). Namun, dalam aplikasi ini, detail seperti *fillet*, *chamfer*, dan alur pasak dimodelkan secara presisi.

Ketika mahasiswa melihat gambar 2D yang memiliki banyak garis putus-putus atau menandakan fitur tersembunyi, mereka sering sulit memahami. Dengan memutar model AR dan mencocokkannya dengan gambar 2D, terjadi proses validasi kognitif. Proses ini secara efektif mengurangi ambiguitas dan miskonsepsi dalam membaca gambar teknik (Mufit dkk., 2023). Hal ini sejalan dengan temuan Hidayat dkk., (2025) yang menyatakan bahwa alat bantu visual 3D secara signifikan meningkatkan akurasi interpretasi teknis siswa vokasi.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan proses perancangan serta pengujian awal yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penelitian ini berhasil mengembangkan media pembelajaran Augmented Reality berbasis Android untuk mata kuliah Gambar Teknik Manufaktur menggunakan metode *Rapid Application Development* (RAD). Hasil pengujian *Black Box* menunjukkan bahwa purwarupa aplikasi berfungsi dengan baik pada fitur deteksi penanda, rotasi interaktif, dan manipulasi skala, terutama dalam kondisi pencahayaan ruang kelas yang memadai. Selain itu, aplikasi ini mampu menampilkan visualisasi objek gambar teknik secara presisi sesuai standar ISO, sehingga memiliki potensi kuat sebagai alat bantu pembelajaran yang dapat meningkatkan pemahaman visualisasi spasial mahasiswa dan mengurangi beban kognitif dalam mempelajari materi proyeksi.

6. SARAN

Sejalan dengan temuan tersebut, penelitian ini masih memiliki ruang untuk dikembangkan lebih lanjut. Oleh karena itu, disarankan agar pengembangan berikutnya mencakup perluasan konten, khususnya dengan menambahkan materi *Assembly Drawing* untuk memperlihatkan hubungan antar komponen secara lebih komprehensif. Penelitian lanjutan juga perlu melakukan uji empiris melalui metode eksperimen, seperti pre-test dan post-test, guna mengukur efektivitas aplikasi dalam meningkatkan hasil belajar mahasiswa secara kuantitatif. Selain itu, optimasi sistem juga penting untuk dilakukan, terutama terkait peningkatan algoritma deteksi agar tetap andal pada kondisi pencahayaan rendah serta pengembangan aplikasi ke platform iOS agar jangkauan pengguna semakin luas. Dengan saran-saran tersebut, media pembelajaran AR yang dihasilkan diharapkan dapat berkembang menjadi teknologi pendukung pembelajaran yang lebih matang, inklusif, dan efektif.

7. REFERENSI

Adiya, A. Z. D. N., Anggraeni, D. L., & Albana, I. (2024). Analisa Perbandingan Penggunaan Metodologi Pengembangan Perangkat Lunak (Waterfall, Prototype, Iterative, Spiral, Rapid

Application Development (RAD)). *Merkurius: Jurnal Riset Sistem Informasi Dan Teknik Informatika*, 2(4), 122–134.

Anggara, I. G. A. S., Yusa, I. M. M., Sutarwiyasa, I. K., Yasa, N. P. D., Andhika, I. P. P., Yasa, G. P. P. A., Farqo, T. M., Prasetyo, D., Martida, V., & Ramadhani, N. (2025). *Dasar-Dasar Animasi: Prinsip, Proses, dan Praktik Kreatif*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.

Aryani, Y., & Fajri, B. R. (2022). Rancang Bangun Augmented Reality Karakteristik dan Prinsip Kerja Mesin Bubut CNC TU-2A. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 6(2), 12711–12719.

Childs, E., Mohammad, F., Stevens, L., Burbelo, H., Awoke, A., Rewkowski, N., & Manocha, D. (2023). An overview of enhancing distance learning through emerging augmented and virtual reality technologies. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 30(8), 4480–4496.

Damayanti, K. (2024). Analisis Produktivitas guna Meminimalisir Defect dengan Metode Six Sigma dan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) pada PT. Kawan Sejati Akurasi. Universitas Islam Indonesia.

Einsthendi, A. D., Rasyid, M. I. A., & Wicaksono, J. B. (2024). Augmented reality: Impact on student engagement and learning. *Hipkin Journal of Educational Research*, 1(2), 239–250.

Fauzan, R. L., Firdaus, L. K. N., Purnomo, A. P., & Luthfiyana, Z. A. (2024). Pengaruh Warna Primer Terhadap Working Memory Pada Mahasiswa Universitas Muhammadiyah Bandung. *IBERS: Jurnal Pendidikan Indonesia Bermutu*, 3(2), 77–86.

Hidayat, A., Sutopo, Y., & Qudus, N. (2025). Pemanfaatan Augmented Reality dalam Pendidikan Vokasi. *Journal Scientific of Mandalika (JSM) e-ISSN 2745-5955 | p-ISSN 2809-0543*, 6(4), 758–767.

Khoriyani, R. P., & Suhendra, M. (2023). Meningkatkan kemampuan spasial siswa dengan pembelajaran melalui media visual. *JURNAL PENDIDIKAN DAN KEGURUAN*, 1(1), 315–323.

Maulana, A., Widyanto, S. A., & Paryanto, P. (2024). Implementasi Aplikasi Augmented Reality Pada Praktikum Proses Produksi Pos Kerja Bubut. *JURNAL TEKNIK MESIN*, 12(3), 1–8.

Mufit, F., Hendriyani, Y., Kom, M., & Dhanil, M. (2023). *Augmented Reality dan Virtual Reality Berbasis Konflik Kognitif, sebagai Media Pembelajaran Abad ke-21-Rajawali Pers*. PT. RajaGrafindo Persada.

Naibaho, H. A. S. (2021). *Pengembangan Media Pembelajaran Augmented Reality Pada Mata Pelajaran Gambar Teknik Mesin Kelas X TPM SMK Negeri 5 Medan Tahun Ajaran 2020/2021*.

UNIMED.

- Nurannisa, A., Asfar, A. M. I. T., & Asfar, A. M. I. A. (2024). *Complex problem solving berbasis virtual reality*. Penerbit KBM Indonesia.
- Pramudwiatmoko, A., & Armanda, R. (2025). Fitur Modifikasi Objek untuk Ketidakakuratan Spasial pada Aplikasi Furnitur Markerless Augmented Reality. *JIKO (Jurnal Informatika Dan Komputer)*, 9(2), 393–404.
- Puji, R. (2023). Strategi Implementasi Iso 14001: 2015 Di Universitas Islam Negeri (Uin) Raden Intan Lampung. UIN Raden Intan Lampung.
- Rahmawati, A. D., Ardianzah, F., & Novitasari, P. (2024). Penerapan Teori Beban Kognitif dalam Pengajaran Matematika Dalam Mengurangi Beban Kognitif Tak Esensial. *Jurnal Jendela Pendidikan*, 4(04), 463–472.
- Satrianto, H. I., Syahri, B., Abadi, Z., & Wulansari, R. E. (2024). Pengembangan Media Pembelajaran Augmented Reality Pada Mata Pelajaran Dasar-Dasar Teknik Mesin. *Jurnal Vokasi Mekanika (VoMek)*, 6(3), 271–279.
- Susanto, F. (2025). Cara Berpikir Visual Siswa SMA dalam Memahami Masalah Dimensi Tiga.

Pentagon: Jurnal Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam, 3(1), 70–79.

- Utomo, D. P., Holisin, I., Inganah, S., & Hidayati, W. S. (2025). Monograf-Efisiensi Kognitif Dalam Pembelajaran Matematika: Integrasi Strategi Pengajaran, Persepsi Mahasiswa, Dan Teori Beban Kognitif Di Pendidikan Tinggi. UMMPress.
- Wibowo, M. C. (2025). Kekuatan AR (Augmented Reality) dan VR (Virtual Reality) dalam Bisnis. Penerbit Yayasan Prima Agus Teknik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRTPM), Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia yang telah mendanai penelitian ini melalui skema Penelitian Dosen Pemula (PDP) Tahun Anggaran 2025. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik ATMI Surakarta atas dukungan fasilitas laboratorium dan administrasi yang diberikan selama proses pelaksanaan penelitian hingga penyusunan publikasi ini.