

Implementasi *Smart Digital Interactive Laboratory* Berbasis *Augmented Reality* dalam Penguatan Literasi Sosiosaintifik Siswa

Kartyka Nababan^{1*}, Dina Mariana Siregar², Victor Tarigan³

¹Program Studi Pendidikan Kimia, Universitas Negeri Manado, Tondano, Sulawesi Utara, 95134 Indonesia

²Program Studi Psikologi, Universitas Negeri Manado, Tomohon, Sulawesi Utara, 95618, Indonesia

³Program Studi Teknik Informatika, Universitas Samratulangi, Manado, Sulawesi Utara, 95115 Indonesia

*Corresponding Author: kartykanababan@unima.ac.id

Article History

Received : September 16th, 2025

Revised : October 23th, 2025

Accepted : November 20th, 2025

Abstract: The Fourth Industrial Revolution and Society 5.0 are driving the transformation of science education towards the development of 21st-century competencies, including socioscientific skills. However, the abstraction of concepts and limitations in representing complex phenomena pose challenges in chemistry learning. Immersive technologies such as Augmented Reality (AR) and Artificial Intelligence (AI) offer solutions through the creation of interactive and personalized learning environments. This study aims to: (1) implement AR and AI-based Smart Digital Laboratory (Smart-DIL) media on environmental pollution material; (2) analyse its impact on student engagement and enthusiasm for learning; and (3) explore the development of environmental awareness and socioscientific skills through an eco-enzyme project. This qualitative research with an instrumental case study design involved 22 students from class XI IPA SMA Kristen Sonder who were selected purposively. Data collection was carried out through participant observation, in-depth interviews, questionnaires, and documentation studies. The data was analysed interactively following the Miles, Huberman, and Saldana model. The implementation of Smart-DIL created a dynamic and immersive learning environment. A significant increase in engagement and enthusiasm for learning was observed, as demonstrated by intensive interaction with AR objects and critical discussions. This application also acts as a catalyst in fostering environmental awareness and socio-scientific skills, which are manifested in the full engagement of students during the practice of making eco-enzymes. The AR and AI-based Smart Digital Laboratory is effective in transforming chemistry learning into contextual and competency-based learning. The integration of this technology in the Merdeka Curriculum not only increases learning engagement but also fosters students' socio-scientific skills and digital literacy.

Keywords: *Augmented Reality, Artificial Intelligence, Socioscientific Skills, Contextual Learning, Teacher Professional Education*

PENDAHULUAN

Landskap pendidikan global abad ke-21 mengalami pergeseran paradigmatik yang signifikan, dari orientasi penguasaan konten menuju pembentukan kompetensi holistik. Kurikulum Merdeka Belajar di Indonesia (Kemdikbudristek, 2022) menekankan pengembangan Profil Pelajar Pancasila, yang salah satu pilarnya adalah kemampuan bernalar kritis. Dalam pendidikan sains, hal ini berimplikasi pada kebutuhan mengintegrasikan dimensi sosial dan etika ke dalam pembelajaran (Sadler, 2022). Keterampilan sosiosaintifik (socioscientific skills) emerged sebagai konstruk kunci. Keterampilan ini merujuk pada

kemampuan individu untuk mengengage isu-isu sosial bermuatan sains, menganalisisnya dari multidimensi, dan mengambil keputusan yang bertanggung jawab (Zeidler & Nichols, 2022).

Namun, realitas di lapangan menunjukkan bahwa pembelajaran kimia masih sering terkendala oleh abstraksi konsep, keterbatasan peralatan laboratorium, dan kesulitan menghadirkan fenomena kompleks dan berbahaya (Lazos et al., 2024). Akibatnya, siswa mengalami kesenjangan antara pengetahuan deklaratif dengan kemampuan menerapkannya dalam memecahkan masalah sosiosaintifik (Sjöström & Eilks, 2018).

Teknologi digital, khususnya *Augmented Reality* (AR) dan *Artificial Intelligence* (AI),

menawarkan solusi disruptif. AR memungkinkan penumpukan informasi digital (model 3D, animasi) ke dalam dunia nyata, menciptakan pengalaman belajar yang imersif (Belda-Medina & Marrahi-Gomez, 2023; Amirbekova et al., 2023). Dalam kimia, AR dapat menghadirkan model molekul yang dapat dimanipulasi atau simulasi reaksi berbahaya. Sementara AI, melalui algoritma machine learning, dapat berfungsi sebagai tutor pintar yang adaptif, memberikan umpan balik personal (Ouyang et al., 2022; Hwang et al., 2020). Kombinasi keduanya berpotensi menciptakan "laboratorium digital" yang responsif.

Konteks lokal merupakan jiwa dari pembelajaran sosiosaintifik yang autentik. SMA Kristen Sonder di Minahasa berdekatan dengan aliran sungai yang rentan pencemaran limbah domestik dan pertanian. Sebagai solusi aplikatif, diangkat teknologi tepat guna pembuatan eco-enzym. Eco-enzym adalah larutan hasil fermentasi limbah organik yang memiliki multifungsi, termasuk sebagai agen bioremediasi yang dapat membantu menurunkan polutan organik dalam air (Syaiful et al., 2022; Foong et al., 2022). Aktivitas ini merupakan aksi nyata yang memungkinkan siswa mentransformasikan pengetahuan konseptual menjadi tindakan sosial yang berdampak. Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini mengembangkan dan mengimplementasikan media "Smart Digital Laboratory" (*Smart-DIL*) yang memadukan AR dan AI untuk materi Pencemaran Lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki implementasi *Smart-DIL* dalam: (1) menciptakan lingkungan belajar yang mendorong keaktifan dan antusiasme, dan (2) mengembangkan keterampilan sosiosaintifik serta sikap positif siswa melalui *project eco-enzym*.

METODE

Jenis dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain studi kasus instrumental (Stake, 1995; Creswell & Poth, 2018). Pendekatan kualitatif dipilih karena sesuai untuk mengeksplorasi fenomena secara mendalam dan holistik dalam konteks alamiahnya, di mana peneliti bertindak sebagai instrumen kunci. Desain studi kasus instrumental diterapkan karena kasus yang diteliti (implementasi *Smart-DIL* di satu sekolah) dipelajari secara mendalam untuk memberikan pemahaman dan insight

mengenai fenomena yang lebih luas, yaitu pengembangan keterampilan sosiosaintifik melalui integrasi teknologi imersif. Penelitian ini dilaksanakan di SMA Kristen Sonder, Kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara. Pemilihan lokasi didasarkan pada pertimbangan bahwa sekolah tersebut terletak di daerah yang menghadapi isu sosiosaintifik nyata, yaitu pencemaran air sungai, sehingga memberikan konteks yang autentik untuk penelitian. Penelitian berlangsung selama bulan Agustus hingga September 2023, mencakup tahap persiapan, implementasi, dan evaluasi.

Subjek penelitian terdiri dari 22 siswa kelas XI Program Ilmu Pengetahuan Alam (IPA). Pemilihan subjek dilakukan dengan teknik purposive sampling berdasarkan kriteria berikut: (1) siswa sedang menempuh materi pokok pencemaran lingkungan sesuai dengan alur pembelajaran Kurikulum Merdeka; (2) siswa mewakili karakteristik umum sekolah menengah atas di daerah dengan fasilitas standar (non-favorit); (3) siswa memiliki akses dan kemampuan dasar dalam mengoperasikan smartphone berbasis Android; serta (4) kesiediaan siswa dan orang tua/wali untuk berpartisipasi penuh dalam penelitian melalui penandatanganan informed consent. Pertimbangan etika penelitian menjadi prioritas, termasuk kerahasiaan data dan hak peserta untuk mengundurkan diri kapan saja.

Prosedur Pengembangan Aplikasi *Smart Digital Laboratory (Smart-DIL)*

Pengembangan aplikasi *Smart-DIL* mengikuti model penelitian dan pengembangan adaptasi dari model ADDIE (*Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation*) yang dilakukan secara iteratif.

1. *Analysis (Analisis Kebutuhan)*

Tahap ini meliputi: (a) Analisis kompetensi inti dan kompetensi dasar pada Kurikulum Merdeka untuk materi Pencemaran Lingkungan dan Kimia Berkelanjutan; (b) Analisis karakteristik *learners* (siswa SMA kelas XI), termasuk gaya belajar dan kesiapan teknologi; (c) Analisis konteks sosiosaintifik lokal, yaitu identifikasi sumber dan jenis pencemaran di Sungai Sonder melalui observasi awal dan studi dokumen; (d) Analisis teknis terhadap kebutuhan perangkat lunak dan keras.

2. *Design (Perancangan)*

Pada tahap ini dirancang: (a) Storyboard alur pembelajaran yang terintegrasi dengan aplikasi, termasuk skenario penggunaan untuk

setiap pertemuan; (b) Desain visual antarmuka pengguna dan pengalaman pengguna yang intuitif dan sesuai untuk usia siswa; (c) Perancangan objek digital 3D dari model molekul polutan seperti fosfat dalam deterjen, nitrat dari pupuk, animasi proses eutrofikasi, dan aliran sungai virtual) menggunakan perangkat lunak Blender; (d) Perancangan *marker-based* AR yang stabil; (e) Perancangan arsitektur knowledge base dan alur dialog untuk fitur *chatbot AI "Asisten Lab Digital"* menggunakan platform Google Dialogflow. Corpus pengetahuan *chatbot* diisi dengan konten terkait materi pencemaran, *eco-enzym*, dan data lokal.

3. *Development (Pengembangan)*

Aplikasi dibangun menggunakan game engine Unity3D versi 2021.3. LTS dengan integrasi Vuforia SDK untuk fungsi Augmented Reality. Fitur AI diintegrasikan melalui *REST API* dari *Google Dialogflow Engine* yang telah dilatih dengan berbagai variasi pertanyaan dan pernyataan dalam Bahasa Indonesia untuk meningkatkan akurasi *Natural Language Understanding (NLU)*. Aplikasi kemudian di-build untuk platform Android.

4. *Implementation (Implementasi)*

Aplikasi yang telah melalui tahap uji alpha (uji validitas oleh satu ahli media dan satu ahli materi) dan revisi, diimplementasikan dalam tiga pertemuan terstruktur. Sebelum penggunaan, dilakukan orientasi singkat kepada siswa tentang cara mengoperasikan aplikasi.

5. *Evaluation (Evaluasi)*

Evaluasi formatif dilakukan selama proses implementasi melalui observasi dan wawancara singkat. Evaluasi sumatif dilakukan di akhir penelitian untuk mengukur efektivitas keseluruhan media dan proses pembelajaran.

Instrumen dan Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan teknik triangulasi untuk memastikan validitas dan reliabilitas data.

1. *Observasi Partisipan Pasif*

Dilakukan menggunakan lembar observasi terstruktur yang diadaptasi dari Fjørtoft et al. (2019). Lembar observasi berisi indikator operasional untuk mengukur: (a) Keaktifan Belajar: diukur dari frekuensi interaksi dengan aplikasi (memindai marker, memanipulasi objek 3D), kuantitas dan kualitas kontribusi dalam diskusi kelompok, serta jumlah pertanyaan yang diajukan; (b) Antusiasme Belajar: diukur dari

ekspresi wajah (senang, kagum, penasaran), gestur tubuh (bersemangat, condong ke depan), dan tingkat partisipasi dalam tugas kelompok.

2. *Wawancara Mendalam Semi-terstruktur*

Wawancara mendalam semi-terstruktur dilakukan terhadap 6 siswa yang dipilih untuk mewakili variasi tingkat kemampuan akademik (tinggi, sedang, rendah) dan 1 orang guru kimia. Pedoman wawancara berisi pertanyaan terbuka yang terfokus pada: (a) Pengalaman subjektif dan persepsi siswa terhadap kegunaan (*usability*) dan kemudahan penggunaan (*ease of use*) aplikasi *Smart-DIL*; (b) Pemahaman siswa tentang hubungan antara konsep kimia yang dipelajari dengan isu pencemaran di Sungai Sonder; (c) Motivasi, perasaan, dan persepsi siswa terhadap kegiatan pembuatan *eco-enzym*; (d) Persepsi guru terhadap dampak aplikasi terhadap proses pembelajaran. Wawancara direkam dan ditranskripsikan secara verbatim.

3. *Kuesioner Respon Siswa*

Kuesioner berisi skala Likert 1-5 (dari Sangat Tidak Setuju hingga Sangat Setuju) dan beberapa pertanyaan terbuka. *Kuesioner* ini mengadaptasi instrumen *Technology Acceptance Model* (Davis, 1989) untuk mengukur dua konstruk utama: Persepsi Kegunaan (*Perceived Usefulness*) dan Persepsi Kemudahan Penggunaan (*Perceived Ease of Use*) terhadap aplikasi *Smart-DIL*.

4. *Studi Dokumentasi*

Teknik ini meliputi: (a) Perekaman foto dan video selama kegiatan pembelajaran dan praktik untuk menguatkan data observasi; (b) Analisis jurnal refleksi siswa yang ditulis setelah kegiatan untuk memahami proses meta-kognisi dan perkembangan sikap mereka; (c) Analisis artefak hasil kerja kelompok, seperti lembar kerja dan proposal ide solusi.

Teknik Analisis Data

Data yang terkumpul dianalisis secara interaktif dan berkelanjutan mengikuti model analisis data kualitatif Miles, Huberman, dan Saldana (2020), yang terdiri dari tiga alur kegiatan yang saling terkait:

1. *Data Condensation (Reduksi Data)*

Proses ini melibatkan pemilihan, pemusatan, penyederhanaan, abstraksi, dan transformasi data mentah yang berasal dari catatan lapangan, transkrip wawancara, hasil *kuesioner*, dan dokumen lainnya. Data direduksi melalui proses *coding*. *Coding* awal (*open*

coding) dilakukan untuk mengidentifikasi tema-tema besar seperti "engagement", "pemahaman konseptual", "sikap lingkungan", dan "tantangan teknis". Selanjutnya, dilakukan axial coding untuk menghubungkan kategori-kategori yang muncul.

2. Data Display (Penyajian Data)

Data yang telah direduksi kemudian disajikan dalam bentuk yang memungkinkan untuk penarikan kesimpulan. Penyajian data dalam penelitian ini berupa narasi teks yang deskriptif dan analitis, matriks yang menyajikan hubungan antar tema, serta bagan alur untuk memvisualisasikan proses perubahan yang terjadi pada siswa.

3. Conclusion Drawing/Verification (Penarikan dan Verifikasi Kesimpulan)

Pada tahap penarikan dan verifikasi kesimpulan, peneliti mulai menarik makna dari data yang telah disajikan. Pola-pola, hubungan-hubungan, penjelasan, dan konfigurasi yang dapat menjawab pertanyaan penelitian diidentifikasi. Kesimpulan yang muncul diverifikasi secara terus-menerus selama proses penelitian melalui teknik *member checking* untuk memastikan interpretasi peneliti sesuai dengan persepsi subjek penelitian dan *peer debriefing* melalui diskusi dengan rekan sejawat untuk menguji keabsahan interpretasi.

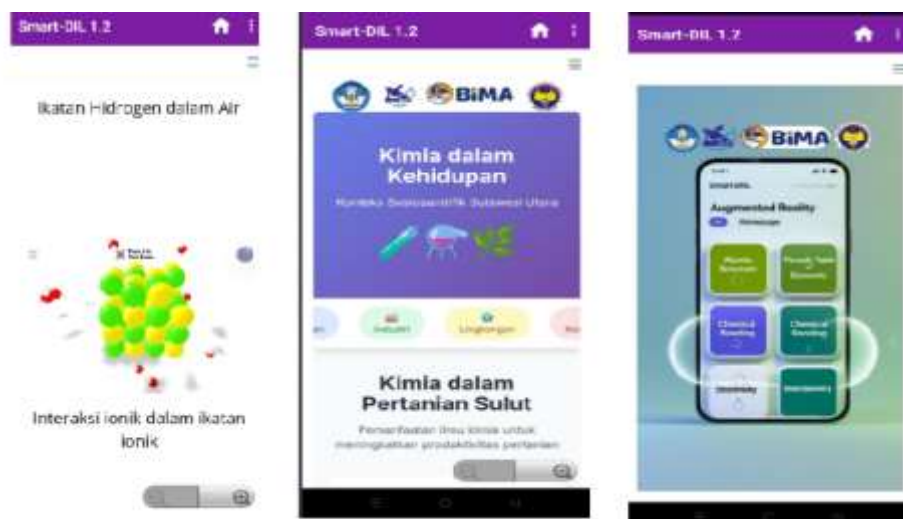
HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Dinamika Implementasi Aplikasi Smart Digital Laboratory

Implementasi aplikasi *Smart-DIL* berlangsung dalam tiga tahap pembelajaran yang terstruktur, masing-masing menunjukkan perkembangan yang jelas dalam keterlibatan dan pemahaman siswa.



Gambar 1. Logo tampilan *Smart-DIL*



Gambar 2 Tampilan Menu dan materi *Smart-DIL*

Pertemuan 1 (Eksplorasi Konseptual):

Pembelajaran diawali dengan pemutaran video dokumenter singkat yang menggambarkan kondisi aktual Sungai Sonder. Fase ini berhasil membangkitkan rasa ingin tahu dan empati siswa. Saat aplikasi *Smart-DIL* diperkenalkan,

terjadi transisi menuju lingkungan belajar yang sangat interaktif. Siswa secara berkelompok memindai marker yang tersedia di meja mereka. Di layar smartphone, muncul model 3D sungai virtual yang di dalamnya terkandung ikon-ikon berbagai polutan (limbah deterjen, pestisida,

sampah organik, limbah peternakan). Interaksi dengan setiap ikon—dengan mengetuknya—menampilkan informasi detail berupa pop-up teks dan suara yang menjelaskan komposisi kimia polutan, dampaknya terhadap kesehatan ekosistem air, dan data simulasi konsentrasinya. Fitur *chatbot* AI "Asisten Lab Digital" digunakan secara intensif. Siswa tidak hanya bertanya tentang definisi konsep ("Apa itu BOD?") tetapi juga mulai menghubungkan konsep dengan konteks ("Mengapa fosfat dari deterjen berbahaya untuk sungai kita?").

Pertemuan 2 (Pemecahan Masalah Sosiosaintifik):

Fokus pembelajaran bergeser dari pemahaman masalah ke pencarian solusi. Aplikasi menyajikan sebuah skenario tantangan: "Desain sebuah kampanye berbasis sains untuk mengurangi pencemaran di sungai kita." Siswa kemudian diarahkan oleh guru untuk membuka modul "Solusi Hijau" dalam *Smart-DIL*. Modul ini menampilkan animasi AR yang menjelaskan langkah-langkah pembuatan *eco-enzym* dan visualisasi bagaimana enzim dalam larutan tersebut bekerja mendegradasi molekul polutan organik secara mikroskopis. Siswa bekerja dalam

kelompok untuk menganalisis kelebihan dan kekurangan dari solusi ini, serta merancang proposal sederhana untuk melakukan implementasi di lingkungan tempat tinggal.

Pertemuan 3 (Aksi dan Refleksi):

Pembelajaran terjadi di luar ruangan. Siswa secara langsung mempraktikkan pembuatan *eco-enzym*. Mereka membawa limbah dapur berupa kulit buah dan sayur dari rumah. Melalui panduan dan guru, siswa mencampurkan gula merah, sampah, dan air dengan komposisi 1:3:10 ke dalam wadah plastik. Kegiatan ini diwarnai dengan semangat kolaborasi dan rasa kepemilikan. Setelahnya, siswa menulis jurnal refleksi yang menceritakan pengalaman belajar mereka secara keseluruhan, mulai dari eksplorasi digital hingga aksi nyata.

2. Peningkatan Keaktifan dan Antusiasme Belajar

Data dari lembar observasi menunjukkan peningkatan yang sangat signifikan dalam indikator keaktifan dan antusiasme belajar jika dibandingkan dengan baseline observasi pada pertemuan-pertemuan kimia sebelumnya yang bersifat konvensional.

Tabel 1. Peningkatan Jumlah Pertanyaan

Kondisi	Rata-rata Jumlah Pertanyaan per Kelompok
Pembelajaran Konvensional (<i>Baseline</i>)	5
Pertemuan 1 (dengan <i>Smart-DIL</i>)	15
Pertemuan 2 (dengan <i>Smart-DIL</i>)	20
Pertemuan 3 (dengan <i>Smart-DIL</i>)	12 (kegiatan praktik)

a. *Keaktifan*: Rata-rata frekuensi interaksi siswa dengan perangkat untuk memindai, memanipulasi objek 3D per-kelompok untuk setiap pertemuan mencapai 15-20 kali. Jumlah pertanyaan yang diajukan kepada guru dan chatbot meningkat lebih dari 75%. Kualitas pertanyaan juga berkembang dari yang bersifat definisional ("Apa itu...?") menjadi bersifat sebab-akibat, hipotetis, dan aplikatif ("Bagaimana jika...?", "Apakah *eco-enzym* bisa digunakan untuk mengolah limbah ternak?"). Dinamika diskusi dalam kelompok menjadi sangat hidup, dengan siswa saling menunjukkan temuan di layar mereka dan berdebat secara konstruktif untuk menyelesaikan tugas.

b. *Antusiasme*: Data nonverbal menunjukkan indikator antusiasme yang kuat. Ekspresi wajah siswa didominasi oleh rasa kagum,

senang, dan penasaran. Bahasa tubuh mereka aktif dan tertuju pada perangkat dan anggota kelompok (condong ke depan, menunjuk layar, *high-five*). Suasana kelas yang sebelumnya sering pasif berubah menjadi riuh rendah oleh diskusi dan ekspresi kekaguman. Dalam kuesioner, 95% siswa menyatakan "Sangat Setuju" atau "Setuju" dengan pernyataan bahwa pembelajaran dengan *Smart-DIL* "lebih menyenangkan dan tidak membosankan".

3. Perkembangan Sikap Positif dan Keterampilan Sosiosaintifik

Temuan yang paling substantif dari penelitian ini adalah perkembangan yang teramat pada ranah afektif dan keterampilan sosiosaintifik siswa.

a. *Sikap positif dan kepedulian lingkungan*: Hasil analisis terhadap jurnal refleksi siswa dan transkrip wawancara

mengungkap dominasi emosi dan sikap positif. Kata-kata seperti "bangga", "bermanfaat", "bersemangat", "tidak sabar untuk melihat hasilnya", dan "ingin mengajak keluarga membuatnya di rumah" muncul berulang kali. Seorang siswa (S08) menulis dalam jurnalnya: "Selama ini saya hanya membuang sampah organik. Sekarang saya tahu bisa jadi sesuatu yang sangat berguna. Rasanya seperti menjadi superhero lingkungan." Pernyataan ini merefleksikan tumbuhnya *environmental self-efficacy* keyakinan diri untuk dapat berkontribusi pada penyelesaian masalah lingkungan.

- b. *Keterampilan sosiosaintifik*: Melalui proses diskusi dalam menganalisis skenario di Pertemuan 2, siswa menunjukkan perkembangan dalam keterampilan inti sosiosaintifik. Mereka dapat mengidentifikasi berbagai pemangku kepentingan (*stakeholders*) yang terlibat (pemerintah desa, masyarakat, petani, pelaku usaha), mempertimbangkan dampak ekonomi (biaya murah) dan sosial (pemberdayaan masyarakat) dari solusi eco-enzym, dan membandingkannya dengan opsi lain yang mahal. Proses ini menunjukkan kemampuan *reasoning etis* dan *pengambilan keputusan yang informed* yang merupakan inti dari keterampilan sosiosaintifik (Zeidler & Nichols, 2022). Aksi pembuatan eco-enzym merupakan kristalisasi dari keterampilan ini, menunjukkan kemampuan untuk *mentransformasikan pengetahuan menjadi aksi sosial yang bertanggung jawab*.

Pembahasan

Temuan penelitian ini memberikan bukti empiris yang kuat tentang keefektifan integrasi teknologi *Augmented Reality* (AR) dan *Artificial Intelligence* (AI) dalam bentuk aplikasi *Smart Digital Laboratory* (*Smart-DIL*) untuk mentransformasi pembelajaran kimia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Smart-DIL* tidak hanya berfungsi sebagai alat yang meningkatkan *engagement*, tetapi juga berperan sebagai katalis yang sangat kuat untuk pengembangan keterampilan sosiosaintifik dan sikap peduli lingkungan.

1. Membangun *Cognitive Engagement* melalui *Immersive Experience*

Tingginya keaktifan dan antusiasme siswa selama menggunakan *Smart-DIL* dapat

dijelaskan melalui teori *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (Mayer, 2019) dan konsep *presence* dalam lingkungan virtual. AR dalam *Smart-DIL* menyajikan visualisasi spasial yang powerful dari konsep-konsep kimia yang abstrak seperti molekul polutan dan proses eutrofikasi. Hal ini memfasilitasi proses pembangunan model mental yang lebih akurat pada diri siswa, karena informasi disajikan secara visual dan verbal dalam konteks yang nyata (Belda-Medina & Marrahi-Gomez, 2023; Wu et al., 2013).

Pengalaman "melihat" polutan yang seolah-olah ada di atas meja mereka menciptakan tingkat *immersion* yang tinggi, yang memicu rasa ingin tahu dan mendorong eksplorasi aktif. Sementara itu, kehadiran fitur *chatbot* AI menciptakan lingkungan belajar yang *personalized* dan *low-risk*. Siswa dapat mengajukan pertanyaan tanpa rasa takut dihakimi oleh guru atau teman, yang pada akhirnya mengurangi *learning anxiety* dan mendorong keberanian untuk bertanya dan bereksplorasi (Ouyang et al., 2022; Hwang et al., 2020). Kombinasi antara daya tarik visual AR dan dukungan personal dari AI ini menciptakan kondisi optimal untuk *cognitive engagement*.

2. Menjembatani Kesenjangan antara Teori Abstrak dan Aksi Nyata

Temuan kunci penelitian ini adalah bagaimana *Smart-DIL* berhasil menjembatani kesenjangan yang sering terjadi antara pemahaman konseptual dan kesiapan untuk beraksi. Aplikasi ini berfungsi sebagai *cognitive scaffold* yang memandu siswa melalui proses *inquiry* yang kompleks. Visualisasi dampak pencemaran yang *immersive* melalui AR tidak hanya menyampaikan informasi kognitif, tetapi juga menyentuh ranah afektif dengan membangkitkan empati dan rasa urgensi untuk bertindak (Belda-Medina & Marrahi-Gomez, 2023). Siswa tidak lagi memandang pencemaran sebagai konsep abstrak dalam buku teks, tetapi sebagai masalah nyata yang mengancam lingkungan langsung mereka. Lebih lanjut, modul yang menyajikan solusi eco-enzym memberikan siswa tidak hanya pengetahuan "mengapa" tetapi juga "bagaimana". Animasi proses pembuatan dan mekanisme kerjanya memberikan pemahaman mendalam yang menjadi dasar bagi keyakinan diri (*self-efficacy*) untuk melakukan aksi nyata. Hal ini sejalan dengan teori *Theory of Planned Behavior* yang

menyatakan bahwa niat untuk melakukan suatu perilaku (seperti perilaku pro-lingkungan) dipengaruhi oleh *attitude toward the behavior*, *subjective norms*, dan *perceived behavioral control* (Ajzen, 1991). *Smart-DIL* secara efektif membentuk *attitude* yang positif dan meningkatkan *perceived behavioral control* dengan menunjukkan bahwa solusi itu feasible dan dapat dilakukan. Oleh karena itu, kegiatan pembuatan eco-enzym bukan sekadar praktik manual, tetapi merupakan kelanjutan logis dan embodiment dari proses pemahaman dan pembentukan sikap yang telah dibangun melalui eksplorasi digital.

3. Mengembangkan Keterampilan Sosiosaintifik dalam Konteks Autentik

Implementasi *Smart-DIL* menyediakan platform yang ideal untuk melatih keterampilan sosiosaintifik. Skenario pemecahan masalah yang disajikan memaksa siswa untuk melampaui pemikiran sains murni. Mereka harus mempertimbangkan dimensi etis (keadilan dalam pembagian tanggung jawab), dimensi ekonomi (biaya yang terjangkau), dan dimensi sosial (keterlibatan masyarakat) dari solusi yang mereka ajukan (Sadler, 2022; Zeidler & Nichols, 2022). Proses diskusi dalam kelompok untuk merancang proposal kampanye melatih kemampuan berargumentasi, bernegosiasi, dan berkolaborasi. Dengan demikian, pembelajaran menjadi selaras dengan prinsip *contextual teaching and learning* dan *socio-scientific issues-based education*. Konteks lokal (pencemaran Sungai Sonder) memberikan *authenticity* yang tidak dapat digantikan oleh contoh-contoh buku teks. Siswa belajar bahwa sains bukanlah disiplin ilmu yang terisolasi, tetapi merupakan alat yang powerful untuk memahami dan memecahkan masalah dalam masyarakatnya (Sjöström & Eilks, 2018). Project eco-enzym merupakan contoh konkret dari *green chemistry* dan *education for sustainable development*, yang memperkenalkan siswa pada paradigma berkelanjutan dan ekonomi sirkular (Syaiful et al., 2022).

4. Implikasi Pedagogis dan Tantangan

Temuan penelitian ini memiliki implikasi penting bagi praktik pedagogis dalam era Kurikulum Merdeka. Guru didorong untuk beralih dari peran sebagai penyampai informasi tunggal menjadi fasilitator yang mendesain pengalaman belajar yang kaya teknologi dan

berpusat pada siswa. Integrasi teknologi seperti AR dan AI tidak lagi dipandang sebagai hiburan semata, tetapi sebagai komponen integral untuk mencapai tujuan pembelajaran kompetensi abad ke-21.

Namun, beberapa tantangan perlu diakui. *Pertama*, diperlukan investasi dalam pelatihan guru untuk menguasai tidak hanya kemampuan teknis menggunakan aplikasi, tetapi juga pedagogi untuk mengintegrasikannya secara efektif ke dalam RPP. *Kedua*, kesenjangan digital dan ketersediaan infrastruktur (seperti kuota internet dan *smartphone*) di beberapa daerah masih menjadi kendala. *Ketiga*, pengembangan konten digital yang berkualitas dan kontekstual memerlukan waktu dan kolaborasi antara guru, ahli materi, dan pengembang perangkat lunak.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Aplikasi *Smart Digital Laboratory (Smart-DIL)* berbasis *Augmented Reality* dan *Artificial Intelligence* berhasil diimplementasikan sebagai media inovatif yang menciptakan pengalaman belajar kimia yang imersif, interaktif, dan kontekstual bagi siswa SMA Kristen Sonder.
2. Implementasi *Smart-DIL* secara signifikan meningkatkan keaktifan dan antusiasme belajar siswa. Teknologi AR berhasil memvisualisasikan abstraksi konsep kimia, sementara fitur AI chatbot menciptakan lingkungan belajar yang personal dan aman, yang mendorong rasa ingin tahu dan partisipasi aktif.
3. Aplikasi *Smart-DIL* efektif dalam mengembangkan keterampilan sosiosaintifik dan menumbuhkan sikap positif siswa terhadap isu lingkungan. Pemahaman konseptual yang diperoleh melalui eksplorasi virtual berhasil ditransformasikan menjadi aksi nyata yang bertanggung jawab melalui project pembuatan eco-enzym, yang merepresentasikan pencapaian tertinggi dari pembelajaran sosiosaintifik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang tulus kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DPPM), Kementerian Pendidikan, Kebudayaan,

Riset, dan Teknologi atas dukungan pendanaan program PKM tahun pelaksanaan 2025. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada SMA Kristen Sonder selaku mitra kolaborasi yang telah memfasilitasi pelaksanaan penelitian. Penghargaan yang setinggi-tingginya disampaikan kepada Universitas Negeri Manado atas dukungan kelembagaan dan fasilitas yang diberikan serta kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam program Implementasi *Smart-DIL* berbasis AR dan AI di SMAK Sonder.

REFERENSI

- Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50(2), 179–211. [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T)
- Amirbekova, E., Shertayeva, N., & Mironova, E. (2023). Teaching chemistry in the metaverse: the effectiveness of using virtual and augmented reality for visualization. *Frontiers in Education*, 8. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1184768>
- Belda-Medina, J., & Marrahi-Gomez, V. (2023). The Impact of Augmented Reality (AR) on Vocabulary Acquisition and Student Motivation. *Electronics (Switzerland)*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/electronics12030749>
- Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches* (4th ed.). SAGE Publications.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319–340. <https://doi.org/10.2307/249008>
- Fjertoft, S. O., Sandvik, L. V., & Buland, T. (2019). The use of observation in health professions education research: A review. *Medical Education*, 53(5), 432–440. <https://doi.org/10.1111/medu.13801>
- Foong, C. S., Sarbon, N. M., & How, M. S. (2022). Eco-enzyme: A potential multifunctional product from fruit and vegetable waste. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1092(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1092/1/012001>
- Hwang, G.-J., Xie, H., Wah, B. W., & Gašević, D. (2020). Vision, challenges, roles and research issues of Artificial Intelligence in Education. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 1, 100001. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2020.100001>
- Kemdikbudristek. (2022). *Peraturan Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Nomor 7 Tahun 2022 tentang Standar Isi pada Pendidikan Anak Usia Dini, Jenjang Pendidikan Dasar, dan Jenjang Pendidikan Menengah*.
- Lazos, P., Stefanidou, C., & Skordoulis, C. (2024). Bridging the gap: From the laboratory science education of the 19th century in Greece to STEM education. *European Journal of Science and Mathematics Education*, 12(1). <https://doi.org/10.30935/scimath/13826>
- Mayer, R. E. (2019). *Multimedia learning* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldana, J. (2020). *Qualitative data analysis: A methods sourcebook* (4th ed.). SAGE Publications.
- Ouyang, F., Zheng, L., & Jiao, P. (2022). Artificial intelligence in online higher education: A systematic review of empirical research from 2014 to 2022. *Education and Information Technologies*, 27(6), 7893–7925. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-10925-9>
- Sadler, T. D. (2022). *Socio-scientific issues in the classroom: Teaching, learning and research*. Springer.
- Sjöström, J., & Eilks, I. (2018). Reconsidering different visions of scientific literacy and science education based on the concept of *Bildung*. In *Cognitive and affective aspects in science education research* (pp. 65–77). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58685-4_6
- Stake, R. E. (1995). *The art of case study research*. SAGE Publications.
- Syaiful, A. Z., Hermawati, H., & Al-Gazali, A.-G. (2022). PENINGKATAN PENGETAHUAN, SIKAP DAN PERILAKU SISWA SMPMQ KHAIRU UMMAH TENTANG PENGELOLAAN SAMPAH MELALUI PEMBELAJARAN BERBASIS PROYEK PEMBUATAN

- ECO ENZYME. UNM Environmental Journals, 5(2). <https://doi.org/10.26858/uej.v5i2.42873>
- Wu, H.-K., Lee, S. W.-Y., Chang, H.-Y., & Liang, J.-C. (2013). Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. *Computers & Education*, 62, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.10.024>
- Zeidler, D. L., & Nichols, B. H. (2022). Socioscientific issues: Theory and practice. *Journal of Research in Science Teaching*, 59(4), 537–540. <https://doi.org/10.1002/tea.21765>