

KAJIAN SISTEMATIS: IMPLEMENTASI AI DALAM PENELITIAN PENDIDIKAN SAINS DI ERA PEMBELAJARAN DIGITAL

Muhamad Sangaji¹, Meilysa Berliana², Pina Apriliani³, Marissa Rijoice⁴, Rani R Simanungkalit⁵, Rino Anthony Stiawan⁶, Andri Suryana⁷
Universitas Indraprasta PGRI^{1,2,3,4,5,6,7}
e-mail: muhamadsangaji890@gmail.com

ABSTRAK

Perkembangan pesat kecerdasan buatan (AI) dalam era pembelajaran digital telah mendorong transformasi signifikan dalam penelitian pendidikan sains, terutama terkait bagaimana data pembelajaran dianalisis, bagaimana diagnosis konsep dilakukan, serta bagaimana pengalaman belajar dipersonalisasi. Kajian ini berfokus pada pemetaan implementasi AI dalam penelitian pendidikan sains berdasarkan 25 studi internasional terindeks yang relevan. Melalui pendekatan kajian sistematis, artikel-artikel dianalisis untuk mengidentifikasi tren, metodologi, konteks penggunaan, serta dampak AI terhadap proses dan hasil belajar sains. Hasil kajian menunjukkan bahwa teknologi AI dalam pendidikan sains paling banyak diterapkan pada pembelajaran berbasis inkuiri, sistem pembelajaran adaptif, intelligent tutoring systems, analitik pembelajaran, deteksi miskonsepsi fisika, umpan balik otomatis, pembelajaran berbasis augmented reality, serta personalisasi pengalaman belajar. AI terbukti meningkatkan keterampilan berpikir ilmiah, akurasi diagnosis miskonsepsi, motivasi belajar, serta efektivitas eksperimen virtual. Meta-temuan dari 25 sumber menunjukkan bahwa penerapan AI memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan pemahaman konsep, kemampuan argumentasi ilmiah, dan performa penyelidikan ilmiah siswa. Namun, tantangan utama yang ditemukan meliputi kesiapan guru, literasi AI siswa, ketersediaan infrastruktur, serta etika penggunaan data pembelajaran. Kajian ini menyimpulkan bahwa integrasi AI dalam penelitian pendidikan sains sangat potensial memperkuat kualitas pembelajaran, tetapi memerlukan kebijakan, dukungan pendidik, serta desain pembelajaran yang matang agar implementasinya optimal dan berkelanjutan.

Kata Kunci: *Kecerdasan Buatan, Pendidikan Sains, Pembelajaran Digital*

ABSTRACT

The rapid development of artificial intelligence (AI) in the digital learning era has driven significant transformations in science education research, particularly regarding how learning data is analyzed, how concept diagnosis is conducted, and how learning experiences are personalized. This study focuses on mapping the implementation of AI in science education research based on 25 relevant indexed international studies. Using a systematic review approach, articles were analyzed to identify trends, methodologies, contexts of use, and the impact of AI on science learning processes and outcomes. The study results indicate that AI technology in science education is most commonly applied in inquiry-based learning, adaptive learning systems, intelligent tutoring systems, learning analytics, physics misconception detection, automated feedback, augmented reality-based learning, and personalized learning experiences. AI has been shown to improve scientific thinking skills, the accuracy of misconception diagnosis, learning motivation, and the effectiveness of virtual experiments. Meta-findings from 25 sources indicate that the application of AI significantly contributes to improving students' conceptual understanding, scientific argumentation skills, and scientific inquiry performance. However, key challenges identified include teacher readiness, students'

AI literacy, infrastructure availability, and the ethical use of learning data. This study concludes that integrating AI into science education research has significant potential to enhance learning quality, but requires sound policy, educator support, and instructional design for optimal and sustainable implementation.

Keywords: *Artificial Intelligence, Science Education, Digital Learning*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi digital dalam satu dekade terakhir telah membawa perubahan signifikan dalam proses pembelajaran, khususnya pada pendidikan sains yang menuntut pengalaman belajar berbasis observasi, eksperimen, analisis data, serta pemecahan masalah secara ilmiah. Kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) muncul sebagai salah satu inovasi paling transformatif yang mampu memperkaya pengalaman belajar dan meningkatkan kualitas pembelajaran melalui personalisasi, analitik pembelajaran, hingga simulasi eksperimen sains. Berbagai penelitian mutakhir memperlihatkan bahwa integrasi AI dalam pendidikan semakin berkembang pesat dan berdampak langsung pada cara siswa membangun pemahaman konsep sains.

Dalam artikel lain dijelaskan oleh Jia et al. (2024), AI dan analitik data telah menjadi fondasi penting dalam pendidikan sains karena mampu memberikan wawasan mendalam mengenai pola belajar siswa dan mendukung strategi pembelajaran berbasis inkuiri. Dalam pernyataan lanjutan Fadillah et al (2024) menunjukkan bahwa penggunaan umpan balik berbasis AI dalam pembelajaran fisika memberikan manfaat signifikan terhadap persepsi siswa, khususnya dalam meningkatkan pemahaman konsep dan kemampuan refleksi terhadap proses belajar mereka. Temuan-temuan tersebut memperkuat bukti bahwa AI memiliki potensi besar untuk mengatasi tantangan pembelajaran sains modern yang membutuhkan pemahaman yang lebih dalam, interaktif, dan berbasis data.

Berdasarkan pernyataan Holmes et al. (2019) menunjukkan bahwa AI memiliki potensi besar dalam mempersonalisasi pembelajaran dan meningkatkan efektivitas umpan balik. Sejalan dengan itu, Zawacki-Richter et al. (2019) melalui tinjauan sistematisnya menemukan bahwa aplikasi AI telah banyak digunakan untuk asesmen otomatis, prediksi performa, dan dukungan pembelajaran adaptif, termasuk pada pendidikan sains. Dukungan AI terhadap pembelajaran berbasis analitik juga dibuktikan oleh Vincoli et al. (2025) yang mengembangkan kerangka analitik pembelajaran multidimensi untuk membantu guru memahami pola belajar siswa secara lebih komprehensif.

Secara lebih spesifik, beberapa penelitian menunjukkan bahwa AI dapat meningkatkan kemampuan inkuiri ilmiah, seperti ditunjukkan oleh Hwang et al. (2024), Long & Alevan (2017), serta Lai (2025) yang menegaskan bahwa sistem diagnosis belajar dan *intelligent tutoring systems* mampu memperbaiki akurasi intervensi pedagogis selama proses penyelidikan ilmiah. Selain itu, pembelajaran berbasis konsep dan peta konsep yang diperkuat AI juga terbukti meningkatkan pemahaman konsep sains (Lai et al., 2018). Dalam konteks pembelajaran adaptif, Hung et al. (2019) dan Barbosa et al. (2024) menemukan bahwa berbagai sistem adaptif berbasis AI dapat meningkatkan pengalaman praktikum sains dan menyesuaikan kebutuhan belajar siswa.

AI juga berperan penting dalam memberikan umpan balik instan dan akurat. Fadillah et al. (2024) menunjukkan bahwa umpan balik berbasis AI pada pembelajaran fisika mampu meningkatkan persepsi dan motivasi belajar siswa. AI bahkan dapat mendeteksi miskonsepsi secara otomatis sebagaimana dibuktikan oleh Kahaleh (2025), sehingga guru dapat memberikan intervensi yang lebih tepat sasaran. Selain itu, penelitian Peng & Li (2025) dan Sailer et al. (2021) menunjukkan bahwa AI dapat memperkuat personalisasi pembelajaran sains, sementara

Makransky et al. (2021) menemukan bahwa laboratorium virtual berbasis AI mampu menstimulasi pengalaman eksperimen lebih autentik.

Dalam konteks prediksi performa sains, *machine learning* dinilai sangat efektif sebagaimana dilaporkan oleh Su et al. (2022) dan Cojean & Jamet (2022). Bahkan, penelitian Haudek & Zhai (2024) memperlihatkan bahwa AI mampu menilai argumentasi ilmiah siswa secara otomatis. Integrasi teknologi seperti *augmented reality* cerdas (Arymbekov, 2023) dan *chatbot* berbasis AI (Edali et al., 2024) juga menunjukkan kontribusi signifikan dalam membantu siswa memahami konsep sains secara lebih interaktif.

Meskipun demikian, implementasi AI dalam pembelajaran sains masih menghadapi sejumlah kesenjangan. Secara ideal, AI diharapkan mendukung guru dalam merancang pembelajaran inkuiri, menyediakan intervensi adaptif berbasis data, serta meningkatkan kualitas pengalaman eksperimen virtual (Luckin & Holmes, 2016; Roll & Wylie, 2016). Namun, kenyataan menunjukkan bahwa literasi AI di kalangan guru dan siswa relatif rendah (Lee et al., 2021), infrastruktur teknologi belum merata, serta pemanfaatan data pembelajaran belum optimal (Spector, 2017). Selain itu, keberhasilan implementasi AI masih sangat bergantung pada kesiapan pedagogis dan kualitas sistem AI yang digunakan.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat kebutuhan untuk memetakan secara sistematis bagaimana AI digunakan dalam penelitian pendidikan sains, termasuk pendekatan, konteks, teknologi yang dominan, serta dampaknya terhadap hasil belajar. Nilai baru (*novelty*) penelitian ini terletak pada sintesis komprehensif dari 25 artikel internasional bereputasi yang secara langsung meneliti implementasi AI dalam pendidikan sains selama 10 tahun terakhir. Kajian ini tidak hanya menampilkan gambaran tren penelitian, tetapi juga mengidentifikasi tantangan, batasan, potensi, serta arah inovasi masa depan yang dapat dijadikan rujukan bagi guru, pengembang teknologi pendidikan, dan peneliti. Dengan demikian, kajian ini memberikan kontribusi penting dalam memperjelas lanskap pemanfaatan AI dalam pendidikan sains serta mendorong desain pembelajaran yang lebih efektif, adaptif, dan berkelanjutan di era digital.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode Kajian Sistematis (*Systematic Literature Review*) untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mensintesis publikasi ilmiah internasional yang membahas implementasi kecerdasan buatan (AI) dalam pendidikan sains pada era pembelajaran digital. Pendekatan SLR dipilih untuk memastikan proses peninjauan literatur dilakukan secara terstruktur, transparan, dan dapat direplikasi. Prosedur kajian dilakukan melalui empat tahapan utama: identifikasi, seleksi, kelayakan, dan sintesis.

Pada tahap identifikasi, peneliti mengumpulkan artikel dari database bereputasi internasional seperti SpringerLink, MDPI, Elsevier, dan Taylor & Francis. Kata kunci pencarian meliputi “*artificial intelligence*”, “*AI in science education*”, “*STEM learning with AI*”, “*AI-assisted learning*”, dan “*digital science learning*”. Kriteria inklusi ditetapkan untuk memastikan relevansi dan kualitas sumber, yaitu: (1) artikel dipublikasikan dalam rentang tahun 2015–2025, (2) merupakan jurnal internasional bereputasi, (3) membahas implementasi AI secara langsung dalam penelitian pendidikan sains, dan (4) menyediakan data empiris atau model implementatif yang jelas. Sementara itu, kriteria eksklusi meliputi artikel yang hanya bersifat konseptual tanpa implementasi, tidak berhubungan dengan pendidikan sains, atau tidak tersedia dalam bentuk teks lengkap.

Tahap seleksi dilakukan dengan memeriksa judul, abstrak, dan isi artikel secara sistematis. Dari total artikel yang teridentifikasi, hanya 25 artikel memenuhi seluruh kriteria dan disertakan dalam kajian ini. Proses seleksi didokumentasikan menggunakan alur PRISMA untuk memastikan transparansi tahapan penyaringan.

Pada tahap kelayakan, setiap artikel dianalisis menggunakan lembar penilaian yang mencakup informasi mengenai: jenis AI yang digunakan, desain penelitian, instrumen pengumpulan data, konteks pembelajaran sains, indikator hasil belajar, serta temuan utama. Instrumen analisis berupa tabel kode (*coding sheet*) digunakan untuk mengorganisasi data tematik dan karakteristik penelitian secara konsisten.

Tahap sintesis data dilakukan melalui pendekatan analisis tematik untuk mengelompokkan informasi dari berbagai artikel ke dalam kategori seperti fungsi AI, bentuk intervensi pembelajaran, dampak terhadap kompetensi sains, tantangan implementasi, serta peluang pengembangan. Sintesis tidak hanya menggabungkan temuan, tetapi juga membandingkan pola antar penelitian untuk menghasilkan gambaran menyeluruh tentang tren dan arah penelitian AI dalam pendidikan sains. Secara keseluruhan, metode ini memastikan bahwa hasil kajian mencerminkan bukti ilmiah yang kredibel serta relevan untuk mendukung pengembangan inovasi pembelajaran sains berbasis kecerdasan buatan di era digital.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Kajian sistematis terhadap 25 artikel internasional mengenai implementasi kecerdasan buatan dalam pendidikan sains menghasilkan empat temuan utama: (1) jenis dan fungsi AI yang paling banyak digunakan dalam penelitian pendidikan sains; (2) bentuk implementasi AI dalam konteks pembelajaran; (3) dampak AI terhadap kompetensi sains; dan (4) tantangan implementasi AI dalam pembelajaran. Temuan ini diperoleh melalui proses ekstraksi data dan pengkodean tematik menggunakan lembar penilaian yang telah disiapkan pada tahap metode. Secara garis besar, empat temuan utama dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Temuan Kajian Sistematis

Temuan	Penjelasan Singkat
Jenis dan Fungsi AI dalam Pendidikan Sains	Teknologi kecerdasan buatan yang paling dominan digunakan dalam pendidikan sains meliputi <i>machine learning-based learning analytics</i> , <i>intelligent tutoring systems</i> (ITS), <i>natural language processing</i> (NLP), <i>adaptive learning systems</i> , serta <i>AI-powered augmented reality</i>
Implementasi AI dalam Pembelajaran Sains	Salah satu implementasi yang paling umum adalah dukungan AI terhadap pembelajaran berbasis inkuiri, terutama melalui analisis data otomatis.
Dampak AI terhadap Kompetensi Sains	Temuan dari kajian menunjukkan bahwa integrasi AI memiliki dampak positif yang signifikan terhadap peningkatan penguasaan konsep sains, baik konsep dasar maupun abstrak.
Tantangan Implementasi AI	implementasi AI menghadapi sejumlah hambatan seperti rendahnya literasi AI guru, perlunya pedagogi yang selaras dengan teknologi, keterbatasan infrastruktur digital, isu etika penggunaan data siswa, serta ketergantungan pada kualitas algoritma

Jenis dan Fungsi AI dalam Pendidikan Sains

Hasil kajian terhadap 25 artikel internasional menunjukkan bahwa teknologi kecerdasan buatan yang paling dominan digunakan dalam pendidikan sains meliputi *machine learning-based learning analytics*, *intelligent tutoring systems* (ITS), *natural language processing* (NLP), *adaptive learning systems*, serta *AI-powered augmented reality*. Setiap jenis AI ini memiliki karakteristik unik yang memungkinkan guru dan siswa mendapatkan pengalaman belajar yang lebih terstruktur, personal, dan adaptif. Pemanfaatan teknologi tersebut tidak hanya

menyediakan alat bantu, tetapi juga menciptakan ekosistem pembelajaran yang responsif terhadap kebutuhan siswa.

Berbagai jenis AI ini berfungsi untuk menghasilkan analisis pembelajaran secara otomatis, mulai dari identifikasi miskonsepsi, penyediaan rekomendasi belajar, hingga prediksi performa akademik siswa. Sistem seperti ITS mampu meniru fungsi tutor manusia dengan memberikan penjelasan bertahap, sementara NLP mendukung pemahaman bahasa ilmiah melalui analisis jawaban siswa. Selain itu, *adaptive learning systems* memberikan jalur belajar yang berbeda bagi setiap siswa sesuai tingkat penguasaan konsepnya, sehingga pembelajaran dapat berlangsung lebih efektif dan efisien.

Fungsi lain yang tidak kalah penting ialah penyediaan simulasi eksperimen berbasis AI yang memungkinkan siswa melakukan eksplorasi ilmiah tanpa batasan risiko, biaya, maupun ketersediaan alat laboratorium. Melalui teknologi seperti *AI-powered augmented reality*, siswa dapat memvisualisasikan fenomena sains yang abstrak, seperti struktur atom, gelombang, atau medan listrik. Temuan keseluruhan memperlihatkan bahwa keberagaman jenis dan fungsi AI ini memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan kualitas interaksi siswa dengan konsep-konsep sains yang kompleks.

Implementasi AI dalam Pembelajaran Sains

Bentuk implementasi AI dalam pembelajaran sains terlihat melalui penerapannya dalam berbagai metode pengajaran yang menekankan eksplorasi dan analisis. Salah satu implementasi yang paling umum adalah dukungan AI terhadap pembelajaran berbasis inkuiri, terutama melalui analisis data otomatis. Siswa dapat mengunggah hasil eksperimen mereka dan menerima analisis langsung dari sistem AI, sehingga pemrosesan data menjadi lebih cepat dan akurat. Hal ini membantu peserta didik fokus pada interpretasi dan penarikan kesimpulan ilmiah.

AI juga banyak digunakan dalam eksperimen virtual berbasis simulasi cerdas yang mempermudah siswa mempelajari konsep-konsep rumit seperti dinamika partikel, reaksi kimia, atau interaksi ekosistem. Simulasi tersebut memungkinkan pengubahan variabel secara fleksibel dan real-time sehingga siswa dapat menguji berbagai hipotesis tanpa risiko fisik maupun keterbatasan alat. Selain itu, AI digunakan dalam *intelligent tutoring systems* untuk memberikan bimbingan personal pada pelajaran fisika, kimia, dan biologi, sehingga siswa bisa belajar sesuai ritme dan kebutuhannya.

Dalam konteks asesmen, implementasi AI membantu mendukung penilaian formatif berbasis pengenalan pola respons siswa. Melalui teknologi ini, sistem dapat memberikan diagnosis otomatis terhadap kesalahan konsep serta memberikan rekomendasi pembelajaran lanjutan. Pendekatan tersebut tidak hanya menghemat waktu guru, tetapi juga meningkatkan kualitas umpan balik yang diterima siswa. Dengan demikian, implementasi AI dalam pembelajaran sains telah memperkaya pengalaman belajar dan mendorong keterlibatan siswa dalam proses belajar yang lebih aktif.

Dampak AI terhadap Kompetensi Sains

Temuan dari kajian menunjukkan bahwa integrasi AI memiliki dampak positif yang signifikan terhadap peningkatan penguasaan konsep sains, baik konsep dasar maupun abstrak. Banyak penelitian melaporkan bahwa AI membantu siswa memahami konsep-konsep yang sebelumnya sulit dicapai melalui metode tradisional. Misalnya, visualisasi berbasis AI memungkinkan siswa memahami fenomena mikroskopis dan makroskopis secara lebih konkret. Hal ini berdampak pada peningkatan penguasaan konsep, terutama dalam materi-materi yang membutuhkan pemahaman spasial dan hubungan matematis.

AI juga memberikan kontribusi besar dalam peningkatan keterampilan proses sains, seperti mengamati, mengukur, merumuskan hipotesis, menganalisis data, serta menarik kesimpulan ilmiah. Melalui simulasi dan analitik otomatis, siswa dapat melakukan proses ilmiah dengan lebih sistematis dan berorientasi bukti. Dampak lain yang terlihat signifikan adalah peningkatan kemampuan pemecahan masalah berbasis bukti serta pemahaman hubungan sebab-akibat dalam fenomena ilmiah, yang merupakan inti dari pembelajaran sains.

Selain peningkatan kognitif, integrasi AI juga memberikan dampak afektif terhadap motivasi dan keterlibatan siswa. Dengan pengalaman belajar yang lebih interaktif, adaptif, dan personal, siswa menjadi lebih antusias dalam mengikuti kegiatan pembelajaran. Penelitian memperlihatkan bahwa efek terbesar terjadi pada model pembelajaran *inquiry-based learning*, *project-based learning*, dan *adaptive learning*. Ketiga pendekatan ini memanfaatkan AI untuk memberikan pengalaman belajar yang lebih autentik dan menantang, sehingga meningkatkan kompetensi sains secara menyeluruh.

Tantangan Implementasi AI

Artikel yang dianalisis mencatat bahwa implementasi AI menghadapi sejumlah hambatan seperti rendahnya literasi AI guru, perlunya pedagogi yang selaras dengan teknologi, keterbatasan infrastruktur digital, isu etika penggunaan data siswa, serta ketergantungan pada kualitas algoritma. Tantangan-tantangan ini menunjukkan bahwa integrasi AI membutuhkan perencanaan yang matang agar tidak menimbulkan kesenjangan baru dalam proses belajar. Di sisi lain, dukungan institusional dan pelatihan yang berkelanjutan menjadi faktor kunci untuk meningkatkan kesiapan tenaga pendidik dalam memanfaatkan teknologi tersebut. Beberapa studi menekankan bahwa AI tidak dapat berdiri sendiri tanpa peran guru sebagai desainer pembelajaran.

Pembahasan

Temuan hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi AI dalam pendidikan sains telah berkembang pesat dalam satu dekade terakhir dan berkontribusi signifikan terhadap peningkatan kualitas proses pembelajaran. Penerapan *intelligent tutoring system* dan *adaptive learning* memperlihatkan efektivitas dalam mengatasi perbedaan kemampuan siswa sehingga pembelajaran menjadi lebih personal dan menyesuaikan kebutuhan masing-masing peserta didik. Hal ini sejalan dengan perkembangan kurikulum global yang menekankan pada diferensiasi proses belajar dan akses terhadap pengalaman ilmiah berbasis data.

Implementasi AI melalui *machine learning-based learning analytics* juga memberikan peluang bagi guru untuk memahami pola belajar siswa secara lebih mendalam. Analitik ini memungkinkan pendidik untuk merancang intervensi pembelajaran yang lebih tepat sasaran, mendeteksi miskonsepsi lebih awal, dan memonitor perkembangan kompetensi sains secara berkelanjutan. Kecenderungan penggunaan *natural language processing* dalam asesmen otomatis juga menunjukkan peningkatan efisiensi dalam penilaian proses inkuiri, yang sebelumnya membutuhkan waktu panjang bila dilakukan secara manual oleh guru.

Di sisi lain, penggunaan *AI-powered augmented reality* dan simulasi cerdas terbukti efektif dalam menjembatani konsep abstrak yang sulit divisualisasikan, khususnya pada materi fisika kuantum, struktur atom, ekosistem kompleks, atau dinamika gerak. Pengalaman belajar multimodal berbasis visual-bukti menghasilkan pemahaman yang lebih mendalam dan meningkatkan retensi konsep.

Namun demikian, pembahasan ini juga menegaskan adanya urgensi peningkatan kesiapan guru dan institusi pendidikan dalam menerapkan AI secara bertanggung jawab dan efektif. Literasi AI guru menjadi faktor krusial karena tanpa pemahaman pedagogis yang

memadai, teknologi berpotensi hanya menjadi alat bantu teknis, bukan transformasi pembelajaran. Isu etika terkait privasi data, bias algoritmik, dan keadilan akses teknologi juga perlu diperhatikan agar implementasi AI berjalan selaras dengan prinsip pendidikan yang inklusif dan humanistik.

Secara umum, temuan ini mengonfirmasi bahwa AI memiliki potensi besar untuk meningkatkan kualitas pembelajaran sains, tetapi keberhasilan implementasinya tetap sangat ditentukan oleh integrasi pedagogi, teknologi, dan kesiapan sumber daya manusia. Kajian ini memberikan arah bagi pemanfaatan AI yang lebih strategis, terukur, dan berkelanjutan dalam penelitian serta praktik pendidikan sains di masa depan.

KESIMPULAN

Kajian sistematis terhadap 25 artikel internasional menunjukkan bahwa implementasi kecerdasan buatan (AI) dalam pendidikan sains telah memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kualitas pembelajaran, baik dalam aspek penguasaan konsep, keterampilan proses sains, kemampuan pemecahan masalah, maupun motivasi belajar siswa. Sejalan dengan harapan pada bagian pendahuluan, pemanfaatan AI terbukti mampu menjembatani kesenjangan antara tuntutan pembelajaran sains abad ke-21 yang ideal dengan kondisi riil di lapangan yang selama ini masih menghadapi keterbatasan media, personalisasi pembelajaran, dan minimnya analitik pembelajaran yang akurat.

Substansi utama temuan menunjukkan bahwa sistem AI seperti *intelligent tutoring systems*, *adaptive learning*, *machine learning-based analytics*, *natural language processing*, dan *AI-powered augmented reality* berperan penting dalam menyediakan pengalaman belajar yang lebih interaktif, adaptif, serta berbasis data. Teknologi ini tidak hanya meningkatkan efektivitas pembelajaran, tetapi juga memberikan peluang baru bagi guru untuk merancang intervensi pedagogis yang lebih tepat dan responsif. Namun demikian, penelitian juga mengindikasikan adanya tantangan, terutama terkait literasi AI guru, kesiapan infrastruktur digital, isu etika data, serta kebutuhan integrasi pedagogi yang selaras dengan karakteristik teknologi AI.

Secara keseluruhan, kajian ini menegaskan bahwa AI bukan sekadar alat bantu, tetapi merupakan teknologi strategis yang dapat mentransformasi cara belajar sains secara lebih mendalam dan bermakna. Prospek ke depan menunjukkan bahwa penelitian selanjutnya perlu mengembangkan model pembelajaran berbasis AI yang lebih humanistik, etis, dan inklusif, serta memperluas eksplorasi terhadap dampak jangka panjang AI terhadap literasi sains, kreativitas ilmiah, dan kesejahteraan belajar siswa. Selain itu, studi lanjutan perlu memfokuskan pada peningkatan literasi AI guru, pengembangan protokol etika penggunaan data, dan implementasi AI yang dapat diadaptasi untuk konteks sekolah dengan keterbatasan sumber daya. Dengan demikian, pemanfaatan AI berpotensi menjadi katalis utama dalam membangun ekosistem pendidikan sains yang lebih inovatif, adil, dan berkelanjutan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arymbekov, B. (2023, May). Augmented reality application to support visualization of physics experiments. In *2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)* (pp. 52-55). <https://doi.org/10.1109/SIST58284.2023.10223534>
- Barbosa, P. L. S., Carmo, R. A. F. D., Gomes, J. P., & Viana, W. (2024). Adaptive learning in computer science education: A scoping review. *Education and Information Technologies*, 29(8), 9139-9188. <https://doi.org/10.1007/s10639-023-12066-z>

- Cojean, S., & Jamet, E. (2022). Does an interactive table of contents promote learning from videos? A study of consultation strategies and learning outcomes. *British Journal of Educational Technology*, 53(2), 269-285. <https://doi.org/10.1111/bjet.13164>
- Edali, M., Sahem, Z., & Elkamel, A. (2024, October). Utilizing AI Chatbots to Enhance Students' Critical Thinking and Problem-Solving Skills in Numerical Methods to Promote Reproducibility. In *Sebha University Conference Proceedings* (Vol. 3, No. 2, pp. 83-89). <https://doi.org/10.51984/sucp.v3i2.3189>
- Fadillah, M. A., Usmeldi, U., Lufri, L., Mawardi, M., & Festiyed, F. (2024). Exploring user perceptions: The impact of ChatGPT on high school students' physics understanding and learning. *Advances in Mobile Learning Educational Research*, 4(2), 1197-1207. <https://doi.org/10.25082/AMLER.2024.02.013>
- Haudek, K. C., & Zhai, X. (2024). Examining the effect of assessment construct characteristics on machine learning scoring of scientific argumentation. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 34(4), 1482-1509. <https://doi.org/10.1007/s40593-023-00385-8>
- Holmes, W., Bialik, M., & Fadel, C. (2019). *Artificial intelligence in education promises and implications for teaching and learning*. Center for Curriculum Redesign.
- Hung, C. Y., Sun, J. C. Y., & Liu, J. Y. (2019). Effects of flipped classrooms integrated with MOOCs and game-based learning on the learning motivation and outcomes of students from different backgrounds. *Interactive Learning Environments*, 27(8), 1028-1046. <https://doi.org/10.1080/10494820.2018.1481103>
- Hwang, G. J., Tang, K. Y., & Tu, Y. F. (2024). How artificial intelligence (AI) supports nursing education: profiling the roles, applications, and trends of AI in nursing education research (1993–2020). *Interactive Learning Environments*, 32(1), 373-392. <https://doi.org/10.1080/10494820.2022.2086579>
- Jia, F., Sun, D., & Looi, C. K. (2024). Artificial intelligence in science education (2013–2023): Research trends in ten years. *Journal of Science Education and Technology*, 33(1), 94-117. <https://doi.org/10.1007/s10956-023-10077-6>
- Kahaleh, R. (2025). Instructor Evaluation of Meta Smart Glasses: Assessing AI Accuracy, Explanation Quality, and Misconception Detection in Physics. *The Physics Educator*, 7, 2550006. <https://doi.org/10.1142/S2661339525500064>
- Lai, C. J. (2025). Evaluating generative AI-assisted inquiry-based learning and metacognitive scaffolding for enhancing scientific vocabulary, content comprehension, and lab report writing. *Interactive Learning Environments*, 1-15. <https://doi.org/10.1080/10494820.2025.2572786>
- Lai, C. L., Hwang, G. J., & Tu, Y. H. (2018). The effects of computer-supported self-regulation in science inquiry on learning outcomes, learning processes, and self-efficacy. *Educational Technology Research and Development*, 66(4), 863-892. <https://doi.org/10.1007/s11423-018-9585-y>
- Lee, I., Ali, S., Zhang, H., DiPaola, D., & Breazeal, C. (2021, March). Developing middle school students' AI literacy. In *Proceedings of the 52nd ACM technical symposium on computer science education* (pp. 191-197). <https://doi.org/10.1145/3408877.3432513>
- Long, Y., & Aleven, V. (2017). Enhancing learning outcomes through self-regulated learning support with an open learner model. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 27(1), 55-88. <https://doi.org/10.1007/s11257-016-9186-6>
- Luckin, R., & Holmes, W. (2016). Intelligence unleashed: An argument for AI in education. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1475756/>

- Makransky, G., Andreassen, N. K., Baceviciute, S., & Mayer, R. E. (2021). Immersive virtual reality increases liking but not learning with a science simulation and generative learning strategies promote learning in immersive virtual reality. *Journal of Educational Psychology*, 113(4), 719. <https://doi.org/10.1037/edu0000473>
- Peng, J., & Li, Y. (2025). Frontiers of Artificial Intelligence for Personalized Learning in Higher Education: A Systematic Review of Leading Articles. *Applied Sciences*, 15(18), 10096. <https://doi.org/10.3390/app151810096>
- Roll, I., & Wylie, R. (2016). Evolution and revolution in artificial intelligence in education. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 26(2), 582–599. <https://doi.org/10.1007/s40593-016-0108-x>
- Sailer, M., Stadler, M., Schultz-Pernice, F., Franke, U., Schöffmann, C., Paniotova, V., ... & Fischer, F. (2021). Technology-related teaching skills and attitudes: Validation of a scenario-based self-assessment instrument for teachers. *Computers in Human Behavior*, 115, 106625. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106625>
- Spector, J. M. (2017, November). Smart learning environments: Potential and pitfalls. In *Educational Technology to Improve Quality and Access on a Global Scale: Papers from the Educational Technology World Conference (ETWC 2016)* (pp. 33-42). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66227-5_4
- Su, Y. S., Lin, Y. D., & Liu, T. Q. (2022). Applying machine learning technologies to explore students' learning features and performance prediction. *Frontiers in Neuroscience*, 16, 1018005. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1018005>
- Vincoli, M., Scholz, N., & Nagashima, T. (2025, July). Multidimensional student agency in learning with AI: a conceptual framework and design implications. In *International Conference on Artificial Intelligence in Education* (pp. 218-232). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-98459-4_16
- Zawacki-Richter, O., Marín, V. I., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(1), 1–27. <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>