

Scoping Review Media Pembelajaran Digital *Generative AI Reenactment* dalam Pembelajaran Biologi: Pendekatan, Praktik, dan Tantangan

(A Scoping Review of *Generative AI Reenactment* in Biology Education: Approaches, Practices, and Challenges)

Maulana Arsyadani Bintang Pratama Putra¹, Slamet Hariyadi^{1*}

Magister Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan

Universitas Jember, Jember 68121, Jawa Timur, Indonesia

*E-mail: s.hariyadi.fkip@unej.ac.id

Abstrak: Integrasi *Generative AI* (GenAI) *Reenactment* dalam pendidikan biologi menawarkan potensi simulasi interaktif, namun rincian mengenai praktik penggunaan dan efektivitasnya belum terangkum secara komprehensif. Penelitian ini bertujuan memetakan pendekatan teknologi, praktik pedagogis, dan tantangan penggunaan GenAI *Reenactment* dalam pembelajaran biologi melalui metode scoping review. Metode penelitian menggunakan kerangka Arksey & O'Malley dan PRISMA-ScR yang diperkaya dengan pendekatan *Reflexive Thematic Analysis* dari Braun dan Clarke. Penelusuran literatur (2023–2025) pada database bereputasi menghasilkan 4 artikel utama yang memenuhi kriteria inklusi. Analisis data mengidentifikasi tiga tema kunci: (1) Evolusi Pendekatan Teknologi, di mana teknologi bervariasi dari *Large Language Models* berbasis teks untuk simulasi peran hingga indikasi integrasi dengan *Virtual Reality* (VR) dan *Augmented Reality* (AR); (2) Transformasi Praktik Pedagogis, di mana GenAI mensimulasikan peran sebagai alat *self-directed learning* serta berpotensi sebagai *Virtual Teaching Assistant* (VTA) di laboratorium; dan (3) Tantangan Multidimensi, yang menyoroti risiko penurunan keterampilan psikomotorik dan originalitas komunikasi siswa akibat ketergantungan pada jawaban instan. Dapat disimpulkan bahwa GenAI *Reenactment* menunjukkan potensi sebagai evolusi interaktif dari teknologi visualisasi sebelumnya yang menuntut model pengawasan hibrida.

Kata Kunci: *Generative AI Reenactment*, Pendidikan Biologi, *Virtual Teaching Assistant*, *Reflexive Thematic Analysis*.

Abstract: The integration of *Generative AI* (GenAI) *Reenactment* in biology education offers potential for interactive simulations, yet details regarding its practical use and effectiveness outcomes have not been comprehensively documented. This study aims to map the technological approaches, pedagogical practices, and challenges of using GenAI *Reenactment* in biology learning through a scoping review method. The method utilizes the Arksey & O'Malley and PRISMA-ScR frameworks, enriched with the Reflexive Thematic Analysis approach by Braun and Clarke. A literature search (2023–2025) across reputable databases yielded 4 primary articles meeting the inclusion criteria. Data analysis identified three key themes: (1) Evolution of Technological Approaches, ranging from text-based Large Language Models for role-playing interactions to indications of integration with Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR); (2) Transformation of Pedagogical Practices, where GenAI simulates roles as a self-directed learning tool and potentially as a Virtual Teaching Assistant

(VTA) in laboratories; and (3) Multidimensional Challenges, highlighting risks of declining psychomotor skills and student communication originality due to reliance on instant answers. It can be concluded that GenAI *Reenactment* demonstrates potential as an interactive evolution of previous visualization technologies, necessitating a hybrid supervision model.

Keywords: *Generative AI Reenactment, Biology Education, Virtual Teaching Assistant, Reflexive Thematic Analysis.*

PENDAHULUAN

Pendidikan biologi di abad ke-21 sedang mengalami transformasi digital yang belum pernah terjadi sebelumnya seiring dengan pesatnya perkembangan Artificial Intelligence (AI). Transformasi digital di era industri 5.0 telah membawa dampak signifikan pada berbagai sektor, termasuk pendidikan. Teknologi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) kini telah menjadi instrumen krusial yang mempercepat inovasi pembelajaran dan efisiensi akses informasi (Gotama *et al.*, 2024). Evolusi ini sejalan dengan prediksi ahli satu dekade lalu bahwa integrasi sistem cerdas akan merevolusi personalisasi pendidikan sains (Luckin *et al.*, 2016; Roll & Wylie, 2016). Salah satu perkembangannya adalah *Generative AI* (GenAI) yang memungkinkan interaksi dinamis dalam bentuk entitas digital.

Berbeda dengan media pembelajaran konvensional yang bersifat satu arah, teknologi GenAI memungkinkan siswa melakukan dialog interaktif terkait konsep-konsep sains. Dalam konteks penelitian ini, *Reenactment* (simulasi peran) tidak hanya dimaknai secara sempit sebagai AI yang meniru tokoh biologi, melainkan didefinisikan secara lebih luas sebagai kemampuan GenAI untuk memerankan fungsi pada manusia, seperti bertindak sebagai *Virtual Teaching Assistant* (VTA) atau *Virtual Tutor* interaktif. Kemampuan ini membuka peluang dalam mengatasi kesulitan siswa memahami materi biologi yang abstrak dan kompleks melalui pendekatan yang responsif. Sebelumnya, upaya memvisualisasikan materi biologi yang sarat konsep abstrak telah dirintis menggunakan teknologi Augmented Reality (AR). Meta-analisis dan studi terdahulu mengindikasikan bahwa AR dapat meningkatkan literasi sains dan pemahaman konsep seperti sistem saraf dan sel (Ahied *et al.*, 2020; Akçayır & Akçayır, 2017; Aripin & Suryaningsih, 2019). Penggunaan media ini juga dilaporkan membantu siswa memvisualisasikan fenomena mikroskopis dengan lebih baik (Weng *et al.*, 2020; Yoon *et al.*, 2017).

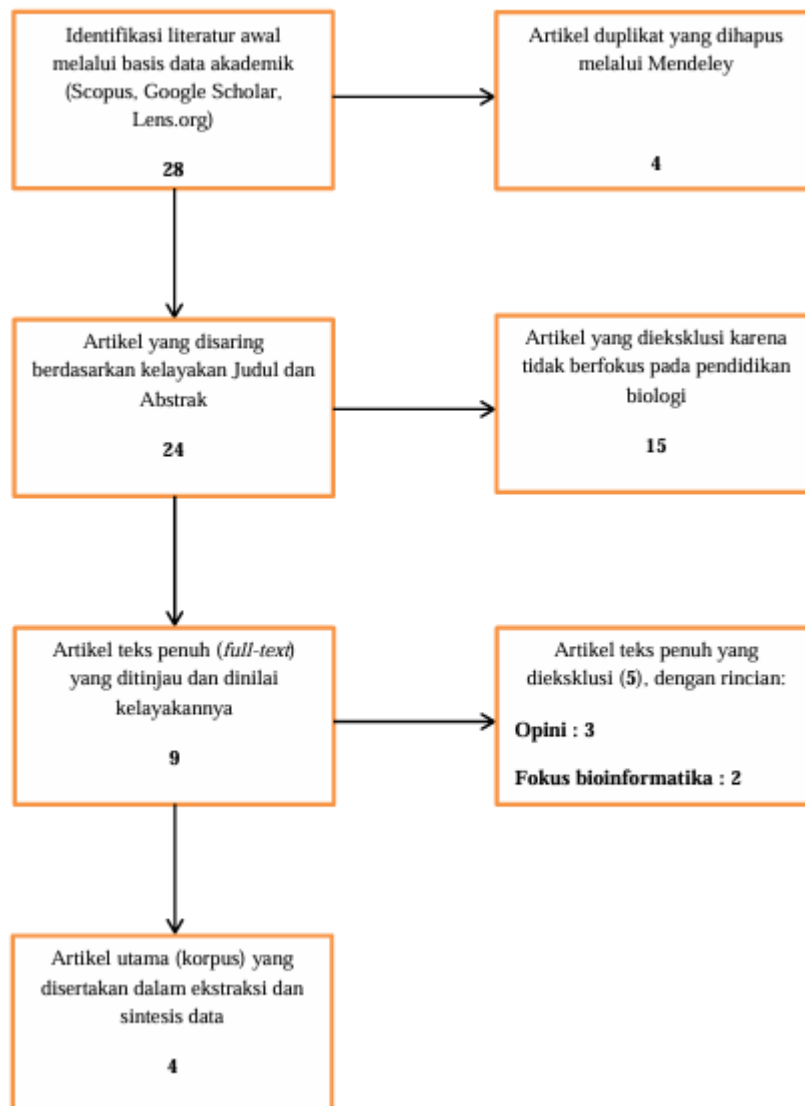
Kini, kehadiran GenAI menyempurnakan pendekatan visual tersebut dengan bertindak sebagai tutor pribadi adaptif. Jika AR konvensional hanya menampilkan model statis, GenAI mampu menyediakan penjelasan visual dan teks yang dinamis, disesuaikan dengan kecepatan belajar masing-masing siswa (Thanh *et al.*, 2025). Sinergi antara visualisasi klasik dan kecerdasan adaptif AI ini terbukti secara signifikan mengoptimalkan pemahaman kognitif siswa (Agustina & Islami, 2025).

Namun, integrasi teknologi ini tidak lepas dari tantangan. Di balik potensinya, terdapat kekhawatiran mengenai validitas informasi yang dihasilkan AI/*hallucinations* serta risiko ketergantungan siswa yang dapat mendegradasi keterampilan berpikir kritis. Hingga saat ini, belum banyak literatur yang memetakan secara sistematis bagaimana GenAI diterapkan spesifik dalam konteks *Reenactment* biologi.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan *scoping review* guna memetakan: (1) ragam pendekatan teknologi yang digunakan, (2) praktik pedagogis penerapannya, dan (3) tantangan utama yang dihadapi dalam implementasi GenAI pada pembelajaran biologi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada tahun 2026. Metode yang digunakan adalah *scoping review* yang mengacu pada kerangka kerja metodologis Arksey dan O'Malley (2005). Pendekatan ini dipilih untuk memetakan literatur yang masih bersifat *emerging* (baru muncul) mengenai penggunaan *Generative AI Reenactment* dalam pendidikan biologi dan untuk mengidentifikasi kesenjangan dalam literatur yang ada. Pelaporan hasil *review* disusun berdasarkan pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews* (PRISMA-ScR).



Gambar 1. Diagram Alur PRISMA-ScR

Pencarian literatur dilakukan secara sistematis pada tanggal 15 Januari 2026 melalui tiga basis data akademik, yaitu Scopus, Google Scholar, dan Lens.org. *String* pencarian disesuaikan untuk masing-masing basis data menggunakan kombinasi *Boolean operator*, contohnya pada Scopus: (TITLE-ABS-KEY("Generative AI" OR "ChatGPT") AND TITLE-ABS-KEY("Biology Education" OR "Science Education") AND TITLE-ABS-KEY("Simulation" OR "Virtual Assistant")). Seluruh hasil pencarian diekspor dan dikumpulkan ke dalam perangkat lunak manajemen referensi Mendeley untuk proses deduplikasi (penghapusan data ganda).

Proses penyaringan (*screening*) dilakukan dalam dua tahap oleh dua peninjau (*reviewer*) secara independen untuk meminimalisasi bias. Tahap pertama meliputi penyaringan judul dan abstrak, dilanjutkan dengan tahap pembacaan teks penuh (*full-text*). Ketidaksepakatan antar peninjau diselesaikan melalui diskusi hingga mencapai kesepakatan bersama. Kriteria seleksi artikel diuraikan pada Tabel 1. Kriteria inklusi mencakup preprint dari repositori akademik guna menangkap perkembangan teknologi GenAI yang bergerak sangat cepat dan belum sepenuhnya terekam dalam siklus publikasi *peer-review* tradisional.

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Artikel jurnal, prosiding, maupun preprint repositori yang terbit pada rentang tahun 2023–2025.	Artikel yang hanya membahas AI secara umum tanpa spesifikasi pada mata pelajaran biologi
Fokus utama membahas penerapan <i>Generative AI</i> dalam konteks pembelajaran biologi tingkat menengah atau tinggi.	Artikel berupa opini, editorial, atau tinjauan konseptual tanpa data pengamatan empiris/studi literatur yang metodologis.
Tersedia dalam teks lengkap (<i>full-text</i>) berbahasa Inggris atau Indonesia.	Artikel yang berfokus pada biologi murni.
Membahas interaksi AI sebagai alat bantu belajar, asisten virtual, atau simulasi.	-

Data dari artikel terpilih diekstraksi menggunakan matriks *charting data*. Selanjutnya, analisis data dilakukan menggunakan pendekatan *Reflexive Thematic Analysis* yang dikembangkan oleh Braun dan Clarke (2019). Proses analisis mencakup enam tahapan: (1) Familiarisasi data; (2) Pembuatan kode awal; (3) Pencarian tema; (4) Peninjauan tema; (5) Pendefinisian tema; serta (6) Penulisan laporan hasil tinjauan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan proses pencarian literatur, diidentifikasi sebanyak 28 catatan awal dari berbagai basis data. Setelah proses deduplikasi menggunakan Mendeley, tersisa 24 artikel untuk disaring pada tahap judul dan abstrak. Sebanyak 15 artikel dieksklusi karena tidak berfokus pada pendidikan biologi. Dari 9 artikel yang ditinjau secara *full-text*, 5 artikel dieksklusi dengan keterangan 3 artikel merupakan opini tanpa data empiris, dan 2 artikel berfokus pada bioinformatika murni. Pada akhirnya, tersisa 4 artikel utama (korpus) yang memenuhi syarat untuk diekstraksi. Keempat artikel korpus tersebut dipetakan secara rinci pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan Ekstraksi Data

No	Penulis & Tahun (Negara)	Teknologi AI	Topik Biologi	Metode Penelitian	Instrumen Penelitian	Temuan Utama (Pendekatan & Praktik)
1	Thanh <i>et al.</i> (2025) (Vietnam)	ChatGPT, Gemini, Copilot	Biologi Umum (Genetika, Sel, Ekologi)	<i>Mixed-Methods</i> (Survei TAM & Analisis Tematik)	Kuesioner (Skala Likert)	Pendekatan <i>self-learning</i> (belajar mandiri). Siswa memakai AI untuk merangkum materi & persiapan ujian, bukan eksperimen.
2	Didiana <i>et al.</i> (2025) (Indonesia)	ChatGPT (<i>Web-based</i>)	Biologi SMA (Kelas XI & XII)	Kualitatif Deskriptif (Survei & Wawancara)	Angket & Lembar Observasi	Praktik diskusi kelas. Dampak positif pada motivasi (afektif) dan kognitif (pemahaman konsep sulit).
3	Cao <i>et al.</i> (2023) (Vietnam)	ChatGPT + VR & AR	Biologi Umum (<i>Immersive Learning</i>)	Conceptual Framework / Review	Studi Literatur & Analisis Konsep	Pendekatan <i>Immersive.</i> AI menjadi Virtual Tutor di dalam dunia VR untuk menjelaskan objek 3D secara real-time.
4	Dođru & Faulconer (2026) (Turki)	ChatGPT vs Human TA (<i>Teaching Assistant</i>)	Lab Biologi (<i>Aktivitas Enzim</i>)	Eksperimen Komparatif (<i>Comparative Study</i>)	Penilaian Buta (<i>Blind Grading</i>) & Analisis Konten	Praktik sebagai VTA (<i>Virtual Teaching Assistant</i>). Menjawab pertanyaan prosedur lab mahasiswa.

Setelah diekstraksi, data tersebut akan diproses menggunakan pendekatan *Reflexive Thematic Analysis* (Braun & Clarke, 2019), proses koding terhadap literatur terpilih menghasilkan tiga tema utama yang memetakan lanskap penggunaan GenAI dalam biologi. Ringkasan tema, kode kunci, dan sumber referensi disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Pendekatan *Reflexive Thematic Analysis*

Tema Utama	Kode Kunci / Sub-Tema	Penjelasan Temuan	Referensi Pendukung
Pendekatan Teknologi	<i>Text-Based Interaction</i>	Penggunaan model bahasa (LLM) seperti ChatGPT untuk tanya jawab teks.	Thanh <i>et al.</i> (2025); Didiana <i>et al.</i> (2025)
	<i>Immersive VR/AR Integration</i>	Integrasi AI ke dalam lingkungan virtual (VR/AR) untuk visualisasi 3D.	Cao <i>et al.</i> (2023)
	<i>Avatar-Based Reenactment</i>	Penggunaan karakter digital (avatar) yang bisa berdialog seperti tokoh nyata.	Cao <i>et al.</i> (2023)
Praktik Pedagogis	<i>Self-Directed Learning Tool</i>	Siswa menggunakan AI sebagai tutor mandiri di luar jam kelas.	Thanh <i>et al.</i> (2025)
	<i>Virtual Teaching Assistant (VTA)</i>	AI berperan menjawab pertanyaan prosedural teknis).	Doğru & Faulconer (2026)
	Dukungan Afektif & Kognitif	Penggunaan AI untuk memotivasi dan membantu pemahaman konsep.	Didiana <i>et al.</i> (2025)
Tantangan	Ketergantungan Jawaban Instan	Fenomena penyalinan jawaban tanpa proses berpikir mendalam.	Didiana <i>et al.</i> (2025)
	Indikasi Kendala Psikomotorik	Pengamatan kualitatif terkait kurangnya keterampilan praktik langsung.	Didiana <i>et al.</i> (2025)
	<i>AI Hallucinations</i>	AI memberikan fakta biologi atau referensi yang salah/palsu.	Doğru & Faulconer (2026)

Analisis tematik terhadap literatur terpilih mengidentifikasi tiga dimensi utama dalam penggunaan GenAI untuk pembelajaran biologi: (1) variasi pendekatan teknologi, (2) keragaman praktik pedagogis, dan (3) tantangan multidimensi yang dihadapi.

Terkait dimensi Pendekatan Teknologi, tinjauan terhadap korpus memperlihatkan variasi pemanfaatan AI. Studi empiris oleh Thanh *et al.* (2025) dan Didiana *et al.* (2025) menunjukkan bahwa penerapan GenAI saat ini masih didominasi oleh penggunaan *Large Language Models* (LLM) berbasis teks seperti ChatGPT. Di sisi lain, Cao *et al.* (2023) menawarkan kerangka konseptual yang mengusulkan integrasi GenAI dengan *Virtual Reality* (VR) dan *Augmented Reality* (AR). Meskipun studi Cao *et al.* (2023) baru berupa kerangka konseptual dan bukan uji efektivitas, usulan integrasi ini menawarkan pendekatan visual yang menjanjikan. Potensi ini sejalan dengan literatur pendukung di luar korpus, seperti studi Maulion & Prudente (2025), yang mencatat bahwa teknologi AR membantu memvisualisasikan anatomi abstrak secara dinamis (Dewanto *et al.*, 2024; Lim *et al.*, 2025).

Dalam dimensi Praktik Pedagogis, temuan dari korpus utama menunjukkan bahwa GenAI mengubah interaksi belajar melalui beberapa cara. Pertama, sebagai fasilitator belajar mandiri (*Self-Directed Learning*), di mana Thanh *et al.* (2025) mencatat bahwa siswa di Vietnam menggunakan AI untuk merangkum materi genetika. Hal ini didukung oleh literatur tambahan dari Jamaluddin (2025) yang mengindikasikan bahwa

penggunaan ChatGPT berkorelasi dengan peningkatan keterlibatan kognitif secara mandiri.

Kedua, sebagai *Virtual Teaching Assistant*. Studi komparatif oleh Doğru dan Faulconer (2026) bereksperimen menggunakan ChatGPT untuk menjawab pertanyaan prosedural mahasiswa di laboratorium. Praktik ini merupakan manifestasi nyata dari GenAI *Reenactment*, di mana komputasi cerdas berhasil mensimulasikan peran dan tugas seorang asisten instruktur manusia secara akademik. Lebih lanjut, urgensi pemanfaatan media digital yang interaktif ini selaras dengan temuan Siswati *et al.* (2023), yang membuktikan bahwa intervensi teknologi digital mampu secara efektif menstimulasi keterampilan metakognitif dan berpikir kreatif siswa sains.

Namun, implementasi teknologi ini tidak lepas dari Tantangan. Berdasarkan pengamatan deskriptif kualitatif oleh Didiana *et al.* (2025) di Indonesia, penggunaan ChatGPT mengindikasikan adanya fenomena konsumsi informasi pasif (*copy-paste*) serta kendala pada aspek psikomotorik karena siswa kurang berinteraksi dengan alat peraga nyata. Kendati bersifat kualitatif deskriptif, temuan ini menjadi sinyal peringatan yang sejalan dengan kekhawatiran literatur global. Penulis pendukung seperti Stahl (2025) dan Hu *et al.* (2025) memperingatkan adanya risiko erosi kemampuan berpikir kritis jika siswa terlalu bergantung pada AI. Tantangan lain bersumber dari keterbatasan teknis AI itu sendiri. Studi eksperimental Doğru dan Faulconer (2026) menegaskan bahwa asisten manusia masih lebih unggul secara pedagogis dibandingkan AI, karena AI rentan mengalami "halusinasi" atau memberikan jawaban ilmiah yang keliru. Oleh karena itu, keberhasilan integrasi GenAI ke depannya sangat bergantung pada validasi dan desain instruksional yang matang, sebagaimana prinsip pengembangan inovasi pembelajaran sains yang ditekankan oleh Sofia *et al.* (2020) agar benar-benar efektif meningkatkan capaian siswa. Selain itu, transisi menuju AI imersif (VR/AR) seperti yang dikonsepsikan oleh Cao *et al.* (2023) umumnya terbentur oleh tingginya biaya infrastruktur, sebuah hambatan sistemik yang kerap disoroti dalam literatur teknologi pendidikan (Chen & Jang, 2019).

KESIMPULAN

Integrasi *Generative AI* dalam pendidikan biologi menunjukkan tren pergeseran dari alat bantu interaksi teks menuju potensi simulasi yang imersif. Secara konsep, usulan penggabungan GenAI dengan *Virtual Reality* (VR) dan *Augmented Reality* (AR) menawarkan pendekatan yang menjanjikan dalam memvisualisasikan konsep abstrak serta mendukung otonomi belajar siswa (*Self-Directed Learning*). Namun, tinjauan ini juga mengindikasikan bahwa penggunaan teknologi AI berisiko menimbulkan kendala pada keterampilan psikomotorik dan memicu kebiasaan konsumsi informasi pasif akibat ketergantungan pada jawaban instan. Selain itu, berdasarkan studi komparatif dalam korpus, ditemukan indikasi bahwa komputasi AI saat ini masih rentan terjadi halusinasi, sehingga secara pedagogis belum dapat sepenuhnya menyamai tingkat akurasi ilmiah dan *teacher voice* dari instruktur manusia.

SARAN

Merespons temuan tersebut, penelitian ini merekomendasikan adopsi "Model Pembelajaran Hibrida-Terkurasi", di mana pendidik dapat memanfaatkan GenAI untuk simulasi visual dan *brainstorming*, sementara validasi fakta, penilaian keterampilan

praktis, dan pengawasan etika tetap dipegang penuh oleh instruktur manusia. Peneliti selanjutnya didorong untuk melakukan studi eksperimental komparatif atau longitudinal guna mengukur dampak nyata penggunaan GenAI terhadap retensi pengetahuan dan keterampilan siswa secara lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, R., & Islami, N. (2025). Kajian penggunaan Artificial Intelligence terhadap hasil belajar biologi siswa sekolah menengah atas. *Jurnal Edukasi Matematika dan IPA*, 12(2): 263–272. <https://doi.org/10.26418/jpmipa.v12i2.71289>
- Ahied, M., Muharrami, L. K., Fikriyah, A., & Rosidi, I. (2020). Improving students' scientific literacy through distance learning with augmented reality-based multimedia amid the Covid-19 pandemic. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 9(4): 499–511. <https://doi.org/10.15294/jpii.v9i4.26123>
- Akçayır, M., & Akçayır, G. (2017). Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational Research Review*, 20: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002>
- Aripin, I., & Suryaningsih, Y. (2019). Pengembangan media pembelajaran biologi menggunakan teknologi Augmented Reality (AR) berbasis Android pada konsep sistem saraf. *Jurnal Sains dan Pendidikan Matematika (Sainsmat)*, 8(2): 47–57. <https://doi.org/10.35580/sainsmat82107192019>
- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1): 19–32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Braun, V., & Clarke, V. (2019). Reflecting on reflexive thematic analysis. *Qualitative Research in Sport, Exercise and Health*, 11(4): 589–597. <https://doi.org/10.1080/2159676X.2019.1628806>
- Cao, L., Nguyen, P., & Truong, H. (2023). Integrating ChatGPT with virtual reality and augmented reality technology in teaching biology at high schools in Vietnam [Preprint]. Bee AI Research. <https://beeai.research.vn/publications>
- Chen, S. J., & Jang, S. J. (2019). The effects of AR-video-modeling learning on students' practical skills and learning achievement in a biology laboratory course. *Interactive Learning Environments*, 31(1): 1–15. <https://doi.org/10.1080/10494820.2019.1632724>
- Dewanto, R., Pujiyanto, P., Wiyatmo, Y., & Yani, A. D. G. (2024). Exploring the role of augmented reality in enhancing student engagement and learning outcomes across education levels. *Jurnal Pendidikan MIPA*, 25(3): 1635–1647. <https://doi.org/10.23960/jpmipa/v25i3.pp1635-1647>
- Didiana, I. K., Bustamin, B., Shamdas, G. B. N., Nurdin, M., Sabran, M., & Lilies, L. (2025). Analisis dampak penggunaan situs web ChatGPT dalam proses pembelajaran biologi siswa SMA Negeri 1 Torue. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 13(4): 2559–2569. <https://doi.org/10.33394/bioscientist.v13i4.17865>
- Doğru, M. S., & Faulconer, E. K. (2026). ChatGPT as a virtual laboratory teaching assistant in undergraduate biology. *Research in Science Education*, 56. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s11165-025-10271-z>

- Gotama, I. W. B. D., Robyh, A. I. A., Febiantara, K., & Hariyadi, S. (2024). Dampak dan kemajuan dampak perkembangan AI (Artificial Intelligence) dalam kemajuan revolusi industri 5.0. *Jurnal Penelitian*, 9(2): 149–157. <https://doi.org/10.46491/jp.v9i2.1838>
- Hu, S., Hystad, K., & Lodge, J. M. (2025). Generative artificial intelligence in education: Initial principles developed from practitioner reflexive research. *The Journal of Educational Research*, 118(1): 1–13. <https://doi.org/10.1080/00220671.2024.2346764>
- Jamaluddin, J. (2025). ChatGPT as a pedagogical tool: Measuring its influence on cognitive engagement and academic achievement of biology students. *Jurnal Pendidikan MIPA*, 26(1): 12–24. <https://doi.org/10.23960/jpmipa/v26i1.pp12-24>
- Lim, J., Jeong, A., & Zhang, N. (2025). Generative AI-enhanced virtual reality simulation for pre-service teacher education: A mixed-methods analysis. *Education Sciences*, 15(8): Article 997. <https://doi.org/10.3390/educsci15080997>
- Luckin, R., Holmes, W., Griffiths, M., & Forcier, L. B. (2016). *Intelligence unleashed: An argument for AI in education*. London: Pearson.
- Maulion, R., & Prudente, M. (2025). Enhancing student engagement through augmented reality in secondary biology education. *Frontiers in Education*, 10: 1628004. <https://doi.org/10.3389/educ.2025.1628004>
- 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/s40593-016-0110-3>
- Siswati, B. H., Suratno, S., Hariyadi, S., Prihatin, J., Wahono, B., & Rosyadah, A. (2023). The effectiveness of nearpod assisted digital daily assessment to improve the creative thinking abilities and metacognitive skills of science students. *BIO-INOVED: Jurnal Biologi-Inovasi Pendidikan*, 5(3): 281–289. <https://doi.org/10.20527/bip.v5i3.13606>
- Sofia, H. W., Utomo, A. P., Hariyadi, S., Wahono, B., & Narulita, E. (2020). The validity and effectivity of learning using STEAM module with biotechnology game. *JPBI (Jurnal Pendidikan Biologi Indonesia)*, 6(1): 91–100. <https://doi.org/10.22219/jpbi.v6i1.10979>
- Stahl, G. (2025). The erosion of human thinking in the age of AI. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 22(1): 104. <https://doi.org/10.1186/s41239-024-00442-3>
- Thanh, D. T., Dinh, V. P., & Van, H. N. (2025). Exploring AI integration in biology self-learning: A TAM-based analysis among high school students in Ho Chi Minh City. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 21(10): Article em2716. <https://doi.org/10.29333/ejmste/17158>
- Weng, C., Otanga, S., Christianto, S. M., & Chu, R. J. (2020). Enhancing students' biology learning by using augmented reality as a learning supplement. *Journal of Educational Computing Research*, 58(4): 747–770. <https://doi.org/10.1177/0735633119884213>
- Yoon, S. A., Anderson, E., Lin, J., & Elinich, K. (2017). How augmented reality enables conceptual understanding of challenging science content. *Journal of Educational Technology & Society*, 20(1): 156–168.