Pengertian: Jurnal Pendidikan Indonesia (PJPI)

E-ISSN: 2986-9528| P-ISSN: 2986-9439
Website https://ejournal.lapad.id/index.php/pjpi

Open Access under CC BY NC SA
Copyright © 2026, Jumartang, et.al

Vol. 4, No. 3, 2026, 1561-1588
DOI:https://doi.org/10.61930/pjpi.v4i3.

Pemanfaatan *Artificial Intelligence* dalam Mendukung Kemampuan *Critical Thinking* Murid pada Pembelajaran Biologi: *A Systematic Literature Review*

Jumartang[1*)], Andi Nurzahratul Jannah[2)], Auliyah Ramadhani[3)] , Nuraini[4)] , Arifah Novia Arifin[5)]
[1-5)] Universitas Negeri Makassar, Indonesia
Email: arifahnoviaarifin@unm.ac.id

Abstract:

The development of Artificial Intelligence (AI) in education provides opportunities to support the improvement of students' critical thinking skills, particularly in Biology (Science) learning. AI is not only used as a source of information but also as a cognitive support tool that assists in analysis, evaluation, problem-solving, and the development of higher-order thinking skills. This study aims to analyze publication trends, research characteristics, as well as the benefits and challenges of utilizing AI to support students' critical thinking skills in Biology (Science) learning. The method used was a Systematic Literature Review (SLR) following the PRISMA 2020 guidelines, with the search and selection of articles conducted through the Scopus database using keywords related to Artificial Intelligence, Critical Thinking, and Biology Learning. Based on the selection process, 28 articles were obtained and analyzed. The results indicate a significant increase in research on AI in Biology learning during the 2023–2026 period, with research predominantly conducted in the United States, United Kingdom, Canada, and China. The research focuses on the use of generative AI, Large Language Models (LLMs), ChatGPT, AI literacy, STEM/STEAM education, and biology education. AI has been shown to contribute to supporting critical thinking, problem-solving, scientific reasoning, creativity, and information evaluation. However, the implementation of AI still faces challenges, including inaccurate information (AI hallucination), technological bias, user dependency, and the need to improve AI literacy.

Keywords: *Artificial Intelligence, Biology Education, Critical Thinking, Systematic Literature Review*

Abstrak:
Perkembangan *Artificial Intelligence* (AI) dalam pendidikan memberikan peluang untuk mendukung peningkatan kemampuan *critical thinking* murid, khususnya dalam pembelajaran Biologi. AI tidak hanya digunakan sebagai sumber informasi, tetapi juga sebagai *cognitive support tool* yang membantu proses analisis, evaluasi, pemecahan masalah, dan pengembangan keterampilan *critical thinking*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tren publikasi, karakteristik penelitian, serta manfaat dan tantangan pemanfaatan AI dalam mendukung kemampuan *critical thinking* murid pada pembelajaran Biologi. Metode yang digunakan adalah *Systematic Literature Review* (SLR) yang mengacu pada pedoman PRISMA 2020 dengan proses pencarian dan seleksi artikel melalui basis data Scopus menggunakan kata kunci terkait *Artificial Intelligence, Critical Thinking, dan Biology Learning*. Berdasarkan proses seleksi, diperoleh 28 artikel yang dianalisis. Hasil kajian menunjukkan bahwa penelitian AI dalam pembelajaran Biologi mengalami peningkatan signifikan pada periode 2023–2026 dengan dominasi penelitian dari United States, United Kingdom, Canada, dan China. Fokus penelitian meliputi penggunaan AI generatif, *Large Language Models* (LLM), ChatGPT, AI *literacy*, STEM/STEAM *education*, dan *biology*

education. AI terbukti berkontribusi dalam mendukung *critical thinking*, *problem solving*, *scientific reasoning*, kreativitas, serta evaluasi informasi. Penerapan AI masih menghadapi tantangan berupa ketidakakuratan informasi (AI *hallucination*), bias teknologi, ketergantungan pengguna, serta kebutuhan peningkatan literasi AI.

Kata Kunci: *kecerdasan buatan, pendidikan biologi, critical thinking, tinjauan literatur sistematis.*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi pada era digital telah memberikan pengaruh yang signifikan terhadap bidang pendidikan, terutama dalam pemanfaatan teknologi sebagai sarana pendukung proses pembelajaran. Teknologi tidak lagi hanya digunakan sebagai sarana komunikasi, tetapi telah dimanfaatkan untuk mendukung penyampaian materi dan menciptakan proses pembelajaran yang lebih interaktif. Salah satu perkembangan teknologi yang semakin banyak dimanfaatkan dalam bidang pendidikan adalah *Artificial Intelligence* (AI) atau kecerdasan buatan, yang dapat mendukung berbagai aktivitas pembelajaran (Ambarita & Nurrahmatullah, 2024) . Pemanfaatan AI dalam dunia pendidikan memberikan peluang bagi pendidik dan murid untuk mengakses informasi serta mendukung proses pembelajaran secara lebih fleksibel dan inovatif (Harianti *et al.,* 2025).

Penerapan AI dalam lingkungan pendidikan masih dihadapkan pada sejumlah tantangan, meskipun AI menawarkan berbagai potensi dalam meningkatkan kualitas pembelajaran. Menurut Paramita *et al.,* (2025) ada beberapa tantangan penerapan AI dalam dunia pendidikan yaitu, keterbatasan kompetensi digital pendidik, kesiapan infrastruktur pendidikan, serta isu etika seperti plagiarisme akademik, perlindungan data murid serta perubahan peran guru dalam proses pembelajaran. Penerapan teknologi kecerdasan buatan ini secara terburu buru beresiko menurunkan efektivitas pengajaran jika tidak diimbangi dengan pertimbangan desain pedagogis yang matang Giannakos *et al.,* (2025) . Ketergantungan berlebihan terhadap sistem AI dapat menghambat proses kognitif mendalam dan menurunkan daya keterlibatan murid. AI menyajikan jawaban secara instan membuat murid cenderung menghindari proses eksplorasi atau pemecahan masalah mandiri yang krusial untuk pemahaman konsep pembelajaran Biologi (Ocen *et al.,* 2025) .

Pemanfaatan AI sebagai keterampilan digital akan meningkatkan kemampuan digital murid dan mendukung proses pembelajaran, terumata dalam bidang biologi. Biologi sering dianggap sebagai mata pelajaran yang sulit karena memiliki berbagai

konsep yang abstrak dan kompleks. Pembelajaran biologi berbasis AI dapat mencakup berbagai aplikasi seperti analisis data, biologis, simulasi virtual tentang ekosistem, hingga platform pembelajaran adaptif yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan individu (Priyanti & Wahyuni, 2022). Pemanfaatan Ai dalam pembelajaran biologi mencangkup personalisasi pembelajaran, simulasi interaktif, evaluasi otomatis serta pengembangan keterampilan *critical thinking* (Dongoran *et al.,* 2025). Dalam konteks biologi fungsi-fungsi ini dinilai sangat relevan karena banyak topik bersifat abstrak dinamis, dan sulit divisualisasikan dengan metode ceramah dan buku teks saja, terutama dalam proses seluler, genetika, fisiologi dan bioinformatika (Rachman, 2025).

Keterampilan *critical thinking* merupakan kemampuan kognitif tingkat tinggi untuk menganalisis, mengevaluasi bukti, menarik kesimpulan logis, serta memecahkan masalah kompleks secara sistematis. Kerangka *critical thinking* umumnya mencangkup komponen interpretasi, analisis, inferensi, evaluasi, penjelasan, serta regulasi diri (Qu *et al.,* 2026). Fakta lapangan yang menunjukkan bahwa kemampuan *critical thinking* di Indonesia masih tergolong rendah. Berdasarkan survei yang dilakukan oleh *World Economic Forum* (WEF) melalui *Global Competitiveness Index* (GCI) tahun 2016–2017, Indonesia menempati peringkat ke-41 dari 138 negara. Peringkat tersebut masih berada di bawah Malaysia dan Thailand (Fajari & Chumdari, 2021). Rendahnya keterampilan *critical thinking* sering kali disebabkan oleh praktik pembelajaran konvensional yang didominasi metode ceramah serta minimnya ruang dialog reflektif (Suryawan *et al.,* 2023) .

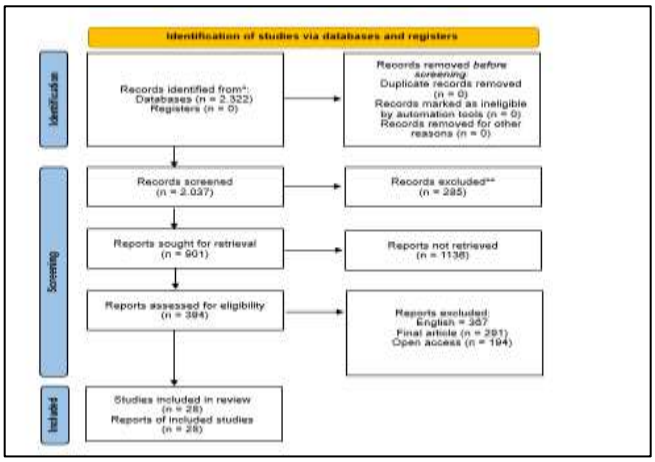
Perkembangan teknologi AI dalam beberapa tahun terakhir sangat pesat, perkembangan teknologi kecerdasan buatan ini telah membawa perubahan besar dalam berbagai bidang, termasuk dalam dunia akademik atau pendidikan. Chat GPT merupakan salah satu aplikasi AI yang sangat populer saat ini dengan interaksi manusia dengan komputer. Chat GPT merupakan Chatbot AI yang saat ini sedang populer merupakan pengembangan oleh Open AI. Dalam konteks dunia akademik dan pendidikan, pemanfaatan Chat GPT ini dapat memberikan kontribusi dalam meningkatkan efektivitas pembelajaran dengan menyediakan akses ke informasi dan materi yang lebih luas dan lebih mudah dipahami. AI dapat meningkatkan efisiensi dalam pembelajaran dengan memberikan dukungan individual bagi murid, dan membantu pengajar dalam memberikan pembelajaran yang lebih profesional (Diantama, 2023).

Penggunaan AI dalam pembelajaran masih perlu diteliti lebih jauh, terutama

pengaruhnya terhadap keterampilan *critical thinking* murid. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana AI dalam pembelajaran dapat mendukung keterampilan, dengan melihat hasil-hasil penelitian yang sudah ada. Untuk itu, penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) dengan mengkaji berbagai penelitian yang relevan.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Systematic Literature Review* (SLR). SLR adalah bentuk sintesis bukti yang mengumpulkan, m\enyeleksi, menilai kritis, dan merangkum studi yang relevan dengan kriteria yang ditetapkan sebelumnya untuk menjawab pertanyaan penelitian yang jelas (Brignardello-Petersen *et al.,* 2025). Proses penelitian meliputi perumusan pertanyaan penelitian, pencarian literatur, penyaringan berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, serta ekstraksi dan analisis data. Proses identifikasi dan seleksi artikel selanjutnya dilaporkan mengacu pada PRISMA 2020, yang memberikan panduan transparan dalam mengidentifikasi, menyeleksi, menilai, dan menyintesis studi pada *systematic review* (Page *et al.,* 2021).



Gambar 1. Diagram Alur Prisma

A. Perumusan Pertanyaan Penelitian

Tahap perumusan pertanyaan penelitian merupakan langkah penting yang menjadi dasar dan arah dalam pelaksanaan tinjauan literatur sistematis. Pertanyaan penelitian

disusun untuk memandu proses pencarian, seleksi, dan analisis literatur agar tetap fokus pada tujuan kajian yang telah ditetapkan. Perumusan pertanyaan membantu peneliti dapat menelaah secara mendalam berbagai temuan yang relevan mengenai pemanfaatan AI untuk mendukung kemampuan *Critical Thinking* pembelajaran biologi.

RQ1: Bagaimana tren publikasi penelitian mengenai pemanfaatan *Artificial Intelligence* untuk mendukung kemampuan *critical thinking* murid dalam pembelajaran Biologi selama periode 2023–2026?

RQ2: Bagaimana karakteristik penelitian mengenai pemanfaatan *Artificial Intelligence* dalam mendukung kemampuan *critical thinking* murid pada pembelajaran Biologi?

RQ3: Apa saja manfaat dan tantangan pemanfaatan *Artificial Intelligence* dalam mendukung kemampuan *critical thinking* murid pada pembelajaran Biologi?

B. Pencarian Literatur

Peneliti melakukan pencarian literatur setelah menetapkan pertanyaan penelitian. Pada tahap ini peneliti mulai memasukkan kata kunci yang relevan untuk menemukan artikel ilmiah yang sesuai dengan fokus kajian. Proses penelusuran dilakukan melalui basis data Scopus karena dianggap memiliki kredibilitas tinggi dan mencakup berbagai jurnal internasional bereputasi. Strategi pencarian disusun dengan menggunakan operator Boolean guna mengoptimalkan hasil pencarian. Istilah dalam setiap kelompok kata kunci dipisahkan dengan operator "OR", sedangkan penggabungan antarkelompok dilakukan menggunakan "AND" sebagaimana yang dijelaskan oleh Ardoin *et al.,* (2020). Adapun kombinasi kata kunci yang peneliti gunakan yaitu (KEY (*Artificial Intelligence* OR AI OR *biology learning OR critical thinking*) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "SOCI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "*Critical Thinking*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "*Artificial Intelligence*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Teaching") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Education*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Learning*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Artificial Intelligence* (ai)") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Ai") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*E-learning*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Students*")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "*final*")) AND (LIMIT-TO (OA , "*all*")) AND PUBYEAR > 2020 AND PUBYEAR < 2027

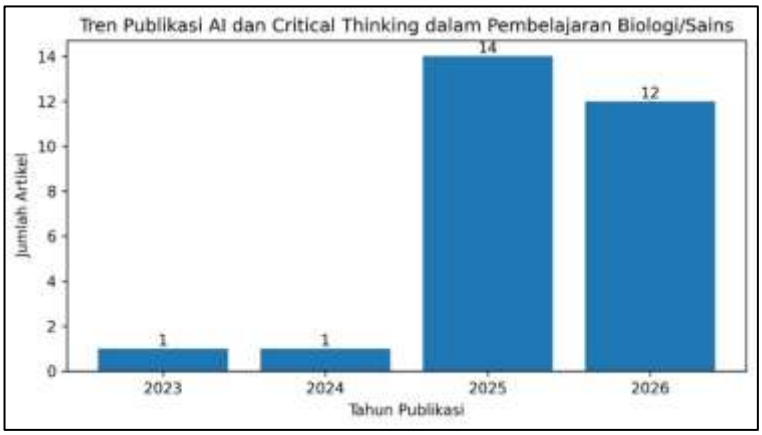
C. Penyaringan Literatur

Tahap ini peneliti tidak hanya mengumpulkan literatur yang sesuai, tetapi juga melakukan proses seleksi yang ketat untuk menyingkirkan artikel yang tidak memenuhi kriteria penelitian. Artikel yang ditemukan melalui pencarian awal kemudian disaring menggunakan tabel inklusi dan 5 eksklusi serta dilakukan penilaian mutu untuk menjamin validitas dan reliabilitas sumber yang dipilih. Evaluasi kredibilitas sumber merupakan bagian penting dalam proses penyaringan informasi karena memungkinkan penilaian terhadap kelayakan informasi sebelum digunakan atau disebarluaskan. (Maharani & Akhyar (2026) menunjukkan bahwa literasi digital berkaitan dengan kemampuan dalam mengevaluasi kredibilitas sumber informasi dan menyaring informasi yang diperoleh.

TEMUAN DAN PEMBAHASAN

A. Tren Publikasi Penelitian *Artificial Intelligence* dalam Mendukung *Critical Thinking* pada Pembelajaran Biologi

1. Tren Publikasi Berdasarkan Tahun



Grafik 1. Distribusi Jumlah Artikel Per-Tahun

Berdasarkan grafik 1 mengenai distribusi jumlah artikel per tahun, peningkatan jumlah publikasi yang cukup tajam pada tahun 2025 dapat dikaitkan dengan semakin berkembangnya penggunaan generative *Artificial Intelligence* (Gen AI) dalam bidang pendidikan. Salah satu titik penting dalam perkembangan tersebut adalah hadirnya Chat GPT pada akhir tahun 2022, yang kemudian mendorong perhatian akademik terhadap penggunaan AI dalam proses pembelajaran. Penelitian mengenai Chat GPT dalam pendidikan berkembang secara progresif, dengan 45 publikasi ilmiah yang teridentifikasi

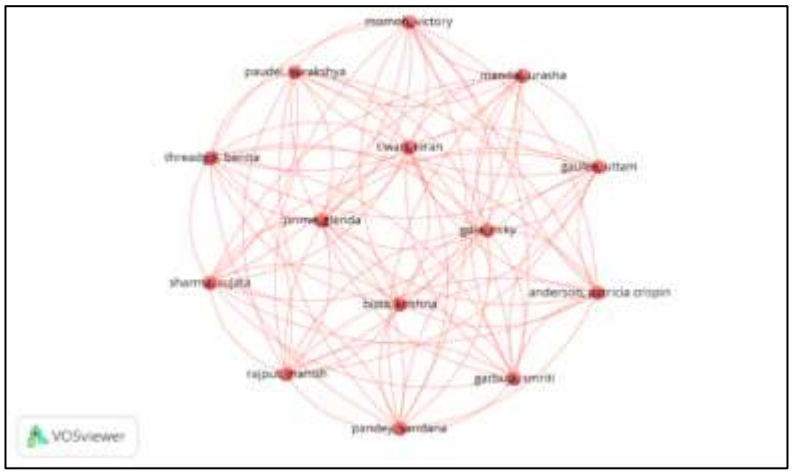
pada periode 2023 hingga Mei 2024 (Amarathunga, 2024). Penelitian bibliometrik mengenai Gen AI dalam pendidikan menunjukkan bahwa jumlah publikasi meningkat secara setelah kemunculan teknologi generatif tersebut. Ng & Ho (2025) , menemukan bahwa publikasi mengenai Gen AI dalam pendidikan mengalami percepatan mulai tahun 2023, dengan peningkatan yang jauh lebih besar pada tahun 2024. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penelitian tentang AI dalam pendidikan berkembang secara bertahap setelah teknologi tersebut mulai dikenal dan digunakan secara luas.

Rendahnya jumlah artikel pada tahun 2023–2024 dan meningkatnya publikasi pada tahun 2025 dapat dipahami sebagai bagian dari fase perkembangan awal penelitian AI dalam pendidikan. Pada tahap awal, peneliti masih banyak mengeksplorasi penggunaan, manfaat, risiko, dan penerimaan AI dalam pembelajaran. Setelah penggunaan AI generatif semakin meluas, perhatian penelitian kemudian berkembang ke pertanyaan yang lebih spesifik, termasuk bagaimana AI dapat digunakan untuk mendukung kemampuan kognitif murid, seperti kemampuan *critical thinking*, analisis, evaluasi, pemecahan masalah, dan pembelajaran mandiri. Hal ini didukung oleh Sardi *et al.,* (2025) yang melalui *systematic review* menemukan bahwa penelitian mengenai Gen AI mulai banyak membahas hubungan teknologi tersebut dengan *self-regulated learning* dan *critical thinking*.

Tahun 2025 dapat dipandang sebagai periode ketika penelitian AI dalam pendidikan mulai berkembang dari sekadar membahas keberadaan dan penggunaan teknologi menuju pengkajian dampaknya terhadap proses dan hasil belajar. Qian (2025) menjelaskan bahwa kemunculan Chat GPT pada akhir 2022 menandai transformasi cepat dalam pendidikan dan kemudian diikuti oleh perkembangan berbagai aplikasi Gen AI multimodal. Perkembangan tersebut mendorong peneliti untuk mengkaji penggunaan Gen AI secara lebih sistematis dalam proses pembelajaran.

Khusus pada aspek *critical thinking*, perkembangan penelitian tersebut semakin relevan karena penggunaan AI tidak hanya dipandang sebagai alat untuk memperoleh informasi, tetapi juga sebagai teknologi yang perlu digunakan secara kritis oleh murid. (Liu *et al.,* (2025) melalui *systematic review*, menemukan bahwa Gen AI berpotensi mendukung kemampuan analisis, penalaran, evaluasi, pengambilan keputusan, dan pemecahan masalah, tetapi pada saat yang sama terdapat risiko ketergantungan terhadap AI yang dapat mengurangi kedalaman berpikir apabila penggunaannya tidak disertai bimbingan pedagogi.

2. Hubungan Antar Penulis *(Co-authorship)*



Gambar 2. Visualisasi Antar Penulis

Berdasarkan analisis kontribusi penulis dari 28 artike l SLR mengenai *Artificial Intelligence* dalam mendukung critical thinking pada pembelajaran Biologi, distribusi author menunjukkan bahwa tidak terdapat penulis yang memiliki jumlah publikasi lebih dari satu artikel. Seluruh penulis yang teridentifikasi, seperti Jaya S., Zaharudin R., Bhartiya S., Alomari M., Hoffarth M., Mawn M.V., Washington J.M., Fedotova V.S., Fedotova N.S., Chick J., Morello L., Staffey S., Abdelfattah M., Mata'ni A.A., dan Paquibot J., masing-masing memiliki kontribusi sebanyak 1 artikel dalam dataset penelitian. Pemanfaatan kecerdasan buatan sebagai alat bantu berpikir (*mindtool*) dapat mendukung pengembangan kemampuan *critical thinking* dalam pembelajaran Biologi (Mawn & Washington, 2026). Penelitian lain menunjukkan bahwa penggunaan *Artificial Intelligence* (AI) secara signifikan meningkatkan kemampuan *critical thinking* siswa dalam pembelajaran Biologi (Sinyo & Sabtu, 2025).

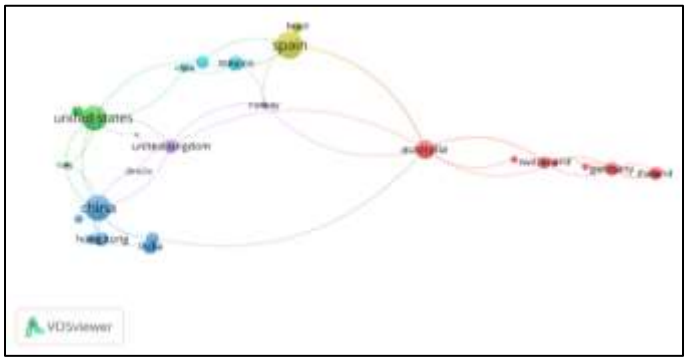
Pola distribusi tersebut menunjukkan bahwa penelitian mengenai pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) untuk mendukung kemampuan *critical thinking* dalam pembelajaran Biologi masih berada pada tahap perkembangan awal dan belum menunjukkan adanya dominasi oleh kelompok penulis tertentu. Tidak ditemukannya author dengan produktivitas publikasi yang tinggi mengindikasikan bahwa kajian AI dalam pendidikan masih berkembang secara multidisipliner dengan melibatkan berbagai bidang, seperti pendidikan sains, biologi, teknologi pendidikan, ilmu komputer, dan pendidikan tinggi. Perkembangan penelitian AI dalam pendidikan menunjukkan peningkatan jumlah publikasi dari waktu ke waktu, meskipun kolaborasi antarpengarang

masih tergolong terbatas (Durak *et al.,* 2024). Penerapan AI dalam pendidikan juga masih berada pada tahap perkembangan dan relatif baru bagi peneliti maupun praktisi (Chiu *et al*., 2023).

Persebaran kontribusi penulis yang relatif merata menunjukkan bahwa penelitian AI dalam pembelajaran masih bersifat eksploratif dan melibatkan berbagai komunitas akademik dari negara serta institusi yang berbeda. Penelitian yang dilakukan oleh Mawn & Washington (2026) menjadi salah satu contoh kontribusi penting karena secara spesifik mengkaji AI sebagai mindtool untuk meningkatkan kemampuan *critical thinking* dalam pembelajaran biologi. Sementara itu, penelitian lain seperti Jaya *et al.,* (2026) dan (Hoffarth, 2026) memperluas kajian dengan membahas penggunaan AI dalam pembelajaran berbasis proyek dan pengembangan kemampuan *critical thinking* pada konteks pendidikan yang lebih luas.

Secara keseluruhan, hasil analisis author menunjukkan bahwa bidang penelitian AI dan *critical thinking* dalam pembelajaran Biologi belum membentuk kelompok penelitian yang terkonsentrasi, tetapi mulai berkembang melalui kolaborasi lintas disiplin. Kondisi ini menunjukkan adanya peluang penelitian lanjutan untuk membangun komunitas riset yang lebih kuat, khususnya pada integrasi AI dalam pembelajaran biologi secara spesifik serta pengembangan model pembelajaran berbasis AI yang berorientasi pada keterampilan berpikir tingkat tinggi. AI dan *critical thinking* berkembang dalam berbagai tema (Salido *et al.,* 2025), sedangkan AI dalam pembelajaran Biologi dapat mendorong kemampuan menganalisis, mengevaluasi, dan mensintesis (Mawn & Washington, 2026).

3. Distribusi Negara Penelitian



Gambar 3. Visualisasi Antar Negara

Berdasarkan analisis distribusi negara afiliasi penulis pada 28 artikel SLR mengenai pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) dalam mendukung kemampuan *critical thinking* pada pembelajaran Biologi, ditemukan bahwa penelitian berasal dari berbagai negara dengan tingkat kontribusi yang berbeda. United States menjadi negara dengan kontribusi publikasi tertinggi sebanyak 10 artikel, menunjukkan dominasi institusi dan peneliti Amerika Serikat dalam pengembangan kajian AI untuk pendidikan, khususnya pada bidang STEM *education*, *biology education*, dan integrasi teknologi pembelajaran. Ulukok-Yildirim & Sonmez (2025) yang menunjukkan bahwa Amerika Serikat merupakan negara dengan kontribusi publikasi tertinggi dalam penelitian AI pada pendidikan sains. Salah satu bentuk pemanfaatan AI dalam pembelajaran sains ditunjukkan oleh Holzmann *et al*., (2025) melalui penggunaan Chat GPT untuk mengidentifikasi dan memvalidasi klaim berdasarkan bukti guna mengembangkan keterampilan penalaran berbasis bukti.

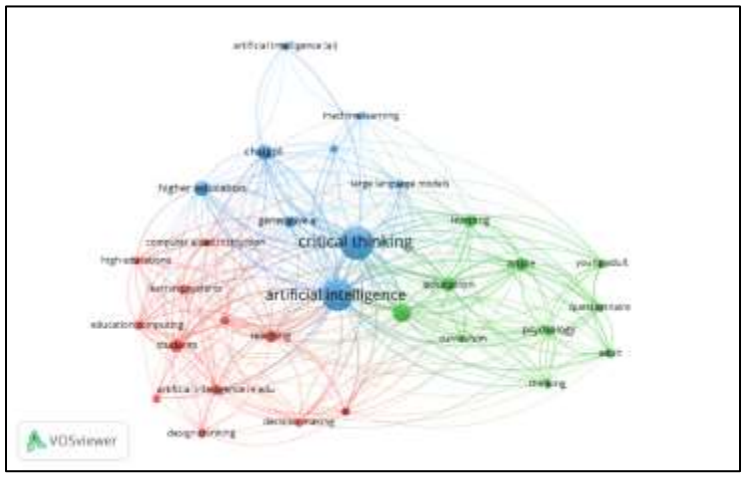
Kontribusi penelitian juga berasal dari United Kingdom dengan 3 artikel, serta Canada dan China masing-masing dengan 2 artikel. Negara-negara tersebut menunjukkan perhatian yang cukup besar terhadap penerapan AI dalam pendidikan melalui pengembangan generative AI, *Large Language Models* (LLMs), AI *assisted learning*, serta strategi pembelajaran yang mendukung keterampilan berpikir tingkat tinggi. Negara lain seperti Malaysia, Jordan, India, Indonesia, Egypt, Türkiye, Taiwan, South Africa, Ireland, Spain, Ecuador, dan Denmark masing-masing menghasilkan satu artikel. Persebaran ini menunjukkan bahwa penelitian mengenai AI dalam pembelajaran mulai berkembang secara global dan tidak hanya terbatas pada negara dengan perkembangan teknologi tinggi. Persebaran ini menunjukkan bahwa penelitian mengenai AI dalam pembelajaran mulai berkembang secara global (Akhmadieva *et al*., 2023).

Dominasi beberapa negara maju dalam publikasi AI pendidikan dapat berkaitan dengan kesiapan infrastruktur digital, investasi penelitian, serta kebijakan pengembangan teknologi pendidikan yang lebih matang. Munculnya penelitian dari negara berkembang seperti Indonesia, Malaysia, India, dan Jordan menunjukkan bahwa integrasi AI dalam pembelajaran Biologi telah menjadi perhatian internasional. Integrasi AI dalam pembelajaran sains telah menjadi perhatian dalam penelitian pendidikan secara global (Zhai *et al*., 2021) . Meskipun jumlah publikasi antarnegara masih belum merata, pola distribusi tersebut menunjukkan bahwa AI dalam pendidikan merupakan bidang penelitian multidisipliner yang melibatkan berbagai konteks pendidikan, mulai dari

pendidikan dasar hingga pendidikan tinggi. Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa AI dalam pendidikan terus berkembang dengan berbagai aplikasi dan mencakup beragam konteks pendidikan, mulai dari K-12 hingga pendidikan tinggi (Wang *et al.,* 2024).

Secara keseluruhan, distribusi negara penelitian menunjukkan bahwa kajian AI untuk mendukung *critical thinking* dalam pembelajaran Biologi masih berada pada fase perkembangan dengan kontribusi yang tersebar di berbagai wilayah. Penelitian AI dalam pendidikan menunjukkan kontribusi dari berbagai wilayah geografis. Namun, kontribusi beberapa negara masih lebih rendah dibandingkan negara lainnya (Fu *et al.,* 2025). Kondisi ini menunjukkan peluang untuk memperluas penelitian pada konteks negara yang masih memiliki keterbatasan representasi, termasuk pengembangan model implementasi AI yang sesuai dengan karakteristik sistem pendidikan dan kebutuhan pembelajaran lokal. Pengembangan implementasi AI perlu mempertimbangkan konteks pendidikan lokal, termasuk kondisi sosial budaya, infrastruktur teknologi, dan kebijakan pendidikan (Mardeli *et al.,* 2025).

4. Hubungan Kata Kunci



Gambar 3. Jaringan *Co-Occurrence Keyword* Hasil Analisis *VOSviewer*

Peta *VOSviewer* memperlihatkan keterkaitan kata kunci dalam kajian AI dan *critical thinking*. Kata kunci yang berdekatan dan dihubungkan garis tampak digunakan bersama dalam publikasi, sedangkan warna membedakan kelompok tema. *Critical thinking* dan *Artificial Intelligence* terlihat menonjol di bagian tengah peta, dengan hubungan ke tema pembelajaran, teknologi, dan konteks pendidikan. Pembacaan klaster tetap perlu dikaitkan dengan isi artikel karena pengelompokan perangkat lunak menunjukkan pola kemunculan bersama, sementara penamaan tema memerlukan interpretasi peneliti (Klarin *et al.,* 2024) .

Pola yang menghubungkan AI, pendidikan, dan kata kunci pembelajaran juga tampak dalam pemetaan riset AI pada pendidikan Sains (Genc & Kocak, 2024) .

Klaster biru berpusat pada critical thinking dan mencakup *Artificial Intelligence*, Chat GPT, *generative* AI, *large language model*, *machine learning*, serta *higher education*. Susunan ini menunjukkan bahwa kajian *critical thinking* dalam kumpulan publikasi tersebut beririsan erat dengan penggunaan AI generatif dan model bahasa, juga dengan konteks pendidikan tinggi. Posisi *critical thinking* di pusat jaringan mengisyaratkan keterhubungannya dengan beberapa tema lain pada peta. Ukuran simpul yang tampak besar menunjukkan kata kunci itu menonjol secara visual, tetapi jumlah kemunculan tepatnya perlu diperiksa pada data atau berkas hasil VOSviewer. Pemetaan AI dalam pendidikan juga melaporkan keterhubungan tema AI dengan konteks pembelajaran dan teknologi pendidikan (Fu *et al.,* 2025)

Klaster merah yang tampak di sisi kiri dan bagian bawah peta, mengelompokkan istilah seperti *students*, *teaching*, *learning systems*, *education computing*, *design thinking*, dan *decision-making*. Kelompok ini menggambarkan sisi implementasi pembelajaran murid dan pengajaran dikaitkan dengan sistem belajar berbantuan teknologi serta aktivitas berpikir dan pengambilan keputusan. Peta menghubungkan pembahasan AI *critical thinking* dengan konteks kelas serta desain kegiatan belajar. Studi bibliometrik pendidikan Sains di sekolah menengah Indonesia juga menemukan tema *critical thinking* berhubungan dengan strategi pembelajaran dan keterampilan Sains (Muchson *et al.,* 2024).

Klaster hijau di sisi kanan memuat istilah *education*, *learning*, *article*, *curriculum*, *psychology*, *thinking*, *questionnaire*, *adult*, dan *young adult*. Kelompok ini menunjukkan bahwa literatur juga mengaitkan pembelajaran AI dengan kurikulum, aspek psikologis, pengukuran melalui kuesioner, dan kelompok peserta dewasa. *Questionnaire* ini juga mengindikasikan bahwa sebagian studi dalam himpunan data menggunakan instrumen survei atau kuesioner, tetapi peta saja tidak cukup untuk memastikan desain penelitian tiap artikel. Kajian AI dalam pendidikan memetakan beragam konteks pendidikan dan pendekatan penelitian, sehingga interpretasi kelompok ini sebaiknya ditindaklanjuti dengan pemeriksaan artikel sumber (Fu *et al.,* 2025). Kajian bibliometrik tentang *critical thinking* dan STEM menunjukkan bahwa keterampilan *critical thinking* dikaji bersama pembelajaran Biologi, Sains, dan murid (Purnomo & Puspitawati, 2024). Peta menggambarkan tiga ranah yang saling terhubung: AI dan *critical thinking* sebagai tema

inti, praktik pembelajaran dan murid pada klaster merah, serta konteks pendidikan, kurikulum, dan karakteristik pembelajar pada klaster hijau. Keterhubungan antar klaster menunjukkan bahwa pembahasan AI tidak berdiri sendiri melainkan beririsan dengan proses belajar dan kompetensi berpikir. Hasil ini sejalan dengan peta riset AI dalam pendidikan Sains yang mengelompokkan tema seputar pembelajaran, teknologi AI, dan hasil belajar (Nadifah *et al.,* 2026). Kata kunci *biology* tidak tampak jelas pada peta gambar ini sendiri belum menunjukkan bahwa seluruh hubungan tersebut secara khusus berasal dari pembelajaran Biologi. Kepastian fokus Biologi perlu ditopang oleh pemeriksaan korpus artikel dan strategi pencarian SLR

B. Karakteristik penelitian mengenai pemanfaatan *Artificial Intelligence* dalam mendukung kemampuan *critical thinking* murid pada pembelajaran Biologi

Untuk mengidentifikasi pola dan karakteristik penelitian menganai pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) dalam pembelajaran Biologi, dilakukan analisis terhadap artikel-artikel yang telah memenuhi kriteria dalam kajian *Systematic Literature Review* (SLR). Analisis mencakup beberapa aspek, yaitu penulis dan tahun publikasi, fokus bidang pembelajaran, bentuk pemanfaatan AI, kontribusinya terhadap kemampuan *critical thinking*, serta metode penelitian yang digunakan. Karakteristik artikel yang dianalisis disajikan pada Tabel berikut.

Tabel 1. Karakteristik Artikel AI dalam Pembelajaran Biologi

No	Author (Tahun)	Fokus Bidang Pembelajaran	Pemanfaatan AI	Kontribusi terhadap Kemampuan Berpikir	Metode Penelitian
1	Abdelfattah *et al.,* (2026)	*Higher Education*	AI *feedback* dalam latihan presentasi.	Mendorong evaluasi diri dan refleksi.	*Pilot case study*
2	Asunda *et al.,* (2023)	*Integrated* STEM *Education*	AI dikaitkan dengan *computational thinking* dalam STEM.	Mengembangkan *Problem Solving, Computational Thinking,* dan *Analytical Thinking.*	*Conceptual framework*
3	Cabrera–Solano & Castillo-Cuesta	Pendidikan guru	AI untuk meningkatkan *critical thinking* guru.	Mengembangkan kemampuan analisis dan evaluasi.	*Quantitative study*

	(2026)				
4	Carroll & Borycz (2024)	Pendidikan berbasis teknologi	*Integrasi Large Language Model* (LLM) dalam pembelajaran.	Mendukung evaluasi informasi dan refleksi kritis terhadap hasil AI.	*Literature review*
5	Chick *et al.,* (2026)	Pendidikan guru	AI *adoption* dalam pengembangan profesional guru.	Meningkatkan kesiapan guru menggunakan AI untuk pembelajaran.	*Case study*
6	Elshall & Badir (2025)	*Assessment* pendidikan	AI *assisted assessment.*	Memberikan *feedback* untuk evaluasi pembelajaran.	*Empirical study*
7	Fedotova & Fedotova (2026)	*Personalized Learning*	AI *adaptive learning system*.	Mendukung pembelajaran mandiri dan pengambilan keputusan.	*Conceptual study*
8	Ginting *et al.,* (2025)	Pendidikan digital	Integrasi AI dalam pembelajaran.	Menganalisis kesiapan dan strategi penggunaan AI.	*Qualitative study*
9	Hoffarth, (2026)	Pendidikan kesehatan	AI dalam pembelajaran profesional.	Mengembangkan *critical reflection* dan *reasoning*.	*Conceptual paper*
10	Holzmann *et al.,* (2025)	*Biology education*	ChatGPT *fact checking*.	Melatih verifikasi informasi ilmiah biologis.	*Educational intervention*
11	Jaya *et al.,* (2026)	Pembelajaran berbasis proyek	AI *enhanced project based learning.*	Meningkatkan kreativitas, kolaborasi, dan pemecahan masalah.	*Conceptual/Framework*
12	Jiang *et al.,* (2025)	AI *Reasoning Evaluation*	Evaluasi kemampuan berpikir model AI.	Memberikan kerangka evaluasi kemampuan *reasoning*.	*Evaluation study*
13	Katsenou *et*	*Collaborative*	AI sebagai	Mendukung interaksi	*Conceptual*

	al., (2025)	*learning*	*collaborative co agent*.	dan konstruksi pengetahuan.	*study*
14	Kunnath & Botes (2025)	*Science Education*	AI dalam *inquiry based learning*.	Meningkatkan *scientific reasoning* dan *problem solving*.	*Conceptual framework*
15	Leahy *et al.,* (2025)	*Higher education*	AI intervention learning.	Meningkatkan engagement dan kemampuan berpikir reflektif.	*Intervention study*
16	Lin & Chang (2025)	STEAM *learning*	AI *supported design thinking*.	Meningkatkan kreativitas dan pemecahan masalah.	*Experimental study*
17	Luan *et al.,* (2025)	STEM *Education*	Chat GPT dalam pembelajaran STEM.	Mendukung *inquiry* dan *critical thinking*.	*Review paper*
18	Luchkevych & Luchkevych (2026)	AI dalam pendidikan	Kajian implementasi AI pendidikan.	Mengidentifikasi faktor pendukung *critical thinking*.	*Review paper*
19	Luo & Tahir (2025)	STEAM *Education*	Chat GPT untuk *lesson planning*.	Membantu desain pembelajaran berbasis HOTS.	*Case study*
20	Mawn & Washington (2026)	Pendidikan Biologi	AI sebagai *mindtool* untuk pembelajaran biologi.	Meningkatkan analisis konsep biologis, evaluasi informasi, dan argumentasi ilmiah.	*Educational practice*
21	Nawafleh & Al-Abbas (2025)	Pembelajaran Sains	AI *science instructional module.*	Meningkatkan pemahaman konsep dan HOTS.	*Quasi Experimental*
22	Otto *et al.,* (2025)	STEM *Education*	Human Gen AI *interaction.*	Mengembangkan pembelajaran aktif berbasis teknologi.	*Review/state of art*
23	Román-González &	*Computational Thinking*	AI sebagai bagian dari	Mengembangkan berpikir logis dan	*Theoretical paper*

	Vidal-Fernández (2026)		pengembangan kemampuan komputasi.	analitis.	
24	Singh *et al.,* (2025)	*Generative AI learning*	AI *search* dan *metacognitive prompts*.	Meningkatkan evaluasi informasi dan *critical thinking*.	*Experimental study*
25	Švejdarová (2026)	*Ecopedagogy*	AI generatif dalam pembelajaran dialogis.	Mendukung refleksi dan pemikiran kritis.	*Conceptual paper*
26	Uminski (2026)	*Biology Education*	AI *generated images* sebagai media analisis.	Melatih literasi visual, evaluasi bukti, dan *critical thinking*.	Teaching intervention
27	Yali *et al.,* (2026)	*Project based learning*	AI *digital storytelling*.	Mengembangkan kreativitas, komunikasi, dan HOTS.	*Design based research*
28	Zorlu (2025)	*Science teacher education*	AI *question generation*.	Meningkatkan kemampuan analisis dan evaluasi.	*Quantitative study*

Berdasarkan analisis terhadap 28 artikel penelitian, karakteristik penelitian mengenai pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) dalam mendukung kemampuan *critical thinking* murid pada pembelajaran Biologi menunjukkan bahwa kajian ini berkembang pada berbagai konteks pembelajaran, mulai dari STEM *education*, *biology education*, *higher education*, pendidikan guru, hingga pembelajaran berbasis proyek. Pembelajaran biologi dapat didukung dengan menggunakan AI untuk mengeksplorasi beragam pemikiran kreatif yang lebih luas (Rahioui *et al.,* 2025). Penelitian berfokus pada integrasi AI *generatif*, *large language models* (LLM), Chat GPT, serta sistem pembelajaran adaptif.

Fokus penelitian sebagian besar artikel mengkaji peran AI sebagai *cognitive support tool* yang membantu murid dalam mengembangkan kemampuan *critical thinking*, yang memuat *problem solving*, *analytical thinking*, kreativitas, dan evaluasi informasi. Dalam pembelajaran Biologi, penelitian seperti Mawn & Washington (2026; Uminski (2026) menunjukkan bahwa AI dapat digunakan sebagai *mindtool* untuk membantu analisis

konsep biologis, evaluasi informasi ilmiah, serta meningkatkan literasi visual dan argumentasi ilmiah. Penelitian dalam bidang STEM dan sains lebih banyak menekankan penggunaan AI untuk mendukung *inquiry learning*, *design thinking*, dan pembelajaran berbasis proyek. Hal ini sejalan dengan Kotsis (2025) bahwa AI mentransformasikan pendidikan STEM melalui sistem tutor cerdas, platform pembelajaran adaptif, penilaian otomatis dan *laboratorium virtual* untuk meningkatkan personalisasi pembelajaran, keterlibatan murid dan *inquiry learning*. (Štuikys *et al.,* (2025) Penelitian tersebut juga menjelaskan bahwa dalam *design thinking*, AI dapat membantu dalam proses membuat dan mengembangkan ide. AI memahami kebutuhan pengguna, menemukan berbagai ide baru, serta menggabungkan kegiatan di dunia nyata dan dunia digital.

Metode penelitian artikel yang dianalisis menggunakan pendekatan yang beragam, meliputi *conceptual framework*, *literature review*, *case study*, *quasi experimental*, *experimental study*, *qualitative study*, *quantitative study*, *intervention study*, hingga *design-based research*. Hal ini menunjukkan bahwa penelitian AI dalam pendidikan masih berkembang dari tahap eksplorasi konsep menuju pengujian implementasi secara empiris. Penelitian empiris mulai banyak dilakukan untuk mengukur pengaruh AI terhadap kemampuan *critical thingking*, pemahaman konsep, kreativitas, dan keterlibatan murid. Penelitian empiris pendidikan digunakan untuk menganalisis dan menginterpretasikan data atau informasi yang dikumpulkan melalui eksperimen, wawancara, atau survei terhadap subjek penelitian (Ma *et al.,* 2022). Kemampuan *critical thingking* maupun kreatif dapat ditingkatkan dengan menggunakan AI untuk mendukung perkembangan kognitif ketika digunakan dalam desain pembelajaran yang tepat seperti regulasi metagonitif, penalaran argumentatif serta pengembangan ide (Li *et al.,* 2026).

Hasil analisis menunjukkan bahwa AI telah dimanfaatkan tidak hanya sebagai alat bantu memperoleh informasi, tetapi juga sebagai media yang mendukung proses kognitif murid melalui analisis, evaluasi, refleksi, dan *critical thingking*. Sejalan dengan hal tersebut Sardi *et al.,* (2025) menyatakan bahwa dapat dilakukan dengan umpan balik reflektif, pertanyaan lanjutan, dan simulasi skenario yang dapat mendorong murid untuk mengevaluasi penalarannya, mempertimbangkan perspektif alternatif, serta mengembangkan solusi terhadap permasalahan yang kompleks. Penelitian yang secara spesifik mengintegrasikan AI dalam pembelajaran Biologi masih relatif terbatas dibandingkan penelitian pada konteks STEM atau pendidikan umum. Kondisi ini

menunjukkan adanya peluang pengembangan penelitian lebih lanjut mengenai model pembelajaran Biologi berbasis AI yang secara khusus dirancang untuk meningkatkan kemampuan *critical thingking* murid. Hal ini sejalan dengan yang menunjukkan bahwa AI dalam pembelajaran dapat berperan sebagai media yang mendukung proses kognitif murid melalui keterlibatan aktif, refleksi kritis, respons analisis, dan peningkatan keterampilan *critical thingking*.

C. Manfaat dan tantangan pemanfaatan *Artificial Intelligence* dalam mendukung kemampuan *critical thinking* murid pada pembelajaran Biologi

Berdasarkan hasil analisis terhadap artikel yang dikaji, pemnafaatan Artificial Intelligence dalam pembelajaran biologi memiliki berbagai manfaat dalam mendukung kemampuan critical thinking murid, tetapi juga menghadirkan sejumlah tantangan dalam penerapannya. Manfaat dan tantangan tersebut kemudian diidentifikasi dan dikelompokkan berdasarkan temuan dari masing-masing artikel, sebagaimana disajikan pada Tabel berikut

Tabel 2. Manfaat dan Tantangan AI

No	Artikel	Manfaat AI terhadap Critical Thinking	Tantangan Implementasi AI
1	Abdelfattah *et al.,* (2026)	Memberikan *feedback* untuk refleksi diri.	Validitas *feedback* AI.
2	Asunda *et al.,* (2023)	Mengembangkan *computational thinking* dan *problem solving*.	Guru membutuhkan literasi AI.
3	Cabrera–Solano & Castillo-Cuesta (2026)	Meningkatkan *critical thinking* guru.	Pelatihan AI diperlukan.
4	Carroll & Borycz (2024)	Membantu analisis informasi melalui LLM.	Risiko informasi tidak akurat.
5	Chick *et al.,* (2026)	Meningkatkan kesiapan guru menggunakan AI.	Hambatan penerimaan teknologi.
6	Elshall & Badir (2025)	Meningkatkan evaluasi pembelajaran melalui *feedback*.	AI belum memahami konteks penuh murid.
7	Fedotova & Fedotova (2026)	Mendukung personalized learning.	Privasi data murid.

8	Ginting *et al.,* (2025)	Mendukung strategi integrasi AI.	Kesiapan institusi pendidikan.
9	Hoffarth, (2026)	Mendorong refleksi kritis.	Perubahan paradigma pembelajaran.
10	Holzmann *et al.,* (2025)	Melatih *fact checking* biologi.	Informasi AI perlu validasi.
11	Jaya *et al.,* (2026)	Meningkatkan kreativitas dan pemecahan masalah.	Ketergantungan teknologi.
12	Jiang *et al.,* (2025)	Memberikan pemahaman tentang reasoning AI.	Kemampuan AI masih terbatas.
13	Katsenou *et al.,* (2025)	AI sebagai partner belajar.	Batas peran AI dan manusia.
14	Kunnath & Botes (2025)	Mendukung *inquiry learning*.	Desain pedagogi harus tepat.
15	Leahy *et al.,* (2025)	Meningkatkan *engagement* maha murid.	Ketergantungan pada AI.
16	Lin & Chang (2025)	Meningkatkan kreativitas desain.	Membutuhkan pendampingan guru.
17	Luan *et al.,* (2025)	Mendukung STEM learning.	AI *hallucination*.
18	Luchkevych & Luchkevych(2026)	Mengidentifikasi strategi implementasi AI.	Masalah etika penggunaan AI.
19	Luo & Tahir (2025)	Mempermudah desain pembelajaran STEAM.	Risiko penggunaan AI secara mekanis.
20	Mawn & Washington (2026)	Mendukung evaluasi konsep biologi dan argumentasi ilmiah.	Murid dapat menerima jawaban AI tanpa verifikasi.
21	Nawafleh & Al-Abbas (2025)	Meningkatkan konsep sains dan HOTS.	Ketersediaan fasilitas teknologi.
22	Otto *et al.,* (2025)	Meningkatkan active learning.	Masalah etika akademik.
23	Román-González & Vidal-Fernández (2026)	Mengembangkan *computational reasoning*.	Kesenjangan kemampuan digital.
24	Singh *et al.,* (2025)	Meningkatkan evaluasi informasi digital.	Kemungkinan bias AI.
25	Švejdarová (2026)	Mendukung dialog dan refleksi.	Keterbatasan interaksi manusia.
26	Uminski (2026)	Melatih evaluasi representasi	AI dapat menghasilkan gambar

		visual biologis.	biologis yang salah.
27	Yali *et al.,* (2026)	Meningkatkan kreativitas dan komunikasi.	Kebutuhan desain proyek yang jelas.
28	Zorlu (2025)	Membantu menghasilkan pertanyaan HOTS.	Kualitas soal AI perlu evaluasi.

Berdasarkan analisis terhadap 28 artikel penelitian, Pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) dalam pembelajaran Biologi dapat memperkuat kemampuan *critical thingking* ketika AI digunakan sebagai *mindtool,* yaitu mitra dalam penalaran dan pemecahan masalah. Penggunaan ini mengubah posisi murid dari penerima informasi pasif menjadi pembelajar aktif yang melakukan analisis, evaluasi, dan sintesis. AI juga dapat mengurangi beban kognitif sehingga murid memiliki lebih banyak kapasitas untuk melakukan *critical thingking*. AI mendukung *computational thinking* dan pemecahan masalah dalam Asunda *et al.,* (2023) , analisis informasi dalam Carroll & Borycz (2024), serta refleksi kritis dalam Hoffarth (2026) . AI juga menyediakan umpan balik untuk refleksi diri menurut Abdelfattah *et al.,* (2026) dan dialog Švejdarová (2026) . Peran sebagai partner belajar dalam Katsenou *et al.,* (2025) turut memperkuat *active learning* dari Otto *et al.,* (2025). Penggunaan AI berpotensi meningkatkan kreativitas dan keterlibatan belajar (Jaya *et al.,* 2026; Leahy *et al.,* 2025). *Critical thingking* tetap merupakan keterampilan manusia sehingga AI hanya berfungsi sebagai pelengkap. AI tidak menggantikan proses berpikir murid, tetapi membantu memperkaya proses tersebut. Manfaat tersebut perlu dipahami dalam konteks pembelajaran Biologi yang memiliki konsep dan representasi khusus.

Manfaat AI terhadap *critical thingking* dapat diwujudkan melalui aktivitas yang mendorong murid menganalisis, mengevaluasi, dan mensintesis informasi. Mawn & Washington (2026) merancang aktivitas *what if modeling*, *concept mapping*, dan identifikasi informasi keliru. Dalam *concept mapping*, murid mengevaluasi kebenaran peta konsep yang dihasilkan AI kemudian menyusun peta konsep yang lebih tepat. Identifikasi informasi yang keliru seperti murid menemukan kesalahan, memperbaikinya, dan menyusun dokumen berdasarkan bukti serta sumber ilmiah yang kredibel. Uminski (2026) menunjukkan bahwa kesalahan pada diagram Biologi yang dibuat AI dapat menjadi bahan diskusi untuk melatih *critical thinking*. Kesalahan tersebut juga mendorong murid memahami bagaimana diagram digunakan untuk menyampaikan informasi Biologi. AI turut mendukung pemahaman konsep sains dan HOTS serta *inquiry learning* (Kunnath &

Botes, 2025; Nawafleh & Al-Abbas, 2025). AI dapat digunakan untuk menyusun pertanyaan HOTS (Zorlu, 2025), latihan *fact checking* Biologi (Holzmann *et al.,* 2025), dan evaluasi informasi digital (Singh *et al.,* 2025).

Ketidaksempurnaan AI dapat menjadi sumber aktivitas *critical thingking*. Kondisi tersebut sekaligus menunjukkan pentingnya kemampuan murid dalam mengenali dan mengatasi ketidakakuratan AI. Ketidakakuratan informasi yang dihasilkan AI merupakan salah satu tantangan penting dalam pembelajaran. Carroll & Borycz (2024) mencatat risiko informasi tidak akurat, Luan *et al.,* (2025) juga menyoroti fenomena miskonsepsi dalam pembelajaran STEM. Miskonsepsi merupakan keluaran AI yang terlihat meyakinkan tetapi sebenarnya keliru atau dibuat tanpa dasar. Studi kasus yang dikutip Mawn dan Washington menemukan berbagai kesalahan Chat GPT, termasuk kesalahan logika, penalaran, fakta, dan fabrikasi informasi. Risiko meningkat apabila murid menerima jawaban AI tanpa melakukan verifikasi. Jawaban AI yang keliru menyebabkan sebagian besar siswa memberikan jawaban yang salah dan menyalin keluaran AI secara langsung. Temuan menunjukkan bahwa murid dapat bergantung pada jawaban AI tanpa pemeriksaan sistematis Mawn & Washington (2026) . Kesalahan AI dapat menjadi sumber belajar apabila murid memiliki pengetahuan awal yang memadai untuk mengidentifikasinya. Pengetahuan awal yang rendah dapat menyebabkan beban kognitif berlebih dan meningkatkan risiko miskonsepsi. Ketidakakuratan AI perlu diikuti dengan verifikasi dan penjelasan guru mengenai letak serta alasan kesalahan tersebut.

Bias AI menjadi tantangan karena dapat memengaruhi cara murid menilai dan memahami informasi. Singh *et al.,* (2025) menyoroti kemungkinan bias AI dalam evaluasi informasi digital, sedangkan Mawn dan Washington menekankan pentingnya kesadaran murid terhadap keterbatasan dan bias AI. Tinjauan terhadap 75 artikel menemukan berbagai bentuk bias algoritmik yang dipengaruhi oleh bias perancang, bias sistemik historis, serta data yang diskriminatif atau tidak memadai. Salah satu contohnya adalah sistem penilaian otomatis di Inggris pada 2020 yang merugikan siswa dari sekolah di komunitas berpenghasilan rendah. Bukti empiris mengenai bias AI masih terbatas karena belum banyak penelitian yang menguji perbedaan akurasi berdasarkan kelompok murid. Ketergantungan terhadap AI juga menjadi perhatian dari Jaya *et al.,* (2026; Leahy *et al.,* (2025) yang mencatat adanya risiko ketergantungan pada teknologi.

Keterlibatan guru dalam literasi AI menjadi faktor penting dalam mewujudkan

manfaat AI sekaligus mengatasi berbagai tantangannya. Asunda *et al.,* (2023) menekankan kebutuhan literasi AI bagi guru, sedangkan Cabrera–Solano & Castillo-Cuesta (2026) menekankan pentingnya pelatihan. Chick *et al.,* (2026) menunjukkan bahwa kesiapan guru dapat ditingkatkan meskipun masih terdapat hambatan penerimaan teknologi. Mawn & Washington (2026) menyarankan agar guru tidak hanya membatasi penggunaan AI, tetapi menetapkan praktik yang dapat diterima dan memberikan contoh penggunaannya. Guru juga perlu menetapkan ekspektasi yang jelas serta merancang pengalaman belajar yang bermakna. Guru berperan sebagai fasilitator dan mentor melalui pengawasan *human in the loop*, dengan AI sebagai pengusul dan guru sebagai pengambil keputusan akhir. Keberhasilan penggunaan AI juga dipengaruhi oleh desain pedagogi, proyek yang jelas, fasilitas teknologi, kesiapan institusi, privasi data, etika, dan penggunaan AI secara tidak mekanis. Bukti empiris AI sebagai *mindtool* dalam pembelajaran Biologi masih perlu diperkuat. AI memiliki potensi besar dalam mendukung *critical thingking* apabila digunakan sebagai alat pendukung, bukan pengganti proses berpikir manusia. Efektivitasnya sangat bergantung pada peran guru dalam merancang aktivitas yang mendorong analisis, evaluasi, refleksi, dan pemecahan masalah (Zaini *et al.,* 2025).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian, penelitian mengenai pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) untuk mendukung *critical thinking* dalam pembelajaran mengalami peningkatan, terutama pada tahun 2025–2026. Penelitian berkembang dari pembahasan umum mengenai penggunaan dan penerimaan AI menuju pemanfaatannya untuk mendukung kemampuan analisis, evaluasi, pemecahan masalah, dan refleksi. Karakteristik penelitian menunjukkan penggunaan berbagai bentuk AI, seperti Generative AI, LLM, dan ChatGPT, dalam pembelajaran Biologi, STEM, dan Sains. AI dimanfaatkan sebagai alat bantu untuk mendukung penalaran, evaluasi informasi, pemecahan masalah, kreativitas, dan critical thinking. Namun, penelitian yang secara khusus mengkaji AI dalam pembelajaran Biologi masih relatif terbatas. AI memberikan manfaat dalam mendukung analisis, evaluasi, refleksi, fact checking, pemecahan masalah, dan argumentasi ilmiah. Di sisi lain, terdapat tantangan berupa informasi yang tidak akurat (hallucination), bias, ketergantungan, keterbatasan literasi digital, privasi, etika, serta kesiapan guru dan fasilitas. Oleh karena itu,

AI sebaiknya digunakan sebagai alat pendukung berpikir, bukan sebagai pengganti kemampuan berpikir peserta didik. Secara keseluruhan, pemanfaatan AI berpotensi mendukung *critical thinking* dalam pembelajaran Biologi apabila diterapkan melalui aktivitas yang mendorong analisis, evaluasi, refleksi, dan pemecahan masalah dengan tetap melibatkan peran guru sebagai pembimbing.

REFERENSI

Abdelfattah, M., Mata'ni, A. Al, Paquibut, J., & Ayadi, H. H. (2026). Learners' Perceptions of AI Feedback in Oral Presentation Rehearsals: A Pilot Case Study in Oman. *Journal of Information Technology Education: Innovations in Practice*, *25*, 1–22. https://doi.org/10.28945/5692

Akhmadieva, R. S., Udina, N. N., Kosheleva, Y. P., Zhdanov, S. P., Timofeeva, M. O., & Budkevich, R. L. (2023). Artificial intelligence in science education: A bibliometric review. In *Contemporary Educational Technology* (Vol. 15, Number 4). Bastas. https://doi.org/10.30935/cedtech/13587

Ambarita, N., & Nurrahmatullah, Muh. F. (2024). Impacts of Artificial Intelligence on Student Learning: A Systematic Literature Review. *Jurnal VARIDIKA*, 13–30. https://doi.org/10.23917/varidika.v36i1.4730

Asunda, P., Faezipour, M., Tolemy, J., & Do Engel, M. T. (2023). Embracing Computational Thinking as an Impetus for Artificial Intelligence in Integrated STEM Disciplines through Engineering and Technology Education. *Journal of Technology Education*, *34*(2), 43–63. https://doi.org/10.21061/jte.v34i2.a.3

Brignardello-Petersen, R., Santesso, N., & Guyatt, G. H. (2025). Systematic reviews of the literature: an introduction to current methods. *American Journal of Epidemiology*, *194*(2), 536–542. https://doi.org/10.1093/aje/kwae232

Cabrera–Solano, P., & Castillo-Cuesta, L. (2026). Integration of Artificial Intelligence to Strengthen Critical Thinking in Teacher Training. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, *25*(7), 535–553. https://doi.org/10.26803/ijlter.25.7.24

Carroll, A. J., & Borycz, J. (2024). Integrating large language models and generative artificial intelligence tools into information literacy instruction. *Journal of Academic Librarianship*, *50*(4). https://doi.org/10.1016/j.acalib.2024.102899

Chick, J., Morello, L., & Staffey, S. (2026). From fear to innovation: a case study of transformative faculty development for ethical AI integration in higher education. *International Journal for Educational Integrity*, *22*(1). https://doi.org/10.1007/s40979-026-00225-x

Chiu, T. K. F., Xia, Q., Zhou, X., Chai, C. S., & Cheng, M. (2023). Systematic literature review on opportunities, challenges, and future research recommendations of artificial intelligence in education. In *Computers and Education: Artificial Intelligence* (Vol. 4). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100118

Diantama, S. (2023). Pemanfaatan Artificial Intelegent (AI) dalam Dunia Pendidikan. *Jurnal Teknologi Pendidikan,* 1(1). 8-14 https://doi.org/10.61434/dewantech.v1i1.8.

Dongoran, M., Nasution, U. A., & Pane, D. A. (2025). Effectiveness of The Use Artificial Intelligence on Biology Student Learning UIN Syahada Padangsidimpuan. *Bioedunis Journal*, *3*(2), 205–218. https://doi.org/10.24952/bioedunis.v3i2.13898

Durak, G., Çankaya, S., Özdemir, D., & Can, S. (2024). Artificial Intelligence in Education: A Bibliometric Study on Its Role in Transforming Teaching and Learning. In *International Review of Research in Open and Distributed Learning* (Vol. 25), https://doi.org/10.19173/irrodl.v25i3.7757

Elshall, A. S., & Badir, A. (2025). Balancing AI-assisted learning and traditional assessment: the FACT assessment in environmental data science education. *Frontiers in Education*, *10*. https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1596462

Fajari, S. L. E. W., & Chumdari. (2021). Critical Thinking Skills And Their Impacts On Elementary School Students. *Malaysian Journal of Learning and Instruction*, *18*(2), 161–187. https://doi.org/10.32890/mjli2021.18.2.6

FEDOTOVA, V. S., & FEDOTOVA, N. S. (2026). Generative artificial intelligence as a means of delivering personalised and adaptive feedback in education. *Perspektivy Nauki i Obrazovania*, *2026*(2), 93–130. https://doi.org/10.32744/pse.2026.2.6

Fu, Y., Weng, Z., & Wang, J. (2025). Examining AI Use in Educational Contexts: A Scoping Meta-Review and Bibliometric Analysis. In *International Journal of Artificial Intelligence in Education* (Vol. 35, Number 3, pp. 1388–1444). Springer. https://doi.org/10.1007/s40593-024-00442-w

Genc, H. N., & Kocak, N. (2024). Bibliometric Analysis of Studies on the Artificial Intelligence in Science Education with VOSviewer. *Journal of Education in Science, Environment and Health*, 183–195. https://doi.org/10.55549/jeseh.756

Giannakos, M., Azevedo, R., Brusilovsky, P., Cukurova, M., Dimitriadis, Y., Hernandez-Leo, D., Järvelä, S., Mavrikis, M., & Rienties, B. (2025). The promise and challenges of generative AI in education. *Behaviour and Information Technology*, *44*(11), 2518–2544. https://doi.org/10.1080/0144929X.2024.2394886

Ginting, D., Hartono, R., & Iskandar, I. (2025). Navigating Artificial Intelligence (AI) Integration in English Language Teaching: Challenges, Opportunities and Future Directions. *Asia Pacific Journal of Educators and Education*, *40*(2), 279–301. https://doi.org/10.21315/apjee2025.40.2.13

Harianti, H., Anwar, S., Kadarohaman, A., Sc, / J, Anwar, ; S, & Kadarohman, A. (2025). The Intersection of AI and Science Education in Indonesia: A Path Forward. *JSER Journal of Science Education Research Journal Homepage*, *2024*(1), 1–10. https://doi.org/10.21831/jser.v9.i1.74872

Hoffarth, M. (2026). Reimagining critical thinking in the age of AI: Implications for nursing education and practice. *Nurse Education Today*, *162*. https://doi.org/10.1016/j.nedt.2026.107076

Holzmann, U., Anand, S., & Payumo, A. Y. (2025). The ChatGPT Fact-Check: exploiting the limitations of generative AI to develop evidence-based reasoning skills in college science courses. *Advances in Physiology Education*, *49*(1), 191–196.

https://doi.org/10.1152/ADVAN.00142.2024

Jaya, S., Zaharudin, R., Bhartiya, S., & Alomari, M. (2026). Bridging Educational Gaps in Low-Resource Classrooms: AI-Enhanced Project-Based Learning for STEM Educators in Africa. *ECNU Review of Education*, *9*(2). https://doi.org/10.1177/20965311261446194

Jiang, L., Cui, Y., Liu, R., & Luo, F. (2025). Evaluating the Critical Thinking of Large Language Models: Insights and Limitations. *Journal of Pacific Rim Psychology*, *19*. https://doi.org/10.1177/18344909251406111

Katsenou, R., Kotsidis, K., Papadopoulou, A., Anastasiadis, P., & Deliyannis, I. (2025). Beyond Assistance: Embracing AI as a Collaborative Co-Agent in Education. *Education Sciences*, *15*(8). https://doi.org/10.3390/educsci15081006

Klarin, J., Hoff, E., Larsson, A., & Daukantaitė, D. (2024). Adolescents' use and perceived usefulness of generative AI for schoolwork: exploring their relationships with executive functioning and academic achievement. *Frontiers in Artificial Intelligence*, *7*. https://doi.org/10.3389/frai.2024.1415782

Kotsis, K. T. (2025). Artificial Intelligence for Physics Education in STEM Classrooms: A Narrative Review within a Pedagogy Technology Policy Framework. *Schrödinger: Journal of Physics Education*, *6*(3), 204–211. https://doi.org/10.37251/sjpe.v6i3.2148

Kunnath, A. J., & Botes, W. (2025). Transforming science education with artificial intelligence: Enhancing inquiry-based learning and critical thinking in South African science classrooms. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, *21*(6). https://doi.org/10.29333/ejmste/16532

Leahy, K., Ozer, E., & Cummins, E. P. (2025). AI-ENGAGE: A Multicentre Intervention to Support Teaching and Learning Engagement with Generative Artificial Intelligence Tools. *Education Sciences*, *15*(7). https://doi.org/10.3390/educsci15070807

Li, C., Cui, H., & Hagedorn, L. S. (2026). The cognitive impact of ChatGPT in higher education: A systematic review of critical and creative thinking outcomes. In *Computers and Education: Artificial Intelligence* (Vol. 10). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2026.100571

Lin, M. Y., & Chang, Y. S. (2025). Effects of design thinking STEAM instruction on AI learning and creativity. *International Journal of Technology and Design Education*, *35*(5), 2025–2047. https://doi.org/10.1007/s10798-025-09977-y

Liu, J., Sihes, A. J. Bin, & Lu, Y. (2025). How do generative artificial intelligence (AI) tools and large language models (LLMs) influence language learners' critical thinking in EFL education? A systematic review. In *Smart Learning Environments* (Vol. 12, Number 1). Springer. https://doi.org/10.1186/s40561-025-00406-0

Luan, L., Lin, X., & Dai, Y. (2025). Bridging the Gap: ChatGPT's Role in Enhancing STEM Education. *Open Praxis*, *17*(1), 108–128. https://doi.org/10.55982/openpraxis.17.1.685

Luchkevych, M., & Luchkevych, V. (2026). Issues with Using Artificial Intelligence in an Educational Environment: Implications for the Training of DevOps Professionals. *Acta Paedagogica Vilnensia*, *56*, 270–294. https://doi.org/10.15388/ActPaed.2026.56.15

Luo, Z., & Tahir, R. (2025). ChatGPT-Assisted Lesson Planning for Children's STEAM Arts Education: An Experimental Study on Benefits, Challenges, Methods, and a Prompt Framework. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, *35*(6), 3696–3745. https://doi.org/10.1007/s40593-025-00513-6

Ma, Y., Xiu, Q., Shao, L., & Yao, H. (2022). Promoting the Sustainable Improvement of Educational Empirical Research Quality: What Kinds of Collaborative Production Relationships Make Sense? *Sustainability (Switzerland)*, *14*(6). https://doi.org/10.3390/su14063380

Maharani, & Akhyar, R. M. (2026). Sistem Pendukung Keputusan Pemilihan Guru Terbaik Metode Simple Additive Weighting SMP Negeri 1 Samarinda. *Adopsi Teknologi Dan Sistem Informasi (ATASI)*, *5*(2), 18–26. https://doi.org/10.30872/atasi.v5i2.4561

Mardeli, M., Sari, J. P., Setyaningsih, K., Fauzi, M., Fitri, E., & Ballianie, N. (2025). Generative AI in Personalized Learning: A Systematic Review of Implementation in Indonesia. *EDUKASIA Jurnal Pendidikan Dan Pembelajaran*, *6*(2), 989–1002. https://doi.org/10.62775/edukasia.v6i2.1672

Mawn, M. V., & Washington, J. M. (2026). Using artificial intelligence as a mindtool to foster critical thinking in biology education. *Journal of Microbiology & Biology Education*, *27*(2). https://doi.org/10.1128/jmbe.00048-26

Muchson, M., Cobern, W. W., & Saefi, M. (2024). The science education research trends (SERT) in Indonesian secondary schools: a systematic review and bibliometrics study. In *Cogent Education* (Vol. 11, Number 1). Taylor and Francis Ltd. https://doi.org/10.1080/2331186X.2024.2308407

Nadifah, I., Rahmawati, L., Libna, &, & Mufidah, S. (2026). EDUTECH Jurnal Teknologi Pendidikan Journal homepage https://ejournal.upi.edu/index.php/edutech Research Trends of Artificial Intelligence In Science Education: A Scopus-Based Bibliometric Mapping Using Vosviewer. *Jurnal Teknologi Pendidikan*, *25*(2), 2026. https://doi.org/10.17509/e.v25i2.99912

Nawafleh, W., & Al-Abbas, L. (2025). Developing An Artificial Intelligence-Based Science Instructional Module and Measuring Its Effect on Acquiring Scientific Concepts and Critical Thinking Skills among Seventh-Grade Female Students. *Educational Process: International Journal*, *15*. https://doi.org/10.22521/edupij.2025.15.92

Ng, S. L., & Ho, C. C. (2025). Generative AI in Education: Mapping the Research Landscape Through Bibliometric Analysis. *Information (Switzerland)*, *16*(8). https://doi.org/10.3390/info16080657

Ocen, S., Elasu, J., Aarakit, S. M., & Olupot, C. (2025). Artificial intelligence in higher education institutions: review of innovations, opportunities and challenges. In *Frontiers in Education* (Vol. 10). Frontiers Media SA. https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1530247

Otto, S., Lavi, R., & Brogaard Bertel, L. (2025). Human-GenAI interaction for active learning in STEM education: State-of-the-art and future directions. *Computers and Education*, *239*. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2025.105444

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson,

E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *Systematic Reviews*, *10*(1). https://doi.org/10.1186/s13643-021-01626-4

Paramita, E., Aminullah, A., Ratnasari, D., & Husna, A. (2025). Transformasi Perkembangan Kurikulum di Indonesia. *Jurnal Pendidikan Dan Pembelajaran Indonesia (JPPI)*, *5*(1), 169–184. https://doi.org/10.53299/jppi.v5i1.976

Priyanti, A. N., & Wahyuni, S. (2022). Transformasi Pembelajaran Biologi Berbasis AI untuk Meningkatkan Kompetensi Calon Guru Masa Depan. *Jurnal Pembelajaran Dan Riset Pendidikan |*, *457*. https://doi.org/10.28926/jprp.v2i4.1709

Purnomo, A. P., & Pratiwi Puspitawati, R. (2024). *Analisis Bibliometrik Keterampilan Berpikir Kritis dalam Pembelajaran Biologi Melalui STEM Pada Tinjauan Publikasi 2013-2023*.

Qian, Y. (2025). Pedagogical Applications of Generative AI in Higher Education: A Systematic Review of the Field. *TechTrends*, *69*(5), 1105–1120. https://doi.org/10.1007/s11528-025-01100-1

Qu, W., Chang, Y., & Fan, H. (2026). Critical thinking skills of Chinese students: a meta-analysis of individual studies between 2002 and 2025. In *Frontiers in Psychology* (Vol. 17). Frontiers Media SA. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2026.1856476

Rachman, S. F. N. (2025). Bibliometric Analysis: Research Trends in the Utilization of Artificial Intelligence (AI) in Biology Learning. *Asian Journal of Applied Education (AJAE)*, *4*(1), 37–56. https://doi.org/10.55927/ajae.v4i1.13685

Rahioui, F., Jouti, M. A. T., & EL Ghzaoui, M. (2025). Exploring the effect of ChatGPT-3 on biology students' lateral thinking skills: a mixed-methods study and impacts for ai-enhanced education. *Telematics and Informatics Reports*, *19*. https://doi.org/10.1016/j.teler.2025.100249

Román-González, M., & Vidal-Fernández, A. (2026). Extending the Definition of Computational Talent. *Behavioral Sciences*, *16*(8). https://doi.org/10.3390/bs16081278

Salido, A., Syarif, I., Sitepu, M. S., Suparjan, Wana, P. R., Taufika, R., & Melisa, R. (2025). Integrating critical thinking and artificial intelligence in higher education: A bibliometric and systematic review of skills and strategies. In *Social Sciences and Humanities Open* (Vol. 12). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2025.101924

Sardi, J., Darmansyah, Candra, O., Yuliana, D. F., Habibullah, Yanto, D. T. P., & Eliza, F. (2025). How Generative AI Influences Students' Self-Regulated Learning and Critical Thinking Skills? A Systematic Review. *International Journal of Engineering Pedagogy*, *15*(1), 94–108. https://doi.org/10.3991/ijep.v15i1.53379

Singh, A., Guan, Z., & Rieh, S. Y. (2025). Enhancing Critical Thinking in Generative AI Search with Metacognitive Prompts. *88th Annual Meeting of the Association for Information Science & Technology*, https://doi.org/10.1002/pra2.1287

Sinyo, Y., & Sabtu, R. (2025). The Effectiveness of Using Artificial Intelligence Media to Improve Students' Critical Thinking Skills in Biology Learning Concepts. *Journal of Educational Analytics*, *4*(3), 635–646. https://doi.org/10.55927/jeda.v4i3.340

Štuikys, V., Burbaitė, R., Binkis, M., & Ziberkas, G. (2025). Developing Problem-Solving Skills

to Support Sustainability in STEM Education Using Generative AI Tools. *Sustainability (Switzerland)*, *17*(15). https://doi.org/10.3390/su17156935

Suryawan, I. P. P., Sudiarta, I. G. P., & Suharta, I. G. P. (2023). Students' Critical Thinking Skills in Solving Mathematical Problems: Systematic Literature Review. *Indonesian Journal Of Educational Research and Review*, *6*(1), 120–133. https://doi.org/10.23887/ijerr.v6i1.56462

Švejdarová, E. (2026). Dialogical ecopedagogy with generative AI: a postdigital framework for critical thinking and planetary justice in higher education. *Cogent Education*, *13*(1). https://doi.org/10.1080/2331186X.2026.2641850

Ulukok-Yildirim, S., & Sonmez, D. (2025). A Comprehensive Bibliometric Analysis of Artificial Intelligence Research in the Field of Science Education. *Journal of Education in Science, Environment and Health*, *11*(4), 334–353. https://doi.org/10.55549/jeseh.870

Uminski, C. (2026). Bad AI-generated images can be good for teaching visual literacy in biology. *Journal of Microbiology & Biology Education*, *27*(2). https://doi.org/10.1128/jmbe.00321-25

Wang, S., Wang, F., Zhu, Z., Wang, J., Tran, T., & Du, Z. (2024). Artificial intelligence in education: A systematic literature review. In *Expert Systems with Applications* (Vol. 252). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124167

Yali, T., Mengxiao, T., Gengrui, L., & Wei, D. (2026). In the AI era: A project-based digital storytelling framework for art and design education. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, *11*. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2026.100645

Zaini, N. A., Siti, T., Wook, M. T., Nor, M., Khalid, A., Azman, S., & Noah, M. (2025). User Requirements of Adaptive Learning Through Digital Game-Based Learning: User-Centered Design Approach to Enhance the Language Literacy Development. In *IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications* (Vol. 16, Number 9), https://doi.org/10.14569/IJACSA.2025.0160919

Zhai, X., Chu, X., Chai, C. S., Jong, M. S. Y., Istenic, A., Spector, M., Liu, J. B., Yuan, J., & Li, Y. (2021). A Review of Artificial Intelligence (AI) in Education from 2010 to 2020. In *Complexity* (Vol. 2021). Hindawi Limited. https://doi.org/10.1155/2021/8812542

Zorlu, Y. (2025). The Role of Artificial Intelligence (Ai)-Assisted Question Generation On Preservice Science Teachers' 21st-Century Teaching Competencies. *Journal of Baltic Science Education*, *24*(5), 984–1005. https://doi.org/10.33225/jbse/25.24.984