

IMPLEMENTASI *AI-ADAPTIVE SYSTEMS* DALAM PEMBELAJARAN IPAS SEKOLAH DASAR UNTUK MENINGKATKAN KETERAMPILAN BERPIKIR KRITIS SISWA

Awalina Barokah

Pendidikan Guru Sekolah Dasar, Universitas Pelita Bangsa, Bekasi, Indonesia

awalina.barokah@pelitabangsa.ac.id

Zahira Mufida Rochman

Pendidikan Guru Sekolah Dasar, Universitas Pelita Bangsa, Bekasi, Indonesia

zahiramufida25@gmail.com

ABSTRACT

The rapid advancement of Artificial Intelligence (AI) has transformed educational practices by enabling adaptive, personalized, and student-centered learning environments. One of the emerging innovations is AI-Adaptive Systems, which dynamically adjust learning content, instructional strategies, and feedback according to students' individual characteristics and learning progress. This study aims to analyze the opportunities, challenges, and implementation of AI-Adaptive Systems through blended learning in elementary Integrated Science and Social Studies (IPAS) to enhance students' critical thinking skills. This study employed a qualitative approach using a literature review method. Data were collected exclusively from the Scopus database following the PRISMA 2020 guidelines. The initial search identified 212 articles, of which 19 met the inclusion criteria and were subsequently analyzed using content analysis. The findings reveal that AI-Adaptive Systems provide substantial opportunities to improve IPAS learning by facilitating personalized instruction, adaptive feedback, inquiry-based learning, formative assessment, and student engagement, all of which contribute to the development of critical thinking skills. However, several challenges remain, including limited teacher competency in AI integration, inadequate digital infrastructure, concerns regarding the accuracy of AI-generated information, ethical and data privacy issues, and students' overreliance on AI technologies. Furthermore, integrating AI-Adaptive Systems into blended learning environments offers an effective instructional strategy by combining face-to-face and online learning to create more flexible, interactive, and meaningful learning experiences. Therefore, strengthening teachers' AI competencies, improving digital infrastructure, and establishing responsible AI governance are essential to maximize the educational benefits of AI-Adaptive Systems in elementary IPAS learning.

Keyword: *AI-Adaptive Systems; Artificial Intelligence in Education; Blended Learning; Critical Thinking Skills; Elementary Education.*

PENDAHULUAN / INTRODUCTION

Integrasi teknologi digital dalam dinamika pendidikan kontemporer telah membawa transformasi yang fundamental dan multidimensional terhadap sistem

pendidikan, termasuk pada jenjang sekolah dasar. Transformasi ini tidak hanya mengubah cara guru menyampaikan materi pembelajaran, tetapi juga mendorong terciptanya lingkungan belajar yang lebih adaptif, personal, dan berpusat pada peserta didik. Seiring dengan akselerasi Revolusi Industri 4.0 dan Society 5.0, pendidikan dituntut tidak hanya membekali peserta didik dengan penguasaan pengetahuan akademis, tetapi juga dengan keterampilan abad ke-21, di antaranya kemampuan berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, dan komunikasi (Voogt & Roblin, 2012). Keterampilan berpikir kritis menjadi fondasi esensial agar peserta didik mampu menganalisis informasi secara mendalam, mengevaluasi bukti secara objektif, memecahkan masalah secara logis, serta mengambil keputusan berdasarkan penalaran yang rasional dan sistematis.

Urgensi pengembangan kemampuan berpikir kritis semakin diperkuat oleh berbagai hasil asesmen internasional yang menunjukkan capaian rendah peserta didik Indonesia. Hasil PISA oleh OECD (2023) mengungkapkan bahwa kemampuan literasi sains siswa Indonesia masih berada jauh di bawah rata-rata negara-negara anggota OECD. Indonesia memperoleh skor literasi sains sebesar 383 poin, sedangkan rata-rata OECD mencapai 485 poin selisih yang sangat signifikan dan mencerminkan kesenjangan kompetensi yang perlu segera diatasi. Lebih memprihatinkan, hanya sekitar 34% siswa Indonesia yang mampu mencapai Level 2 atau lebih pada literasi sains, yaitu ambang kompetensi minimum yang menunjukkan kemampuan menggunakan pengetahuan ilmiah untuk menjelaskan fenomena alam dan menarik kesimpulan berdasarkan bukti empiris. Sebaliknya, sebagian besar peserta didik Indonesia belum mampu menunjukkan kemampuan berpikir ilmiah dan bernalar secara memadai dalam konteks kehidupan nyata.

Data tersebut secara tegas mengindikasikan bahwa kemampuan berpikir kritis dan penalaran ilmiah peserta didik Indonesia masih memerlukan perhatian yang serius dan intervensi pedagogis yang terencana. Rendahnya capaian literasi sains mengonfirmasi bahwa sebagian besar siswa masih mengalami kesulitan dalam menganalisis informasi ilmiah secara kritis, mengevaluasi validitas bukti, serta mengaplikasikan konsep-konsep sains untuk menyelesaikan permasalahan kontekstual dalam kehidupan sehari-hari. Kondisi ini menegaskan perlunya inovasi pembelajaran yang secara simultan mampu memfasilitasi proses berpikir tingkat tinggi sekaligus mengakomodasi keragaman karakteristik, gaya, dan kecepatan belajar peserta didik (Anderson et al., 2025; Brookhart, 2010).

Salah satu inovasi yang berkembang pesat dan menjanjikan dalam lanskap pendidikan global adalah pemanfaatan Artificial Intelligence (AI). Menurut Luckin et al., (2016), AI dalam pendidikan memiliki kapasitas untuk mewujudkan pembelajaran yang terintegrasi melalui kemampuannya menganalisis karakteristik individual, kebutuhan belajar, dan perkembangan kompetensi setiap peserta didik secara otomatis dan real-time. Dengan demikian, AI tidak lagi diposisikan sekadar sebagai media penyampaian konten pembelajaran, melainkan berkembang menjadi teknologi cerdas yang mampu mendukung proses pengambilan keputusan pedagogis secara adaptif dan responsif. Selain itu, AI berpotensi membantu guru dalam mengidentifikasi kesenjangan pemahaman siswa, memberikan umpan balik formatif yang tepat sasaran, serta merancang jalur belajar yang disesuaikan dengan profil masing-masing peserta didik (Holmes et al., 2019; Zawacki-Richter et al., 2019). Facione (2015) menjelaskan bahwa berpikir kritis merupakan proses kognitif yang melibatkan kemampuan interpretasi, analisis, evaluasi, inferensi, eksplanasi, serta regulasi diri dalam konteks pengambilan keputusan yang

kompleks. Kemampuan-kemampuan ini sejatinya dapat dilatihkan sejak dini melalui pembelajaran IPA yang dirancang secara kontekstual dan berbasis penyelidikan.

Namun demikian, implementasi pembelajaran IPAS di sekolah dasar masih menghadapi berbagai tantangan yang bersifat struktural maupun pedagogis. Pembelajaran cenderung berpusat pada guru melalui pendekatan ceramah, sehingga kesempatan peserta didik untuk melakukan eksplorasi, penyelidikan ilmiah mandiri, dan diskusi argumentatif masih sangat terbatas (Abell & Appleton, 2010). Di samping itu, heterogenitas kemampuan kognitif, gaya belajar, dan latar belakang pengetahuan siswa menyebabkan guru mengalami kesulitan dalam memberikan layanan pembelajaran yang responsif terhadap kebutuhan masing-masing individu. Kondisi tersebut pada akhirnya berdampak pada kurang optimalnya pengembangan kemampuan berpikir kritis siswa, yang justru merupakan kompetensi inti yang harus dikuasai pada abad ke-21 (National Research Council, 2012)

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, pembelajaran berdiferensiasi telah diidentifikasi sebagai salah satu pendekatan pedagogis yang paling relevan dan efektif. (Tomlinson, 2017) menjelaskan bahwa pembelajaran berdiferensiasi memungkinkan guru untuk secara fleksibel menyesuaikan konten, proses pembelajaran, produk yang dihasilkan peserta didik, serta lingkungan belajar berdasarkan kesiapan belajar, minat, dan profil belajar masing-masing individu. Pendekatan ini memberikan kesempatan yang setara kepada setiap peserta didik untuk memperoleh pengalaman belajar yang sesuai dengan karakteristik uniknya, sehingga potensi berpikir kritis dapat berkembang secara optimal dan merata. Perkembangan AI menghadirkan peluang revolusioner melalui AI-Adaptive Systems sistem yang mampu mengotomatiskan proses diferensiasi dengan menyesuaikan materi, aktivitas, dan bentuk evaluasi secara real-time berdasarkan perkembangan kemampuan masing-masing peserta didik (Brusilovsky & Millán, 2007).

Dalam konteks pembelajaran IPA di sekolah dasar, AI-Adaptive Systems berpotensi memfasilitasi penyajian simulasi interaktif, eksperimen virtual berbasis inkuiri, visualisasi konsep abstrak, serta umpan balik formatif yang bersifat personal dan segera, sehingga dapat membantu peserta didik memahami konsep-konsep sains yang kompleks sekaligus meningkatkan kemampuan berpikir kritis secara terstruktur (Hwang & Tu, 2021). Pendekatan blended learning yang mengintegrasikan pembelajaran tatap muka dengan pembelajaran daring berbasis AI menawarkan ekosistem belajar yang hibrida, di mana interaksi sosial dan bimbingan langsung dari guru tetap terjaga sembari peserta didik memperoleh pengalaman belajar yang dipersonalisasi secara digital (Graham, 2018; Staker & Horn, 2012).

Meskipun demikian, penerapan AI dalam pendidikan tidak terlepas dari berbagai tantangan yang perlu dipertimbangkan secara kritis. UNESCO (2021) mengidentifikasi sejumlah isu krusial, antara lain kesiapan kompetensi digital guru, ketersediaan infrastruktur teknologi yang merata, perlindungan data dan privasi peserta didik, serta dimensi etika dalam pemanfaatan algoritma pembelajaran adaptif. Selain itu, penggunaan AI yang berlebihan tanpa diimbangi dengan interaksi sosial secara langsung berpotensi mengurangi kesempatan peserta didik untuk mengembangkan keterampilan komunikasi interpersonal, kolaborasi, dan empati, kompetensi sosial emosional yang tidak dapat sepenuhnya difasilitasi oleh teknologi (Luckin et al., 2016).

Berbagai penelitian terdahulu telah melaporkan dampak positif pemanfaatan AI dalam pendidikan. Holmes et al., (2019) menunjukkan bahwa sistem AI mampu meningkatkan personalisasi dan efektivitas pembelajaran secara signifikan. Hwang & Tu, (2021) membuktikan bahwa *adaptive learning* berbasis AI efektif dalam meningkatkan

hasil belajar dan motivasi siswa. Graham (2018) menyimpulkan bahwa pendekatan blended learning secara konsisten mampu meningkatkan keterlibatan belajar dan pencapaian akademik peserta didik. Akan tetapi, kajian yang secara spesifik dan komprehensif menganalisis implementasi AI-Adaptive Systems dalam pembelajaran IPAS jenjang sekolah dasar, khususnya dalam konteks peningkatan kemampuan berpikir kritis melalui pendekatan blended learning (Willemsen et al., 2023; Zawacki-Richter et al., 2019), masih sangat terbatas dalam literatur akademik Indonesia maupun internasional

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara mendalam peluang dan tantangan implementasi AI-Adaptive Systems dalam pembelajaran IPAS di sekolah dasar guna meningkatkan kemampuan berpikir kritis peserta didik melalui pendekatan blended learning. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoretis maupun praktis bagi pengembangan inovasi pembelajaran berbasis teknologi di Indonesia, serta menjadi referensi bagi guru, pengambil kebijakan, dan peneliti di bidang teknologi pendidikan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode studi kepustakaan (*literature review*) untuk menganalisis secara komprehensif perkembangan penelitian mengenai implementasi AI-Adaptive Systems dalam pembelajaran IPAS di sekolah dasar. Studi kepustakaan bertujuan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil penelitian terdahulu sehingga diperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai topik penelitian (Creswell, 2013)

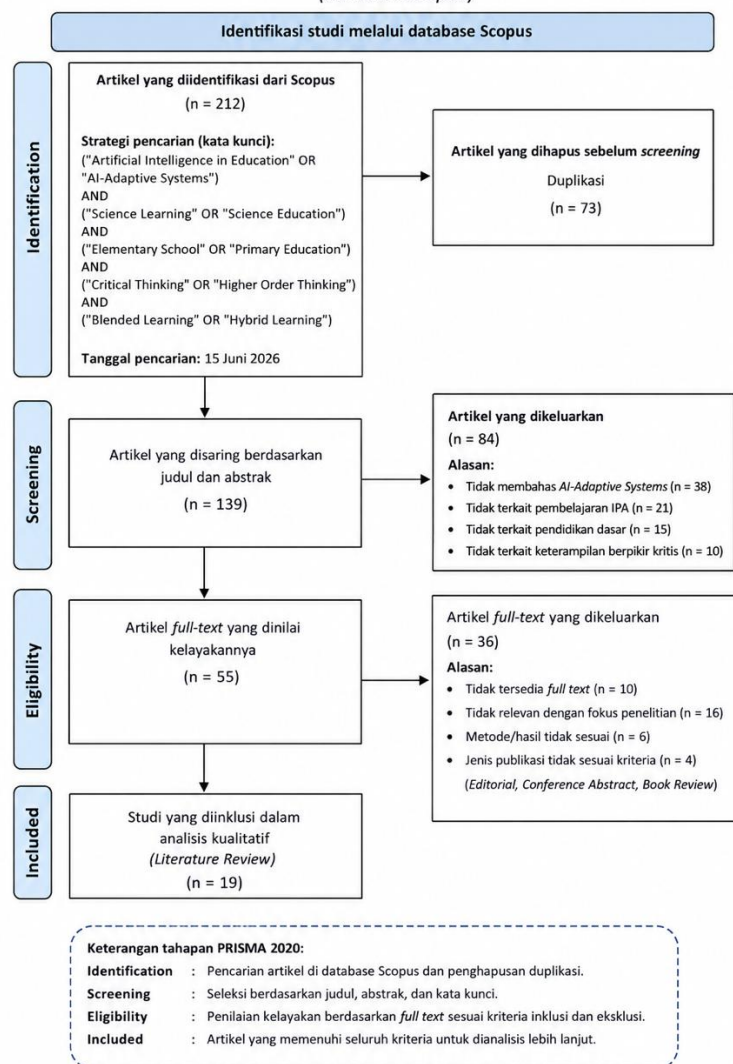
Sumber data penelitian diperoleh dari basis data Scopus, dengan pertimbangan bahwa basis data tersebut mencakup jurnal-jurnal bereputasi dan telah melalui proses peer-review yang ketat. Penelusuran literatur dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci:

("Artificial Intelligence in Education" OR "AI-Adaptive Systems") AND
("Science Learning" OR "Science Education") AND ("Elementary School" OR
"Primary Education") AND ("Critical Thinking" OR "Higher Order Thinking") AND
("Blended Learning" OR "Hybrid Learning")

Pencarian dibatasi pada artikel yang terbit pada rentang tahun 2020–2025. Proses seleksi artikel mengacu pada pedoman PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), yang terdiri atas empat tahapan, yaitu *identification*, *screening*, *eligibility*, dan *included*, sebagaimana diuraikan berikut.

PRISMA 2020 Flow Diagram untuk Seleksi Literatur

(Sumber: Scopus)



Gambar 1. Alur Prisma

Sintesis data dilakukan menggunakan teknik analisis isi melalui tiga tahapan, yaitu reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan, sebagaimana dikemukakan oleh (Miles et al., 2013). Analisis difokuskan pada identifikasi tema-tema utama mengenai peluang, tantangan, serta implikasi penerapan AI-Adaptive Systems dalam pembelajaran IPAS di sekolah dasar. Kriteria inklusi dalam penelitian ini meliputi: (1) artikel penelitian yang terindeks Scopus; (2) dipublikasikan pada periode 2020–2025; (3) tersedia dalam bentuk full text; (4) ditulis dalam bahasa Inggris; (5) membahas implementasi Artificial Intelligence atau AI-Adaptive Systems dalam konteks pendidikan; dan (6) memiliki relevansi dengan pembelajaran IPAS, pendidikan dasar, atau keterampilan berpikir kritis. Kriteria eksklusi meliputi: (1) artikel yang terbit sebelum tahun 2020 atau setelah tahun 2025; (2) artikel yang terduplikasi; (3) artikel yang tidak tersedia dalam bentuk full text; (4) artikel yang tidak relevan dengan fokus penelitian; serta (5) editorial, conference abstract, book review, atau publikasi nonriset.

Artikel-artikel rujukan yang disaring didominasi oleh karya publikasi dari rentang tahun 2020 hingga 2025 demi menjaga orisinalitas dan aktualitas data teoretis dari

perkembangan teknologi pendidikan terkini. Selain data jurnal, sejumlah referensi buku teks utama juga digunakan untuk memperkuat analisis dasar teoretis.

Prosedur analisis data dijalankan lewat tiga fase interaktif, yakni reduksi data, display atau penyajian data, serta penarikan kesimpulan akhir. Di fase reduksi data, peneliti menyaring dan menyeleksi naskah-naskah ilmiah yang benar-benar klop dengan tema sentral riset. Selanjutnya, data hasil reduksi diorganisasikan secara terstruktur berpatokan pada dua tema besar, yakni potensi akselerasi (peluang) serta hambatan sistemik (tantangan) dari penerapan *AI-Adaptive Systems* pada mata pelajaran IPAS di jenjang sekolah dasar.

HASIL DAN PEMBAHASAN / *RESULT AND DISCUSSION*

Analisis Penelitian Terdahulu

Hasil penelusuran pustaka mengonfirmasi bahwa arah pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) dalam ranah pendidikan terus mengalami eskalasi yang signifikan. Rangkaian studi empiris memvalidasi bahwa teknologi berbasis kecerdasan buatan mampu menyumbangkan fleksibilitas tinggi serta menyelaraskan ritme pembelajaran dengan preferensi personal siswa.

Tabel 1
Analisis Studi Literatur

No	Judul Artikel	Fokus Penelitian	Hasil Penelitian	Keterkaitan dengan Berpikir Kritis
1	(Ma et al., 2025)	Faktor yang memengaruhi keterlibatan belajar daring siswa.	Keterlibatan belajar dipengaruhi oleh kombinasi dukungan guru, teknologi, dan motivasi.	Keterlibatan belajar yang tinggi mendukung proses analisis, refleksi, dan pengambilan keputusan.
2	(Dimeli & Kostas, 2025)	Pemanfaatan ChatGPT dalam pendidikan.	ChatGPT meningkatkan personalisasi pembelajaran dan umpan balik, namun memerlukan pengawasan etis.	AI membantu siswa menganalisis informasi, mengevaluasi jawaban, dan menyusun argumen logis.
3	(Chen et al., 2023)	Tren penelitian <i>computational thinking</i> .	Terjadi peningkatan integrasi AI dan <i>computational thinking</i> dalam pendidikan.	<i>Computational thinking</i> mendukung penalaran logis dan pemecahan masalah sebagai komponen berpikir kritis.
4	(Al-Karasneh et al., 2025)	Implementasi Generative AI dalam pembelajaran IPA SD.	AI meningkatkan pemahaman konsep sains dan pembelajaran adaptif.	Sangat relevan karena AI mendorong analisis fenomena ilmiah, evaluasi bukti, dan penalaran ilmiah.

5	(Suwendra et al., 2023)	Model pembelajaran berbasis konsep diri.	Meningkatkan karakter dan kreativitas siswa.	Kepercayaan diri mendukung siswa dalam mengemukakan alasan dan mengevaluasi solusi.
6	(Kosmas et al., 2025)	Integrasi AI pada pembelajaran literasi SD.	AI memfasilitasi diferensiasi pembelajaran dan umpan balik individual.	Umpan balik adaptif membantu interpretasi, evaluasi, dan argumentasi siswa.
7	(Lin et al., 2023)	Pengembangan literasi AI melalui teknologi.	Meningkatkan pemahaman siswa mengenai AI dan penggunaannya secara bertanggung jawab.	Literasi AI membantu siswa mengevaluasi informasi digital secara kritis.
8	(Tian & Zheng, 2025)	Pengaruh AI terhadap keterampilan 4C.	AI meningkatkan <i>critical thinking</i> , kreativitas, komunikasi, dan kolaborasi.	Memberikan bukti empiris bahwa AI berkontribusi terhadap peningkatan berpikir kritis.
9	(H. Zhang & Wang, 2025)	Penggunaan Generative AI untuk pengembangan profesional guru.	AI meningkatkan pengetahuan pedagogik dan perencanaan pembelajaran guru.	Guru lebih mampu merancang aktivitas yang melatih berpikir kritis siswa.
10	(Behnamnia et al., 2024)	Penggunaan AI untuk meningkatkan keterampilan penelitian siswa.	AI membantu pencarian informasi, analisis data, dan penyusunan laporan.	Mengembangkan kemampuan evaluasi bukti dan penyelesaian masalah berbasis data.
11	(X. Zhang & Zhou, 2023)	Teknologi digital untuk meningkatkan kompetensi interkultural.	Teknologi meningkatkan komunikasi lintas budaya dan kolaborasi.	Berpikir kritis berkembang melalui evaluasi berbagai perspektif.
12	(Wang et al., 2025)	AI dan Virtual Reality dalam pembelajaran musik.	AI meningkatkan hasil belajar dan kemampuan evaluasi siswa.	Menunjukkan bahwa AI adaptif dapat memperkuat kemampuan refleksi dan evaluasi.
13	(Zheng et al., 2024)	Tren teknologi dalam pembelajaran fisika.	Teknologi mendukung eksperimen dan pembelajaran berbasis investigasi.	Pembelajaran berbasis investigasi melatih analisis data dan penalaran ilmiah.

14	(Prahani et al., 2020)	Model pembelajaran berbasis web dan mobile.	BWML meningkatkan HOTS siswa secara signifikan.	HOTS mencakup analisis, evaluasi, dan kreasi sebagai indikator berpikir kritis.
15	(Zheng et al., 2024)	Pembelajaran inkuiri virtual berbasis POE.	Meningkatkan keterampilan inkuiri dan pemahaman konsep sains.	Sangat relevan karena melatih observasi, analisis, inferensi, dan evaluasi.
16	(Ji et al., 2025)	Kolaborasi ChatGPT dengan siswa dalam pembelajaran STEM.	ChatGPT meningkatkan kreativitas dan kualitas pembelajaran.	AI menjadi mitra berpikir yang mendorong evaluasi dan pengembangan argumen.
17	(Husain, 2024)	Potensi ChatGPT dalam pembelajaran pemrograman.	ChatGPT membantu pemecahan masalah dan pembelajaran mandiri.	Pemecahan masalah melatih penalaran logis dan berpikir kritis.
18	(Aydin-Günbatır et al., 2025)	Kajian sistematis Generative AI dalam pendidikan sains.	AI mendukung pembelajaran yang lebih personal, adaptif, dan interaktif.	Sangat relevan karena AI memperkuat penalaran ilmiah dan pengambilan keputusan berbasis bukti.
19	(Chang et al., 2025)	AI dalam penulisan reflektif.	AI meningkatkan refleksi, metakognisi, dan kualitas belajar.	Refleksi merupakan bagian penting dari regulasi diri dan berpikir kritis.

Berdasarkan hasil sintesis terhadap 19 artikel yang terindeks Scopus, penelitian mengenai implementasi “*AI-Adaptive Systems*” dalam pendidikan menunjukkan tren yang terus meningkat, terutama dalam mendukung pembelajaran yang lebih adaptif, personal, dan berpusat pada peserta didik. Sebagian besar penelitian melaporkan bahwa pemanfaatan kecerdasan buatan mampu meningkatkan kualitas pembelajaran melalui pemberian umpan balik secara real-time, penyesuaian materi sesuai kebutuhan belajar siswa, serta fasilitasi aktivitas pembelajaran berbasis inkuiri dan pemecahan masalah. Ditinjau dari kaitannya dengan kemampuan berpikir kritis, hasil kajian menunjukkan bahwa “*AI-Adaptive Systems*” berkontribusi terhadap pengembangan kemampuan analisis, evaluasi, interpretasi informasi, penyelesaian masalah, dan pengambilan keputusan berbasis bukti. Beberapa penelitian juga menegaskan bahwa integrasi AI dalam pembelajaran IPA mampu memperkuat penalaran ilmiah, meningkatkan keterampilan berpikir tingkat tinggi, serta mendorong keterlibatan aktif peserta didik dalam proses pembelajaran. Selain berpengaruh terhadap peserta didik, beberapa artikel juga menyoroti peran AI dalam meningkatkan kompetensi guru, khususnya dalam merancang pembelajaran yang adaptif, melakukan asesmen formatif, dan memberikan umpan balik yang lebih efektif. Secara keseluruhan, temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa “*AI-Adaptive Systems*” memiliki potensi yang besar untuk

mendukung transformasi pembelajaran IPA di sekolah dasar melalui pembelajaran yang lebih personal, interaktif, dan berorientasi pada pengembangan kemampuan berpikir kritis siswa.

Peluang Penggunaan *AI-Adaptive Systems* dalam Pembelajaran IPAS

Berdasarkan hasil sintesis terhadap 19 artikel yang terindeks Scopus, implementasi “AI-Adaptive Systems” menunjukkan potensi yang signifikan dalam meningkatkan kualitas pembelajaran IPAS di sekolah dasar. Teknologi kecerdasan buatan memungkinkan pembelajaran berlangsung secara lebih adaptif melalui penyesuaian materi, aktivitas belajar, dan umpan balik berdasarkan karakteristik, kemampuan, serta kebutuhan individual peserta didik. Pendekatan ini mendukung terciptanya pembelajaran yang lebih personal dan berpusat pada siswa sehingga mampu meningkatkan efektivitas proses belajar. Salah satu peluang utama penggunaan AI-Adaptive Systems adalah pengembangan kemampuan berpikir kritis. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan AI, khususnya Nguyen & Tran (2024) dan Al-Karasneh et al., (2025) mampu memfasilitasi peserta didik dalam menganalisis informasi, mengevaluasi berbagai alternatif penyelesaian masalah, memberikan argumentasi berbasis bukti, serta merefleksikan proses berpikirnya. Aktivitas tersebut merupakan indikator utama kemampuan berpikir kritis yang sangat dibutuhkan dalam pembelajaran IPAS. Temuan ini sejalan dengan hasil kajian Dimeli & Kostas (2025) dan Aydin-Günbatar et al., (2025) yang menyatakan bahwa AI mampu meningkatkan kualitas penalaran, kreativitas, dan keterampilan pemecahan masalah melalui interaksi yang bersifat adaptif dan kolaboratif. Selain meningkatkan kemampuan berpikir kritis, AI-Adaptive Systems juga berpotensi memperkuat pembelajaran berbasis inkuiri yang menjadi karakteristik utama mata pelajaran IPAS. Penelitian Al-Karasneh et al., (2025) menunjukkan bahwa Generative AI membantu peserta didik memahami konsep-konsep sains yang abstrak melalui simulasi, visualisasi, dan pemberian umpan balik secara langsung sehingga proses penyelidikan ilmiah menjadi lebih efektif. Demikian pula, penelitian mengenai *Virtual Inquiry Learning* melaporkan bahwa integrasi AI dalam strategi “Predict-Observe-Explain” mampu meningkatkan kemampuan observasi, analisis data, penalaran ilmiah, dan penyusunan kesimpulan berdasarkan bukti empiris. Hasil tersebut menunjukkan bahwa AI dapat mendukung keterampilan proses sains yang menjadi salah satu capaian utama pembelajaran IPAS. Peluang lainnya adalah meningkatnya keterlibatan belajar. Penelitian mengenai jalur keterlibatan belajar siswa K–9 menemukan bahwa pembelajaran yang didukung teknologi adaptif mampu meningkatkan partisipasi aktif, motivasi belajar, dan interaksi siswa selama proses pembelajaran (Ma et al., 2025). Kondisi tersebut diperkuat oleh penelitian tentang integrasi AI dalam pembelajaran literasi yang menunjukkan bahwa umpan balik personal dan penyesuaian materi sesuai kemampuan siswa dapat meningkatkan rasa percaya diri serta mendorong siswa untuk lebih aktif mengeksplorasi konsep-konsep pembelajaran. Pembelajaran yang lebih interaktif tersebut memberikan ruang bagi siswa untuk mengembangkan kemampuan analisis, evaluasi, dan pengambilan keputusan secara mandiri.

Dari perspektif guru, AI-Adaptive Systems juga membuka peluang dalam meningkatkan kualitas pembelajaran melalui penyusunan materi yang terdiferensiasi, pelaksanaan asesmen formatif, serta analisis perkembangan belajar siswa secara lebih cepat dan akurat. Penelitian mengenai pemanfaatan Generative AI bagi guru menunjukkan bahwa teknologi AI membantu guru dalam merancang pengalaman belajar yang lebih efektif, memilih strategi pembelajaran yang sesuai dengan karakteristik

peserta didik, serta memberikan umpan balik yang lebih tepat sasaran. Dengan demikian, guru dapat lebih berfokus pada pengembangan aktivitas pembelajaran yang mendorong kemampuan berpikir kritis, kolaborasi, dan pemecahan masalah. Secara keseluruhan, hasil sintesis menunjukkan bahwa AI-Adaptive Systems memiliki peluang besar untuk mendukung transformasi pembelajaran IPAS di sekolah dasar melalui personalisasi pembelajaran, penguatan pembelajaran berbasis inkuiri, peningkatan keterlibatan belajar, optimalisasi asesmen formatif, serta pengembangan kemampuan berpikir kritis peserta didik. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa implementasi AI tidak hanya berfungsi sebagai inovasi teknologi, tetapi juga sebagai pendekatan pedagogis yang mampu menciptakan pengalaman belajar yang lebih bermakna, adaptif, dan relevan dengan tuntutan keterampilan abad ke-21.

Tantangan Penggunaan *AI-Adaptive Systems* dalam Pembelajaran IPAS

Penggunaan AI-Adaptive Systems dalam Pembelajaran IPAS Meskipun AI-Adaptive Systems menawarkan berbagai peluang dalam meningkatkan kualitas pembelajaran IPAS, hasil sintesis terhadap 19 artikel menunjukkan bahwa implementasinya masih menghadapi sejumlah tantangan yang perlu mendapat perhatian. Tantangan tersebut meliputi aspek kompetensi guru, kesiapan infrastruktur teknologi, validitas informasi yang dihasilkan AI, isu etika dan privasi data, serta kesenjangan akses terhadap teknologi digital. Salah satu tantangan utama adalah kesiapan kompetensi guru dalam mengintegrasikan AI ke dalam pembelajaran. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar guru masih berada pada tahap awal dalam memahami konsep, cara kerja, dan strategi pedagogis penggunaan AI di kelas. Penelitian H. Zhang & Wang (2025) dapat membantu guru dalam merancang pembelajaran dan menyusun asesmen, efektivitas penggunaannya sangat bergantung pada literasi digital dan kompetensi pedagogik guru. Temuan serupa juga dilaporkan dalam penelitian Behnamnia et al., (2024), yang menegaskan bahwa keberhasilan implementasi AI tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan teknologi, tetapi juga oleh kemampuan guru dalam memanfaatkan AI secara pedagogis untuk mendukung proses belajar. Tantangan berikutnya berkaitan dengan akurasi dan reliabilitas informasi yang dihasilkan oleh sistem AI. Penelitian Dimeli & Kostas, (2025) mengungkapkan bahwa meskipun AI mampu menghasilkan jawaban secara cepat, sistem ini masih berpotensi memberikan informasi yang kurang akurat, bias, atau tidak sesuai dengan konteks pembelajaran. Oleh karena itu, guru tetap memiliki peran penting sebagai fasilitator yang melakukan verifikasi terhadap informasi yang dihasilkan AI sebelum digunakan sebagai sumber belajar. Dalam pembelajaran IPAS, validitas informasi menjadi sangat penting karena materi yang dipelajari berkaitan dengan konsep-konsep ilmiah yang harus didukung oleh bukti empiris. Selain aspek akademik, isu etika, keamanan, dan privasi data juga menjadi tantangan yang banyak dibahas dalam literatur. Beberapa artikel menyoroti bahwa penggunaan AI dalam pendidikan melibatkan pengumpulan dan analisis data peserta didik untuk menghasilkan rekomendasi pembelajaran yang bersifat personal. Kondisi ini menimbulkan kekhawatiran mengenai keamanan penyimpanan data, perlindungan privasi, serta potensi penyalahgunaan informasi pribadi peserta didik apabila tidak diatur melalui kebijakan yang jelas. Oleh karena itu, implementasi AI-Adaptive Systems perlu disertai dengan penerapan prinsip etika penggunaan AI yang menjamin transparansi, akuntabilitas, dan perlindungan data pengguna. Tantangan lainnya adalah keterbatasan infrastruktur teknologi dan kesenjangan akses digital. Hasil beberapa penelitian menunjukkan bahwa implementasi AI memerlukan perangkat digital yang memadai, koneksi internet yang

stabil, serta dukungan platform pembelajaran yang kompatibel. Pada banyak sekolah dasar, khususnya di daerah dengan keterbatasan fasilitas teknologi, kondisi tersebut masih menjadi hambatan dalam mengimplementasikan AI secara optimal. Kesenjangan infrastruktur ini berpotensi menciptakan ketidakmerataan kualitas pembelajaran sehingga manfaat AI belum dapat dirasakan secara menyeluruh oleh seluruh peserta didik. Di samping itu, penggunaan AI juga berpotensi menurunkan kemandirian belajar apabila tidak digunakan secara proporsional. Penelitian mengenai pemanfaatan ChatGPT dalam pendidikan menunjukkan bahwa ketergantungan peserta didik terhadap AI dapat mengurangi kesempatan untuk berpikir secara mandiri, melakukan eksplorasi konsep, serta mengembangkan kemampuan memecahkan masalah. Jika AI hanya dimanfaatkan sebagai alat untuk memperoleh jawaban instan, maka tujuan pembelajaran IPAS dalam mengembangkan kemampuan berpikir kritis, penalaran ilmiah, dan keterampilan inkuiri tidak akan tercapai secara optimal. Oleh karena itu, AI sebaiknya diposisikan sebagai alat pendukung yang memfasilitasi proses berpikir, bukan menggantikan aktivitas berpikir peserta didik. Berdasarkan hasil sintesis literatur, dapat disimpulkan bahwa keberhasilan implementasi AI-Adaptive Systems dalam pembelajaran IPAS tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan teknologi, tetapi juga oleh kesiapan sumber daya manusia, ketersediaan infrastruktur digital, regulasi mengenai etika dan keamanan data, serta desain pembelajaran yang mampu memanfaatkan AI untuk mendorong proses berpikir kritis. Dengan demikian, pengembangan kompetensi guru, peningkatan literasi AI, penyediaan infrastruktur yang memadai, serta penyusunan kebijakan penggunaan AI yang bertanggung jawab menjadi prasyarat penting agar implementasi AI-Adaptive Systems dapat memberikan manfaat secara optimal dalam pembelajaran IPAS di sekolah dasar.

Implementasi *AI-Adaptive Systems* melalui *Blended Learning*

Hasil sintesis terhadap artikel-artikel yang dianalisis menunjukkan bahwa implementasi *AI-Adaptive Systems* akan lebih optimal apabila diintegrasikan dengan model *blended learning*, yaitu pendekatan pembelajaran yang mengombinasikan pembelajaran tatap muka dengan pembelajaran berbasis teknologi digital. Pendekatan ini memungkinkan sistem kecerdasan buatan memberikan pengalaman belajar yang lebih personal melalui penyesuaian materi, kecepatan belajar, jenis aktivitas, serta umpan balik sesuai dengan karakteristik dan kebutuhan setiap peserta didik. Penelitian Prahani et al., (2020) menunjukkan bahwa integrasi pembelajaran tatap muka dengan platform digital mampu meningkatkan keterampilan berpikir tingkat tinggi, termasuk kemampuan berpikir kritis, analisis, evaluasi, dan pemecahan masalah. Model *blended learning* memberikan kesempatan kepada peserta didik untuk mempelajari materi secara mandiri melalui platform digital sebelum melakukan diskusi, eksperimen, maupun refleksi bersama guru di kelas. Dengan demikian, waktu pembelajaran tatap muka dapat dimanfaatkan secara lebih efektif untuk mengembangkan kemampuan berpikir kritis melalui aktivitas investigasi dan pemecahan masalah. Temuan tersebut diperkuat oleh penelitian Al-Karasneh et al., (2025) yang menunjukkan bahwa Generative AI mampu membantu peserta didik memahami konsep-konsep sains yang kompleks melalui penyajian materi yang adaptif, simulasi interaktif, visualisasi fenomena ilmiah, serta pemberian umpan balik secara langsung. Dalam konteks pembelajaran IPAS, AI dapat dimanfaatkan untuk memvisualisasikan proses-proses ilmiah yang sulit diamati secara langsung, seperti perubahan ekosistem, siklus air, sistem tata surya, maupun interaksi antara manusia dan lingkungan, sehingga peserta didik lebih mudah membangun pemahaman konseptual. Selain mendukung pemahaman konsep, implementasi AI

melalui *blended learning* juga memperkuat proses pembelajaran berbasis inkuiri. Penelitian Prahani & Dawana (2025) menunjukkan bahwa penggunaan lingkungan belajar virtual berbantuan AI mampu meningkatkan kemampuan peserta didik dalam melakukan observasi, menyusun hipotesis, menganalisis data, serta menarik kesimpulan berdasarkan bukti ilmiah. Aktivitas tersebut selaras dengan karakteristik pembelajaran IPAS yang menekankan proses penyelidikan ilmiah sebagai sarana mengembangkan kemampuan berpikir kritis. Implementasi AI-Adaptive Systems melalui *blended learning* juga memberikan peluang untuk meningkatkan keterlibatan peserta didik. Penelitian (Ma et al., 2025) menunjukkan bahwa keterlibatan belajar meningkat ketika peserta didik memperoleh materi yang sesuai dengan tingkat kemampuannya, mendapatkan umpan balik secara cepat, serta memperoleh kesempatan untuk berinteraksi dengan guru maupun teman sebaya. AI berperan dalam menganalisis perkembangan belajar siswa secara berkelanjutan sehingga mampu merekomendasikan materi maupun aktivitas yang sesuai dengan kebutuhan masing-masing individu. Kondisi tersebut menciptakan pengalaman belajar yang lebih bermakna sekaligus meningkatkan motivasi belajar. Di sisi lain, penggunaan AI dalam lingkungan *blended learning* juga mendukung guru dalam melaksanakan asesmen formatif secara berkelanjutan. Penelitian Dimeli & Kostas (2025) serta H. Zhang & Wang (2025) menunjukkan bahwa AI dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan umpan balik otomatis, menganalisis capaian belajar peserta didik, serta membantu guru merancang aktivitas pembelajaran yang terdiferensiasi. Informasi tersebut memungkinkan guru memberikan intervensi pembelajaran secara lebih tepat sesuai dengan kebutuhan belajar masing-masing peserta didik. Berdasarkan hasil sintesis tersebut, implementasi AI-Adaptive Systems melalui *blended learning* tidak hanya mengintegrasikan teknologi digital ke dalam pembelajaran, tetapi juga menciptakan ekosistem belajar yang lebih adaptif, kolaboratif, dan berpusat pada peserta didik. Dalam pembelajaran IPAS, integrasi ini berpotensi meningkatkan pemahaman konsep, keterampilan proses sains, kemampuan berpikir kritis, serta keterlibatan belajar siswa. Oleh karena itu, penerapan AI-Adaptive Systems berbasis *blended learning* dapat menjadi salah satu strategi inovatif untuk mewujudkan pembelajaran IPAS yang sesuai dengan karakteristik Kurikulum Merdeka dan tuntutan kompetensi abad ke-21.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil sintesis terhadap 19 artikel yang terindeks Scopus, dapat disimpulkan bahwa *AI-Adaptive Systems* memiliki potensi yang signifikan dalam meningkatkan kualitas pembelajaran IPAS di sekolah dasar melalui pembelajaran yang adaptif, personal, dan berpusat pada peserta didik. Sistem ini mampu menyesuaikan materi, aktivitas pembelajaran, serta umpan balik berdasarkan karakteristik belajar siswa sehingga mendukung pengembangan kemampuan berpikir kritis, penalaran ilmiah, pemecahan masalah, dan keterampilan berpikir tingkat tinggi. Hasil kajian juga menunjukkan bahwa implementasi *AI-Adaptive Systems* memberikan berbagai peluang, antara lain meningkatkan keterlibatan belajar peserta didik, memperkuat pembelajaran berbasis inkuiri, mendukung asesmen formatif, serta membantu guru dalam merancang pembelajaran yang terdiferensiasi. Di sisi lain, penerapan AI masih menghadapi sejumlah tantangan, meliputi keterbatasan kompetensi guru, kesiapan infrastruktur teknologi, validitas dan reliabilitas informasi yang dihasilkan AI, perlindungan privasi data, serta potensi ketergantungan peserta didik terhadap teknologi apabila penggunaannya tidak diimbangi dengan pendampingan guru. Implementasi AI-Adaptive Systems melalui pendekatan “*blended learning*” menjadi strategi yang menjanjikan karena mampu

mengintegrasikan keunggulan pembelajaran tatap muka dengan pembelajaran digital secara harmonis. Model ini memungkinkan peserta didik memperoleh pengalaman belajar yang lebih fleksibel, interaktif, dan kontekstual, sekaligus memberikan ruang yang lebih luas bagi guru untuk mengembangkan aktivitas pembelajaran yang mendorong kemampuan berpikir kritis. Penelitian ini memberikan implikasi bahwa keberhasilan implementasi AI-Adaptive Systems dalam pembelajaran IPAS tidak hanya bergantung pada perkembangan teknologi, tetapi juga memerlukan peningkatan kompetensi guru, penguatan literasi AI, penyediaan infrastruktur digital yang memadai, serta kebijakan pendidikan yang mendukung penggunaan AI secara etis dan bertanggung jawab. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji efektivitas model AI-Adaptive Systems melalui studi eksperimen pada pembelajaran IPAS di sekolah dasar sehingga diperoleh bukti empiris mengenai pengaruhnya terhadap kemampuan berpikir kritis peserta didik.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Karasneh, S. M., Kanaan, E. M., Al-Barakat, A. A., AlAli, R. M., Zaher, A. M., & Ibrahim, N. A. (2025). Transforming Primary Science Education: Unlocking the Power of Generative AI to Enhance Pupils' Grasp of Scientific Concepts. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, 24(5), 304–322. Scopus. <https://doi.org/10.26803/ijlter.24.5.16>
- Anderson, A., Sodani, D. G., Dennis, T., Smith, M., & Irvine Belson, S. (2025). The Influence of Culturally Responsive Literacy Practices on Students' Literacy Motivation. *SAGE Open*, 15(2), 21582440251326378. <https://doi.org/10.1177/21582440251326378>
- Aydin-Günbatır, S., Durukan, A., & Günbatır, M. S. (2025). Generative AI as the New Frontier in Science Education: A Systematic Review of Web of Science Articles. *Science and Education*. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11191-025-00677-6>
- Behnamnia, N., Hayati, S., Kamsin, A., Ahmadi, A., & Alizadeh, Z. (2024). Enhancing Students' Research Skills Through AI Tools and Teacher Competencies: A Mixed-Methods Study. *Journal of E-Learning and Knowledge Society*, 20(3), 39–55. Scopus. <https://doi.org/10.20368/1971-8829/1135960>
- Brookhart, S. M. (2010). *How to assess higher-order thinking skills in your classroom*. ASCD.
- Brusilovsky, P., & Millán, E. (2007). User Models for Adaptive Hypermedia and Adaptive Educational Systems. In P. Brusilovsky, A. Kobsa, & W. Nejdl (Eds), *The Adaptive Web* (Vol. 4321, pp. 3–53). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72079-9_1
- Chang, C.-Y., Lin, H.-C., Yin, C., & Yang, K.-H. (2025). Generative AI-assisted reflective writing for improving students' higher order thinking: Evidence from quantitative and epistemic network analysis. *Educational Technology and Society*, 28(1), 270–285. Scopus. [https://doi.org/10.30191/ETS.202501_28\(1\).TP03](https://doi.org/10.30191/ETS.202501_28(1).TP03)
- Chen, H. E., Sun, D., Hsu, T.-C., Yang, Y., & Sun, J. (2023). Visualising trends in computational thinking research from 2012 to 2021: A bibliometric analysis. *Thinking Skills and Creativity*, 47. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2022.101224>
- Creswell, J. W. (2013). *Educational research: Planning, conducting, and evaluating quantitative and qualitative research* (Fourth Indian edition). PHI Learning Private Limited.

- Dimeli, M., & Kostas, A. (2025). The Role of ChatGPT in Education: Applications, Challenges: Insights From a Systematic Review. *Journal of Information Technology Education: Research*, 24, 1–30. Scopus. <https://doi.org/10.28945/5422>
- Facione, P. A. (2015). Critical Thinking: What It Is and Why It Counts. *Insight Assessment*.
- Graham, C. R. (2018). Current Research in Blended Learning. In M. G. Moore & W. C. Diehl (Eds), *Handbook of Distance Education* (4th edn, pp. 173–188). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315296135-15>
- Holmes, W., Bialik, M., & Fadel, C. (2019). *Artificial intelligence in education: Promises and implications for teaching and learning*. Center for Curriculum Redesign.
- Husain, A. J. A. (2024). POTENTIALS OF CHATGPT IN COMPUTER PROGRAMMING: INSIGHTS FROM PROGRAMMING INSTRUCTORS. *Journal of Information Technology Education: Research*, 23. Scopus. <https://doi.org/10.28945/5240>
- Hwang, G.-J., & Tu, Y.-F. (2021). Roles and Research Trends of Artificial Intelligence in Mathematics Education: A Bibliometric Mapping Analysis and Systematic Review. *Mathematics*, 9(6), 584. <https://doi.org/10.3390/math9060584>
- Ji, Y., Zhan, Z., Li, T., Zou, X., & Lyu, S. (2025). Human-Machine Cocreation: The Effects of ChatGPT on Students' Learning Performance, AI Awareness, Critical Thinking, and Cognitive Load in a STEM Course Toward Entrepreneurship. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 18, 402–415. Scopus. <https://doi.org/10.1109/TLT.2025.3554584>
- Kosmas, P., Nisiforou, E. A., Kounnapi, E., Sophocleous, S., & Theophanous, G. (2025). Integrating artificial intelligence in literacy lessons for elementary classrooms: A co-design approach. *Educational Technology Research and Development*, 73(4), 2589–2615. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11423-025-10492-z>
- Lin, X.-F., Wang, Z., Zhou, W., Luo, G., Hwang, G.-J., Zhou, Y., Wang, J., Hu, Q., Li, W., & Liang, Z.-M. (2023). Technological support to foster students' artificial intelligence ethics: An augmented reality-based contextualized dilemma discussion approach. *Computers and Education*, 201. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2023.104813>
- Luckin, R., Holmes, W., Griffiths, M., & Forcier, L. B. (2016). Intelligence Unleashed: An argument for AI in Education. *Pearson*.
- Ma, Y., Zuo, M., Yan, Y., Luo, H., & Wang, K. (2025). An fsQCA approach to identifying pathways to K-9 students' online learning engagement. *Distance Education*, 46(2), 148–172. Scopus. <https://doi.org/10.1080/01587919.2024.2338704>
- Miles, M., Huberman, M., & Saldaña, J. (2013). Qualitative Data Analysis: A Methods Sourcebook. In *Zeitschrift für Personalforschung* (Vol. 28).
- National Research Council. (2012). *A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas* (p. 13165). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13165>
- Nguyen, N. T. P., & Tran, L. H. (2024). Uncovering the Challenges and Requirements of Elementary School Teachers in Implementing STEM Educational Activities in Vietnam. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, 23(6), 373–390. Scopus. <https://doi.org/10.26803/ijlter.23.6.17>

- OECD. (2023). *PISA 2022 Results (Volume I): The State of Learning and Equity in Education*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/53f23881-en>
- Prahani, B. K., & Dawana, I. R. (2025). Exploring the potential of technology in physics education: Current research and innovation trends to support 21st century skills. *Perspektiv Nauti i Obrazovanja*, 73(1), 349–361. Scopus. <https://doi.org/10.32744/pse.2025.1.23>
- Prahani, B. K., Jatmiko, B., Hariadi, B., Sunarto, D., Sagirani, T., Amelia, T., & Lemantara, J. (2020). Blended web mobile learning (BWML) model to improve students' higher order thinking skills. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, 15(11), 42–55. Scopus. <https://doi.org/10.3991/IJET.V15I11.12853>
- Staker, H., & Horn, M. B. (2012). Classifying K–12 Blended learning. *Innosight Institute*.
- Suwendra, I. W., Suarnaya, I. P., Widiana, I. W., & Asli, N. L. (2023). The integration of the self-concept-based Upanishad learning model in blended learning and its impact on character development and creative thinking skills. *Journal of Education and E-Learning Research*, 10(1), 51–60. Scopus. <https://doi.org/10.20448/jeelr.v10i1.4342>
- Tian, Q., & Zheng, X. (2025). The impact of artificial intelligence on students' 4C skills: A meta-analysis. *Educational Research Review*, 49. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2025.100728>
- Tomlinson, C. A. (2017). *How to differentiate instruction in academically diverse classrooms* (3rd edition). ASCD.
- UNESCO. (2021). *AI and education: Guidance for policy-makers*. UNESCO. <https://doi.org/10.54675/PCSP7350>
- Voogt, J., & Roblin, N. P. (2012). A comparative analysis of international frameworks for 21st century competences: Implications for national curriculum policies. *Journal of Curriculum Studies*, 44(3), 299–321. <https://doi.org/10.1080/00220272.2012.668938>
- Wang, H.-J., Chen, K., Wang, Y., & Liu, C.-C. (2025). From the Performer to the Evaluator: Exploring the Effects of the Evaluation-Explanation-Comparison-Based SVVR on Students' Vocal Music Appreciation and Singing Skills. *Journal of Computer Assisted Learning*, 41(6). Scopus. <https://doi.org/10.1111/jcal.70145>
- Willemsen, R. H., De Vink, I. C., Kroesbergen, E. H., & Lazonder, A. W. (2023). The role of creative thinking in children's scientific reasoning. *Thinking Skills and Creativity*, 49, 101375. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2023.101375>
- Zawacki-Richter, O., Marín, V. I., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators? *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>
- Zhang, H., & Wang, Q. (2025). How could GenAI work on in-service teachers' knowledge building process? An empirical study based on epistemic network analysis. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 22(1). Scopus. <https://doi.org/10.1186/s41239-025-00544-y>
- Zhang, X., & Zhou, M. (2023). Information and digital technology-assisted interventions to improve intercultural competence: A meta-analytical review. *Computers and Education*, 194. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104697>
- Zheng, Y., Bai, X., Yang, Y., & Xu, C. (2024). Exploring the Effects and Inquiry Process Behaviors of Fifth-Grade Students Using Predict-Observe-Explain Strategy in

Virtual Inquiry Learning. *Journal of Science Education and Technology*, 33(4), 590–606. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10956-024-10106-y>