

Strategi dan Cabaran Pengintegrasian Kecerdasan Buatan (AI) dalam Pengajaran dan Pembelajaran (PdP) Sains (Strategies and Challenges of Artificial Intelligence (AI) Integration in Science Teaching and Learning)

Umi Humaira Hasmadi^{1*}, Mohammad Hafiz Zaini¹

¹ Fakulti Pendidikan, Universiti Kebangsaan Malaysia, Selangor, Malaysia

*Pengarang Koresponden: p150307@siswa.ukm.edu.my

Received: 25 November 2025 | Accepted: 27 December 2025 | Published: 1 February 2026

DOI: <https://doi.org/10.55057/ijares.2026.8.1.24>

Abstrak: Perkembangan teknologi kecerdasan buatan (AI) telah membawa transformasi dalam landskap pendidikan global, termasuklah dalam bidang pengajaran dan pembelajaran (PdP) Sains. Kertas konsep ini bertujuan untuk mengenal pasti strategi dan cabaran utama pengintegrasian AI dalam usaha meningkatkan kualiti PdP Sains di Malaysia. Berdasarkan analisis kepustakaan, terdapat lima strategi utama yang telah dikenal pasti iaitu pembelajaran peribadi, penilaian adaptif, pembelajaran imersif, pembelajaran interaktif dan penilaian automatik. Strategi ini berpotensi membantu pelajar memahami konsep abstrak sains melalui pendekatan secara visual dan simulasi digital yang lebih kontekstual dan menyeronokkan. Namun demikian, pengintegrasian AI dalam PdP Sains turut berhadapan dengan beberapa cabaran seperti kekangan infrastruktur, kos pelaksanaan, kebergantungan berlebihan terhadap AI, keselamatan data serta isu etika. Seterusnya, implikasi kajian ini menekankan keperluan kepada latihan profesional berterusan untuk guru, pembangunan infrastruktur digital yang saksama serta garis panduan etika penggunaan AI dalam pendidikan. Dapatan ini diharap menjadi asas kepada penyelidikan lanjutan dan panduan dasar bagi memperkukuhkan integrasi AI dalam PdP Sains secara holistik dan mampan.

Kata Kunci: kecerdasan buatan, PdP Sains, strategi AI, cabaran AI

Abstract: The rapid advancement of artificial intelligence (AI) technologies has significantly transformed global education, particularly in the teaching and learning of Science. This conceptual paper aims to identify key strategies and challenges in integrating AI to enhance the quality of teaching and learning Science in Malaysia. Based on a review of relevant literature, five major strategies were identified, namely personalized learning, adaptive assessment, immersive learning, interactive learning and automatic assessment. These strategies have the potential to support students' understanding of abstract scientific concepts through more contextualized, engaging visualization and digital simulation. Nevertheless, the integration of AI in Science teaching and learning also presents several challenges, including infrastructure limitations, implementation costs, overreliance on AI, data security and ethical concerns. The paper further highlights the importance of continuous professional development for teachers, the development of equitable digital infrastructure, and the establishment of clear ethical guidelines for AI use in education. The findings of this paper are expected to provide a foundation for future research and inform policy formulation towards a more holistic and sustainable integration of AI in Science teaching and learning.

Keywords: artificial intelligence, teaching and learning Science, AI strategies, AI challenges

1. Pengenalan

Perkembangan pesat teknologi digital telah membuka dimensi baharu dalam landskap pendidikan global. Antara inovasi utama yang semakin mendapat perhatian ialah kecerdasan buatan (AI) yang berpotensi besar untuk mentransformasi amalan pengajaran dan pembelajaran (PdP) abad ke-21 dalam menangani cabaran pendidikan global seperti akses, kualiti dan pembelajaran peribadi (UNESCO, 2023). AI merujuk kepada sistem yang mensimulasi fungsi kognitif manusia seperti penaaakulan, penyelesaian masalah dan pembelajaran (Russell & Norvig, 2020). Dalam konteks pendidikan, AI berpotensi memperkasa PdP melalui pembelajaran adaptif, sistem tutor pintar dan analitik pembelajaran yang dapat memperibadikan pengalaman pelajar. Di peringkat serantau, Singapura muncul sebagai peneraju dalam pengintegrasian AI ke dalam sistem pendidikan melalui sokongan kukuh daripada kerajaan dan komuniti penyelidik. Pelbagai projek berasaskan AI telah dijalankan termasuklah inovasi dalam penilaian, pembelajaran adaptif serta penggunaan alat generatif seperti *ChatGPT* di sekolah dan institusi pengajian tinggi (Lee et al., 2023). Sehubungan itu, pendekatan ini menjadi rujukan penting bagi negara serantau, termasuk Malaysia dalam merancang dasar dan strategi pengajaran berasaskan teknologi. Di Malaysia, kemajuan AI turut mendorong Kementerian Pendidikan Malaysia (KPM) melancarkan Dasar Pendidikan Digital (DPD) sebagai usaha strategik untuk mengintegrasikan teknologi ini dalam sistem pendidikan. Dasar ini menekankan keperluan membangunkan warga pendidik yang celik digital serta memperluas penggunaan teknologi seperti AI bagi meningkatkan kualiti PdP. Antara inisiatif utamanya ialah penambahbaikan pelantar *Digital Educational Learning Initiatives Malaysia* (DELIMa) yang kini menyediakan akses kepada 16 aplikasi berkaitan AI bagi menyokong PdP di bilik darjah. Langkah ini mencerminkan komitmen KPM dalam memperkasakan guru dan murid melalui pendekatan PdP digital yang lebih interaktif dan berpusatkan pelajar. Manakala, dalam konteks pengajaran Sains, AI berpotensi besar dalam membantu pelajar memahami konsep-konsep abstrak yang sukar dicapai melalui pendekatan konvensional. AI dapat menyediakan persekitaran pembelajaran berasaskan simulasi maya, makmal maya dan visualisasi 3D yang membantu meningkatkan minat dan kefahaman pelajar dalam PdP Sains. Kajian Al Darayseh (2023) mendapati bahawa 75% guru Sains melaporkan peningkatan kefahaman pelajar terhadap konsep abstrak setelah menggunakan pendekatan ini. Walaupun pelbagai kajian antarabangsa telah membincangkan potensi AI dalam pendidikan, kebanyakannya menumpukan kepada konteks negara maju serta aspek teknologi secara umum. Kajian yang mengintegrasikan strategi pedagogi AI dan cabaran pelaksanaan sebenar dalam PdP Sains sekolah Malaysia masih terhad.

Oleh itu, kertas konsep ini bertujuan untuk mengenal pasti strategi dan cabaran pengintegrasian AI dalam PdP Sains serta membina satu gambaran konseptual yang dapat dijadikan rujukan awal kepada guru dan pembuat dasar dalam merancang pelaksanaan AI secara lebih terancang dan beretika.

2. Pengajaran dan Pembelajaran (PdP) Sains di Sekolah Malaysia

Pelbagai dasar pendidikan digital telah digubal oleh KPM bagi memperkukuh amalan pedagogi abad ke-21. Namun begitu, pelaksanaan PdP Sains di kebanyakan sekolah di Malaysia masih mengekalkan kaedah pengajaran konvensional dan berpusatkan guru. Pendekatan ini lebih menumpukan kepada penyampaian fakta serta hafalan konsep tanpa memberi ruang mencukupi

kepada pembelajaran berasaskan pengalaman sebenar dan lebih diperibadikan. Kajian Masliza & Nor'ain (2021) menunjukkan bahawa majoriti guru masih mengamalkan kaedah pengajaran konvensional dengan penggunaan teknologi yang minimum. Keadaan menjadi lebih kritikal kerana banyak topik dalam Sains seperti fotosintesis, sistem suria dan perubahan tenaga melibatkan konsep abstrak yang sukar diperhatikan secara langsung. Dapatan Kamarudin & Mat Noor (2024) turut melaporkan bahawa tahap kefahaman murid Tahun Empat terhadap topik abstrak fotosintesis masih lagi rendah. Manakala, laporan *Trends in International Mathematics and Science Study* (TIMSS) menunjukkan bahawa terdapat peningkatan peratusan murid Malaysia yang tidak mencapai penanda aras antarabangsa dalam domain kandungan Sains (KPM, 2024). Dapatan ini mencerminkan jurang yang ketara antara aspirasi dasar pendidikan digital dengan amalan sebenar di bilik darjah. Sebagai perbandingan di peringkat serantau, Singapura telah melaksanakan pelbagai inisiatif berskala besar untuk mengintegrasikan AI dalam sistem pendidikannya. Kajian antarabangsa turut menunjukkan bahawa penggunaan AI mampu meningkatkan kefahaman pelajar serta memperbaiki pencapaian akademik berbanding kaedah tradisional (Naseer et al., 2024). Kejayaan ini menonjolkan jurang yang wujud antara aspirasi dasar digital Malaysia dan pelaksanaannya di lapangan. Dalam konteks Malaysia, transformasi PdP Sains memerlukan pendekatan yang lebih inovatif dan interaktif. Ini selaras dengan matlamat Kurikulum Standard Sekolah Rendah (KSSR) Sains untuk melahirkan murid yang mampu berfikir secara saintifik, mengaplikasi pengetahuan dalam situasi harian dan menghargai sains sebagai cara hidup (KPM, 2021). Integrasi AI berpotensi memainkan peranan penting dalam transformasi ini melalui empat mekanisme seperti visualisasi interaktif, pembelajaran adaptif dan peribadi, maklum balas masa nyata dan persekitaran pembelajaran kolaboratif. Oleh itu, wujud keperluan mendesak untuk meneroka pendekatan berasaskan AI yang dapat menyokong pembelajaran konsep abstrak melalui visualisasi interaktif, simulasi digital dan tutor maya supaya PdP Sains menjadi lebih bermakna dan berkesan.

3. Strategi Pengintegrasian Kecerdasan Buatan dalam Pengajaran dan Pembelajaran Sains

Pengintegrasian AI dalam PdP Sains berpotensi besar untuk mentransformasi pendekatan tradisional kepada pengalaman pembelajaran yang lebih dinamik dan interaktif. Berdasarkan sorotan literatur, terdapat lima strategi utama yang sering dikaitkan dengan pengintegrasian AI dalam konteks PdP Sains iaitu pembelajaran peribadi, penilaian adaptif, pembelajaran imersif, pembelajaran interaktif dan penilaian automatik.

3.1 Pembelajaran peribadi berasaskan kecerdasan buatan (AI)

Pembelajaran peribadi berasaskan AI merupakan pendekatan pedagogi yang menyesuaikan kaedah pengajaran, kandungan dan kadar pembelajaran mengikut keperluan individu pelajar (Merino-Campos, 2025). Berbeza dengan pengajaran konvensional yang bersifat umum untuk semua, pendekatan ini memberi peluang kepada pelajar untuk bergerak mengikut kadar penguasaan masing-masing. Dalam konteks PdP Sains, pendekatan ini penting bagi menangani kepelbagaian tahap keupayaan pelajar serta membantu mereka memahami konsep abstrak Sains yang sukar dicapai melalui kaedah konvensional. Melalui keupayaan analitik AI, pembelajaran peribadi dapat direalisasikan melalui algoritma pintar yang berupaya untuk menganalisis corak pembelajaran, meramal prestasi dan melaksanakan pengalaman PdP yang lebih diperibadikan mengikut keperluan serta keupayaan pelajar (Jia et al., 2024; Zhai et al., 2021). Berdasarkan data prestasi pelajar, sistem AI dapat mengenal pasti kekuatan dan kelemahan individu secara masa nyata bagi mencadangkan intervensi yang bersesuaian seperti latihan pengukuhan atau bahan tambahan. Aplikasi pembelajaran mesin bukan sahaja berupaya

mengesan pelajar yang berisiko gagal, malah mengenal pasti pelajar yang berpotensi cemerlang untuk membolehkan guru menyediakan intervensi awal yang lebih bersasar (Sandra et al., 2021). Proses ini menunjukkan potensi AI sebagai sistem sokongan pintar yang memperkayakan pengalaman PdP tanpa menggantikan peranan guru sebagai fasilitator utama. Dalam bidang STEM, teknologi AI turut digunakan bagi membantu pelajar berkeperluan khas menyesuaikan kandungan pembelajaran mengikut kemampuan individu (Singh et al., 2023). Selain itu, analisis ramalan AI juga mampu mengenal pasti kecenderungan pelajar terhadap pemilihan jurusan utama dalam bidang Sains dan Teknologi (Chang et al., 2023). Ini secara tidak langsung membolehkan intervensi kaunseling akademik dijalankan dengan lebih awal. Dapatan pelbagai kajian ini menunjukkan bahawa AI berpotensi mewujudkan ekosistem pembelajaran yang benar-benar diperibadikan, dinamik dan responsif terhadap keunikan setiap pelajar. Walau bagaimanapun, keberkesanan pendekatan ini tetap bergantung kepada peranan guru sebagai fasilitator yang membimbing proses PdP serta memastikan penggunaan AI berlaku secara inklusif tanpa memperluas jurang digital.

3.2 Penilaian Adaptif berasaskan kecerdasan buatan (AI)

Transformasi digital dalam bidang pendidikan memperkenalkan pelbagai inovasi dalam kaedah penilaian, terutamanya dalam PdP Sains. Salah satu inovasi yang semakin mendapat perhatian ialah penilaian adaptif berasaskan teknologi AI yang berupaya menganalisis sejumlah besar data untuk menyesuaikan kandungan penilaian mengikut profil individu pelajar (Moreira & Teles, 2024). Berdasarkan analisis ini, sistem AI dapat menjana soalan atau tugas yang sesuai dengan tahap kognitif setiap pelajar dan sekali gus memastikan mereka tidak terbeban dengan soalan yang terlalu sukar atau merasa bosan dengan soalan yang terlalu mudah (Mnguni, 2025). Pendekatan ini bukan sahaja membantu guru memahami keperluan individu pelajar, tetapi juga memperkukuh keberkesanan pengajaran Sains yang berpusatkan pelajar. Dalam konteks PdP Sains, antara cabaran utama guru ialah membantu murid memahami konsep abstrak seperti fotosintesis, kitaran air dan struktur zarah yang memerlukan keupayaan penaklukan yang tinggi. Penilaian adaptif AI dapat mengatasi cabaran ini dengan mengesan kefahaman murid secara terperinci serta menyesuaikan bentuk tugas soalan mengikut keperluan individu. Sebagai contoh, pelajar yang menunjukkan kesukaran memahami konsep fotosintesis akan diberikan soalan berbentuk penerokaan visual atau simulasi interaktif bagi membina pemahaman konseptual yang lebih mendalam (Naseer & Khawaja, 2025). Selain itu, sistem AI turut berupaya memberi maklum balas serta-merta terhadap kesilapan jawapan pelajar dengan menjelaskan sebab serta mencadangkan aktiviti pengayaan yang bersesuaian (Katonane Gyonyoru & Katona, 2024). Justeru, penilaian tidak lagi berfungsi semata-mata sebagai ukuran pencapaian, tetapi juga sebagai alat diagnostik dan pembelajaran berterusan yang menyokong pengajaran Sains secara lebih berkesan dan diperibadikan. Kajian (Budiman et al., 2025) turut menunjukkan bahawa pelajar yang menggunakan sistem penilaian adaptif berasaskan AI mencatatkan peningkatan signifikan dalam skor pasca ujian serta tahap penglibatan yang lebih tinggi berbanding pendekatan konvensional. Walaupun kajian tersebut dilaksanakan dalam konteks pendidikan vokasional, prinsip asasnya iaitu keupayaan AI dalam menyesuaikan soalan mengikut tahap penguasaan pelajar tetap relevan untuk diaplikasikan dalam PdP Sains, terutamanya dalam membantu murid memahami konsep abstrak. Implikasinya, penilaian adaptif berasaskan AI berpotensi menjadi strategi utama dalam meningkatkan kualiti PdP Sains.

3.3 Pembelajaran Imersif berasaskan kecerdasan buatan (AI)

Pembelajaran imersif merupakan satu pendekatan pendidikan yang menggabungkan teknologi seperti realiti maya (VR), realiti terimbuh (AR) dan realiti campuran (MR) bagi membantu pelajar membina pengetahuan melalui pengalaman langsung yang menyerupai situasi dunia

sebenar (Kuhail et al., 2025). Pendekatan ini memberi peluang kepada pelajar untuk berinteraksi secara aktif dengan persekitaran pembelajaran yang disimulasikan secara dinamik dan realistik. Secara tidak langsung, ini meningkatkan penglibatan kognitif dan emosi mereka terhadap proses pembelajaran. Dalam konteks PdP sains, pendekatan ini amat signifikan kerana ia membolehkan pelajar meneroka fenomena yang sukar diperhatikan secara langsung atau berisiko tinggi untuk dijalankan dalam situasi sebenar. Walaupun pelaksanaan pembelajaran imersif berasaskan AI masih di peringkat awal penerokaan, dapatan kajian menunjukkan potensi yang signifikan dalam meningkatkan kefahaman saintifik dan pengekalan memori pelajar. Sebagai contoh, kajian Peney & Skarratt (2024) melaporkan bahawa tahap keupayaan ingatan semula pelajar jauh lebih tinggi dalam kumpulan yang belajar menggunakan persekitaran imersif berbanding kumpulan yang meneroka persekitaran 360° tanpa AI. Dapatan ini sejajar dengan kajian Ateş (2025) yang menunjukkan peningkatan signifikan dalam kefahaman konseptual pelajar yang terlibat dalam pembelajaran imersif berbanding pendekatan tradisional. Kajian yang sama oleh Faria & Lobato Miranda (2024) turut menyokong dapatan ini dengan menunjukkan peningkatan signifikan dalam pencapaian akademik pelajar bagi topik meiosis serta keupayaan pelajar mengingat semula konsep selepas tempoh pembelajaran. Secara keseluruhan, bukti empirikal ini menegaskan bahawa pembelajaran imersif berasaskan AI bukan sahaja memperkukuh pemahaman saintifik melalui pengalaman pembelajaran yang mendalam dan bermakna, tetapi turut meningkatkan tahap pengekalan memori pelajar. Keupayaan teknologi AI untuk situasi dunia sebenar membolehkan pelajar untuk mengaplikasikan pengetahuan teori dalam konteks autentik, khususnya dalam bidang sains yang menekankan hubungan antara teori dan amalan. Implikasinya, pembelajaran imersif berasaskan AI bukan sahaja memperkayakan PdP Sains melalui pengalaman kontekstual yang realistik, tetapi juga berpotensi melahirkan pelajar yang lebih bersedia menghadapi cabaran dunia sebenar.

3.4 Pembelajaran Interaktif berasaskan kecerdasan buatan (AI)

Pembelajaran interaktif merupakan salah satu strategi pengintegrasian AI dalam PdP Sains yang menekankan penglibatan aktif pelajar melalui penerokaan, simulasi dan maklum balas secara langsung. Strategi ini berasaskan prinsip konstruktivisme yang membolehkan pelajar membina pemahaman saintifik melalui interaksi dengan persekitaran pembelajaran yang dinamik dan responsif. Integrasi AI menjadikan proses ini lebih bermakna apabila sistem mampu menganalisis tindakan pelajar dan menyesuaikan aktiviti pembelajaran mengikut keperluan individu secara masa nyata. Salah satu aplikasi utama pembelajaran interaktif ialah penggunaan makmal maya berasaskan AI yang menyediakan persekitaran simulasi eksperimen yang selamat dan menyeronokkan. Melalui makmal maya, pelajar dapat menjalankan eksperimen secara sendiri, mengulangi aktiviti pembelajaran dan memerhati fenomena saintifik dengan lebih jelas bagi mengukuhkan pemahaman mereka (Nkwande et al., 2024). Contohnya, penggunaan aplikasi makmal maya seperti *PhET Interactive Simulations* yang dibangunkan oleh University of Colorado Boulder bukan sahaja membolehkan pelajar meneroka konsep Sains secara interaktif, tetapi membantu pelajar mengartikulasikan alasan saintifik dengan lebih jelas ketika menyelesaikan tugas (Diab et al., 2024). Manakala, aplikasi *Virtual Labs* yang dibangunkan oleh *LabXchange* pula menyediakan peluang kolaboratif untuk pelajar menjalankan eksperimen maya serta berbincang keputusan dengan rakan sebaya dalam talian. Selain itu, kajian terkini juga menunjukkan bahawa makmal maya berasaskan AI mampu meningkatkan kebolehcapaian, keterlibatan dan motivasi pelajar dalam pembelajaran STEM. Pelajar dapat mengakses pembelajaran mengikut kesesuaian sendiri, mengawal kadar pembelajaran sendiri dan melakukan eksperimen tanpa kekangan sumber fizikal (Reyes et al., 2024). Selain itu, integrasi AI membolehkan sistem menyediakan maklum balas pintar serta data prestasi yang membantu

pelajar menganalisis keputusan dan memperbaiki kesilapan (Murali et al., 2024). Secara keseluruhannya, integrasi AI dalam strategi pembelajaran interaktif bukan sahaja berupaya meningkatkan penglibatan serta pengekalan pembelajaran dalam kalangan pelajar, tetapi juga merapatkan jurang antara pengetahuan teori dan aplikasi praktikal dunia sebenar (Mannepalli et al., 2025).

3.5 Penilaian automatik berasaskan kecerdasan buatan (AI)

Penilaian automatik berasaskan AI merupakan antara inovasi utama yang menyokong aspek penilaian dalam PdP Sains. Teknologi ini memanfaatkan gabungan pembelajaran mesin (ML) dan pemprosesan bahasa semula jadi (NLP) bagi menilai kefahaman pelajar secara lebih menyeluruh, khususnya melalui respons terbuka, esei saintifik dan penjelasan konsep yang kompleks. Sistem penilaian automatik berasaskan AI ini juga memberi tumpuan kepada analisis kandungan kognitif dan linguistik bagi mengenal pasti tahap kefahaman saintifik sebenar pelajar (Alshorman, 2024). Dalam konteks PdP Sains, sistem penilaian automatik dapat diaplikasikan melalui pelbagai platform pembelajaran digital seperti *AI-integrated Learning Management System (LMS)* yang membolehkan penilaian dijalankan secara masa nyata. Sistem ini mampu menilai pelbagai jenis soalan termasuk pilihan berganda, isian tempat kosong dan jawapan terbuka yang memerlukan penjelasan konsep saintifik. Kajian González-Calatayud et al. (2021) menunjukkan bahawa penggunaan penilaian automatik bukan sahaja meningkatkan objektiviti dan konsistensi pentaksiran, tetapi juga dapat menyediakan maklum balas segera kepada pelajar. Ciri ini amat signifikan dalam pembelajaran konsep abstrak seperti fotosintesis dan sistem suria kerana pelajar dapat mengenal pasti kesilapan konsep serta membetulkannya secara serta-merta melalui maklum balas AI. Dari perspektif pedagogi, penilaian automatik juga berpotensi mengubah peranan guru dalam proses penilaian. Sistem ini dapat mengambil alih tugas rutin seperti semakan lembaran kerja dan penilaian kuiz bagi membolehkan guru menumpukan perhatian kepada aktiviti pedagogi berimpak tinggi. Secara keseluruhannya, penilaian automatik berasaskan AI membawa potensi besar dalam mempertingkatkan keberkesanan penilaian PdP Sains. Namun, keberkesanannya bukan hanya bergantung kepada ketepatan algoritma, tetapi juga pada kebolehan guru mentafsir dan menggunakan data penilaian tersebut untuk memperkayakan pengalaman pembelajaran.

4. Cabaran pengintegrasian kecerdasan buatan (AI) dalam pengajaran dan pembelajaran Sains

Walaupun teknologi AI menawarkan potensi besar dalam meningkatkan keberkesanan PdP Sains, proses pengintegrasian bukanlah sesuatu yang mudah. Kajian-kajian lepas menunjukkan bahawa terdapat pelbagai cabaran yang perlu ditangani terlebih dahulu sebelum pengintegrasian AI dapat dimanfaatkan secara menyeluruh dalam konteks pendidikan. Antara cabaran utama yang sering dibincangkan dalam literatur lepas ditunjukkan dalam Jadual 1.

Jadual 1: Kajian Lepas tentang Cabaran Pengintegrasian AI dalam PdP Sains

Cabaran	Isu Utama	Impak	Kajian Lepas
Kekangan Infrastruktur	Kekurangan peralatan, perkakasan dan akses kepada teknologi AI di sekolah luar bandar.	Jurang digital semakin melebar dan menyebabkan pelajar luar bandar ketinggalan dalam pencapaian akademik serta akses kepada pembelajaran digital.	Al-Dosari et al. (2025) Alsohaimi et al. (2025) Kamalov et al. (2023) Pop et al. (2024)
Kos pelaksanaan	Perbelanjaan tinggi dalam pembangunan perisian,	Membebankan institusi pendidikan serta menghalang	Reyes et al. (2024), Rajput (2025)

	penyelenggaraan sistem dan latihan guru.	sekolah daripada mengaplikasikan AI secara menyeluruh.	Khomh et al. (2023) Saxena et al. (2024)
Kebergantungan berlebihan kepada AI	Guru dan pelajar terlalu bergantung kepada teknologi AI sehingga mengurangkan interaksi sosial dan kreativiti.	Penurunan kualiti pendidikan, kehilangan minat dalam pembelajaran serta kurang pembangunan diri dan kemahiran menyelesaikan masalah.	Kamalov et al. (2023), Salbihana et al. (2024), Ahmad et al. (2023) Milicević et al. (2024)
Keselamatan data peribadi	Risiko kebocoran data dan penyalahgunaan maklumat peribadi pelajar	Kehilangan kepercayaan masyarakat terhadap AI dalam pendidikan serta impak psikologi kepada pelajar yang menghadapi kecurian data.	Monib et al. (2024), Ahmad et al. (2023), Martínez-Requejo et al. (2025)
Isu etika	Bias algoritma yang menyebabkan ketidakadilan dalam pendidikan serta ketiadaan garis panduan mengenai akauntabiliti AI.	Keputusan yang berat sebelah dan diskriminasi dalam akses pendidikan serta kebimbangan terhadap hak privasi pelajar.	Rouabhia (2025) Praveenkumar et al. (2025) Lami et al. (2024) Elliott & Soifer (2025)

4.1 Kekangan infrastruktur teknologi

Salah satu cabaran utama pengintegrasian AI dalam PdP Sains ialah kekurangan infrastruktur digital, terutamanya di sekolah luar bandar. Kajian yang dijalankan di sekolah rendah di Arab Saudi menunjukkan terdapat beberapa kekangan kritikal dari aspek ini seperti capaian yang terhad kepada teknologi AI, kekurangan makmal elektronik serta keterbatasan alat AI (Al-Dosari et al., 2025; Alshohaimi et al., 2025). Dapatan ini sejajar dengan realiti yang dihadapi sekolah luar bandar di Malaysia yang berhadapan dengan capaian internet yang tidak stabil dan kekurangan peralatan digital (Kamalov et al., 2023). Walaupun kajian ini lebih tertumpu kepada aspek ICT secara umum, situasi tersebut secara tidak langsung menjejaskan keberkesanan pengintegrasian AI dalam PdP Sains yang memerlukan capaian internet yang stabil dan berkelajuan tinggi. Akibatnya, jurang digital antara sekolah bandar dan luar bandar semakin melebar. Situasi ini menyebabkan pelajar luar bandar semakin ketinggalan dari segi pencapaian akademik dan peluang menguasai kemahiran digital (Pop et al., 2024). Jika isu ini tidak ditangani secara strategik, pengintegrasian AI hanya akan meningkatkan ketidaksamarataan dalam pendidikan berbanding menjadi alat pemeriksa. Justeru, dasar pendidikan perlu memberi penekanan bukan sahaja kepada penyediaan peranti yang mencukupi, tetapi juga kepada pembangunan infrastruktur digital yang mampan serta sokongan berterusan bagi guru dan pelajar di kawasan kurang berkemampuan.

4.2 Kos Pelaksanaan

Pengintegrasian AI dalam PdP Sains turut berhadapan dengan cabaran kos pelaksanaan yang tinggi, khususnya bagi pembangunan makmal maya berintegrasi AI dengan teknologi imersif seperti realiti maya (VR). Walaupun makmal maya ini berupaya mensimulasi senario dunia sebenar untuk membantu murid memahami konsep abstrak, namun kecanggihannya menyebabkan kos pembangunan dan penyelenggaraan meningkat kerana sistem menjadi lebih kompleks (Reyes et al., 2024). Tambahan pula, keberkesanan makmal maya sangat bergantung kepada sambungan internet yang stabil dan berkelajuan tinggi. Justeru, tanpa pelaburan yang signifikan dalam infrastruktur digital dan peruntukan kewangan berterusan, usaha mengintegrasikan AI ke dalam PdP Sains berisiko tidak dapat dimanfaatkan sepenuhnya oleh semua sekolah. Selain itu, perisian dan perkakasan AI pendidikan juga turut melibatkan kos

yang besar untuk penyelenggaraan dan sokongan teknikal. Kajian menunjukkan bahawa aktiviti penyelenggaraan sahaja boleh merangkumi lebih 70% daripada jumlah kos keseluruhan sistem perisian. Ini termasuklah kerja-kerja pengemaskinian reka bentuk, penggunaan semula kod dan sokongan teknikal berterusan (Khomh et al., 2023). Selain itu, kos penyelenggaraan bulanan seperti penyediaan pelayan awan, pasukan sokongan serta kemas kini keselamatan juga menambah beban kewangan kepada institusi pendidikan (Saxena et al., 2024). Sebagai contoh, aplikasi seperti *ChatGPT* mengenakan yuran bulanan bagi mendapatkan akses penuh. Keadaan ini menjadi salah satu faktor utama yang menghalang pendidik daripada mengintegrasikan teknologi AI dalam pengajaran mereka. Oleh itu, pelaburan yang strategik dan bersepadu amat diperlukan bagi memastikan kos yang dikeluarkan seiring dengan peningkatan kecekapan guru dan kualiti PdP Sains secara keseluruhan.

4.3 Kebergantungan berlebihan kepada AI

Kebergantungan berlebihan terhadap teknologi kecerdasan buatan (AI) dalam pengajaran dan pembelajaran (PdP) Sains menimbulkan kebimbangan terhadap peranan guru serta perkembangan kemahiran pelajar. Kajian Kamalov et al. (2023) menegaskan bahawa apabila AI digunakan secara tidak terkawal, ia boleh mengurangkan peranan pendidik dalam bilik darjah. AI seharusnya berfungsi sebagai alat sokongan yang memperkukuh keberkesanan pengajaran dan bukannya menggantikan peranan guru sebagai pemimpin dan fasilitator pembelajaran (Salbihana et al., 2024). Hal ini kerana interaksi sosial antara guru dan pelajar berisiko terhakis apabila proses pembelajaran terlalu bergantung kepada sistem automatik. Selain itu, kajian Ahmad et al. (2023) turut menunjukkan bahawa situasi ini boleh menurunkan motivasi dan minat pelajar untuk meneroka atau membangunkan kemahiran baharu secara aktif. Keadaan ini bukan sahaja menjejaskan kualiti pembelajaran, tetapi juga menghalang pembangunan sendiri pelajar. Tambahan pula, dapatan Milicević et al. (2024) mengesahkan bahawa kebergantungan berlebihan terhadap AI boleh menyempitkan ruang kreativiti, pemikiran kritikal dan keupayaan menyelesaikan masalah dunia sebenar. Sehubungan itu, integrasi AI perlu diimbangi dengan pendekatan pedagogi yang mengekalkan interaksi manusia dan proses kognitif reflektif. Strategi seperti pembelajaran kolaboratif, inkuiri saintifik dan perbincangan berasaskan masalah perlu diteruskan bagi memastikan pembelajaran Sains kekal bermakna, holistik dan berpusatkan pelajar.

4.4 Keselamatan data peribadi

Pengintegrasian AI dalam PdP telah membuka ruang kepada pembelajaran yang lebih diperibadikan. Walau bagaimanapun, kemajuan ini turut menimbulkan kebimbangan serius berkaitan keselamatan data peribadi. Aplikasi AI berasaskan pembelajaran adaptif biasanya memerlukan akses kepada pelbagai data murid untuk menyesuaikan kandungan dan gaya pembelajaran yang diperibadikan. Data yang dikumpul sering kali melibatkan maklumat sensitif seperti prestasi akademik, pola pembelajaran dan tingkah laku pelajar (Ahmed et al., 2022; Monib et al., 2024). Sekiranya sistem AI tidak mengurus data dengan selamat, risiko seperti pencerobohan data, kecurian identiti dan penyalahgunaan maklumat individu boleh berlaku dan mengancam keselamatan serta privasi pelajar. Justeru, institusi pendidikan perlu membangunkan dasar yang jelas mengenai penggunaan dan perlindungan data bagi menjamin keselamatan peribadi pelajar. Dalam masa yang sama, pendidik dan pelajar juga perlu diberikan latihan serta pendedahan untuk memahami dan mengurangkan risiko yang berkaitan dengan penggunaan AI dalam PdP (Martínez-Requejo et al., 2025). Implikasi daripada kebocoran data ini bukan sahaja menjejaskan reputasi institusi pendidikan, tetapi turut menjejaskan kepercayaan masyarakat terhadap penggunaan teknologi AI. Apa yang lebih membimbangkan lagi, pelajar yang menjadi mangsa pelanggaran data boleh mengalami kesan psikologi seperti keresahan, kurang tumpuan belajar dan hilang motivasi kerana bimbang

maklumat peribadi mereka terdedah kepada pihak tidak bertanggungjawab. Oleh itu, isu keselamatan data perlu diberi perhatian serius bagi memastikan penggunaan AI dalam PdP dilaksanakan dengan beretika dan berpaksikan perlindungan peribadi pelajar.

4.5 Isu etika

Pengintegrasian AI dalam PdP Sains membuka peluang untuk memperkukuh keberkesanan pedagogi di bilik darjah. Namun, pengintegrasian AI ini juga menimbulkan pelbagai persoalan etika yang perlu diberikan perhatian serius oleh semua pihak. Antara isu utama yang sering dibincangkan ialah bias algoritma, iaitu kecenderungan sistem AI menghasilkan keputusan yang berat sebelah akibat data latihan yang tidak seimbang (Rouabhia, 2025). Dalam konteks pendidikan, bias ini boleh menjejaskan prinsip keadilan apabila algoritma AI digunakan bagi menilai prestasi atau menyediakan maklum balas pembelajaran pelajar (Praveenkumar et al., 2025). Situasi ini berpotensi memperluas jurang pencapaian dan menghakis kepercayaan pelajar terhadap sistem pembelajaran digital. Selain itu, isu ketelusan dan kerahsiaan data juga turut menimbulkan kebimbangan. Kebanyakan sistem AI beroperasi tanpa penjelasan yang jelas mengenai cara data pelajar dikumpul, digunakan atau disimpan. Kekurangan ketelusan ini menjejaskan kepercayaan guru, pelajar dan ibu bapa terhadap keselamatan maklumat peribadi pelajar. Menurut Lami et al. (2024), pelaksanaan sistem AI tanpa dasar privasi yang kukuh boleh meningkatkan risiko penyalahgunaan data dan melemahkan akauntabiliti institusi pendidikan. Teknologi AI juga mampu mengautomasikan pengumpulan data peribadi tanpa disedari pengguna (Elliott & Soifer, 2022). Situasi ini menegaskan keperluan kepada ketelusan dan kawalan yang lebih ketat dalam pengurusan data pelajar agar prinsip etika dan hak individu terpelihara. Oleh itu, bagi memastikan penggunaan AI dalam pendidikan berlaku secara beretika, pihak berkepentingan perlu menggariskan panduan yang jelas mengenai tanggungjawab dan akauntabiliti dalam pengurusan data pelajar. Pendekatan ini penting bagi menjamin keselamatan maklumat, melindungi hak individu serta mengekalkan kepercayaan terhadap sistem pembelajaran berasaskan AI.

5. Implikasi

Kajian ini masih berada pada peringkat kertas konsep, namun beberapa implikasi awal dapat diandaikan berdasarkan sorotan literatur yang telah dikemukakan. Implikasi ini menjelaskan potensi sumbangan kajian terhadap amalan pendidikan, pembangunan profesional guru dan dasar pendidikan digital negara. Kertas konsep ini memberikan beberapa implikasi yang signifikan kepada guru-guru Sains dalam mengenal pasti strategi pengintegrasian alat AI dalam PdP Sains terutamanya bagi membantu menjelaskan konsep sains yang abstrak. Sekiranya guru mendapati tahap penguasaan AI mereka masih rendah, ini boleh menjadi titik tolak untuk meningkatkan penglibatan mereka dalam latihan profesional berterusan. Selain itu, kertas konsep ini juga memberikan dapatan yang penting kepada pihak KPM, khususnya kepada Bahagian Pembangunan Kurikulum (BPK) dalam merangka program pembangunan profesional yang lebih tersasar dan efektif untuk guru-guru luar bandar. Latihan perlu merangkumi bukan sahaja aspek teknikal penggunaan AI, tetapi juga strategi pedagogi dan reka bentuk pengajaran yang berkesan bagi memperkasakan lagi pengajaran mata pelajaran Sains dengan mengintegrasikan teknologi AI dalam kurikulum. Kertas konsep ini juga menyumbang secara tidak langsung kepada usaha memperkukuh Dasar Pendidikan Digital (DPD) dengan menyumbang kepada kefahaman mendalam tentang jurang digital dan keperluan sebenar guru di sekolah luar bandar. Implikasi ini penting dalam memastikan pelaksanaan dasar yang lebih inklusif, adil dan bersesuaian dengan realiti lapangan.

6. Cadangan Kajian

Berdasarkan hasil sorotan literatur dan analisis cabaran dalam pengintegrasian teknologi AI dalam PdP Sains, beberapa cadangan kajian lanjutan dikemukakan untuk memperkukuh kefahaman dan pelaksanaan AI secara lebih berkesan, khususnya dalam konteks sekolah di Malaysia. Cadangan kajian masa hadapan dicadangkan meliputi (1) penilaian empirikal kesan penggunaan AI terhadap pemahaman konsep abstrak Sains; (2) kajian perbandingan antara sekolah bandar dan luar bandar; (3) analisis kompetensi guru berdasarkan kerangka TPACK-AI serta (4) penyelidikan aspek etika dan keselamatan data. Dapatan daripada kajian-kajian ini diharapkan dapat menyokong pelaksanaan Dasar Pendidikan Digital (DPD) secara lebih inklusif dan berkesan.

7. Kesimpulan

Kertas konsep ini membincangkan strategi dan cabaran pengintegrasian teknologi kecerdasan buatan (AI) dalam pengajaran dan pembelajaran (PdP) Sains dengan penekanan khusus terhadap peranan AI sebagai sokongan pedagogi dalam membantu pelajar memahami konsep-konsep abstrak Sains. Berdasarkan sorotan literatur, lima strategi utama dikenal pasti, iaitu pembelajaran peribadi, penilaian adaptif, pembelajaran imersif, pembelajaran interaktif dan penilaian automatik. Strategi-strategi ini menegaskan bahawa pengintegrasian AI dalam PdP Sains perlu difahami sebagai satu ekosistem pedagogi yang saling melengkapi, dan bukannya sekadar penerapan teknologi secara teknikal atau bersifat alat semata-mata. Walaupun strategi-strategi ini berpotensi menyokong pembelajaran yang lebih kontekstual dan berpusatkan pelajar, pelaksanaannya turut berhadapan dengan cabaran yang signifikan seperti kekangan infrastruktur, kos pelaksanaan, kebergantungan berlebihan terhadap teknologi serta isu keselamatan data dan etika. Cabaran-cabaran ini menegaskan bahawa pengintegrasian AI dalam PdP Sains memerlukan perancangan yang teliti, sokongan pelbagai pihak serta dasar yang jelas bagi memastikan penggunaan teknologi dapat memberikan manfaat dalam PdP. Secara keseluruhannya, pengintegrasian AI dalam PdP Sains bukan sekadar bertujuan meningkatkan kecekapan pengajaran, tetapi berfungsi sebagai pendekatan sokongan yang dapat memperkayakan pemahaman pelajar terhadap konsep abstrak Sains secara lebih holistik dan beretika. Justeru, kertas konsep ini menyediakan asas konseptual awal kepada guru, pembuat dasar dan penyelidik dalam merancang integrasi AI yang lebih kontekstual dalam sistem pendidikan Malaysia.

Penghargaan

Penulis ingin merakamkan ucapan terima kasih yang tidak terhingga kepada semua pihak yang menyumbang secara langsung dan tidak langsung dalam menyiapkan kajian ini.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis mengisytiharkan bahawa tiada sebarang konflik kepentingan berhubung dengan penerbitan kajian ini dan kajian ini tidak menerima sebarang dana penyelidikan.

Rujukan

Ahmad, S. F., Han, H., Alam, M. M., Rehmat, Mohd. K., Irshad, M., Arraño-Muñoz, M., & Ariza-Montes, A. (2023). Impact of artificial intelligence on human loss in decision making, laziness and safety in education. *Humanities and Social Sciences Communications*, 10(1), 311. <https://doi.org/10.1057/s41599-023-01787-8>

- Ahmed, S., Khalil, M. I., Chowdhury, B., Haque, R., Senathirajah, A. R. B. S., & Din, F. M. B. O. (2022). Motivators and barriers of artificial intelligent (AI) based teaching. *Eurasian Journal of Educational Research*, 2022(100), 74–89. <https://doi.org/10.14689/ejer.2022.100.006>
- Al Darayseh, A. (2023). Acceptance of artificial intelligence in teaching Science: Science teachers' perspective. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100132>
- Al-Dosari, I. A. A., Albahiri, M. H., & Alhaj, A. A. M. (2025). Enhancing AI utilization skills in education: Challenges and proposals for elementary school teachers in Bisha. *Educational Process International Journal*, 16(1). <https://doi.org/10.22521/edupij.2025.16.242>
- Alshorman, S. (2024). The readiness to use AI in teaching Science: Science teachers' perspective. *Journal of Baltic Science Education*, 23(3), 432–448. <https://doi.org/10.33225/jbse/24.23.432>
- Alsohaimi, M., Albahiri, M. H., & Alhaj, A. A. M. (2025). Addressing and managing Artificial Intelligence (AI) challenges and opportunities in elementary education in Saudi Arabia: An In-Depth Consideration. *Educational Process International Journal*, 17(1). <https://doi.org/10.22521/edupij.2025.17.324>
- Ateş, H. (2025). Integrating augmented reality into intelligent tutoring systems to enhance Science education outcomes. *Education and Information Technologies*, 30(4), 4435–4470. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-12970-y>
- Budiman, R. D. A., Surjono, H. D., Wagiran, Firdaus, M., Kurniati, T., Feladi, V., Oktarika, D., Hakiki, M., Sabir, A., & Wiyoko, T. (2025). Effectiveness of AI-driven assessments in enhancing learning evaluation through predictive technology in vocational secondary school. *International Journal of Information and Education Technology*, 15(7), 1410–1417. <https://doi.org/10.18178/ijiet.2025.15.7.2342>
- Chang, C.-N., Lin, S., Kwok, O.-M., & Saw, G. K. (2023). Predicting STEM major choice: A machine learning classification and regression tree approach. *Journal for STEM Education Research*, 6(2), 358–374. <https://doi.org/10.1007/s41979-023-00099-5>
- Diab, H., Daher, W., Rayan, B., Issa, N., & Rayan, A. (2024). Transforming Science education in elementary schools: The power of PhET simulations in enhancing student learning. *Multimodal Technologies and Interaction*, 8(11), 105. <https://doi.org/10.3390/mti8110105>
- Elliott, D., & Soifer, E. (2022). AI technologies, privacy, and security. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 5. <https://doi.org/10.3389/frai.2022.826737>
- Faria, A., & Lobato Miranda, G. (2024). The effect of augmented reality on learning meiosis via guided inquiry and pecha kucha: A quasi-experimental design. *Information*, 15(9), 566. <https://doi.org/10.3390/info15090566>
- González-Calatayud, V., Prendes-Espinosa, P., Roig-Vila, R., & Carpanzano, E. (2021). Applied sciences review artificial intelligence for student assessment: A systematic review. *Appl. Sci*, 2021, 5467. <https://doi.org/10.3390/app>
- Jia, F., Sun, D., & Looi, C. kit. (2024). Artificial intelligence in Science education (2013–2023): Research trends in ten years. In *Journal of Science Education and Technology* (Vol. 33, Issue 1, pp. 94–117). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10956-023-10077-6>
- Kamalov, F., Santandreu Calonge, D., & Gurrib, I. (2023). New era of artificial intelligence in education: Towards a sustainable multifaceted revolution. *Sustainability (Switzerland)*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/su151612451>

- Kamarudin, M. Z., & Mat Noor, M. S. A. (2024). To what extent do primary school children understand photosynthesis?: A study of children's drawings with follow-up interviews. *Education 3-13*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/03004279.2024.2385434>
- Katonane Gyonyoru, K. I., & Katona, J. (2024). Student perceptions of AI-enhanced adaptive learning systems: A pilot survey. 2024 IEEE 7th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), 93–98. <https://doi.org/10.1109/CANDO-EPE65072.2024.10772884>
- Kementerian Pendidikan Malaysia. (2024). Laporan awal pencapaian Malaysia dalam TIMSS 2023 trend in international mathematics and science study.
- Khomh, F., Masudur Rahman, M., & Barbez, A. (2023). Intelligent software maintenance (pp. 241–275). https://doi.org/10.1007/978-981-19-9948-2_9
- KPM (Kementerian Pendidikan Malaysia). (2021). Dokumen Standard Kurikulum dan Pentaksiran Sains Tahun 6.
- Kuhail, M. A., Abdulkerim, A. Z., Thornquist, E., & Haile, S. Y. (2025). A review on the use of immersive technology in space research. *Telematics and Informatics Reports*, 17, 100191. <https://doi.org/10.1016/j.teler.2025.100191>
- Lami, B., Mohd. Hussein, S., Rajamanickam, R., & Emmanuel, G. K. (2024). The role of artificial intelligence (AI) in shaping data privacy. *International Journal of Law and Management*. <https://doi.org/10.1108/IJLMA-07-2024-0242>
- Lee, A. V. Y., Koh, E., & Looi, C. K. (2023). AI in education and learning analytics in Singapore: An overview of key projects and initiatives. *Information and Technology in Education and Learning*, 3(1), 3.1.Inv.p001. <https://doi.org/10.12937/itel.3.1.Inv.p001>
- Mannepal, P. K., Wanjari, S., Ghode, S. D., & Ghode, S. D. (2025). Revolutionary EdTech. In *Revolutionizing education with remote experimentation and learning analytics* (pp. 423–438). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-8593-7.ch025>
- Martínez-Requejo, S., Redondo-Duarte, S., Jiménez-García, E., & Ruiz-Lázaro, J. (2025). Technoethics and the use of artificial intelligence in educational contexts (pp. 223–246). <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-0122-8.ch010>
- Masliza, S. R., & Nor'ain, M. T. (2021). Need analysis for developing a challenge-based learning module in learning Mathematics for form 4 students. *Jurnal Pendidikan Sains Dan Matematik Malaysia*, 11(Sp), 50–58. <https://doi.org/10.37134/jpsmm.vol11.sp.5.2021>
- Merino-Campos, C. (2025). The impact of artificial intelligence on personalized learning in higher education: A systematic review. *Trends in Higher Education*, 4(2), 17. <https://doi.org/10.3390/higheredu4020017>
- Milicević, V., Lazarova, L. K., & Pavlović, M. J. (2024). The application of artificial intelligence in education: The current state and trends. *International Journal of Cognitive Research in Science, Engineering and Education*, 12(2), 259–272. <https://doi.org/10.23947/2334-8496-2024-12-2-259-272>
- Mnguni, L. (2025). AI as a teaching augmentor: A review of the integration of AI in science education. *Multidisciplinary Reviews*, 8(12), 2025390. <https://doi.org/10.31893/multirev.2025390>
- Monib, W. K., Qazi, A., Apong, R. A., Azizan, M. T., Silva, L. De, & Yassin, H. (2024). Generative AI and future education: A review, theoretical validation, and authors' perspective on challenges and solutions. *PeerJ Computer Science*, 10. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2105>
- Naseer, F., Khan, M. N., Tahir, M., Addas, A., & Aejaaz, S. M. H. (2024). Integrating deep learning techniques for personalized learning pathways in higher education. *Heliyon*, 10(11), e32628. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32628>

- Naseer, F., & Khawaja, S. (2025). Mitigating conceptual learning gaps in mixed-ability classrooms: A learning analytics-based evaluation of AI-driven adaptive feedback for struggling learners. *Applied Sciences*, 15(8), 4473. <https://doi.org/10.3390/app15084473>
- Peney, T., & Skarratt, P. A. (2024). Increasing the immersivity of 360° videos facilitates learning and memory: Implications for theory and practice. *Educational Technology Research and Development*, 72(6), 3103–3115. <https://doi.org/10.1007/s11423-024-10402-9>
- Praveenkumar, S., Anute, N., Vaissnave, V., Ragupathi, T., Fardale, S., Selvakumar, P., & Manjunath, T. C. (2025). Risks of AI bias and inequities in learning (pp. 257–284). <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-2302-2.ch009>
- Reyes, R. L., Isleta, K. P., Regala, J. D., & Bialba, D. M. R. (2024). Enhancing experiential science learning with virtual labs: A narrative account of merits, challenges, and implementation strategies. *Journal of Computer Assisted Learning*, 40(6), 3167–3186. <https://doi.org/10.1111/jcal.13061>
- Rouabhia, R. (2025). Ethical implications of AI (pp. 409–436). <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-9511-0.ch014>
- Russell, S. J. , & Norvig, P. (2020). *Artificial intelligence: A modern approach* ((4th ed.)). Pearson.
- Salbihana, S., Halif, M. S., & Ahmad, S. A. (2024). Persepsi bakal guru terhadap kesan aplikasi kecerdasan buatan (AI) dalam pengajaran dan pembelajaran.
- Sandra, L., Lumbangaol, F., & Matsuo, T. (2021). Machine learning algorithm to predict student's performance: A systematic literature review. *TEM Journal*, 1919–1927. <https://doi.org/10.18421/TEM104-56>
- Singh, P., Kapoor, I., & Goyal, A. (2023). Educational software system for teaching STEM to visually impaired people. *Journal of Physics: Conference Series*, 2570(1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2570/1/012030>
- UNESCO. (2023). *Panduan AI generatif dalam pendidikan dan penyelidikan*.
- Zhai, X., Shi, L., & Nehm, R. H. (2021). A meta-analysis of machine learning-based Science assessments: Factors impacting machine-human score agreements. *Journal of Science Education and Technology*, 30(3), 361–379. <https://doi.org/10.1007/s10956-020-09875-z>