Malaysian Journal of Social Sciences and Humanities (MJSSH) (e-ISSN : 2504-8562)
2026, Volume 11, Issue 4, e003874
DOI: https://doi.org/10.47405/mjssh.v11i4.3874

RESEARCH ARTICLE

Pengintegrasian Kecerdasan Buatan dalam Pengajaran Sains untuk Meningkatkan Kemahiran 4C Murid Sekolah Rendah

(Integration of Artificial Intelligence in Science Education to Enhance 4C Thinking Skills in Primary Students)

Yugeswaran Puspanathan[1], Siti Nur Diyana Mahmud[2*]

[1]Fakulti Pendidikan, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia
Email: p144865@siswa.ukm.edu.my
[2]Fakulti Pendidikan, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia
Email: diyana@ukm.edu.my

CORRESPONDING AUTHOR (*):
Siti Nur Diyana Mahmud
(diyana@ukm.edu.my)

KATA KUNCI:
Kecerdasan Buatan (AI) dalam Pendidikan Sains
Kemahiran Abad ke-21 (4C)
Pengajaran dan Pembelajaran Sekolah Rendah
Kaedah Campuran
Integrasi Teknologi Pendidikan

KEYWORDS:
Artificial Intelligence (AI) in Science Education
21st Century Skills (4C)
Primary School Teaching and Learning
Mixed Methods Approach

CITATION:
Yugeswaran, P., & Siti Nur Diyana, M. (2026). Pengintegrasian Kecerdasan Buatan dalam Pengajaran Sains untuk Meningkatkan Kemahiran 4C Murid Sekolah Rendah. *Malaysian Journal of Social Sciences and Humanities (MJSSH), 11*(4), e003874. https://doi.org/10.47405/mjssh.v11i4.3874

ABSTRAK

Pengintegrasian Kecerdasan Buatan (AI) dalam pendidikan sekolah rendah semakin mendapat perhatian kerana potensinya untuk meningkatkan keberkesanan pengajaran dan pembelajaran, serta membangunkan kemahiran abad ke-21. Kajian ini bertujuan untuk meneliti pengintegrasian AI dalam pengajaran dan pembelajaran Sains di sekolah rendah di Malaysia, dengan fokus kepada kesannya terhadap pembangunan kemahiran 4C, iaitu pemikiran kritikal, komunikasi, kolaborasi dan kreativiti dalam kalangan murid. Menggunakan reka bentuk kaedah campuran, kajian ini melibatkan pengumpulan data kuantitatif dan kualitatif untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai pelaksanaan AI dalam bilik darjah Sains. Data kuantitatif diperoleh melalui soal selidik yang melibatkan 150 murid sekolah rendah dari sekolah bandar dan luar bandar, manakala data kualitatif diperoleh melalui temu bual separa berstruktur dengan 10 guru Sains. Analisis statistik deskriptif digunakan untuk menilai penggunaan AI dan persepsi murid terhadap kemahiran 4C, manakala analisis tematik meneliti pengalaman guru, cabaran, kesiapsiagaan dan isu etika dalam penggunaan AI. Dapatan kajian menunjukkan bahawa penggunaan alat AI seperti platform pembelajaran adaptif dan makmal maya memberi kesan positif terhadap kemahiran 4C, dengan pemikiran kritikal dan kolaborasi mencatatkan skor tertinggi. Walau bagaimanapun, cabaran seperti jurang infrastruktur digital, keperluan latihan guru dan isu etika seperti privasi data turut dikenalpasti. Kesimpulannya, kajian ini menunjukkan bahawa pengintegrasian AI dalam pendidikan Sains berpotensi besar untuk menyokong perkembangan kemahiran 4C, dengan sokongan perancangan pedagogi yang berkesan dan infrastruktur yang mencukupi.

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

ABSTRACT

The integration of Artificial Intelligence (AI) in primary education has gained significant attention due to its potential to improve teaching and learning effectiveness and develop 21st-century skills. This study examines the integration of AI in Science teaching and learning at primary schools in Malaysia, focusing on its impact on developing 4C skills—critical thinking, communication, collaboration, and creativity—among students. A mixed-method research design was used, combining both quantitative and qualitative data collection to gain a comprehensive understanding of AI implementation in Science classrooms. Quantitative data were gathered through questionnaires from 150 primary school students in urban and rural schools, while qualitative data came from semi-structured interviews with 10 Science teachers. Descriptive statistical analysis was applied to assess the level of AI usage and students' perceptions of 4C skill development, while thematic analysis explored teachers' experiences, readiness, challenges, and ethical considerations regarding AI. The results showed that AI tools like adaptive learning platforms, AI-based interactive videos, and virtual laboratories were used at moderate to high levels, particularly in urban schools. AI integration positively influenced all 4C components, with critical thinking and collaboration showing the highest improvement. However, challenges such as digital infrastructure gaps, the need for continuous teacher training, and ethical concerns regarding data privacy were identified. In conclusion, the study suggests that AI integration in primary Science education can significantly support 4C skill development if accompanied by effective pedagogical planning, teacher training, and equitable infrastructure. The findings offer valuable insights for educators, policymakers, and curriculum developers.

Sumbangan/Keaslian: Kajian ini menyumbang kepada literatur sedia ada dengan meneroka pengintegrasian Kecerdasan Buatan (AI) dalam pengajaran Sains sekolah rendah di Malaysia. Kajian ini menggunakan kaedah campuran untuk menilai kesannya terhadap pembangunan kemahiran 4C murid, sekaligus memberikan wawasan baharu tentang aplikasi AI dalam pendidikan.

1. Pengenalan

Dalam beberapa tahun kebelakangan ini, pengintegrasian Kecerdasan Buatan (AI) dalam pendidikan semakin diberi perhatian, khususnya untuk memperkukuh pengajaran dan pembelajaran Sains di sekolah rendah. Teknologi seperti AI generatif dan model bahasa multimodal menawarkan pendekatan baharu yang berpotensi memperibadikan pembelajaran, memupuk pemikiran kritikal, serta menyokong pembelajaran berasaskan inkuiri melalui pengalaman interaktif, adaptif dan berpusatkan murid (Al-Karasneh et al., 2025; Bewersdorff et al., 2024; Tian, 2025). Selari dengan tuntutan pendidikan abad ke-21, AI dilihat mampu memperkaya cara murid meneroka konsep sains melalui maklum balas masa nyata, simulasi eksperimen, dan bahan pembelajaran yang

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

disesuaikan dengan tahap serta keperluan murid (Al Nabhani et al., 2025; Al-Karasneh et al., 2025).

Pembangunan kemahiran abad ke-21 yang sering dirumuskan sebagai 4K/4C—Pemikiran Kritikal, Komunikasi, Kolaborasi dan Kreativiti—menjadi keutamaan dalam reformasi pendidikan kerana kemahiran ini diperlukan untuk menghadapi kerumitan dunia moden yang saling berhubung (Barus & Sahrul, 2025). Dalam konteks pendidikan Sains, AI boleh menyokong pembangunan 4K melalui aktiviti penyelesaian masalah, analisis fenomena sains, kerja kumpulan, dan penerokaan idea kreatif dalam penyelidikan. Contohnya, aplikasi AI boleh membantu murid menilai bukti, membina hujah, serta bekerjasama menyelesaikan tugasan yang lebih kompleks, sekali gus menggalakkan komunikasi dan kolaborasi yang lebih bermakna (Öztürk & Türker, 2025).

Walau bagaimanapun, pelaksanaan AI di sekolah rendah berdepan beberapa cabaran. Antara isu utama ialah keperluan pembangunan profesional guru bagi memastikan penggunaan AI berlaku secara pedagogi yang tepat dan bukan sekadar penggunaan teknologi semata-mata (Bas, 2025). Tanpa latihan dan sokongan sistem yang memadai, guru mungkin sukar mengintegrasikan AI secara efektif dan berasa terbeban. Selain itu, kurikulum juga perlu menyepadukan AI secara bermakna agar penggunaannya selaras dengan objektif pembelajaran Sains serta pembangunan kemahiran 4K (Al-Karasneh et al., 2025; Herlinawati, 2024). Isu kesaksamaan turut penting kerana jurang akses teknologi boleh memperkukuh ketidaksamarataan pendidikan, terutama apabila sekolah mempunyai tahap infrastruktur digital yang berbeza (Yim, 2025).

Kajian ini memberi fokus kepada pengintegrasian AI dalam pendidikan Sains sekolah rendah di Malaysia dan menilai kesannya terhadap pembangunan kemahiran 4K dalam kalangan murid. Penyelidikan ini menilai keberkesanan pelbagai alat AI, meneliti persepsi dan pengalaman guru, serta mengenal pasti cabaran dan peluang penggunaan AI dalam bilik darjah. Dapatan kajian diharap dapat menyumbang kepada wacana inovasi pendidikan, menyediakan panduan praktikal, dan memaklumkan pihak berkepentingan seperti pembuat dasar, pendidik, serta pembangun kurikulum tentang manfaat dan halangan sebenar integrasi AI dalam konteks tempatan.

1.1. Permasalahan Kajian

Walaupun AI berpotensi meningkatkan pengajaran dan pembelajaran Sains, pelaksanaannya masih terhalang oleh beberapa faktor kritikal. Pertama, kesiapsiagaan guru masih menjadi kebimbangan utama kerana ramai pendidik kekurangan literasi AI dan keyakinan untuk menggunakan alat AI secara berkesan (Bas, 2025). Ketiadaan program pembangunan profesional yang menyeluruh menambah jurang kecekapan digital, sekali gus mengehadkan impak AI terhadap hasil pembelajaran murid (Yim, 2024). Kedua, jurang infrastruktur digital antara sekolah bandar dan luar bandar menjejaskan pelaksanaan yang saksama. Sekolah bandar lazimnya mempunyai capaian internet dan kemudahan lebih baik, manakala sekolah luar bandar sering berhadapan kekangan peranti dan sambungan (Jamaluddin et al., 2025). Ketiga, kurikulum Sains semasa dilihat masih kurang menekankan integrasi AI dan pembangunan kemahiran 4K, menyebabkan peluang memupuk kecekapan penting murid tidak dimanfaatkan sepenuhnya (Nasran, 2025). Di samping itu, isu etika dan pedagogi seperti privasi data, bias algoritma, dan risiko pergantungan berlebihan kepada teknologi perlu ditangani melalui garis panduan yang jelas (Yan et al., 2023). Terdapat juga risiko murid menjadi

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

penerima pasif sekiranya AI tidak direka untuk mendorong penglibatan aktif; maka, AI perlu menyokong pembelajaran aktif agar kemahiran kritikal dan kreativiti dapat dipupuk secara konsisten (Mnguni, 2025). Dari sudut pentaksiran, kaedah tradisional mungkin kurang tepat mengukur 4K; penilaian berasaskan AI berpotensi memberi maklum balas segera dan diperibadikan, tetapi memerlukan penjajaran teliti dengan objektif kurikulum dan kerangka pelaksanaan yang jelas (Nguyen, 2025). Akhir sekali, perancangan strategik dan sokongan dasar yang menyeluruh masih diperlukan untuk meliputi latihan guru, pembangunan kurikulum, pemerkasaan infrastruktur dan pematuhan etika (Jamaluddin et al., 2025).

1.2. Objektif kajian

Kajian ini dijalankan untuk:

i. Mengenal pasti alat AI yang digunakan dalam pendidikan Sains sekolah rendah di Malaysia (contohnya sistem tutor pintar, pembelajaran adaptif, makmal maya atau LMS berasaskan AI)
ii. Menilai kesan pengintegrasian AI terhadap pembangunan kemahiran 4K dalam kalangan murid;
iii. Meneroka perspektif guru tentang penggunaan AI, termasuk cabaran, pengalaman, dan keperluan latihan serta sokongan.

1.3. Persoalan Kajian

i. Apakah alat AI yang digunakan?
ii. Bagaimana AI mempengaruhi 4K?
iii. Apakah pandangan serta cabaran guru dalam pengintegrasian AI?

1.4. Kepentingan Kajian

i. Meningkatkan pemahaman tentang cara AI memupuk kemahiran 4K yang diperlukan dalam dunia kerja dan masyarakat masa kini (Barus & Sahrul, 2025).
ii. Memaklumkan amalan pengajaran dan membantu guru mengenal pasti amalan terbaik serta keperluan pembangunan profesional (Bas, 2025; Yim, 2024).
iii. menyumbang kepada penggubalan dasar dan reka bentuk kurikulum yang menyepadukan AI secara beretika dan berkesan, termasuk usaha merapatkan jurang digital (Jamaluddin et al., 2025).
iv. Mengisi jurang literatur tentang AI dalam pendidikan sekolah rendah di Malaysia yang masih kurang diterokai (Yan et al., 2023).
v. Membuka ruang kajian masa hadapan termasuk kajian jangka panjang tentang kesan AI terhadap perkembangan kognitif dan sosial murid.

1.5. Skop dan Batasan Kajian

Kajian melibatkan murid dan guru Sains sekolah rendah di Malaysia merentasi sekolah bandar dan luar bandar. Kajian meneliti beberapa jenis alat AI yang praktikal digunakan di sekolah, serta menilai pembangunan 4K melalui gabungan kaedah kualitatif dan kuantitatif seperti pemerhatian, soal selidik, temu bual, dan analisis hasil kerja murid dalam tempoh enam bulan. Batasan kajian termasuk skop alat AI yang terhad, representasi geografi yang mungkin tidak menyeluruh, variasi literasi AI guru, bias

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

persepsi guru dan murid, kekangan infrastruktur, tempoh kajian yang singkat untuk kesan jangka panjang, serta cabaran mengukur kemahiran 4K yang bersifat abstrak dan pelbagai dimensi.

1.6. Definisi operasi

Istilah utama seperti AI (alat pembelajaran adaptif, tutor pintar, makmal maya), pendidikan Sains sekolah rendah (umur 7–12 tahun), kemahiran 4K (pemikiran kritikal, komunikasi, kolaborasi, kreativiti), kesiapsiagaan guru, penglibatan murid, pembelajaran diperibadikan, jurang digital, pertimbangan etika, pembelajaran berasaskan inkuiri, dan maklum balas masa nyata. Secara keseluruhan, Bab 1 membina asas kajian dengan menghuraikan rasional, isu utama, objektif, kepentingan, skop, batasan dan konsep teras untuk memahami peranan AI dalam mempertingkatkan pendidikan Sains serta pembangunan kemahiran 4K di sekolah rendah.

2. Sorotan Literatur

Integrasi Kecerdasan Buatan (AI) dalam pendidikan Sains sekolah rendah dengan fokus kepada kesannya terhadap pembangunan kemahiran 4C—Pemikiran Kritis, Komunikasi, Kolaborasi dan Kreativiti—dalam kalangan murid. Walaupun penggunaan AI dalam pendidikan berkembang pesat dan sering dibincangkan sebagai pemangkin transformasi pengajaran-pembelajaran, aplikasi AI dalam pendidikan Sains sekolah rendah yang secara khusus menilai pembangunan 4C masih kurang diterokai, khususnya dalam konteks Malaysia. Justeru, bab ini dibina untuk menyokong objektif dan persoalan kajian dengan menghuraikan konsep AI dalam pendidikan, jenis alat AI yang digunakan, peranan AI dalam memupuk 4C, perspektif guru, serta isu etika, pedagogi dan infrastruktur yang mempengaruhi keberkesanan integrasi.

Dalam perbincangan pengenalan AI dalam pendidikan, AI ditakrifkan sebagai teknologi yang membolehkan mesin melaksanakan tugasan yang biasanya memerlukan kecerdasan manusia, termasuk pembelajaran, penaakulan, penyelesaian masalah dan pemahaman bahasa (UNESCO, 2025). Dalam konteks sekolah, AI berpotensi memperibadikan pembelajaran, menyediakan maklum balas masa nyata, dan mengautomasikan tugasan pentadbiran seperti pemarkahan serta penjadualan. Keupayaan ini membolehkan guru menumpukan masa kepada aktiviti interaktif, bimbingan berfokus, dan interaksi bermakna dengan murid. Sorotan literatur menekankan bahawa pembelajaran diperibadikan melalui AI berlaku apabila sistem menganalisis data prestasi murid secara berterusan lalu menyesuaikan kandungan, kadar, dan tahap kesukaran berdasarkan keperluan serta kemajuan individu. Pendekatan ini bertujuan meningkatkan penglibatan dan pencapaian murid melalui sokongan yang lebih disasarkan.

Bab ini seterusnya menghuraikan teknologi AI yang biasa digunakan dalam pendidikan, khususnya di peringkat rendah. Antara alat utama ialah Sistem Tutoran Pintar (Intelligent Tutoring Systems, ITS) yang mensimulasikan bimbingan satu lawan satu dengan menyediakan petunjuk, latihan, dan maklum balas yang disesuaikan mengikut respons murid (Wang, 2024). Selain itu, Platform Pembelajaran Adaptif pula melaras kandungan dan kadar pembelajaran berdasarkan prestasi murid agar cabaran yang diterima kekal sesuai dan progresif, sekali gus menyokong pemahaman mendalam serta pengekalan ilmu (Wang, 2024). Dalam pendidikan Sains, Makmal Maya dan Simulasi berasaskan AI membolehkan murid menjalankan eksperimen dalam persekitaran maya

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

yang terkawal, mengurangkan kebergantungan kepada sumber fizikal, dan menyediakan pengalaman amali yang lebih selamat serta mudah diakses (Boulhrir, 2025). Seterusnya, Permainan Pendidikan dikuasakan AI memanfaatkan gamifikasi untuk meningkatkan motivasi, penglibatan, dan pembelajaran berasaskan penyelesaian masalah, di samping menggalakkan kolaborasi rakan sebaya (Springs, 2025).

Dari sudut tren global, sorotan literatur menunjukkan penerapan AI dalam pendidikan rendah semakin meluas, dengan contoh penggunaan alat berasaskan AI dalam amalan pengajaran harian serta inisiatif kebangsaan yang mensasarkan literasi digital dan pemikiran kritis. Trend ini menunjukkan pengiktirafan yang meningkat terhadap AI sebagai alat memperkukuh pengalaman pembelajaran yang lebih diperibadikan dan bermakna. Namun, bab ini turut menegaskan bahawa pertumbuhan global tersebut tidak semestinya menggambarkan kesediaan dan realiti pelaksanaan di semua negara, kerana konteks dasar, infrastruktur, budaya sekolah, dan sokongan latihan berbeza mengikut lokasi.

Dalam pendidikan Sains sekolah rendah, bab ini menumpukan perincian jenis alat AI yang digunakan dan rasional penggunaannya. AI dilihat mampu memperkaya pembelajaran Sains dengan memupuk inkuiri, meningkatkan pemahaman konsep melalui visualisasi dan simulasi, serta membina kemahiran penyelesaian masalah secara lebih aktif. Antara contoh alat yang disebut termasuk ITS seperti Cognii yang menawarkan maklum balas masa nyata dan disesuaikan, platform adaptif seperti i-Ready dan Khan Academy yang melaras tahap kesukaran mengikut prestasi murid, makmal maya yang membolehkan eksperimen dijalankan secara maya, serta permainan pendidikan berasaskan AI yang menggalakkan pembelajaran kolaboratif. Dari segi keberkesanan, literatur mencadangkan bahawa AI membantu meningkatkan hasil pembelajaran melalui pembelajaran peribadi, peningkatan pencapaian akademik, serta pengukuhan pemikiran kritis apabila murid digalakkan menganalisis, menyoal, dan meneroka fenomena saintifik secara inkuiri (UNESCO, 2025; Vieriu, 2025; Al-Karasneh, 2025).

Bab ini turut menghuraikan kelebihan dan cabaran penggunaan AI dalam pendidikan Sains. Dari aspek kelebihan, AI membolehkan laluan pembelajaran yang disesuaikan mengikut tahap dan gaya murid, menyediakan maklum balas segera yang mempercepat pembetulan salah faham, serta mewujudkan persekitaran pembelajaran yang menarik melalui simulasi dan gamifikasi (Taylor, 2025). Walau bagaimanapun, pelaksanaannya berdepan cabaran ketara seperti isu akses dan keadilan—ketidaksamarataan teknologi boleh menjejaskan sekolah yang kurang sumber, sekali gus memperluas jurang digital (Ng, 2025). Cabaran lain ialah kesiapsiagaan guru yang memerlukan latihan profesional dan sokongan teknikal untuk menggunakan alat AI dengan berkesan (Bas, 2025). Di samping itu, pertimbangan etika seperti privasi data, bias algoritma, dan risiko kebergantungan berlebihan terhadap teknologi turut menjadi isu utama yang perlu diurus secara teliti (Vieriu, 2025).

Satu bahagian penting bab ini ialah perbincangan kemahiran 4C dan kepentingannya dalam pendidikan abad ke-21. Kemahiran 4C ditakrifkan sebagai: Pemikiran Kritis (keupayaan menganalisis dan menilai maklumat untuk keputusan berasaskan alasan), Komunikasi (menyampaikan idea secara berkesan), Kolaborasi (bekerjasama untuk mencapai matlamat), dan Kreativiti (menjana idea baharu yang bernilai). Sorotan literatur menegaskan 4C sebagai asas kepada keupayaan menangani masalah kompleks dan menyumbang secara inovatif dalam dunia moden. Dalam kerangka ini, AI

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

dihujahkan berpotensi menyokong pembangunan 4C melalui beberapa mekanisme: (i) pemikiran kritis dipupuk apabila AI menyediakan situasi penyelesaian masalah yang menuntut analisis dan penilaian; (ii) komunikasi meningkat melalui persekitaran interaktif seperti perbincangan, pembentangan, dan tugasan digital; (iii) kolaborasi diperkukuh melalui ruang kerja maya yang membolehkan murid berkongsi sumber dan membina kandungan bersama; dan (iv) kreativiti berkembang apabila murid menggunakan AI untuk mereka bentuk projek, bereksperimen dengan idea baharu, dan meneroka penyelesaian inovatif dalam aplikasi konsep sains. Dengan kata lain, AI bukan sekadar alat penyampaian kandungan, tetapi juga medium yang boleh merangsang aktiviti pembelajaran aktif yang sejajar dengan pembangunan 4C.

Dari sudut teori, bahagian ini mengaitkan pembangunan 4C dengan kerangka Pembelajaran Abad ke-21 (P21) yang menekankan integrasi 4C dalam kurikulum melalui strategi seperti pembelajaran inkuiri dan kolaborasi, serta Teori Konstruktivisme (Piaget dan Vygotsky) yang menegaskan pembinaan pengetahuan melalui penglibatan aktif dan interaksi sosial. AI boleh diselaraskan dengan kedua-dua pendekatan ini apabila digunakan untuk menyokong penerokaan, perbincangan, dan kerja projek yang menuntut murid membina pemahaman melalui pengalaman dan kerjasama.

Perspektif guru terhadap integrasi AI kerana guru ialah pelaksana utama dalam bilik darjah. Sorotan literatur menekankan bahawa kesediaan guru dipengaruhi oleh literasi AI, keyakinan penggunaan teknologi, kepercayaan pedagogi, serta persepsi terhadap kegunaan dan kemudahan penggunaan alat AI. Terdapat dapatan bahawa sebahagian guru menunjukkan sikap positif terhadap AI, namun kekurangan latihan dan sokongan teknikal melemahkan kesediaan untuk mengintegrasikannya secara konsisten. Literasi AI dilihat bukan sekadar kemahiran menggunakan aplikasi, tetapi juga kefahaman tentang potensi, batasan, dan implikasi pedagogi AI agar guru dapat membuat keputusan berinformasi dalam memilih dan menggunakan alat. Oleh itu, pembangunan profesional digambarkan sebagai komponen kritikal—latihan perlu bersifat kontekstual, berperingkat mengikut tahap kepakaran, menyediakan pengalaman praktikal, dan merangkumi dimensi etika. Selain itu, literatur turut menyatakan bahawa peranan guru berubah dengan integrasi AI, daripada penyampai ilmu kepada pemudah cara pembelajaran yang membimbing murid menavigasi persekitaran pembelajaran diperkaya AI, di samping mengekalkan pertimbangan manusiawi dalam pembelajaran.

Perbincangan etika dan pedagogi menegaskan bahawa pelaksanaan AI perlu bertanggungjawab dan tidak boleh mengabaikan nilai kemanusiaan dalam pendidikan. Antara isu etika utama ialah privasi data pelajar kerana sistem AI biasanya memerlukan data besar untuk menyesuaikan pembelajaran, yang menimbulkan risiko keselamatan data, persetujuan, dan kemungkinan penyalahgunaan (Gouseti, 2025). Selain itu, bias algoritma boleh berlaku apabila data latihan AI mencerminkan prasangka sosial, lalu menyebabkan ketidakadilan yang memberi kesan kepada peluang dan hasil pembelajaran murid (Al-Zahrani, 2024). Seterusnya, kebergantungan berlebihan kepada AI boleh mengurangkan aspek kemanusiaan seperti empati, kepekaan emosi, dan hubungan guru-murid yang penting dalam perkembangan menyeluruh pelajar (Aljabr, 2024). Dari perspektif pedagogi, teori konstruktivis disarankan sebagai asas penggunaan AI—AI perlu mendorong penerokaan, inkuiri, refleksi, dan pemikiran kritis, bukan sekadar memudahkan jawapan. Model “Human-AI-Human” turut diketengahkan untuk mengekalkan keseimbangan peranan teknologi dan manusia, iaitu AI sebagai alat sokongan yang memperkaya keputusan pedagogi, manakala guru kekal sebagai pusat

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

yang membuat pertimbangan profesional dan refleksi (Reykdal, 2024). Literatur juga menekankan AI tidak mampu menggantikan pemahaman mendalam dan sokongan emosi guru; maka, AI perlu berfungsi sebagai pelengkap yang memperkukuh pembelajaran tanpa menjejaskan interaksi manusia (Li et al., 2025).

Akhirnya, sorotan lietarur ini menghimpunkan cabaran dan halangan pelaksanaan AI dalam pendidikan rendah. Dari segi teknologi, keterbatasan infrastruktur—terutamanya internet stabil, peranti digital, dan sokongan teknikal—menjadi halangan besar, khususnya di kawasan luar bandar. Kekangan ini memperluas jurang digital dan mewujudkan ketidaksamaan peluang akses kepada pembelajaran AI (Castro et al., 2025). Dari segi kurikulum, integrasi AI memerlukan penyesuaian struktur dan pedagogi agar penggunaan AI sejajar dengan hasil pembelajaran, namun ketiadaan rangka kerja standard, sumber sokongan, serta kesukaran menyesuaikan alat AI dengan konteks tempatan dan budaya sekolah menambahkan kerumitan (Karataş, 2025; Filiz, 2025). Dari segi dasar, sorotan literatur menunjukkan sokongan dasar dan strategi pendidikan yang jelas—termasuk pembiayaan, garis panduan, dan pematuhan privasi—berupaya mempercepat penerapan AI secara lebih meluas dan selamat. Namun, cabaran memastikan integrasi yang inklusif dan saksama masih berterusan, maka strategi merangkumi peningkatan infrastruktur, penyelarasan kurikulum, latihan guru, dan dasar etika adalah kritikal.

Ringkasnya, penemuan utama literatur menegaskan bahawa (i) alat AI seperti ITS danplatform adaptif berpotensi memperibadikan pembelajaran serta meningkatkan penglibatan dan prestasi murid; (ii) AI berpotensi menyokong pembangunan 4C melalui pembelajaran interaktif, inkuiri dan penyelesaian masalah; (iii) kejayaan integrasi banyak bergantung pada kesiapsiagaan guru, latihan, sumber dan pengurusan isu privasi; dan (iv) halangan utama termasuk kekangan infrastruktur, cabaran penyelarasan kurikulum, serta keperluan sokongan dasar yang menyeluruh untuk memastikan akses adil dan penggunaan AI yang beretika (Bas, 2025; Türker & Öztürk, 2024; Tahir & Haron, 2025; Jamaluddin et al., 2025). Pada masa yang sama, jurang dalam literatur masih wujud, khususnya kajian empirikal yang memfokuskan pendidikan Sains sekolah rendah dan pembangunan 4C dalam konteks Malaysia. Bab ini menyediakan asas konseptual dan praktikal untuk membimbing kajian seterusnya dalam menilai bagaimana AI boleh diintegrasikan secara berkesan, inklusif dan bertanggungjawab bagi memperkukuh pendidikan Sains dan pembangunan kemahiran 4C.

3. Metod Kajian

Penyelidikan tentang integrasi Kecerdasan Buatan (AI) dalam pendidikan berkembang pesat kerana potensinya mengubah pedagogi dan menyokong perkembangan kognitif aras tinggi. Dalam pendidikan Sains sekolah rendah, AI menawarkan pembelajaran diperibadikan, bimbingan pintar, dan simulasi interaktif yang membantu murid meneroka konsep saintifik dengan lebih mendalam (Wang, 2024). Potensi ini sejajar dengan agenda global memperkukuh kemahiran abad ke-21, khususnya 4C—pemikiran kritis, komunikasi, kolaborasi dan kreativiti—bagi mempersiapkan murid menghadapi cabaran masa hadapan (Tian, 2025). Namun, keberkesanan integrasi AI tidak hanya bergantung pada teknologi, malah dipengaruhi reka bentuk pedagogi, kesiapsiagaan guru dan pertimbangan etika. Kajian terkini menunjukkan AI boleh meningkatkan pembelajaran berasaskan inkuiri dan penyelesaian masalah, tetapi impaknya bergantung kepada akses infrastruktur, kompetensi digital guru, serta tahap penglibatan

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

murid dengan kandungan adaptif (Bas, 2025; Gouseti, 2025). Justeru, pendekatan kaedah campuran semakin relevan kerana dapat menangkap bukti kuantitatif yang boleh diukur dan penjelasan kualitatif tentang realiti pelaksanaan bilik darjah (Filiz, 2025).

Metod yang digunakan dalam kajian ini merangkumi reka bentuk kaedah campuran bagi menilai bagaimana alat AI digunakan dalam bilik darjah Sains sekolah rendah di Malaysia serta sumbangannya terhadap pembangunan kemahiran 4C. Reka bentuk kajian dipilih untuk memastikan koherens metodologi, meningkatkan kebolehpercayaan dapatan, dan menghasilkan gambaran holistik kerana kajian melibatkan pemboleh ubah boleh diukur dan pengalaman subjektif. Literatur metodologi menegaskan reka bentuk pelbagai dimensi penting dalam kajian pembelajaran diperkaya teknologi kerana satu pendekatan sahaja mungkin tidak dapat mengesan pola sebenar dalam ekosistem pembelajaran digital (Creswell & Creswell, 2023; Filiz, 2025).

Pendekatan kaedah campuran menggabungkan elemen kuantitatif dan kualitatif bagi meneliti kesan pedagogi AI secara menyeluruh (Yin, 2023). Bahagian kuantitatif menghasilkan data numerikal tentang tahap penggunaan AI dan persepsi murid terhadap perkembangan 4C melalui soal selidik berstruktur. Data ini membantu mengenal pasti pola, hubungan dan perbezaan antara kumpulan. Bahagian kualitatif pula memperluas dapatan dengan meneliti pengalaman guru, kesiapsiagaan, isu etika dan pertimbangan pedagogi yang sukar ditangkap melalui ukuran berangka. Temu bual separa berstruktur membolehkan guru menerangkan mengapa sesuatu pelaksanaan AI berjaya atau menghadapi kegagalan, sekali gus menghubungkan kesan yang diukur dengan realiti bilik darjah (Gouseti, 2025). Rasional pemilihan kaedah campuran turut berasaskan triangulasi: dapatan daripada pelbagai sumber dapat saling mengesahkan, mengurangkan bias, dan meningkatkan kesahan. Pendekatan ini juga membolehkan faktor kontekstual seperti infrastruktur sekolah, kompetensi digital dan budaya pengajaran diterangkan secara lebih bermakna; data kuantitatif boleh menunjukkan perbezaan (contohnya bandar-luar bandar), manakala data kualitatif menerangkan sebab dan implikasi perbezaan tersebut (Bas, 2025; Zhai, 2024; Cohen et al., 2023).

Bagi populasi dan persampelan, kajian menumpukan murid sekolah rendah dan guru Sains di Malaysia yang mempunyai pengalaman menggunakan bahan bantu mengajar berasaskan AI. Murid penting untuk menilai kesan AI terhadap 4C melalui data kuantitatif, manakala guru penting kerana mereka menentukan strategi pengajaran, mentafsir maklumat daripada sistem AI dan mengurus isu etika serta pedagogi. Literatur menegaskan kompetensi digital dan kepercayaan pedagogi guru mempengaruhi sejauh mana AI digunakan secara berkesan (Zhai, 2024). Kajian turut mengambil kira perbezaan sekolah bandar dan luar bandar untuk menangkap isu jurang akses infrastruktur yang sering dibangkitkan dalam pendidikan Malaysia (Tahir & Haron, 2025). Teknik persampelan menggabungkan persampelan rawak berstrata (untuk murid) dan persampelan bertujuan (untuk guru). Persampelan rawak berstrata memastikan murid dipilih daripada pelbagai latar geografi dan sosio-demografi agar dapatan lebih representatif serta mengurangkan taburan tidak seimbang (Cohen et al., 2023). Persampelan bertujuan memilih guru yang mempunyai pengalaman minimum dan relevan dalam penggunaan AI kerana mereka dapat memberikan maklumat mendalam mengenai amalan pengajaran dan cabaran sebenar (Gouseti, 2025).

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

3.1. Saiz Sampel

Kajian ini melibatkan 150 orang murid sekolah rendah, yang mewakili sekolah-sekolah di kawasan bandar dan luar bandar. Selain itu, 10 orang guru Sains telah ditemu bual untuk komponen kualitatif kajian.

3.2. Penentuan Saiz Sampel:

Saiz sampel ditentukan berdasarkan gabungan beberapa faktor. Bagi komponen kuantitatif, saiz sampel sebanyak 150 murid dipilih bagi memastikan representasi yang seimbang dari kedua-dua sekolah bandar dan luar bandar. Penggunaan persampelan rawak berstrata memastikan dapatan kajian lebih representatif mengikut latar geografi dan sosio-demografi yang berbeza. Bagi komponen kualitatif, 10 orang guru dipilih melalui persampelan bertujuan untuk mendapatkan pandangan mendalam dari guru yang berpengalaman menggunakan alat AI dalam pengajaran Sains.

3.3. Instrumen Kajian

Dari segi instrumen penyelidikan, kajian menggunakan tiga instrumen utama bagi memastikan pengumpulan data sistematik, sah dan boleh dipercayai: soal selidik murid, protokol temu bual guru, dan senarai semak analisis dokumen. Soal selidik murid sebagai instrumen kuantitatif dibahagi kepada bahagian demografi, pendedahan kepada pembelajaran Sains berasaskan AI, penilaian kemahiran 4C, dan tahap penglibatan murid. Skala Likert lima mata digunakan kerana sesuai mengukur konstruk pendidikan secara konsisten (Cohen et al., 2023). Item dibina berasaskan kerangka 4C yang disahkan serta komponen literasi AI, termasuk item khusus seperti pemikiran kritis dalam simulasi AI dan kolaborasi dalam tugasan makmal maya. Item akses peranti turut dimasukkan untuk menangkap kesan infrastruktur terhadap pengalaman pembelajaran AI, khususnya di luar bandar (Tian, 2025). Bagi komponen kualitatif, protokol temu bual separa berstruktur membolehkan guru menghuraikan pengalaman, pemilihan alat, pengurusan bilik darjah, kompetensi digital, keperluan latihan, serta isu privasi data dan bias algoritma yang sering dibincangkan dalam literatur AI (Gouseti, 2025; Al-Zahrani, 2024). Analisis dokumen pula menggunakan senarai semak bagi menilai rancangan pengajaran, tugasan AI, dokumen penilaian dan rekod aktiviti/papan pemuka AI. Instrumen ini membantu mengesahkan laporan murid dan guru serta memberi bukti objektif tentang penjajaran AI dengan reka bentuk pengajaran dan pentaksiran (Yin, 2023; Bas, 2025).

Prosedur pengumpulan data dilaksanakan secara berperingkat dan beretika. Fasa persediaan bermula dengan mendapatkan kebenaran pihak sekolah dan jawatankuasa etika, diikuti ujian rintis instrumen untuk memastikan kejelasan, kebolehpercayaan dan kesesuaian bahasa bagi murid sekolah rendah (Cohen et al., 2023). Pengumpulan data kuantitatif dilakukan melalui soal selidik semasa waktu PdP Sains. Guru membantu pengedaran tetapi tidak boleh mempengaruhi jawapan; kerahsiaan respon dijaga untuk menggalakkan jawapan jujur dan melindungi peserta. Soal selidik dikumpulkan pada hari yang sama bagi mengekalkan integriti data. Pengumpulan data kualitatif pula melibatkan temu bual separa berstruktur dengan guru secara bersemuka atau dalam talian; temu bual dirakam (dengan makluman peserta) dan ditranskripsikan verbatim. Guru juga digalakkan berkongsi contoh tugasan AI dan cabaran etika atau infrastruktur untuk menambah kekayaan konteks. Bagi triangulasi, dokumen seperti rancangan

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

pengajaran, papan pemuka AI, rekod penilaian dan log aktiviti dikumpulkan untuk mengesahkan amalan sebenar penggunaan AI (Zhai, 2024).

Analisis data menggunakan gabungan statistik dan analisis tematik selaras dengan kaedah campuran. Data kuantitatif dianalisis melalui statistik deskriptif (frekuensi, min, sisihan piawai) untuk menggambarkan pendedahan murid kepada AI dan persepsi terhadap 4C (Cohen et al., 2023). Statistik inferensi digunakan untuk menguji hubungan dan perbezaan, termasuk korelasi Pearson bagi menilai hubungan penggunaan AI dengan domain 4C, ujian-t sampel bebas untuk membandingkan murid bandar-luar bandar, dan regresi untuk menilai tahap ramalan integrasi AI terhadap perkembangan 4C (Tian, 2025). Data kualitatif dianalisis secara tematik melalui proses pembiasaan, pengekodan, pembinaan dan pemurnian tema. Analisis tematik sesuai untuk mengesan corak halus berkaitan kepercayaan, kesiapsiagaan, isu etika dan manfaat AI yang dirasai guru (Gouseti, 2025; Zhai, 2024). Semakan peserta (member checking) digunakan bagi meningkatkan kredibiliti tafsiran. Fasa integrasi pula menggabungkan kedua-dua set dapatan melalui triangulasi untuk mengesahkan bukti selari antara pengalaman murid dan guru, serta mentafsir percanggahan secara kontekstual. Pendekatan ini penting dalam kajian AI kerana ia menghubungkan hasil teknologi dengan pengalaman manusia dalam bilik darjah (Bas, 2025).

Artikel ini juga menekankan kesahan dan kebolehpercayaan bagi memastikan dapatan kukuh. Kesahan kuantitatif dipastikan melalui semakan pakar (guru Sains dan pakar teknologi pendidikan) untuk kesahan kandungan, penjajaran konstruk dengan kerangka 4C untuk kesahan konstruk, serta ujian rintis bagi meningkatkan kesahan muka dan kesesuaian bahasa (Cohen et al., 2023; Tian, 2025). Bagi data kualitatif, kesahan ditingkatkan melalui kredibiliti (member checking), kebolehgunaan melalui deskripsi konteks yang terperinci, dan kebolehkesahan melalui dokumentasi sistematik proses analisis. Kebolehpercayaan kuantitatif dinilai menggunakan alpha Cronbach dengan ambang minimum 0.70 untuk konsistensi dalaman, disokong prosedur pentadbiran yang distandardkan (Cohen et al., 2023). Kebolehpercayaan kualitatif diperkuat melalui protokol temu bual yang konsisten dan jejak audit (audit trail) bagi keputusan pengekodan (Gouseti, 2025).

Kesimpulannya, artikel ini membina rangka kerja metodologi yang sistematik, beretika dan boleh dipercayai untuk menilai integrasi AI dalam pendidikan Sains sekolah rendah serta kesannya terhadap pembangunan kemahiran 4C. Melalui reka bentuk kaedah campuran, persampelan yang seimbang, instrumen pelbagai, prosedur pengumpulan data berperingkat, analisis statistik dan tematik, serta strategi kesahan dan kebolehpercayaan yang kukuh, kajian ini menyediakan asas yang mantap untuk analisis dan tafsiran dapatan seterusnya.

4. Dapatan Kajian

Dapatan kajian yang diperoleh daripada analisis data kuantitatif dan kualitatif berkaitan pengintegrasian Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence, AI) dalam pengajaran dan pembelajaran Sains sekolah rendah serta kesannya terhadap pembangunan kemahiran abad ke-21 yang merangkumi Pemikiran Kritikal, Komunikasi, Kolaborasi dan Kreativiti (4C). Selaras dengan reka bentuk kajian kaedah campuran yang dihuraikan dalam bahagian terdahulu, dapatan kajian ini dianalisis secara deskriptif bagi memberikan gambaran menyeluruh tentang pola data, kecenderungan responden, serta pengalaman sebenar pelaksanaan AI dalam bilik darjah Sains. Pendekatan ini membolehkan

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

penyelidik memahami bukan sahaja tahap penggunaan AI, malah implikasinya terhadap pembelajaran murid dan amalan pedagogi guru.

Data kuantitatif kajian ini diperoleh melalui soal selidik yang diedarkan kepada murid sekolah rendah, manakala data kualitatif dikumpulkan melalui temu bual separa berstruktur bersama guru Sains serta analisis dokumen pengajaran yang berkaitan dengan penggunaan AI. Dapatan kajian disusun berdasarkan objektif kajian bagi memastikan kesinambungan yang jelas antara persoalan kajian, kaedah penyelidikan dan hasil kajian. Analisis deskriptif digunakan untuk menilai tahap penggunaan AI dalam pengajaran Sains, persepsi murid terhadap pembangunan kemahiran 4C, serta pandangan guru tentang keberkesanan dan cabaran integrasi AI dalam konteks pendidikan Sains sekolah rendah.

Jadual 1: Profil Demografi Responden Kajian

Aspek Demografi	Kategori	Bilangan (n)	Peratus (%)
Lokasi Sekolah	Bandar	90	60
	Luar bandar	60	40
Jantina	Perempuan	78	52
	Lelaki	72	48
Umur	10–12 tahun	150	100

Jadual 1 menunjukkan profil demografi responden kajian yang melibatkan seramai 150 orang murid sekolah rendah. Dari segi lokasi sekolah, majoriti responden terdiri daripada murid sekolah di kawasan bandar, iaitu seramai 90 orang (60%), manakala 60 orang murid (40%) berasal dari sekolah di kawasan luar bandar. Agihan ini selaras dengan kaedah persampelan rawak berstrata yang digunakan dalam kajian ini.

Dari aspek jantina, responden kajian adalah hampir seimbang dengan 78 orang murid perempuan (52%) dan 72 orang murid lelaki (48%). Seterusnya, dari segi umur, kesemua responden berada dalam lingkungan umur 10 hingga 12 tahun, iaitu peringkat umur yang sesuai untuk penglibatan aktif dalam pembelajaran berasaskan inkuiri serta penggunaan alat digital dalam proses pengajaran dan pembelajaran.

Dari aspek pendedahan terhadap teknologi, sebahagian besar murid melaporkan bahawa mereka mempunyai akses kepada peranti digital seperti komputer atau tablet di sekolah. Walau bagaimanapun, terdapat juga murid yang bergantung kepada penggunaan makmal komputer sekolah atau peranti yang dikongsi bersama rakan lain. Perbezaan tahap akses ini memberikan konteks penting dalam mentafsir dapatan kajian, khususnya berkaitan keberkesanan penggunaan AI dan perbezaan pengalaman pembelajaran antara murid di sekolah bandar dan luar bandar.

Jadual 2: Profil Guru Sains yang Ditemu Bual

Aspek	Kategori	Bilangan (n)
Bilangan guru	Jumlah informan	10
Pengalaman mengajar	5 – 18 tahun	10
Lokasi sekolah	Bandar	6
	Luar bandar	4
Penggunaan AI	Pernah menggunakan sekurang-kurangnya satu alat AI	10

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

Jadual 2 menunjukkan profil guru Sains sekolah rendah yang terlibat dalam temu bual kajian ini. Seramai 10 orang guru telah dipilih sebagai informan kajian melalui temu bual separa berstruktur. Guru-guru tersebut mempunyai pengalaman mengajar antara 5 hingga 18 tahun, yang menunjukkan kepelbagaian tahap pengalaman dalam pengajaran Sains. Dari segi lokasi sekolah, enam orang guru bertugas di sekolah bandar manakala empat orang lagi mengajar di sekolah luar bandar. Kepelbagaian latar belakang ini membolehkan kajian mengenal pasti variasi konteks pelaksanaan AI serta cabaran yang berbeza mengikut persekitaran sekolah.

Analisis deskriptif menunjukkan bahawa tahap penggunaan alat AI dalam pengajaran Sains sekolah rendah berada pada tahap sederhana ke tinggi. Majoriti murid melaporkan bahawa guru mereka menggunakan alat digital berasaskan AI sekurang-kurangnya dua hingga tiga kali sebulan dalam pengajaran Sains. Antara alat AI yang paling kerap digunakan termasuk platform pembelajaran adaptif, video interaktif berasaskan AI dan simulasi makmal maya. Dapatan ini menunjukkan bahawa AI telah mula diintegrasikan secara aktif dalam pengajaran Sains, walaupun tahap penggunaannya masih belum seragam di semua sekolah.

Nilai min keseluruhan bagi tahap penggunaan AI ialah 3.84 dengan sisihan piawai 0.67 pada skala Likert lima mata, menunjukkan kecenderungan positif terhadap penggunaan AI dalam pembelajaran. Murid di sekolah bandar mencatatkan nilai min yang lebih tinggi berbanding murid di sekolah luar bandar, yang mencerminkan perbezaan dari segi kemudahan infrastruktur dan kestabilan akses teknologi. Dapatan ini menyokong perbincangan terdahulu tentang kewujudan jurang digital yang masih mempengaruhi pelaksanaan teknologi pendidikan secara saksama.

Jadual 3: Tahap Pembangunan Kemahiran Abad ke-21 (4C) Melalui Penggunaan AI dalam Pembelajaran Sains

Domain Kemahiran 4C	Min	Sisihan Piawai	Interpretasi Tahap
Pemikiran Kritikal	3.92	0.61	Tinggi
Komunikasi	3.75	0.66	Sederhana – Tinggi
Kolaborasi	3.81	0.63	Sederhana – Tinggi
Kreativiti	3.69	0.70	Sederhana – Tinggi

Jadual 3 menunjukkan tahap pembangunan kemahiran abad ke-21 (4C) melalui penggunaan AI dalam pembelajaran Sains sekolah rendah. Secara keseluruhannya, semua domain kemahiran mencatatkan tahap sederhana hingga tinggi, menunjukkan bahawa penggunaan AI memberikan kesan positif terhadap pembangunan kemahiran murid.

Domain pemikiran kritikal mencatat nilai min tertinggi (M = 3.92, SP = 0.61). Murid melaporkan bahawa penggunaan simulasi AI dan soalan adaptif membantu mereka berfikir secara lebih mendalam serta menyelesaikan masalah Sains secara sistematik. Bagi kemahiran komunikasi, nilai min ialah 3.75 (SP = 0.66), menunjukkan bahawa AI membantu murid berbincang, menerangkan idea dan membuat pembentangan ringkas, walaupun komunikasi lisan masih memerlukan bimbingan guru.

Dari aspek kolaborasi, nilai min ialah 3.81 (SP = 0.63), yang menunjukkan bahawa aktiviti seperti projek kumpulan digital dan simulasi makmal maya membantu murid bekerjasama dalam menyelesaikan tugasan. Bagi kreativiti, nilai min ialah 3.69 (SP = 0.70), yang menunjukkan bahawa AI memberi peluang kepada murid menghasilkan idea

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

baharu dan meneroka penyelesaian dalam eksperimen maya. Walau bagaimanapun, dapatan juga menunjukkan bahawa peranan guru masih penting dalam memaksimumkan potensi AI untuk menyokong kreativiti murid.

Jadual 4: Tema Dapatan Kualitatif daripada Temu Bual Guru Sains

Tema	Huraian Dapatan
Manfaat pedagogi AI	Guru menyatakan bahawa AI meningkatkan penglibatan murid dalam pembelajaran Sains, terutamanya bagi topik yang bersifat abstrak. Simulasi dan visualisasi berasaskan AI membantu murid memahami konsep yang sukar dijelaskan melalui kaedah tradisional serta menyokong pembelajaran diperibadikan.
Kesediaan dan peranan guru	Walaupun AI digunakan dalam pengajaran, guru masih memainkan peranan sebagai fasilitator utama dalam PdP. AI dilihat sebagai alat sokongan dan bukan pengganti guru. Guru yang mempunyai literasi digital tinggi cenderung menggunakan AI secara lebih kreatif dan bermakna.
Cabaran infrastruktur dan latihan	Guru, khususnya di kawasan luar bandar, menghadapi cabaran seperti sambungan internet tidak stabil, kekurangan peranti dan kekangan masa pengajaran. Guru juga menekankan keperluan latihan profesional yang berterusan berkaitan penggunaan AI dalam pengajaran.
Pertimbangan etika penggunaan AI	Guru membangkitkan isu privasi data dan kemungkinan kebergantungan murid terhadap AI. Oleh itu, pemantauan guru dan penerapan nilai etika dianggap penting bagi memastikan penggunaan teknologi secara bertanggungjawab.

Jadual 4 menunjukkan empat tema utama yang dikenal pasti daripada analisis temu bual guru. Secara keseluruhannya, guru mempunyai persepsi positif terhadap penggunaan AI dalam pengajaran Sains kerana teknologi ini dapat meningkatkan penglibatan murid dan membantu menjelaskan konsep abstrak. Walau bagaimanapun, guru turut menekankan beberapa cabaran seperti kekangan infrastruktur, keperluan latihan profesional dan isu etika penggunaan AI. Dapatan ini juga menunjukkan bahawa peranan guru kekal penting sebagai fasilitator dalam memastikan penggunaan AI menyokong pembelajaran secara berkesan.

Secara keseluruhannya, penggabungan dapatan kuantitatif dan kualitatif menunjukkan keselarasan yang jelas antara persepsi murid dan pengalaman guru. Skor tinggi bagi pemikiran kritikal dan kolaborasi dalam data kuantitatif disokong oleh naratif guru yang menekankan keberkesanan AI dalam pembelajaran berasaskan inkuiri dan aktiviti kumpulan. Namun demikian, kedua-dua sumber data juga menunjukkan bahawa keberkesanan integrasi AI bergantung kepada kesiapsiagaan guru, sokongan infrastruktur dan reka bentuk pedagogi yang bermakna.

Kesimpulannya, dapatan kajian ini menunjukkan bahawa pengintegrasian AI dalam pendidikan Sains sekolah rendah memberi kesan positif terhadap pembangunan kemahiran 4C, khususnya pemikiran kritikal dan kolaborasi. Walau bagaimanapun, cabaran berkaitan jurang infrastruktur, keperluan latihan guru dan isu etika perlu ditangani secara sistematik bagi memastikan pelaksanaan AI yang lebih berkesan, saksama dan lestari dalam konteks pendidikan sekolah rendah.

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

5. Perbincangan

Artikel ini membincangkan dapatan kajian berkaitan pengintegrasian Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence, AI) dalam pendidikan Sains sekolah rendah serta pengaruhnya terhadap pembangunan kemahiran 4C, iaitu Pemikiran Kritikal, Komunikasi, Kolaborasi dan Kreativiti dalam kalangan murid. Perbincangan ini dipandu oleh objektif dan persoalan kajian yang telah dikemukakan. Dapatan kajian ditafsirkan dengan merujuk kepada literatur sedia ada bagi menilai sejauh mana hasil kajian ini menyokong, memperluas atau berbeza daripada kajian terdahulu berkaitan pembelajaran berasaskan AI dalam pendidikan sekolah rendah. Selain itu, artikel ini turut menghuraikan implikasi pendidikan, pedagogi dan dasar berkaitan integrasi AI dalam pendidikan Sains, di samping mengemukakan batasan kajian dan cadangan untuk kajian masa hadapan sebelum dirumuskan melalui kesimpulan yang menyeluruh tentang sumbangan kajian.

Berdasarkan objektif kajian, dapatan menunjukkan bahawa integrasi AI dalam pendidikan Sains sekolah rendah dilaksanakan terutamanya melalui platform pembelajaran adaptif, video interaktif berasaskan AI, makmal maya dan alat simulasi. Alat-alat ini digunakan pada tahap sederhana ke tinggi, khususnya di sekolah bandar, yang menunjukkan bahawa AI telah mula memainkan peranan yang bermakna dalam pengajaran bilik darjah. Dapatan ini selari dengan kajian terdahulu yang menyatakan bahawa sistem pembelajaran adaptif dan simulasi berasaskan AI merupakan antara alat yang paling mudah diakses serta sesuai dari segi pedagogi untuk murid sekolah rendah (Wang, 2024; UNESCO, 2025). Keupayaan alat ini menyampaikan kandungan secara visual dan interaktif amat membantu pembelajaran Sains yang sering melibatkan konsep abstrak. Namun, analisis turut menunjukkan wujud perbezaan ketara antara sekolah bandar dan luar bandar, apabila sekolah bandar mencatat tahap penggunaan AI yang lebih tinggi disebabkan infrastruktur dan ketersediaan peranti yang lebih baik. Hal ini menyokong kajian yang menegaskan bahawa infrastruktur digital merupakan faktor utama yang menentukan keberkesanan pelaksanaan AI di sekolah (Jamaluddin et al., 2025; Castro et al., 2025). Walaupun terdapat inisiatif di peringkat nasional untuk menyokong pembelajaran digital, pengagihan sumber teknologi yang tidak seimbang masih menjejaskan akses saksama kepada pendidikan berasaskan AI, sekali gus menyebabkan pelaksanaan AI belum seragam merentas konteks pendidikan yang berbeza.

Dari segi kesan integrasi AI terhadap kemahiran 4C, dapatan menunjukkan bahawa pemikiran kritikal mencatat nilai min tertinggi berbanding kemahiran lain. Murid melaporkan bahawa simulasi berasaskan AI, tugasan penyelesaian masalah dan soalan adaptif menggalakkan mereka menganalisis maklumat, membuat perbandingan serta merumuskan kesimpulan berdasarkan bukti. Hal ini menunjukkan bahawa alat AI berkesan dalam menyokong proses kognitif aras tinggi dalam pembelajaran Sains. Dapatan ini selari dengan teori pembelajaran konstruktivisme yang menekankan penglibatan aktif, inkuiri dan penyelesaian masalah sebagai mekanisme utama dalam pembinaan pengetahuan (Piaget, 1973; Vygotsky, 1978). Melalui makmal maya, murid dapat menjalankan eksperimen dalam persekitaran yang selamat dan terkawal, menguji hipotesis serta memerhati hasil secara berulang, yang seterusnya memperkukuh pemikiran analitikal. Dapatan ini turut menyokong kajian empirikal terkini yang menunjukkan bahawa pembelajaran berasaskan inkuiri yang disokong AI dapat meningkatkan keupayaan penaakulan dan penyelesaian masalah murid (Tian, 2025; Al-Karasneh, 2025). Walau bagaimanapun, dapatan kualitatif menegaskan bahawa

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

keberkesanan AI dalam memupuk pemikiran kritikal sangat bergantung kepada reka bentuk aktiviti pembelajaran oleh guru, kerana penggunaan AI secara bersendirian tidak semestinya menjamin pemikiran mendalam tanpa strategi pedagogi yang terancang.

Bagi kemahiran komunikasi, dapatan menunjukkan kesan yang positif walaupun nilai minnya sedikit lebih rendah berbanding pemikiran kritikal dan kolaborasi. Murid melaporkan peningkatan peluang untuk menerangkan idea, menyertai perbincangan dan membuat pembentangan, khususnya semasa tugasan digital berasaskan kumpulan. Dapatan ini menyokong kajian terdahulu yang menyatakan bahawa AI menyokong komunikasi secara tidak langsung melalui pewujudan persekitaran pembelajaran yang interaktif, dan bukannya mengajar kemahiran komunikasi secara langsung (Öztürk & Türker, 2025). Platform AI lazimnya menyediakan ciri yang menggalakkan murid menyatakan kefahaman, seperti soalan perbincangan dan tugasan kolaboratif. Namun, dapatan kualitatif menunjukkan bahawa perkembangan komunikasi lebih berkesan apabila guru merancang aktiviti yang memerlukan interaksi lisan atau bertulis secara sengaja. Keadaan ini menegaskan peranan guru sebagai pemudah cara dalam bilik darjah berasaskan AI, kerana tanpa perancangan pedagogi yang jelas, penggunaan AI boleh kekal bersifat individu dan mengehadkan peluang komunikasi yang bermakna. Justeru, dapatan ini mengukuhkan pandangan bahawa AI perlu melengkapkan, dan bukannya menggantikan, amalan pengajaran interaktif (Zhai, 2024).

Seterusnya, kemahiran kolaborasi muncul sebagai kemahiran kedua tertinggi dalam kalangan 4C. Murid melaporkan bahawa projek kumpulan berasaskan AI, simulasi berkongsi dan tugasan penyelesaian masalah secara kolaboratif meningkatkan kerjasama serta interaksi rakan sebaya. Guru turut mengesahkan bahawa alat AI memudahkan pengurusan aktiviti berkumpulan dan pemantauan penyertaan murid. Dapatan ini selari dengan perspektif konstruktivisme sosial yang melihat pembelajaran sebagai proses yang dimediasi secara sosial (Vygotsky, 1978), iaitu murid membina pengetahuan secara kolektif melalui pertukaran idea dan penyelesaian masalah bersama. Kajian terdahulu juga melaporkan bahawa persekitaran pembelajaran kolaboratif berasaskan AI menyokong pembelajaran rakan sebaya dan penyelesaian masalah secara kolektif (Bas, 2025). Namun begitu, dapatan kualitatif menunjukkan bahawa kolaborasi kurang berkesan dalam konteks yang mempunyai kekangan peranti dan sambungan internet yang tidak stabil, sekali gus menekankan kepentingan infrastruktur dalam menyokong pembelajaran kolaboratif berasaskan AI, terutamanya di sekolah luar bandar.

Bagi kemahiran kreativiti, dapatan menunjukkan nilai min terendah dalam kalangan 4C, walaupun masih berada pada tahap sederhana ke tinggi. Murid melaporkan bahawa alat AI membolehkan mereka menjana idea, menghasilkan output digital serta meneroka pelbagai penyelesaian alternatif. Walau bagaimanapun, kreativiti didapati sangat bergantung kepada tahap autonomi yang diberikan oleh guru. Dapatan ini selari dengan kajian terdahulu yang menyatakan bahawa kreativiti lebih berkembang apabila murid diberikan kebebasan untuk meneroka dan bereksperimen (Mnguni, 2025). Walaupun alat AI menawarkan potensi kreatif melalui simulasi dan ciri penciptaan kandungan, reka bentuk pengajaran yang terlalu berstruktur boleh mengehadkan potensi tersebut. Guru turut menegaskan bahawa kreativiti murid lebih ketara apabila AI digunakan dalam tugasan terbuka berbanding latihan berstruktur, sekali gus menunjukkan bahawa fleksibiliti pedagogi penting untuk memaksimumkan manfaat kreatif AI. Hal ini menyokong hujah bahawa AI perlu diintegrasikan melalui pendekatan pembelajaran

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

berasaskan inkuiri dan projek bagi menyokong pembangunan kreativiti secara menyeluruh.

Dari sudut perspektif guru, dapatan kualitatif menunjukkan bahawa guru secara umumnya mempunyai persepsi positif terhadap AI sebagai alat sokongan pengajaran. Guru melihat AI berfaedah untuk meningkatkan penglibatan murid, menyokong pengajaran terbeza dan memudahkan pemahaman konsep Sains yang kompleks, selari dengan kajian terdahulu yang menyatakan bahawa guru mengiktiraf nilai pedagogi AI apabila mereka mempunyai pendedahan serta pengalaman yang mencukupi (Tahir & Haron, 2025). Namun, guru menegaskan bahawa AI tidak menggantikan peranan pendidik, sebaliknya guru kekal sebagai fasilitator yang membimbing murid mentafsir maklumat, membuat refleksi pembelajaran dan mengaplikasikan pengetahuan secara bermakna. Dapatan ini menyokong pendekatan "AI berteraskan manusia" yang meletakkan AI sebagai alat bantuan, bukannya agen pengajaran autonomi (Reykdal, 2024). Dalam masa yang sama, guru turut menekankan cabaran berkaitan latihan yang terhad, kekangan masa serta isu etika, khususnya berkaitan privasi data dan kebergantungan murid terhadap AI, yang sejajar dengan literatur sedia ada tentang keperluan garis panduan etika yang jelas dan pembangunan profesional berterusan (Gouseti, 2025).

Implikasi dapatan kajian ini terhadap amalan pendidikan dapat dihuraikan melalui beberapa aspek utama. Pertama, kesan positif AI terhadap kemahiran 4C menunjukkan bahawa alat berasaskan AI berpotensi diintegrasikan secara berkesan dalam kurikulum Sains sekolah rendah untuk menyokong hasil pembelajaran abad ke-21. Namun, kejayaan pelaksanaan memerlukan reka bentuk pedagogi yang disengajakan dan bermakna, dan bukan sekadar penerapan teknologi. Kedua, latihan guru dikenal pasti sebagai faktor kritikal, justeru program pembangunan profesional perlu menumpukan bukan sahaja kepada kemahiran teknikal, tetapi juga strategi pedagogi untuk mengintegrasikan AI secara berkesan. Guru memerlukan sokongan bagi merancang aktiviti pembelajaran berasaskan inkuiri, kolaboratif dan kreatif dengan menggunakan alat AI. Ketiga, dapatan kajian menekankan keperluan menangani jurang infrastruktur, kerana pembuat dasar perlu mengutamakan penyediaan akses digital yang saksama agar manfaat pendidikan berasaskan AI dapat dinikmati oleh murid tanpa mengira lokasi geografi.

Pada peringkat dasar, dapatan kajian mencadangkan keperluan kepada satu kerangka menyeluruh bagi membimbing integrasi AI dalam pendidikan sekolah rendah yang merangkumi penjajaran kurikulum, garis panduan etika, pembangunan infrastruktur dan latihan guru yang berterusan. Dasar pendidikan kebangsaan perlu bergerak melangkaui inisiatif rintis kepada pelaksanaan AI secara sistematik dalam pengajaran dan pembelajaran. Selain itu, dasar juga perlu menekankan penggunaan AI secara bertanggungjawab melalui perlindungan privasi data, ketelusan dan keadilan, kerana garis panduan yang jelas dapat meningkatkan keyakinan guru serta memastikan pelaksanaan AI yang beretika di bilik darjah.

Walaupun kajian ini memberikan sumbangan yang bermakna, beberapa batasan perlu diakui. Pertama, penggunaan analisis deskriptif mengehadkan keupayaan untuk menentukan hubungan sebab dan akibat antara penggunaan AI dan pembangunan kemahiran 4C. Kedua, kebergantungan kepada data laporan kendiri berpotensi menimbulkan bias respons. Ketiga, kajian ini tertumpu kepada pendidikan Sains sekolah rendah dan mungkin tidak dapat digeneralisasikan kepada mata pelajaran atau

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

peringkat pendidikan lain. Oleh itu, kajian masa hadapan disarankan untuk menggunakan reka bentuk longitudinal bagi menilai kesan jangka panjang AI terhadap pembelajaran dan pembangunan kemahiran murid. Pendekatan eksperimen atau kuasi-eksperimen juga boleh digunakan untuk mengenal pasti hubungan sebab dan akibat dengan lebih jelas. Selain itu, penyelidikan lanjutan wajar meneroka integrasi AI dalam mata pelajaran lain serta menilai tahap literasi AI dan kesedaran etika murid.

6. Kesimpulan

Kesimpulannya, kajian ini menyediakan bukti empirikal bahawa pengintegrasian Kecerdasan Buatan dalam pendidikan Sains sekolah rendah memberi kesan positif terhadap pembangunan kemahiran 4C, khususnya pemikiran kritikal dan kolaborasi. Dapatan kajian menegaskan bahawa AI paling berkesan apabila digabungkan dengan amalan pedagogi yang kukuh, persediaan guru yang mencukupi dan sokongan infrastruktur yang menyeluruh. Secara keseluruhannya, kajian ini menyumbang kepada perkembangan ilmu berkaitan AI dalam pendidikan sekolah rendah dengan memberikan pandangan tentang bagaimana AI boleh digunakan secara bertanggungjawab dan berkesan bagi meningkatkan pembelajaran Sains serta mempersiapkan murid menghadapi keperluan abad ke-21.

Kelulusan Etika dan Persetujuan untuk Menyertai Kajian (*Ethics Approval and Consent to Participate*)

Para penyelidik menggunakan garis panduan etika penyelidikan yang disediakan oleh Jawatankuasa Etika Penyelidikan Universiti Kebangsaan Malaysia (RECUKM). Semua prosedur yang dilakukan dalam kajian ini yang melibatkan subjek manusia telah dijalankan mengikut piawaian etika jawatankuasa penyelidikan institusi. Kebenaran dan persetujuan mengikuti kajian turut diperoleh daripada semua peserta kajian.

Penghargaan (*Acknowledgement*)

Penulis ingin merakamkan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah menyumbang sama ada secara langsung atau tidak langsung dalam penghasilan dan penambahbaikan laporan ini.

Kewangan (*Funding*)

Kedua-dua kajian penaganalisan, pelaporan dan penerbitan dalam kes ini tidak menerima sebarang tajaan atau bantuan yang besar dalam bentuk kewangan.

Konflik Kepentingan (*Conflict Of Interest*)

Penulis melaporkan tiada sebarang konflik kepentingan berkenaan penyelidikan, pengarangan atau penerbitan kajian ini.

Rujukan

Adam, I. O., Alhassan, M. D., & Diack, A. (2024). Exploring the pedagogical approaches for generative AI integration in computing education in Ghana: A constructivist

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

perspective. In *AMCIS 2024 proceedings*. AIS Electronic Library. https://aisel.aisnet.org/amcis2024/ai_aa/22/

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). https://ijlter.org/index.php/ijlter/article/view/13218

Al-Zahrani, A. M. (2024). Unveiling the shadows: Beyond the hype of AI in education. *National Institutes of Health (PMC)*. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11087970/

Bas, C. (2025). Primary school teachers' needs for AI-supported STEM education: A study on 21st-century skills and interdisciplinary thinking. *Sustainability, 17*(15), 7044. https://doi.org/10.3390/su17157044

Boulhrir, T. (2025). Unpacking artificial intelligence in elementary education: A comprehensive thematic analysis systematic review. *Computers & Education: Artificial Intelligence, 7*(2), 1-14. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2025.04.002

Castro, A., García, M. del C. R., & Romero, M. (2025). Identifying rural elementary teachers' perceptions of artificial intelligence integration. *Sustainability, 17*(6), 2748. https://doi.org/10.3390/su17062748

Cohen, L., Manion, L., & Morrison, K. (2023). *Research methods in education* (9th ed.). Routledge.

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). SAGE Publications.

Filiz, O. (2025). Understanding the factors influencing AI integration in K–12 education. *Education and Information Technologies, 30*(5), 1-16. https://doi.org/10.1007/s10639-025-13463-2

Gouseti, A. (2024). The ethics of using AI in K–12 education: A systematic literature review. *Learning, Media and Technology, 49*(1), 1-16. https://doi.org/10.1080/1475939X.2024.2428601

Karataş, F. (2025). Reshaping curriculum adaptation in the age of artificial intelligence. *British Educational Research Journal, 51*(4), 45-67. https://doi.org/10.1002/berj.4068

Li, H., Fang, Y., Zhang, S., Lee, S. M., Wang, Y., Trexler, M., & Botelho, A. F. (2025). ARCHED: A human-centered framework for transparent, responsible, and collaborative AI-assisted instructional design. *arXiv.* https://arxiv.org/abs/2503.08931

Mnguni, L. (2025). AI as a teaching augmentor: A review of the integration of AI in science education. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/393129733

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2023). *Generative AI in the classroom: From hype to reality?* OECD. https://one.oecd.org/document/EDU/EDPC(2023)11/en/pdf

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2023). *OECD digital education outlook 2023: Pushing the frontiers with AI, blockchain and robots*. OECD Publishing. https://www.oecd.org/en/publications/oecd-digital-education-outlook-2023_c74f03de-en.html

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2024). *Shaping digital education: Enabling factors for quality, equity and efficiency*. OECD Publishing. https://www.oecd.org/en/publications/shaping-digital-education_bac4dc9f-en.html

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).

Office of Superintendent of Public Instruction. (2024). *Human-centered AI guidance for K–12 public schools*. Washington State Office of Superintendent of Public Instruction. https://ospi.k12.wa.us/sites/default/files/2024-08/comprehensive-ai-guidance.pdf

Öztürk, M., & Türker, P. M. (2025). Generative artificial intelligence and the 4C learning skills for the 21st century. In *Next-generation AI methodologies in education*. IGI Global. https://doi.org/10.4018/979-8-3693-7220-3.ch011

Piaget, J. (1973). *To understand is to invent: The future of education*. Grossman.

Reykdal, C. (2024). Foreword. In *Office of Superintendent of Public Instruction, Human-centered AI guidance for K–12 public schools*. https://ospi.k12.wa.us/sites/default/files/2024-08/comprehensive-ai-guidance.pdf

Sperling, K. (2024). In search of artificial intelligence (AI) literacy in teacher education. *Computers & Education: Artificial Intelligence, 7*(1), 1-12. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.02.005

Tahir, M. S. M., & Haron, Z. (2025). Malaysian teachers' perspectives on AI-based classroom assessment: Opportunities and challenges in 21st-century education. *Journal of Advanced Social Educational Development Discovery, 3*(2), 31–43. https://www.asedd.com/index.php/About/article/view/23

Tian, Q. (2025). The impact of artificial intelligence on students' 4C skills. *Procedia – Social and Behavioral Sciences, 225*, 23-28. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2025.03.110

UNESCO. (2023). *Guidance for generative AI in education and research*. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386693

UNESCO. (n.d.). Artificial intelligence in education. *UNESCO*. https://www.unesco.org/en/digital-education/artificial-intelligence

U.S. Department of Education, Office of Educational Technology. (2023). *Artificial intelligence and the future of teaching and learning: Insights and recommendations*. https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED631097.pdf

Vieriu, A. M. (2025). The impact of artificial intelligence on students' learning outcomes. *Education, 15*(3), 343.

Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press.

Wang, S., Wang, F., Zhu, Z., Wang, J., Tran, T., & Du, Z. (2024). Artificial intelligence in education: A systematic literature review. *Expert Systems with Applications, 252*(Part A), 124167. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124167

Yin, R. K. (2023). *Case study research and applications: Design and methods* (7th ed.). SAGE Publications.

Zhai, X. (2025). Transforming teachers' roles and agencies in the era of generative AI: Perceptions, acceptance, knowledge, and practices. *Journal of Science Education and Technology, 34*, 1323–1333. https://doi.org/10.1007/s10956-024-10174-0

© 2026 by the authors. Published by Secholian Publication. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY).