

Kerangka Konseptual Integrasi Kecerdasan Buatan dalam Pembelajaran Inkuiri Biologi Sekolah Menengah

Izzati Nur Md.Dom ^{1*} and Mohd Jasmy Abd Rahman ²

^{1,2} Fakulti Pendidikan, Universiti Kebangsaan Malaysia, Selangor, Malaysia

ABSTRAK

Kertas konsep ini meneroka cara strategik untuk menggabungkan teknologi Kecerdasan Buatan (AI) secara berkesan ke dalam proses pengajaran dan pembelajaran biologi, khususnya bagi membantu pelajar menangani cabaran memahami konsep saintifik yang sukar dilihat dengan mata kasar dan bersifat abstrak. Berlandaskan kaedah rujukan kepustakaan secara konseptual, kajian ini meneliti bagaimana alat AI moden dan sistem pembelajaran yang bersesuaian mampu berfungsi sebagai pembantu kognitif serta pemangkin minda yang merangsang cara pelajar berfikir secara mendalam. Dapatan mendedahkan bahawa integrasi teknologi ini menuntut satu persekitaran pembelajaran yang menyeluruh dan seimbang. Persekitaran tersebut menggabungkan peranan guru sebagai fasilitator yang membimbing etika penggunaan, pelajar sebagai penyelidik yang menilai maklumat secara kritis, serta teknologi sebagai penyedia simulasi visual yang dinamik. Melalui paparan imej, model, dan simulasi proses biologi yang interaktif, pelajar dapat membayangkan struktur hidupan dengan lebih mudah dan berkesan. Walau bagaimanapun, kertas ini memberi penekanan yang amat mendalam terhadap kepentingan amalan menyemak kesahihan fakta secara berterusan bagi membendung risiko maklumat palsu, bias, atau rekaan yang mungkin dihasilkan oleh sistem digital. Kesimpulannya, kajian ini mengetengahkan keperluan mendesak terhadap satu kerangka pengajaran yang terancang. Langkah ini penting bagi memastikan kerjasama yang sinergi antara manusia dan mesin mampu memperkukuh literasi sains pelajar, sekali gus selari sepenuhnya dengan aspirasi Kurikulum Standard Sekolah Menengah serta panduan literasi digital kebangsaan.

SEJARAH ARTIKEL

Peroleh 22 Jun 2026
Semakan 30 Julai 2026
Terima 31 Julai 2026
Online First 31 Julai 2026
Published 02 Oktober 2026

KATA KUNCI Kecerdasan Buatan (AI); Pendidikan Biologi; Pembelajaran Inkuiri; Konsep Abstrak; Amalan Meneliti Kebenaran Fakta (Fact-Checking)

Conceptual Framework for the Integration of Artificial Intelligence in Inquiry-Based Biology Learning in Secondary Schools

ABSTRACT

This conceptual paper explores strategic ways to effectively integrate Artificial Intelligence (AI) technology into biology teaching and learning processes, specifically to help students address the challenges of understanding scientific concepts that are microscopic and abstract. The thematic analysis of the selected literature identified, this study examines how modern AI tools and personalized learning systems can function as cognitive assistants and catalysts that stimulate deep critical thinking among students. The findings reveal that the integration of this technology demands a holistic and balanced learning ecosystem. This environment combines the role of teachers as facilitators guiding ethical use, students as active researchers evaluating information critically, and technology as a provider of dynamic visual simulations. Through the display of interactive images, models, and biological process simulations, students are better equipped to visualize living structures more easily and effectively. However, this paper places strong emphasis on the importance of continuous fact-checking practices to mitigate the risks of misinformation, bias, or fabrications generated by digital systems. In conclusion, this study highlights the urgent need for a well-planned instructional framework. This step is vital to ensure that synergistic collaboration between humans and machines can strengthen students' scientific literacy, fully aligning with the aspirations of the Kurikulum Standard Sekolah Menengah (KSSM) and national digital literacy guidelines.

ARTICLE HISTORY

Received 22 June 2026
Revised 30 July 2026
Accepted 31 July 2026
Online First 31 July 2026
Published 02 October 2026

KEYWORDS

Artificial Intelligence(AI);
Biology Education; Inquiry-
Based Learning; Abstract
Concepts; Fact-Checking

1. Pengenalan

1.1. Latar Belakang Kajian

Landskap pendidikan global pada era digital abad ke-21 kini berada di ambang anjakan paradigma yang amat ketara, didorong oleh kemasukan teknologi terutamanya Kecerdasan Buatan (AI). Dalam konteks pendidikan sains, khususnya disiplin ilmu Biologi, pengajaran dan pembelajaran (PdP) bukan lagi sekadar proses pemindahan maklumat sehala daripada guru kepada murid, sebaliknya menuntut satu bentuk pembinaan pengetahuan yang dinamik, berasaskan inkuiri, dan berpusatkan pelajar. Biologi sebagai satu cabang sains hayat sering kali berdepan dengan kekangan konseptual yang unik, di mana sebahagian besar fenomena alam seperti struktur sub-selular, replikasi molekul DNA, proses kitaran sel, dan proses biokimia yang kompleks bersifat mikroskopik, abstrak, serta sukar untuk dilihat secara visual melalui kaedah pengajaran konvensional buku teks semata-mata. Keadaan ini sering kali mencetuskan jurang kefahaman yang ketara, lantas mengehendkan keupayaan pelajar untuk membina model mental yang tepat terhadap realiti biologi yang dipelajari.

Menyedari hakikat ini, integrasi Kecerdasan Buatan (AI) menawarkan penyelesaian transformatif yang berpotensi besar untuk merungkai kerumitan tersebut. Perkembangan pesat alat penjanaan AI (*Generative AI*) dan sistem

pembelajaran adaptif pintar telah membuka ruang baharu untuk pemudahcara pembelajaran yang diperibadikan (*personalized learning*), menyediakan simulasi makmal maya interaktif, serta memproses set data biologi yang rumit dengan ketepatan yang tinggi (Usak, 2024; Ayeni et al., 2024). Di dalam bilik darjah moden, AI bukan sahaja bertindak sebagai pembantu instruksional yang meringankan beban tugas pentadbiran guru, malah ia berfungsi secara proaktif sebagai "objek untuk berfikir" (*objects-to-think-with*). Konsep yang dipopularkan ini menerangkan bagaimana alat digital berupaya merangsang, mencabar, dan memperluas struktur pemikiran kritis pelajar ketika mereka meneroka serta mencerakinkan fenomena sains yang abstrak (Vasconcelos & dos Santos, 2025).

Di peringkat nasional, usaha untuk mendekati era digital ini disokong secara langsung melalui pelbagai inisiatif strategik, termasuklah pelancaran Buku Panduan Literasi AI dalam pendidikan oleh Kementerian Pendidikan Malaysia (KPM). Garis panduan ini menekankan kepentingan membudayakan penggunaan teknologi secara beretika, inklusif, dan berhemah di dalam institusi pendidikan, agar kemahiran teknologi pelajar berkembang seiring dengan nilai integriti akademik. Walau bagaimanapun, meskipun potensi AI dalam memperkaya PdP Biologi diakui secara meluas, usaha pengintegrasian ke dalam bilik darjah arus perdana memerlukan penelitian yang mendalam. Tanpa panduan pedagogi yang berstruktur, risiko kebergantungan mutlak, penurunan krisis pemikiran, serta ancaman ketepatan maklumat atau "halusinasi AI" dikhuatiri boleh menjejaskan kualiti pencapaian murid (Cooper, 2023). Oleh itu, kertas konsep ini digariskan untuk meneliti secara komprehensif bagaimana sinergi antara manusia dan mesin dapat dioptimumkan secara beretika dalam ekosistem pembelajaran Biologi.

1.2. Pernyataan Masalah

Meskipun potensi Kecerdasan Buatan (AI) dalam merevolusikan landskap pendidikan sains yang diakui secara meluas, integrasi teknologi ini ke dalam bilik darjah Biologi sering kali berdepan dengan pelbagai halangan termasuklah dari segi struktur, pedagogi, dan kognitif yang kompleks. Salah satu isu utama yang dikenal pasti ialah jurang antara kesediaan menggunakan Kecerdasan Buatan (AI) dan pedagogi yang ketara dalam kalangan guru sains. Kebanyakan pendidik masih lagi bergelut untuk menggunakan alat AI generatif ke dalam amalan pengajaran harian agar sejajar dengan kehendak Dokumen Standard Kurikulum dan Pentaksiran (DSKP) dan ini terjadi disebabkan kekurangan latihan profesional yang berfokus serta tiada kerangka panduan praktikal. Akibatnya, penggunaan AI di dalam bilik darjah sering kali gagal digunakan secara meluas, terhad kepada pencarian maklumat rutin, atau dibiarkan tanpa bimbingan terarah yang mampu merangsang pemikiran kritis murid.

Selain daripada kekangan kesediaan guru, perkara lain yang turut membimbangkan ialah risiko ketepatan maklumat atau fenomena "halusinasi AI" (*AI hallucinations*) yang kerap dicatatkan dalam sistem *Large Language Models* (LLM) (Cooper, 2023). Dalam pengajaran dan pembelajaran ilmu Biologi, di mana integriti saintifik, kesahihan mekanisme molekul, dan ketepatan tatanama taksonomi adalah mutlak, sebarang kesilapan fakta atau maklumat rekaan yang dijana oleh AI boleh menyebabkan pemesongan maklumat kepada pelajar serta melahirkan salah tanggapan (*misconceptions*) yang serius. Keadaan ini diburukkan lagi oleh kecenderungan murid untuk menerima sahaja output digital secara bulat-bulat tanpa mengamalkan penelitian terhadap kebenaran fakta (*fact-checking*) yang diberi secara kritikal, yang seterusnya berisiko menyebabkan kelumpuhan terhadap daya pemikiran aras tinggi mereka melalui *cognitive offloading* (Papaneophytou & Nicolaou, 2025).

Di samping itu, kebergantungan yang berlebihan terhadap alat AI dikhuatiri akan mencetuskan fenomena *cognitive offloading*, di mana murid mengambil jalan pintas dengan menyerahkan keseluruhan proses penyelesaian masalah dan analisis data kepada mesin. Keadaan ini berisiko melumpuhkan daya usaha mental pelajar, merencatkan perkembangan kemahiran berfikir aras tinggi (KBAT), serta melemahkan keupayaan inkuiri saintifik yang tulen. Tanpa garis panduan etika, kerangka pedagogi yang terancang, serta intervensi guru yang berkesan sebagai fasilitator, integrasi AI dikhuatiri membawa lebih banyak mudarat daripada manfaat. Oleh itu, kertas konsep ini kritikal untuk merungkai permasalahan tersebut melalui pembinaan ekosistem inkuiri yang menyeimbangkan keupayaan teknologi dengan integriti akademik.

1.3. Persoalan Kajian

1. Apakah kriteria pemilihan alat AI yang efektif untuk menterjemah konsep abstrak Biologi?

2. Bagaimanakah integrasi AI secara sistematis dan beretika dapat dilaksanakan selari dengan DSKP Biologi?

1.4. Objektif Kajian

1. Mengetahui pasti alat AI yang sesuai dalam PdP Biologi bagi menterjemah konsep abstrak.
2. Mengemukakan garis panduan integrasi AI yang sistematis dan beretika selari dengan DSKP.

2. Sorotan Literatur

2.1. Potensi AI dalam Visualisasi Konsep Abstrak dan Pembinaan Model Mental

Disiplin ilmu Biologi sarat dengan fenomena sub-mikroskopik, molekul kompleks, dan proses dinamik yang merentasi batas persepsi pancaindera manusia secara langsung. Halangan kognitif utama dalam pembelajaran sains menengah adalah ketidakupayaan pelajar menterjemahkan teks statik di dalam buku rujukan kepada representasi mental tiga dimensi yang tepat. Dalam hal ini, kemunculan teknologi Kecerdasan Buatan (AI) generatif dan alat visualisasi lanjutan menawarkan anjakan paradigma yang mendalam. Melalui penjanaan grafik berwibawa, simulasi realiti maya, dan animasi interaktif laluan biokimia seperti replikasi DNA, transkripsi protein, dan dinamika membran sel AI bertindak sebagai pemangkin kognitif yang membolehkan murid melihat, memanipulasi, serta memahami struktur abstrak dengan ketepatan visual yang belum pernah dicapai sebelum ini (Ayeni et al., 2024).

Selari dengan pandangan ini, Usak (2024) menegaskan bahawa penggunaan AI dalam pendidikan biologi memudahkan proses pengumpulan dan penyusunan data biologi berskala besar, yang kemudiannya dizahirkan melalui model bersepadu yang merentasi pelbagai sub-disiplin sains. Tambahan pula, pelbagai kajian lepas menegaskan bahawa persembahan visual dinamik mampu mengurangkan beban kognitif luaran (*extraneous cognitive load*), sekali gus membuka ruang mental yang lebih besar untuk pemprosesan maklumat bermakna (Luckin, 2023). Apabila pelajar berinteraksi dengan simulasi yang dihasilkan oleh AI, mereka bukan sahaja bertindak sebagai pemerhati pasif, malah dapat meneroka pelbagai senario "apa jua keadaan" (*what-if scenarios*) yang mustahil dilakukan di dalam makmal fizikal sekolah. Keupayaan ini diperkukuh oleh penemuan metaanalisis Kesgin (2025) yang menunjukkan kesan positif signifikan AI terhadap hasil pembelajaran sains (Hedges' $g = 0.63$), terutamanya dalam aspek visualisasi dan makmal maya. Ini secara langsung memperkukuh pembinaan model mental kognitif yang jitu, menyokong pemahaman konseptual yang tulen, dan merapatkan jurang antara teori abstrak dengan realiti empirikal sains hayat (Vasconcelos & dos Santos, 2025).

2.2. Pembelajaran Peribadi, Sistem Adaptif, dan Pengurangan Jurang Pencapaian

Selain daripada aspek visualisasi struktur, landskap pendidikan moden turut menyaksikan peralihan drastik ke arah sistem pembelajaran adaptif berteraskan algoritma AI. Sistem ini berupaya menganalisis pola prestasi, kelajuan pembelajaran, serta corak kesilapan individu pelajar secara masa nyata (*real-time*), membolehkan penyampaian kandungan ilmu disesuaikan secara khusus mengikut tahap keperluan sendiri setiap murid. Dalam konteks kelas Biologi yang heterogen, pendekatan peribadi (*personalized learning*) ini memainkan peranan penting dalam menyokong pelajar yang menghadapi kekangan kefahaman tanpa mengganggu kelajuan pembelajaran murid yang lebih pantas.

Menerusi kerangka Teori Perkembangan Proksimal Vygotsky, sistem adaptif AI berfungsi sebagai perancah pintar (*intelligent scaffolding*) yang memberikan sokongan optimum di zon perkembangan proksimal murid. Apabila algoritma AI mengesan kelemahan murid dalam topik tertentu—contohnya pengangkutan merentasi membran atau genetik mendel—sistem akan secara automatik menawarkan modul pemulihan, soalan pengukuhan berperingkat, atau analogi alternatif yang lebih mudah dihadap. Analisis empirikal oleh Kesgin (2025) turut merumuskan bahawa sistem tunjuk ajar pintar (*intelligent tutoring systems*) memberikan impak yang sangat ketara dalam

mengoptimalkan laluan pembelajaran peribadi murid. Hal ini bukan sahaja memupuk motivasi intrinsik pelajar melalui pengalaman kejayaan berterusan, malah berkesan dalam merapatkan jurang pencapaian akademik secara menyeluruh di dalam bilik darjah arus perdana.

2.3. Integrasi Beretika, Amalan Meneliti Kebenaran Fakta, dan Peranan Evolving Guru

Walaupun potensi AI dalam memperkaya PdP Biologi adalah sangat luas, integrasinya tidak boleh dipisahkan daripada kerangka etika yang ketat dan kawalan pedagogi manusia. Salah satu ancaman terbesar yang dikenal pasti dalam literatur semasa ialah fenomena halusinasi AI, iaitu kecenderungan sistem bahasa besar untuk menjana maklumat yang kelihatan meyakinkan tetapi sebenarnya salah dari segi saintifik (Cooper, 2023). Kajian terhadap prestasi model bahasa besar (LLMs) dalam peperiksaan biologi sekolah menengah turut mendedahkan bahawa walaupun model ini cemerlang dalam soalan fakta asas, mereka sering menghadapi kekangan ketara dalam menyelesaikan penaakulan biologi peringkat tinggi yang rumit (Dao & Le, 2023). Dalam disiplin sains di mana ketepatan tatanama taksonomi, mekanisme fisiologi, dan data molekul adalah mutlak, sebarang kesilapan fakta boleh mencetuskan salah tanggapan yang mendalam dan merosakkan integriti akademik.

Oleh itu, literatur menekankan kepentingan mendesak untuk membudayakan amalan meneliti kebenaran fakta (*fact-checking*) dalam kalangan murid sebagai sebahagian daripada teras literasi AI. Guru Biologi tidak lagi berfungsi sebagai penyampai maklumat tunggal, sebaliknya dapat menjadi fasilitator kritis dan pembimbing etika (Miao & Holmes, 2023). Peranan baharu ini menuntut kecekapan pedagogi digital yang tinggi bagi melatih murid menilai kesahihan sumber, membandingkan output AI dengan literatur primer yang disemak rakan sebaya (*peer-reviewed*), serta mengekalkan kawalan kognitif manusia sepenuhnya (*human-in-the-loop*) dalam setiap proses inkuiri saintifik.

3. Metodologi

Kertas konsep ini menggunakan pakai pendekatan sorotan integratif dan pembinaan kerangka konseptual. Pendekatan ini dipilih secara strategik untuk membolehkan proses pengumpulan, penilaian kritikal, dan sintesis literatur lepas dilaksanakan secara teliti, menyeluruh, serta berstruktur tanpa terikat kepada had sumber tunggal (Bond et al., 2024). Menurut Snyder (2019), sorotan integratif bukan sekadar proses menghimpunkan penemuan kajian terdahulu, malah merupakan satu metodologi penyelidikan yang sistematik bagi mengenal pasti, menilai, mensintesis, dan mengintegrasikan pengetahuan sedia ada untuk membangunkan perspektif baharu, mengenal pasti jurang penyelidikan, serta membentuk asas konseptual bagi kajian seterusnya. Oleh itu, pendekatan ini amat bersesuaian bagi pembangunan kertas konsep kerana membolehkan pengkaji menghasilkan satu kerangka konseptual yang berasaskan bukti empirikal dan teori yang mantap. Melalui metodologi ini, pengkaji dapat memetakan landskap perbincangan semasa mengenai peranan teknologi dalam bilik darjah secara objektif, sekali gus memastikan hujah yang dibina berasaskan bukti yang kukuh dan menyeluruh (Tricco et al., 2018). Tatacara pelaksanaan kajian ini dirangka melalui tiga fasa utama bagi menjamin kesahihan hujah konseptual dan keteguhan landasan teori:

3.1. Fasa Penerokaan dan Pengumpulan

Fasa awal ini melibatkan proses pencarian dan pengumpulan menyeluruh terhadap pelbagai sumber ilmiah, termasuklah artikel jurnal berwasit, prosiding persidangan berindeks, buku rujukan akademik, serta dokumen dasar rasmi seperti panduan literasi digital kebangsaan dengan menggunakan pelbagai pangkalan data antaranya ialah Scopus, Springer, Research Gate dan Google Scholar dengan menggunakan kata kunci utama iaitu '*Artificial Intelligence*' dan '*Biology*'. Sumber-sumber ini memfokuskan kepada perbincangan mengenai integrasi sistem pembelajaran bersesuaian, alat bantu digital, serta amalan pedagogi dalam pendidikan sains (Chakraborty & Harikrishnan, 2026).

3.2. Fasa Penapisan Sumber Literatur

Pemilihan artikel ditapis secara ketat berdasarkan kriteria kerelevanan teori, kebolehpercayaan sumber, serta fokus khusus terhadap pengajaran konsep biologi yang abstrak dan mikroskopik sekolah menengah. Langkah penapisan bertingkat ini memastikan bahawa hanya literatur yang menyumbang secara langsung kepada skop kajian sahaja yang dipilih untuk dianalisis dan mengelakkan lambakan maklumat yang tidak bersesuaian dengan matlamat penyelidikan.

Data, pandangan, dan hujah daripada literatur terpilih seterusnya dianalisis menggunakan kaedah tematik digunakan untuk menganalisis dan mensintesis dapatan daripada literatur yang dipilih dengan mengenal pasti tema-tema yang berulang serta pola utama yang muncul dalam kajian terdahulu (Braun & Clarke, 2003). Melalui proses ini, setiap penulisan diteliti bagi mengenal pasti bagaimana teknologi kecerdasan buatan (AI) dimanfaatkan untuk membantu visualisasi struktur biologi yang bersifat abstrak, cabaran etika yang berkaitan dengan penggunaannya dalam pendidikan, serta keperluan membangunkan kerangka pengajaran yang dapat menyokong pengintegrasian teknologi secara berkesan di dalam bilik darjah (Lee et al., 2023). Analisis tematik ini turut membolehkan persamaan, perbezaan dan kecenderungan dapatan antara kajian dikenal pasti secara sistematik bagi membentuk pemahaman yang lebih menyeluruh terhadap isu yang dibincangkan.

Di samping itu, setiap sumber dianalisis secara kritis dengan menilai kekuatan dan kelemahan kajian daripada aspek reka bentuk penyelidikan, konteks pelaksanaan, serta dapatan yang dilaporkan. Penilaian ini bertujuan mengenal pasti jurang penyelidikan yang masih belum diterokai, khususnya berkaitan penggunaan AI dalam meningkatkan kefahaman murid terhadap konsep biologi di peringkat sekolah menengah. Hasil analisis tersebut menjadi asas kepada pembentukan cadangan kerangka konseptual yang dapat menyokong pelaksanaan teknologi AI secara sistematik, beretika dan selaras dengan keperluan pengajaran dan pembelajaran sains semasa (Miao & Holmes, 2021).

3.3. Fasa Sintesis dan Pembinaan Kerangka Konseptual

Hasil daripada analisis tematik disintesis secara logik, berurutan, dan bermakna bagi membangunkan satu kerangka konseptual yang menyeluruh serta praktikal. Kerangka yang dibina ini berfungsi sebagai panduan holistik kepada pendidik untuk mengintegrasikan teknologi secara sistematik, beretika, dan selari dengan kehendak kurikulum sains kebangsaan, khususnya Kurikulum Standard Sekolah Menengah (KSSM).

Bagi menyokong keteguhan kerangka konseptual ini, kajian menyepadukan Teori Konstruktivisme oleh Jean Piaget (Piaget, 1972), Teori Penentuan Kendiri (Self-Determination Theory, SDT) (Deci & Ryan, 2000), serta diperkukuh melalui model pedagogi digital interaktif (Jha & Atif, 2025). Teori Konstruktivisme menjelaskan bahawa pembelajaran berlaku apabila pelajar membina pengetahuan secara aktif melalui pengalaman, penerokaan dan refleksi, manakala Teori Penentuan Kendiri menjelaskan bahawa penggunaan AI sebagai alat sokongan pembelajaran dapat meningkatkan motivasi intrinsik apabila pelajar merasakan mereka mempunyai autonomi dalam meneroka konsep, kompetensi dalam menyelesaikan tugas serta hubungan yang positif dengan guru dan rakan semasa aktiviti pembelajaran berasaskan AI.

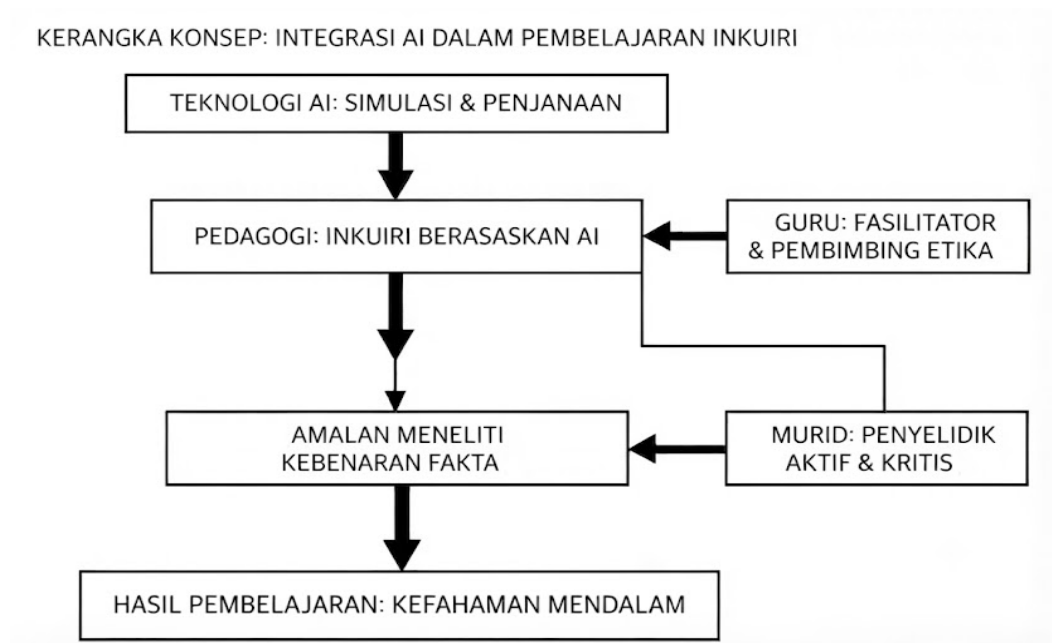
Dari aspek perbandingan alat bantuan pembelajaran kecerdasan buatan, literatur membezakan keupayaan antara model bahasa besar seperti ChatGPT, Microsoft Copilot, dan sistem tutor pintar (ITS) (Chakraborty & Harikrishnan, 2026; Ahmedtelba et al., 2025). Walaupun alat pintar ini bertindak sebagai pemudah cara yang pantas dalam meringkaskan maklumat biologi yang kompleks, perbandingan empirikal menunjukkan bahawa pergantungan mutlak tanpa kawalan boleh mengurangkan usaha kognitif pelajar (*cognitive offloading*) (Ahmedtelba et al., 2025). Sintesis literatur menunjukkan bahawa AI paling berkesan apabila berfungsi sebagai alat sokongan kognitif (*cognitive partner*), bukannya pengganti kepada proses penaakulan manusia. Oleh itu, proses sintesis ini menegaskan bahawa teknologi pintar harus berfungsi sebagai rakan kolaborasi (*object-to-think-with*) yang menyokong pemikiran kritis dan penaakulan inferensi pelajar, dan bukannya menggantikan daya usaha kognitif manusia (Küçükuncular, 2025; Vendrell & Johnson, 2024). Hubungan yang terjalin antara usaha manusia (guru dan murid) dengan keupayaan

teknologi ini berupaya memperkukuh literasi sains secara berkesan, memupuk kemahiran pemikiran aras tinggi, serta memelihara nilai integriti akademik dan etika pembelajaran sepanjang hayat (Hu et al., 2025; Jha & Atif, 2025).

4. Keputusan

4.1 Kerangka Konseptual Integrasi AI dalam Pembelajaran Inkuiri

Analisis konseptual yang disintesis daripada pelbagai literatur semasa menunjukkan bahawa integrasi Kecerdasan Buatan (AI) dalam PdP Biologi tidak seharusnya dilihat sebagai penggunaan alat teknologi secara terpencil atau mekanikal semata-mata. Sebaliknya, ia membentuk satu ekosistem pembelajaran inkuiri yang dinamik, saling berhubungkait, dan berpusatkan murid. Kerangka konseptual yang dibangunkan ini menerangkan bagaimana pelbagai elemen utama berinteraksi untuk mencapai objektif pembelajaran yang optimum.



Rajah 1. Kerangka Konseptual Integrasi AI dalam Pembelajaran Inkuiri Biologi

Berdasarkan rajah 1 kerangka konseptual di atas, proses ini bermula dengan teknologi AI sebagai penyedia simulasi dan penjana maklumat yang bertindak mencetuskan rangsangan awal kognitif. Teknologi ini disalurkan ke dalam teras pedagogi inkuiri berasaskan AI selaras dengan keperluan pengajaran sains (Al Darayseh, 2023). Di peringkat ini, peranan guru sebagai fasilitator dan pembimbing etika menyuntik panduan pedagogi yang mendalam untuk memastikan penggunaan teknologi kekal terarah kepada silibus biologi KSSM (Luckin et al., 2022). Seterusnya, proses inkuiri bergerak ke arah amalan meneliti kebenaran fakta. Di zon kritikal ini, murid sebagai penyelidik aktif dan kritis menggunakan daya pemikiran aras tinggi mereka untuk menyemak, mengesahkan, dan menilai output yang dijana oleh AI berbanding sumber primer yang sahih. Seterusnya, proses inkuiri bergerak ke arah amalan meneliti kebenaran fakta. Di zon kritikal ini, murid sebagai penyelidik aktif dan kritis menggunakan daya pemikiran aras tinggi mereka untuk menyemak, mengesahkan, dan menilai output yang dijana oleh AI berbanding sumber primer yang sahih (Papaneophytou & Nicolaou, 2025). Berikut merupakan penerangan mengenai kerangka konseptual pada Rajah 1.

4.1.1. Peranan Permulaan Teknologi AI

Proses penerokaan ilmu di dalam kerangka ini bermula dengan komponen Teknologi AI: Simulasi & Penjana. Pada peringkat awal ini, teknologi berfungsi sebagai penyedia visualisasi dinamik dan penjana maklumat yang berkesan untuk menceritakan proses biologi yang sukar dilihat dengan mata kasar serta bersifat abstrak. Keupayaan AI menghasilkan model visual yang interaktif ini bertindak sebagai pencetus rangsangan kognitif awal, membolehkan pelajar melihat struktur hidupan dengan cara yang lebih jelas dan bermakna berbanding kaedah pembacaan teks tradisional.

4.1.2. Integrasi Pedagogi dan Peranan Guru

Seterusnya, input daripada teknologi tersebut disalurkan ke dalam teras pedagogi inkuiri berasaskan sains. Walau bagaimanapun, teknologi tidak dibiarkan bergerak sendiri tanpa panduan. Di peringkat ini, kehadiran guru sebagai fasilitator dan pembimbing etika memainkan peranan yang sangat penting dalam memastikan kandungan pengajaran selari dengan hasrat KSSM (Victoriano & Tamayo, 2025). Guru bertindak menyuntik panduan pengajaran yang beretika, memantau arah tuju pembelajaran, dan memastikan penggunaan alat digital kekal padu dengan nilai integriti akademik (Tan & Maravilla, 2024). Guru membimbing pelajar agar tidak bergantung sepenuhnya kepada mesin, sebaliknya menggunakan teknologi sebagai jambatan untuk memahami konsep biologi dengan lebih bermakna.

4.1.3. Amalan Penilaian Kritis oleh Murid

Seterusnya, proses inkuiri bergerak dengan lebih aktif ke arah amalan meneliti kebenaran fakta sains. Pada zon kritikal ini, murid sebagai penyelidik aktif dan kritis dipertanggungjawabkan untuk menggunakan daya pemikiran aras tinggi mereka (Küçükuncular, 2025). Murid tidak boleh menerima maklumat atau jawapan daripada sistem digital secara bulat-bulat. Sebaliknya, mereka perlu aktif menyemak, membuat pengesahan, dan menilai ketepatan output biologi yang dijana oleh AI dengan merujuk kepada buku teks dan sumber sahih yang lain (Aruleba et al., 2025). Langkah ini melatih pelajar supaya menjadi pemikir yang bijak menilai kebenaran maklumat saintifik.

4.1.4. Matlamat Akhir: Kefahaman Mendalam

Melalui proses semakan fakta yang ketat dan bimbingan guru yang berterusan, pelajar akhirnya berjaya memperoleh Hasil Pembelajaran: Kefahaman Mendalam. Penguasaan ilmu terhadap konsep biologi yang rumit menjadi lebih mantap dan berpijak pada landasan saintifik yang betul. Di samping itu, ekosistem pembelajaran ini secara langsung membina ketahanan mental (daya tahan kognitif) dalam diri pelajar untuk membendung risiko ralat atau maklumat rekaan (*halusinasi AI*), sekali gus melahirkan generasi pelajar yang celik sains, beretika, dan berfikir kritis di era digital.

4.2 Transformasi Visualisasi Konsep Abstrak Biologi

Dapatan kajian menunjukkan bahawa salah satu sumbangan paling signifikan daripada integrasi AI dalam pendidikan Biologi ialah keupayaannya bertindak sebagai pemangkin kognitif yang memecahkan tembok halangan kefahaman konseptual. Konsep biologi yang bersifat sub-mikroskopik, abstrak, dan sukar dizahirkan melalui kaedah konvensional. Konsep-konsep seperti replikasi rantai DNA, proses transkripsi dan translasi protein, struktur kuaternari enzim, dinamika kompleks kitaran sel, serta mekanisme pengangkutan aktif merentasi membran plasma kini dapat dijemakan dalam bentuk visualisasi dinamik, manipulatif, dan berketepatan visual yang tinggi (Usak, 2024).

Melalui penggunaan alat AI generatif, model visualisasi pintar tiga dimensi, dan perisian interaktif, murid bukan lagi sekadar menghafal rajah statik dua dimensi di dalam buku teks yang sering kali mencetuskan salah tanggapan (*misconceptions*). Sebaliknya, merujuk kepada dapatan metaanalisis Kesgin (2025) yang mencatatkan kesan positif signifikan AI terhadap hasil pembelajaran sains (Hedges' $g = 0.63$), murid berupaya meneroka struktur molekul secara interaktif, memanipulasi sudut pandangan ruang, serta melihat secara langsung bagaimana perubahan kecil pada

urutan nukleotida atau struktur asid amino boleh mengubah fungsi biologi sesuatu protein. Transformasi visual ini secara langsung mengurangkan beban kognitif luaran (*extraneous cognitive load*) murid, membolehkan mereka membina model mental kognitif yang jitu, serta memupuk kefahaman yang berasaskan pembuktian visual yang sah, interaktif, dan mendalam (Ayeni et al., 2024; Luckin, 2023).

4.3 Pemeraksanaan Inkuiri Melalui Pembelajaran Adaptif dan Kolaborasi Manusia-Mesin

Selain daripada aspek visualisasi struktur molekul, analisis konseptual turut mendedahkan bahawa sistem adaptif berasaskan algoritma AI berupaya mengubah landskap bilik darjah harian menjadi sebuah persekitaran pembelajaran yang sangat berpusatkan murid. Sistem adaptif pintar mampu memantau corak penguasaan individu, mengenal pasti kelemahan konsep secara masa nyata, dan menyesuaikan tahap kesukaran tugas mengikut kadar sendiri murid masing-masing. Pendekatan ini bertindak sebagai perancah pintar (*intelligent scaffolding*) yang menyokong murid di zon perkembangan proksimal mereka, memastikan tiada pelajar yang ketinggalan dalam penguasaan silibus Biologi yang padat.

Di samping itu, kolaborasi harmonis antara manusia dan mesin memperkukuh proses inkuiri saintifik di mana AI bertindak sebagai "*objects-to-think-with*" yang merangsang dialog reflektif, manakala murid dan guru kekal sebagai pemegang taruh utama yang melaksanakan penilaian kritikal, penaakulan etika, dan refleksi saintifik (Vasconcelos & dos Santos, 2025). Walaupun model bahasa besar (LLMs) sangat cekap dalam menguruskan maklumat asas, kajian empirikal mengingatkan bahawa sokongan manusia (guru) kekal mutlak dalam membimbing penaakulan biologi aras tinggi yang rumit (Dao & Le, 2023). Sinergi ini melahirkan ekosistem pembelajaran yang berkesan dari sudut pencapaian kognitif dan membina kemahiran berfikir aras tinggi (KBAT) serta literasi digital yang mampan (Küçükuncular, 2025).

5. Perbincangan

5.1 Kematangan Pedagogi dan Penyelarasan Kurikulum KSSM

Keberkesanan integrasi Kecerdasan Buatan (AI) dalam bilik darjah Biologi KSSM amat bergantung pada kebolehan guru menterjemahkan teknologi ke dalam standard kandungan kurikulum kebangsaan. Alat AI generatif dan simulasi interaktif bukan sekadar medium digital, tetapi berfungsi secara aktif untuk merungkai standard pembelajaran KSSM yang melibatkan fenomena sub-mikroskopik seperti struktur DNA dan kitaran sel (Usak, 2024; Victoriano & Tamayo, 2025). Tanpa kematangan pedagogi digital yang selaras dengan keperluan pengajaran sains, matlamat melahirkan murid berfikiran kritis sukar dicapai.

Selain itu, kematangan pedagogi guru diukur menerusi keupayaan mereka menangani jurang digital serta membina persekitaran pembelajaran inklusif yang menyokong pelbagai aras keupayaan murid. Kajian menunjukkan bahawa guru sains perlu dilengkapi dengan latihan profesional yang terarah bagi memahami potensi sebenar teknologi kecerdasan buatan, bukan sahaja sebagai alat bantu merancang bahan pengajaran, tetapi juga sebagai fasilitator pembelajaran peribadi di dalam kelas (Chakraborty & Harikrishnan, 2026). Tanpa kefahaman mendalam mengenai pedagogi digital yang berkesan, risiko penyalahgunaan teknologi atau tidak sejajar antara proses pengajaran dengan kehendak kurikulum KSSM akan terus menjadi halangan utama kepada kejayaan transformasi pendidikan sains negara.

5.2 Membina Budaya Meneliti Kebenaran Fakta (Fact-Checking)

Salah satu cabaran kritikal yang dikenal pasti dalam era penggunaan AI generatif ialah risiko ketidaktepatan maklumat atau fenomena "halusinasi AI" yang boleh memesongkan kefahaman konseptual pelajar (Cooper, 2023). Dalam konteks pendidikan sains dan disiplin ilmu Biologi, integriti data serta kesahihan fakta adalah mutlak dan tidak boleh di kompromi. Di samping itu, kajian empirikal terhadap prestasi model bahasa besar (LLMs) mendedahkan bahawa walaupun model ini cekap menjawab soalan fakta asas, mereka sering berdepan kekangan ketara dalam menyelesaikan penaakulan biologi peringkat tinggi yang rumit (Dao & Le, 2023). Oleh itu, perbincangan ini

menegaskan bahawa penerapan budaya meneliti kebenaran fakta (*fact-checking*) secara sistematik mesti dijadikan teras utama dalam setiap aktiviti pengajaran di dalam bilik darjah. Murid perlu dilatih untuk mengamalkan sikap skeptisisme sihat, di mana setiap output, penjelasan molekul, atau data yang dijana oleh sistem AI wajib disemak silang (*cross-referenced*) dengan literatur primer, jurnal saintifik yang disemak rakan sebaya (*peer-reviewed*), serta kesahihan maklumat dalam buku teks rasmi. Melalui pendekatan ini, institusi pendidikan bukan sahaja melahirkan pelajar yang celik teknologi, malah membangunkan pemikir kritis yang berintegriti tinggi dalam menilai maklumat saintifik.

Amalan meneliti fakta ini juga berperanan penting dalam memupuk literasi AI kritikal, iaitu kebolehan murid untuk mempersoalkan sumber maklumat, mengenal pasti bias algoritma, dan memahami batasan model bahasa besar apabila berdepan dengan konsep biologi yang kompleks (Küçükuncular, 2025). Dalam bidang sains hayat, di mana perincian genetik dan struktur mikroskopik memerlukan ketepatan yang tinggi, kebergantungan mutlak kepada jawapan mesin boleh melahirkan salah tanggapan yang berpanjangan. Oleh yang demikian, pendidik bertanggungjawab mewujudkan tugas inkuiri yang memaksa murid membuktikan kesahihan sesuatu maklumat saintifik sebelum menerimanya sebagai fakta mutlak (Papaneophytou & Nicolaou, 2025).

5.3 Sinergi Kolaborasi Manusia dan Mesin dalam Pembelajaran

Perbincangan turut mengetengahkan kepentingan sinergi harmoni antara keupayaan pengiraan pantas AI dengan penaakulan kognitif aras tinggi manusia. AI memainkan peranan sebagai alat pemudah cara yang mengambil alih beban kognitif rutin, manakala guru dan murid kekal sebagai pengemudi utama yang memimpin proses analisis kritis dan penilaian etika (Vasconcelos & Santos, 2025; Miao & Holmes, 2023). Model kolaborasi manusia-mesin ini memastikan bahawa teknologi bertindak sebagai alat perluasan minda (*cognitive extension*) dan bukannya pengganti kepada daya pemikiran kritikal manusia. Dengan mengekalkan kawalan manusia sepenuhnya (*human-in-the-loop*) dalam setiap fasa inkuiri biologi, ekosistem pembelajaran dapat dipelihara daripada risiko kebergantungan pasif, sekaligus menjamin kelangsungan pembangunan modal insan yang kreatif, beretika, dan berdaya saing tinggi.

Model kolaborasi ini menekankan konsep "belajar bersama AI" dan bukannya "belajar melalui AI", di mana teknologi dan manusia saling melengkapi dalam membina pengetahuan baharu (Küçükuncular, 2025). AI menyumbang dari segi kelajuan pemprosesan data yang besar dan penjanaan senario pembelajaran maya, manakala manusia menyumbangkan nilai moral, pertimbangan konteks dunia sebenar, serta intuisi saintifik. Melalui pendekatan ini, murid dipersiapkan untuk menghadapi era digital masa hadapan dengan kebolehan bekerja secara seiring bersama sistem pintar, memastikan bidang pendidikan Biologi sentiasa relevan, dinamik, dan berpaksikan nilai kemanusiaan yang kukuh.

6. Kesimpulan

Kesimpulannya, berdasarkan kerangka perbincangan konseptual, integrasi Kecerdasan Buatan (AI) dalam PdP Biologi KSSM terbukti berupaya mentransformasikan kefahaman konsep abstrak melalui visualisasi dinamik dan sistem pembelajaran adaptif. Walau bagaimanapun, dapatan dan perbincangan kajian menegaskan bahawa kejayaan ekosistem ini sangat bergantung kepada tiga teras utama: (i) kematangan pedagogi guru dalam membimbing penggunaan teknologi selari dengan DSKP KSSM; (ii) amalan meneliti fakta secara berterusan bagi membendung risiko halusinasi AI dan salah tanggapan biologi di kalangan pelajar (Papaneophytou & Nicolaou, 2025); serta (iii) kolaborasi manusia-mesin yang memastikan AI bertindak sebagai rakan kognitif (*cognitive partner*) yang menyokong pemikiran aras tinggi murid. Oleh itu, perancangan instruksional yang berstruktur ini memastikan aspirasi kurikulum sains kebangsaan dapat direalisasikan sepenuhnya.

Pernyataan

Penghargaan

Tidak berkenaan.

Konflik Kepentingan

Tiada.

Kelulusan Etika

Kajian ini dikecualikan daripada keperluan kelulusan etika formal kerana tidak melibatkan subjek manusia, percubaan klinikal, atau pengumpulan data peribadi yang sensitif. Kajian ini menggunakan pendekatan tinjauan literatur bersistematik (systematic literature review) serta analisis kerangka konseptual berdasarkan data sekunder yang boleh diakses secara terbuka daripada pangkalan data akademik antarabangsa. Oleh itu, ia mematuhi garis panduan institusi yang mengklasifikasikan kajian perpustakaan dan analitikal seperti ini sebagai berisiko rendah.

Sumbangan Penulis

Penulis¹: Pengkonsepsian, reka bentuk kerangka kajian, pengumpulan dan analisis literatur, serta penulisan draf asal.

Penulis²: Penyeliaan, semakan kritikal, penambahbaikan hujah pedagogi Biologi, serta pengesahan draf akhir

Ketersediaan Data

Data dan bahan rujukan utama yang dianalisis dalam kertas konsep ini diperoleh daripada pelbagai pangkalan data akademik yang diiktiraf (termasuk Scopus, Web of Science, dan Springer). Strategi pencarian, kriteria pemilihan, serta kerangka tematik literatur AI kritikal dalam pendidikan Biologi telah diperincikan di dalam Bahagian Metodologi kertas konsep ini. Sebarang pertanyaan lanjut mengenai set data kajian boleh dikemukakan kepada penulis sewajarnya.

Rujukan

- Ahmedtelba, E., Mitereva, S., & Ponce, M. (2025). *Critical integration of generative AI in higher education: Cognitive, pedagogical and ethical perspectives*. *London Journal of Research in Humanities and Social Science*, 25(13), 1–12.
- Al Darayseh, A. (2023). Acceptance of artificial intelligence in teaching science: Science teachers' perspective. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 4, 100132. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100132>
- Aruleba, K., Sanusi, I. T., Obaido, G., Ogbuokiri, B., & Mienye, I. D. (2025). *Beyond the prompt: Student strategies, ethical reflections, and learning with ChatGPT in computer science*. *Technology, Knowledge and Learning*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s10758-025-09899-7>
- Ayeni, O. O., Al Hamad, N. M., Chisom, O. N., Osawaru, B., & Adewusi, O. E. (2024). AI in education: A review of personalized learning and educational technology. *GSC Advanced Research and Reviews*, 18(2), 261–271. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2024.18.2.0062>
- Bond, M., Khosrow-Pour, K., Zawacki-Richter, O., & O'Shea, S. (2024). A meta systematic review of artificial intelligence in higher education: A call for increased ethics, collaboration, and rigour. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 21(1), Article 4. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00436-z>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp0630a>

- Chakraborty, S., & Harikrishnan, M. (2026). Barriers and enablers to implementing artificial intelligence in life-sciences education: A mixed-methods study. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 11(3), 1776–1784. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/26mar1073>
- Cooper, G. (2023). Examining science education in ChatGPT: An exploratory study of generative artificial intelligence. *Journal of Science Education and Technology*, 32(4), 444–452. <https://doi.org/10.1007/s10956-023-10039-y>
- Dao, X.-Q., & Le, N.-B. (2023). LLMs performance on Vietnamese high school biology examination. *I.J. Modern Education and Computer Science*, 2023(6), 14–30. <https://doi.org/10.5815/ijmecs.2023.06.02>
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2000). The "what" and "why" of goal pursuits: Human needs and the self-determination of behavior. *Psychological Inquiry*, 11(4), 227–268. https://doi.org/10.1207/S15327965PLI1104_01
- Hu, Z., Wu, Y., & Luo, Z. (2026). Student voices: Synergising artificial and human intelligence in health science education. *BMC Medical Education*, 26, Article 185. <https://doi.org/10.1186/s12909-025-08545-1>
- Jha, M., & Atif, A. (2025). Reimagining pedagogy for the GenAI era: Frameworks, challenges and institutional strategies. *Australasian Journal of Educational Technology*, 41(5), 56–73. <https://doi.org/10.14742/ajet.10645>
- Kementerian Pendidikan Malaysia. (2026). *Buku panduan literasi AI dalam pendidikan*. Bahagian Sumber dan Teknologi Pendidikan.
- Kesgin, E. (2025). Bibliometric analysis and predictive modeling map the role of artificial intelligence in science education from research trends to classroom integration. *Discover Education*, 3(1), Article 45. <https://doi.org/10.1007/s44217-025-00906-8>
- Küçükuncular, A. (2025). Learning with, rather than through, AI: Co-designing science education for critical AI literacy. *Frontiers in Education*, 10, Article 1716353. <https://doi.org/10.3389/educ.2025.1716353>
- Lee, J., Park, S., & Kim, D. (2023). Designs and practices using generative AI for sustainable student discourse and knowledge creation. *Smart Learning Environments*, 10, Article 59. <https://doi.org/10.1186/s40561-023-00279-1>
- Luckin, R. (2023). *Machine learning and human intelligence: The future of education in the age of AI*. UCL Press.
- Miao, F., & Holmes, W. (2023). *Guidance for generative AI in education and research*. UNESCO.
- Papaneophytou, C., & Nicolaou, S. A. (2025). Promoting critical thinking in biological sciences in the era of artificial intelligence: The role of higher education. *Trends in Higher Education*, 4(2), 24. <https://doi.org/10.3390/higheredu4020024>
- Piaget, J. (1972). Intellectual evolution from adolescence to adulthood. *Human Development*, 15(1), 1–12. <https://doi.org/10.1159/000271225>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Tan, M. J. T., & Maravilla, N. M. A. (2024). Shaping integrity: Why generative artificial intelligence does not have to undermine education. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 7, 1471224. <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1471224>
- Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M. D., Horsley, T., & Weeks, L. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467–473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>
- Usak, M. (2024). Artificial intelligence in biology education. *Journal of Baltic Science Education*, 23(5), 806–808. <https://doi.org/10.33225/jbse/24.23.806>
- Vasconcelos M. A. R., & dos Santos, R. P. (2025). Enhancing STEM learning with ChatGPT and Bing Chat as objects-to-think-with: A case study. *Centre for Generative Artificial Intelligence in Cognition and Education*. <https://doi.org/10.29333/ejmste/13313>
- Vendrell, M., & Johnston, S.-K. (2024). Scaffolding critical thinking with generative AI: Design principles for integrating large language models in higher education. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 7, 100286. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2026.100572>
- Victoriano, A. M., & Tamayo, M. A. L. (2025). Exploring the perception of science teachers in integration of AI in biology education: Literature review. *Formosa Journal of Science and Technology (FJST)*, 4(8), 2603–2616. <https://doi.org/10.55927/fjst.v4i8.211>

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of RISE and/or the editor(s). RISE and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.