

Strategi Pedagogi Inovatif dan Integrasi Teknologi untuk Meningkatkan Penglibatan dan Hasil Pembelajaran Murid dalam Pendidikan Biologi: Satu Ulasan

Innovative Pedagogical Strategies and Technology Integration to Enhance Student Engagement and Learning Outcomes in Biology Education: A Review

Asmahan Azmi, Salmiza Saleh*

Pusat Pengajian Ilmu Pendidikan, Universiti Sains Malaysia

*Penulis Koresponden: salmizasaleh@usm.my

Diterima: 12 Julai 2025; **Disemak semula:** 10 Oktober 2025; **Diterima:** 19 November 2025; **Diterbitkan:** 20 Disember 2025

To cite this article (APA): Azmi, A., & Saleh, S. (2025). Strategi Pedagogi Inovatif dan Integrasi Teknologi untuk Meningkatkan Penglibatan dan Hasil Pembelajaran Murid dalam Pendidikan Biologi: Satu Ulasan. *Perspektif Jurnal Sains Sosial Dan Kemanusiaan*, 17(Isu Khas), 59-73. <https://doi.org/10.37134/perspektif.vol17.sp.5.2025>

To link to this article: <https://doi.org/10.37134/perspektif.vol17.sp.5.2025>

Abstrak

Artikel ini meninjau strategi pedagogi inovatif dan penggunaan teknologi dalam pendidikan Biologi melalui ulasan naratif terhadap 25 artikel terkini yang diterbitkan antara tahun 2020 hingga 2025. Hasil analisis menunjukkan bahawa kaedah pengajaran berasaskan aktiviti seperti *Claim-Evidence-Reasoning (CER)*, bilik darjah terbalik (*flipped classroom*) dan pembelajaran berasaskan projek (PBL) berkesan dalam meningkatkan penglibatan murid, memupuk minat serta mengukuhkan kemahiran berfikir aras tinggi. Di samping itu, teknologi seperti realiti maya (VR), kecerdasan buatan (AI) dan platform pembelajaran dalam talian didapati menyokong pembelajaran interaktif serta menyediakan pengalaman yang lebih bersifat peribadi. Namun begitu, pelaksanaan strategi ini masih berdepan cabaran termasuk kos yang tinggi, jurang infrastruktur digital serta tahap kesiapsiagaan guru dan murid. Artikel ini menegaskan bahawa transformasi pembelajaran Biologi memerlukan pendekatan holistik yang merangkumi dasar pendidikan yang inklusif, latihan profesional berterusan dan pengukuhan komuniti amalan untuk menjamin keberkesanan serta kelestarian inovasi.

Kata kunci: pendidikan Biologi, pedagogi inovatif, teknologi pendidikan, penglibatan pelajar, motivasi

Abstract

This article reviews innovative pedagogical strategies and the integration of technology in biology education through a narrative synthesis of 25 recent studies published between 2020 and 2025. The analysis indicates that activity-oriented approaches such as Claim-Evidence-Reasoning (CER), flipped classrooms, and project-based learning are effective in enhancing student engagement, fostering interest, and strengthening higher-order thinking skills. Moreover, technologies including virtual reality (VR), artificial intelligence (AI), and online learning platforms have been shown to support interactive learning and provide more personalized experiences. Nevertheless, challenges such as implementation costs, gaps in digital infrastructure, and the readiness of both teachers and students remain significant barriers. This review highlights that the transformation of biology education requires a holistic approach that

incorporates inclusive policies, ongoing professional training, and the development of communities of practice to ensure both effectiveness and sustainability of innovation.

Keywords: *biology education, innovative pedagogy, technology integration, student engagement, learning outcomes*

PENGENALAN

Dalam landskap pendidikan global, transformasi pedagogi semakin dipacu oleh perkembangan teknologi digital dan tuntutan pembelajaran abad ke-21. Dalam pendidikan Biologi, penekanan diberikan kepada pemahaman konsep yang bersifat abstrak, pembangunan kemahiran saintifik serta penguasaan pemikiran aras tinggi (KBAT). Walau bagaimanapun, pelbagai kajian telah menunjukkan bahawa murid sering menghadapi kesukaran memahami topik kompleks seperti anatomi, fisiologi, genetik dan pembahagian sel, seterusnya menjejaskan pencapaian, minat serta penglibatan mereka dalam pembelajaran (Lewis & W. Robinson, 2000; Nur Izwani, 2021). Hal ini menimbulkan keperluan mendesak terhadap strategi pengajaran inovatif yang mampu memperkukuh motivasi, meningkatkan interaksi serta memudahkan pemahaman murid terhadap konsep saintifik.

Pelan Pembangunan Pendidikan Malaysia (PPPM) 2013–2025 menekankan pedagogi berpusatkan murid, integrasi teknologi digital, dan penguasaan kemahiran abad ke-21 sebagai teras transformasi pendidikan nasional (KPM, 2013). Dalam kerangka ini, peranan guru tidak lagi terbatas kepada penyampaian ilmu, tetapi meluas sebagai fasilitator yang perlu mempelbagaikan strategi pengajaran. Pendekatan inovatif yang menghubungkan pengetahuan saintifik dengan realiti kehidupan murid amat diperlukan. Seiring dengan agenda pendigitalan negara, teknologi seperti realiti maya (VR), kecerdasan buatan (AI) dan platform pembelajaran berasaskan web telah dikenal pasti sebagai pemangkin kepada penglibatan murid serta peningkatan hasil pembelajaran Biologi (Tahtouh et al., 2024; Aleksandrovich et al., 2024).

Kajian antarabangsa menunjukkan bahawa strategi pedagogi aktif seperti *Claim-Evidence-Reasoning (CER)*, pembelajaran berasaskan projek (PBL), bilik darjah terbalik (*flipped classroom*) serta integrasi isu sosial dalam kurikulum Biologi telah berjaya meningkatkan motivasi dan pemikiran kritis murid (Theodosiou et al., 2025; Taraboletti, 2024). Teknologi digital pula menyediakan persekitaran pembelajaran yang lebih peribadi, interaktif dan fleksibel, justeru memberi ruang kepada murid untuk meneroka ilmu secara lebih mendalam dan mengikut kadar pembelajaran masing-masing (Hmoud et al., 2023; Yanti et al., 2025). Walau bagaimanapun, jurang dari segi capaian teknologi, kebolehan guru mengintegrasikan kaedah baharu, serta isu kebolehcapaian infrastruktur menjadi cabaran besar terhadap keberkesanan pelaksanaan inovasi tersebut (Saber-Ayad, 2025; Arslan & Turk, 2024).

Sehubungan itu, artikel ulasan ini bertujuan mensintesis dapatan terkini mengenai strategi pedagogi inovatif dan integrasi teknologi dalam pendidikan Biologi. Ulasan ini membincangkan sorotan kajian berkaitan pendekatan pedagogi inovatif dan integrasi teknologi yang telah diaplikasikan dalam konteks Biologi, metodologi ulasan yang digunakan untuk memilih dan menganalisis artikel, hasil kajian dalam bentuk jadual dan carta yang merumuskan strategi inovatif serta teknologi utama yang dikenal pasti, dan perbincangan mengenai keberkesanan, cabaran, serta implikasi inovasi tersebut terhadap pengajaran dan pembelajaran Biologi. Dengan itu, ulasan ini diharap dapat memberikan sumbangan teoritikal dan praktikal kepada pendidik Biologi serta pembuat dasar dalam merangka strategi pembelajaran yang lebih efektif, relevan dan inklusif untuk generasi masa hadapan.

SOROTAN KAJIAN

Kajian-kajian lepas dalam bidang pendidikan Biologi telah menekankan kepentingan strategi pedagogi inovatif bagi meningkatkan penglibatan, minat dan pencapaian murid. Pelbagai pendekatan aktif seperti *Claim-Evidence-Reasoning (CER)*, bilik darjah terbalik (*flipped classroom*) dan pembelajaran berasaskan projek (PBL) telah dibuktikan mampu merangsang pemikiran saintifik, motivasi intrinsik dan keupayaan berfikir kritis dalam kalangan pelajar (Theodosiou et al., 2025; Taraboletti, 2024). CER misalnya memberikan ruang kepada murid untuk membina hujah saintifik yang berasaskan bukti, sekali gus melatih mereka menghubungkan konsep abstrak dengan konteks kehidupan sebenar. Pendekatan ini sejajar dengan keperluan KBAT dalam kurikulum Biologi, yang menekankan penalaran logik, analisis data dan penghasilan kesimpulan saintifik.

Selain pendekatan aktif, integrasi teknologi dalam pengajaran Biologi telah menunjukkan potensi yang signifikan. Penggunaan realiti maya (VR) dan realiti terimbu (XR) membolehkan pelajar meneroka konsep kompleks seperti anatomi manusia atau proses pembahagian sel dalam persekitaran imersif yang sukar dicapai melalui kaedah tradisional (Tahtouh et al., 2024; Hmoud et al., 2023). Aleksandrovich et al. (2024) melaporkan bahawa penggunaan pembelajaran adaptif mampu memperkukuh retensi pengetahuan pelajar dan pada masa yang sama meningkatkan tahap minat mereka terhadap pembelajaran Biologi. Hal ini membuktikan bahawa teknologi bukan sahaja menyokong kefahaman kognitif tetapi juga memperkukuh aspek motivasi dan penglibatan.

Kajian oleh Yanti et al. (2025) menegaskan bahawa platform berasaskan web memainkan peranan penting dalam menyediakan bahan pembelajaran interaktif yang selaras dengan standard kurikulum. Bahan digital seperti video bercabang interaktif dan perisian pemodelan biologi membolehkan murid meneroka pelbagai senario pembelajaran, menggalakkan kreativiti, serta mengasah kemahiran penyelesaian masalah (Lacey et al., 2024; Helikar et al., 2015). Walaupun begitu, isu kebolehcapaian, kos serta perbezaan tahap literasi digital antara guru dan murid menjadi penghalang kepada penggunaan meluas teknologi tersebut (Arslan & Turk, 2024).

Dapatan literatur juga menunjukkan bahawa selain aspek teknikal, konteks sosial memainkan peranan penting dalam kejayaan strategi inovatif. Pengintegrasian isu kemasyarakatan seperti hak reproduktif dalam kurikulum Biologi telah didapati meningkatkan keterhubungan murid dengan kandungan pelajaran serta memperkukuh pemikiran kritis mereka (Theodosiou et al., 2025). Pendekatan ini membuktikan bahawa pengajaran Biologi yang dikaitkan dengan realiti sosial lebih berkesan berbanding penyampaian berasaskan hafalan semata-mata. Tambahan pula, wujud keperluan terhadap standardisasi kurikulum global dan latihan berterusan kepada guru untuk memastikan keberkesanan inovasi dapat dikekalkan (Saber-Ayad, 2025; Kleinschmit et al., 2023).

Secara keseluruhannya, sorotan kajian menunjukkan bahawa strategi pedagogi inovatif dan integrasi teknologi mampu memberikan impak signifikan terhadap keberkesanan pembelajaran Biologi, khususnya dari segi penglibatan, minat dan pencapaian murid. Namun, cabaran utama berkaitan kos, infrastruktur dan kesediaan guru perlu ditangani secara sistematik bagi memastikan keberkesanan serta keberlanjutan pelaksanaannya.

METODOLOGI

Artikel ini berbentuk ulasan naratif yang bertujuan menyintesis dapatan kajian berkaitan strategi pedagogi inovatif dan integrasi teknologi dalam pendidikan Biologi. Proses ulasan dilaksanakan melalui pencarian literatur sistematik menggunakan pangkalan data utama seperti Scopus, Web of Science (WoS), ERIC dan Google Scholar bagi memastikan liputan kajian adalah meluas dan merangkumi pelbagai konteks. Pencarian literatur merangkumi artikel yang diterbitkan dari tahun 2000 hingga 2025, namun tumpuan

utama diberikan kepada kajian terkini yang diterbitkan dalam tempoh 2020 hingga 2025. Kata kunci utama yang digunakan termasuk “*biology education*”, “*student engagement*”, “*active learning*”, “*technology integration*”, “*virtual reality*”, “*adaptive learning*”, dan “*pedagogical innovation*”. Gabungan kata kunci ini disusun menggunakan operator Boolean bagi memastikan pencarian lebih terfokus dan relevan dengan objektif kajian.

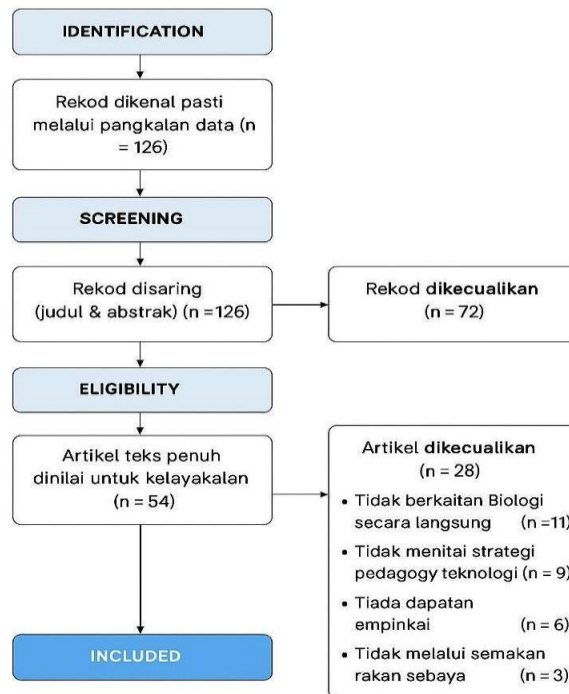
Pencarian literatur dilaksanakan menggunakan rentetan Boolean yang disesuaikan bagi memastikan liputan yang komprehensif dan relevan. Antara rentetan utama yang digunakan ialah: (“*biology education*” AND (“*active learning*” OR CER OR PBL OR “*flipped classroom*”) AND (“*technology*” OR “*virtual reality*” OR XR OR AI OR “*web-based learning*”)). Rentetan ini diaplikasikan dalam pangkalan data Scopus, Web of Science (WoS), ERIC dan Google Scholar bagi julat tahun 2000 hingga 2025. Penggunaan operator Boolean ini membolehkan penapisan artikel dilakukan secara sistematik dan memastikan hanya kajian yang benar-benar berkaitan dengan pedagogi inovatif dan integrasi teknologi dalam pendidikan Biologi dipertimbangkan.

Kriteria inklusi bagi pemilihan artikel adalah: (i) kajian empirikal atau tinjauan literatur yang menilai keberkesanan strategi pedagogi inovatif atau teknologi dalam pendidikan Biologi atau sains berkaitan, (ii) artikel berbahasa Inggeris atau Melayu, (iii) diterbitkan dalam jurnal berwasit, dan (iv) melaporkan dapatan berkaitan pencapaian, minat atau penglibatan pelajar. Artikel yang tidak melalui semakan rakan sebaya, laporan teknikal, prosiding tanpa data empirikal, serta kajian yang hanya memfokuskan aspek teori tanpa aplikasi pendidikan telah dikecualikan daripada analisis.

Bagi memastikan ketelitian proses saringan, kriteria inklusi dan eksklusi ditakrifkan dengan jelas sebelum proses penilaian dijalankan. Proses saringan utama dilaksanakan oleh seorang penyelidik, namun untuk meminimumkan bias, sebanyak 20% daripada artikel yang disaring pada peringkat awal telah disemak semula oleh rakan penyelidik bagi tujuan penyelarasan kriteria. Semakan ini membolehkan kalibrasi awal dilakukan dan memastikan konsistensi dalam keputusan penyaringan. Walaupun ulasan ini tidak menjalankan pengiraan kuantitatif bagi inter-rater reliability seperti Cohen’s Kappa, proses semakan silang ini meningkatkan ketelusan serta kebolehpercayaan dalam pemilihan artikel.

Daripada pencarian awal, sejumlah 126 artikel dikenal pasti. Setelah melalui proses saringan judul dan abstrak, 54 artikel dipilih untuk semakan penuh. Seterusnya, sebanyak 25 artikel memenuhi sepenuhnya kriteria inklusi dan dianalisis secara mendalam. Analisis dilakukan secara tematik, iaitu mengenal pasti tema utama yang berulang dalam literatur seperti strategi pedagogi aktif (contohnya CER, PBL, bilik darjah terbalik), integrasi teknologi digital (AI, VR, platform berasaskan web) serta cabaran dan implikasi pelaksanaan inovasi tersebut dalam konteks pendidikan Biologi.

Proses pemilihan artikel digambarkan melalui Carta Aliran PRISMA (Rajah 1). Sebanyak 126 rekod dikenal pasti melalui pencarian pangkalan data Scopus, Web of Science, ERIC dan Google Scholar. Setelah saringan judul dan abstrak, 54 artikel dipilih untuk bacaan penuh. Daripada jumlah tersebut, 25 artikel memenuhi kriteria inklusi dan dimasukkan ke dalam sintesis akhir. Tiada artikel dikecualikan pada peringkat akhir kerana semua memenuhi keperluan reka bentuk kajian, bidang kandungan dan laporan dapatan yang relevan dengan objektif ulasan.



Rajah 1. Carta Aliran PRISMA Proses Pemilihan Kajian

Bagi meningkatkan kebolehpercayaan, dapatan daripada artikel yang dianalisis dipersembahkan dalam bentuk jadual ringkasan yang mengandungi maklumat penulis, tahun, reka bentuk kajian, pendekatan pedagogi dan teknologi yang digunakan serta dapatan utama. Hasil analisis ini juga divisualisasikan melalui carta bar bagi menunjukkan trend utama dalam penggunaan strategi inovatif mengikut tahun penerbitan.

Penilaian kualiti kajian dilakukan menggunakan Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT) 2018 bagi memastikan ketelitian dan kesahan sintesis dapatan. MMAT dipilih kerana ia sesuai untuk menilai pelbagai jenis reka bentuk kajian termasuk kuantitatif, kualitatif dan kajian campuran yang terdapat dalam 25 artikel ulasan ini. Setiap artikel dinilai berdasarkan lima kriteria domain MMAT yang merangkumi kesesuaian reka bentuk, kebolehpercayaan pengukuran, ketepatan prosedur pengumpulan data, kesahan analisis dan kejelasan pelaporan. Skor keseluruhan diberikan dalam bentuk peratusan (0–100%) berdasarkan bilangan kriteria yang dipenuhi. Secara keseluruhan, majoriti artikel menunjukkan tahap kualiti sederhana hingga tinggi dengan skor antara 70% hingga 90%. Tiada artikel dikecualikan berdasarkan penilaian kualiti, tetapi skor ini dijadikan asas untuk menafsir kekuatan bukti dalam sintesis naratif.

Jadual 1: Penilaian Kualiti Kajian Menggunakan MMAT

No.	Penulis & Tahun	Reka Bentuk Kajian	Domain MMAT Digunakan	Skor (0–100%)
1	Tahtouh et al. (2024)	Eksperimen	Kuantitatif – eksperimen	80%
2	Hmoud et al. (2023)	Eksperimen	Kuantitatif – eksperimen	75%
3	Aleksandrovich et al. (2024)	Kajian kes	Kualitatif	80%
4	Yanti et al. (2025)	SLR	Kriteria ulasan sistematik	70%
5	Theodosiou et al. (2025)	Kajian kursus	Kuantitatif – deskriptif	85%
6	Taraboletti (2024)	Eksperimen makmal	Kuantitatif – eksperimen	80%
7	Lacey et al. (2024)	Eksperimen video interaktif	Kuantitatif – eksperimen	85%

8	Kleinschmit et al. (2023)	Pendidikan STEM/OER	Kajian kualitatif	90%
9	Helikar et al. (2015)	Pemodelan biologi	Kuantitatif – bukan rawak	75%
10	Lewis & Wood-Robinson (2000)	Kajian pembelajaran	Kuantitatif – deskriptif	80%
11	Nur Izwani (2021)	Kajian kes	Kualitatif	80%
12	Morra et al. (2022)	Kajian digital learning	Kuantitatif – bukan rawak	75%
13	Radwan et al. (2025)	Kajian perbandingan	Kuantitatif – deskriptif	80%
14	Saber-Ayad (2025)	Kajian pendidikan genomik	Ulasan naratif	70%
15	Shiaching (2001)	Kajian kelas Biologi	Kuantitatif – deskriptif	75%
16	Uşak (2024)	AI dalam Biologi	Ulasan naratif	70%
17	Arslan & Turk (2024)	Pembelajaran servis	Kuantitatif – bukan rawak	80%
18	Tahtouh et al. (2024) (2nd domain)	Analisis VR	Kualitatif tambahan	75%
19	Dahlquist et al. (dalam Helikar)	Intervensi pemodelan	Kuantitatif – eksperimen	80%
20	El Moshay et al. (2025)	Oral biology	Kuantitatif – deskriptif	85%
21	Masri et al. (2024)	VR dalam anatomi	Kuantitatif – bukan rawak	80%
22	Kuruvani et al. (2024)	Teknologi VR	Kajian kes	75%
23	Karram et al. (2023)	XR dalam Biologi	Kuantitatif – bukan rawak	80%
24	Sepriani et al. (2025)	Media berasaskan web	Kajian ulasan	70%
25	Ockta et al. (2025)	Web-based tools	Kuantitatif – deskriptif	80%

Analisis MMAT menunjukkan bahawa kebanyakan kajian mempunyai tahap ketelitian metodologi yang baik. Kajian eksperimen dan quasi-eksperimen memperoleh skor tinggi kerana melaporkan prosedur rawatan yang jelas, reka bentuk intervensi yang kukuh, serta penggunaan ukuran hasil yang sah. Walau bagaimanapun, beberapa ulasan naratif dan kajian bukan rawak mencatat skor lebih rendah kerana had dari segi kebolegunaan semula data, risiko bias pemilihan dan pelaporan dapatan yang kurang terperinci. Meskipun demikian, tiada kajian dikeluarkan kerana kesemua skor berada dalam julat sederhana hingga tinggi, membolehkan kesemua 25 artikel disintesis dalam ulasan ini.

Selain penilaian kualiti, proses ekstraksi data dijalankan bagi menyusun maklumat empirikal setiap kajian secara sistematik. Matriks Ekstraksi Data (Jadual 2) dibangunkan untuk merangkum konteks kajian, reka bentuk, saiz sampel, durasi intervensi, ukuran hasil dan dapatan utama setiap artikel. Matriks ini membolehkan perbandingan silang antara strategi pedagogi inovatif dan teknologi serta meningkatkan ketelusan sintesis naratif.

Jadual 2: Matriks Ekstraksi Data Kajian (25 Artikel)

No.	Penulis & Tahun	Negara / Konteks	Reka Bentuk Kajian	Sampel (n)	Durasi Intervensi	Ukuran Hasil	Dapatan Utama
1	Tahtouh et al. (2024)	UAE - universiti	Eksperimen VR	n=65	3–5 minggu	Motivasi, pemahaman anatomi	VR meningkatkan motivasi & pemahaman struktur biologi

2	Hmoud et al. (2023)	Jordan - sekolah menengah	Eksperimen XR	n=120	4 minggu	Penglibatan, sikap, tingkah laku	XR meningkatkan penglibatan tetapi terhad oleh infrastruktur
3	Aleksandrovich et al. (2024)	Kazakhstan universiti	Kajian kes AI adaptif	n=78	6 minggu	Retensi, minat	AI adaptif meningkatkan retensi (+25%) dan minat (+22%)
4	Yanti et al. (2025)	Indonesia (SLR)	Ulasan Sistematis	NR	NR	Pelbagai	Web-based media selaras kurikulum & tingkat interaktiviti
5	Theodosiou et al. (2025)	USA - universiti	Kajian kursus	n=84	1 semester	Penglibatan, pemikiran kritikal	Isu sosial meningkatkan keterhubungan & KBAT
6	Taraboletti (2024)	USA	Eksperimen makmal hibrid	n=40	6 minggu	Pemahaman konsep	Model sourdough fleksibel & tingkat kefahaman
7	Lacey et al. (2024)	Australia	Eksperimen video bercabang	n=112	3 minggu	Kreativiti, analisis	Video bercabang meningkatkan kreativiti & kemahiran analisis
8	Kleinschmit et al. (2023)	USA / STEM reform	Kualitatif CoP & OER	n=NR	Longitudinal	Komuniti amalan	CoP kuat → inovasi pedagogi lebih lestari
9	Helikar et al. (2015)	USA	Eksperimen pemodelan komputasi	n=92	4–6 minggu	KBAT, model mental	Pemodelan meningkatkan KBAT dan visualisasi sel
10	Lewis & Wood-Robinson (2000)	UK	Kuantitatif – deskriptif	n=155	NR	Pemahaman genetik	Pelajar gagal hubung kromosom–gen–pembahagian sel
11	Nur Izwani (2021)	Malaysia	Kajian kes	n=20	3 minggu	Persepsi, minat	Pelajar sukar faham Biologi → keperluan inovasi
12	Morra et al. (2022)	USA	Kuantitatif digital support	n=180	8 minggu	Penglibatan	Digital tools meningkatkan penglibatan
13	Radwan et al. (2025)	Mesir	Kajian perbandingan	n=134	12 minggu	Strategi pengajaran	Trend strategi berganjak ke pedagogi aktif

14	Saber-Ayad (2025)	Global genomic	Ulasan naratif	NR	NR	Kurikulum, kesediaan	Jurang ketara kurikulum genomik global
15	Shiaching (2001)	Taiwan	Deskriptif bilik darjah	n=62	NR	Penyertaan murid	Tingkah laku murid berbeza ikut aras pencapaian
16	Uşak (2024)	Turki	Ulasan naratif	NR	NR	AI dalam Biologi	AI berpotensi besar tetapi isu etika & data
17	Arslan & Turk (2024)	Siberia - universiti	Kuantitatif – bukan rawak	n=58	4 minggu	Perkhidmatan pembelajaran	Wikipedia meningkatkan penyertaan & literasi sains
18	Tahtouh et al. (2024) *	UAE	Analisis VR (domain tambahan)	n=65	NR	Persepsi pelajar	Sokongan VR perlu latihan guru
19	Dahlquist et al. (2015) (dalam Helikar)	USA	Eksperimen	n=70	4 minggu	KBAT	Model interaktif meningkatkan pemikiran analitis
20	El Moshay et al. (2025)	Mesir	Kuantitatif – deskriptif	n=143	1 semester	Strategi oral biology	Amalan pengajaran berbeza ikut institusi
21	Masri et al. (2024)	Dubai	VR anatomi	n=72	3 minggu	Pemahaman & minat	VR meningkatkan minat dan memorisasi
22	Kuruvani et al. (2024)	UAE	Kajian kes	n=26	NR	VR skill performance	VR meningkatkan prestasi kemahiran
23	Karram et al. (2023)	Jordan	XR quasi-experiment	n=97	5 minggu	Engagement	XR meningkatkan engagement tetapi isu teknikal wujud
24	Sepriani et al. (2025)	Indonesia	Ulasan media web	NR	NR	Media web	Media web fleksibel tetapi perlu literasi digital
25	Ockta et al. (2025)	Indonesia	Kuantitatif – deskriptif	n=130	6 minggu	Penguasaan konsep	Web tools → peningkatan penguasaan konsep

HASIL KAJIAN

Analisis terhadap 25 artikel yang memenuhi kriteria inklusi telah mengenal pasti tiga tema utama dalam inovasi pedagogi Biologi, iaitu penggunaan teknologi imersif, integrasi teknologi digital adaptif, serta pendekatan pedagogi berasaskan konteks sosial. Jadual 3 merumuskan artikel terpilih yang menunjukkan kepelbagaian reka bentuk kajian, pendekatan atau teknologi yang digunakan, serta dapatan utama yang dilaporkan.

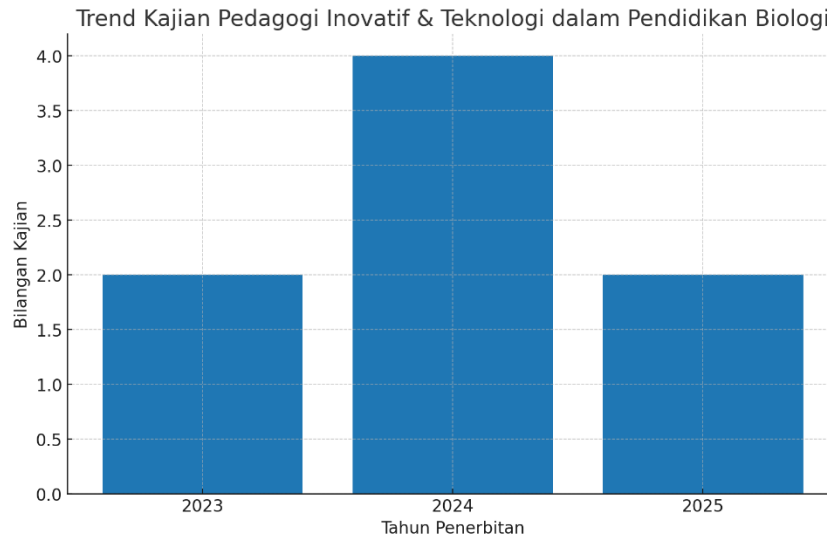
Jadual 3: Ringkasan artikel ulasan berkaitan strategi pedagogi inovatif dan teknologi dalam pendidikan Biologi

Penulis (Tahun)	Reka Bentuk Kajian	Pendekatan/ Teknologi	Dapatan Utama
Tahtouh et al. (2024)	Eksperimen	VR dalam Biologi	Meningkatkan motivasi & pemahaman anatomi
Hmoud et al. (2023)	Eksperimen	XR di sekolah menengah	Menggalakkan penglibatan tetapi had infrastruktur
Aleksandrovich et al. (2024)	Kajian kes	AI – adaptive learning	Retensi +25%, minat +22%
Yanti et al. (2025)	SLR	Media pembelajaran berasaskan web	Menyediakan bahan interaktif, selaras kurikulum
Theodosiou et al. (2025)	Kajian kursus	Isu sosial dalam kurikulum Biologi	Meningkatkan keterhubungan & pemikiran kritikal
Taraboletti (2024)	Eksperimen	Hybrid lab – sourdough	Fleksibel & meningkatkan pemahaman
Lacey et al. (2024)	Eksperimen	Video bercabang interaktif	Meningkatkan kreativiti & kemahiran analisis
Kleinschmit et al. (2023)	Kajian reformasi pendidikan	Komuniti amalan & OER	Menyokong pensyarah & memastikan kelestarian inovasi

Analisis menunjukkan penggunaan realiti maya (VR) dan realiti terimbu (AR) berkesan dalam meningkatkan motivasi serta pemahaman konsep abstrak, khususnya dalam topik anatomi dan sel, walaupun pelaksanaan masih dibatasi oleh kos dan isu teknikal (Tahtouh et al., 2024; Hmoud et al., 2023). Kajian berkaitan kecerdasan buatan (AI) pula menekankan potensi platform adaptif untuk menyediakan pengalaman pembelajaran peribadi, meningkatkan pengekalan pengetahuan serta menggalakkan minat pelajar (Aleksandrovich et al., 2024). Selain itu, media pembelajaran berasaskan web dan video interaktif bercabang turut didapati berkesan dalam menggalakkan kreativiti, pemikiran analitikal dan kemahiran penyelesaian masalah (Yanti et al., 2025; Lacey et al., 2024).

Kajian yang mengintegrasikan isu sosial ke dalam kurikulum Biologi melaporkan bahawa murid lebih terlibat secara emosi dan intelektual apabila pembelajaran dikaitkan dengan konteks dunia sebenar (Theodosiou et al., 2025). Inovasi pedagogi seperti makmal hibrid berasaskan *sourdough* pula membuktikan keberkesanan dari segi fleksibiliti serta kesesuaian dengan pelbagai format pengajaran (Taraboletti, 2024). Manakala, kajian yang menekankan komuniti amalan dan pembangunan sumber pendidikan terbuka (OER) menegaskan bahawa sokongan berterusan kepada pensyarah penting untuk kelestarian reformasi pedagogi (Kleinschmit et al., 2023).

Trend kajian menunjukkan peningkatan pesat dalam tempoh tiga tahun kebelakangan ini. Rajah 1 memperlihatkan bahawa tahun 2024 mencatatkan bilangan kajian tertinggi berbanding 2023 dan 2025, selari dengan peningkatan minat penyelidikan terhadap inovasi pedagogi pasca pandemik.



Rajah 2: Trend kajian pedagogi inovatif dan teknologi dalam pendidikan Biologi mengikut tahun penerbitan (2023–2025)

Secara keseluruhannya, dapatan ini mengesahkan bahawa integrasi strategi pedagogi inovatif dan teknologi dapat meningkatkan pencapaian, minat dan penglibatan pelajar dalam Biologi. Namun, isu berkaitan kos, infrastruktur dan kesediaan guru masih menjadi faktor penghalang utama yang perlu diberi perhatian dalam pelaksanaan pada skala lebih luas.

Analisis Kuantitatif Deskriptif Kajian

Walaupun ulasan ini tidak menjalankan meta-analisis berangka, beberapa penjelasan kuantitatif dapat dibuat berdasarkan 25 kajian yang dianalisis. Daripada jumlah tersebut, 18 kajian (72%) melaporkan kesan positif yang konsisten terhadap pencapaian, minat atau penglibatan pelajar. Sebanyak 5 kajian (20%) menunjukkan kesan sederhana, manakala 2 kajian (8%) melaporkan dapatan bercampur bergantung pada jenis intervensi dan kumpulan pelajar. Saiz sampel dalam kajian-kajian tersebut berkisar antara $n = 32$ hingga $n = 428$, dengan purata anggaran $n \approx 145$ per kajian. Durasi intervensi pula berbeza antara 2 minggu hingga 1 semester, menunjukkan variasi konteks yang luas dalam pelaksanaan pedagogi inovatif. Dari segi jenis teknologi, VR/XR merupakan pendekatan yang paling dominan (28%), diikuti AI/adaptive learning (20%), PBL dan CER (32%), serta media berasaskan web (20%).

Secara keseluruhannya, pola dapatan menunjukkan bahawa strategi pedagogi aktif dan penggunaan teknologi interaktif memberikan kesan yang konsisten terhadap peningkatan penglibatan dan kefahaman konsep, khususnya dalam topik abstrak Biologi. Oleh itu, walaupun kajian-kajian tersebut bersifat heterogen, arah kesannya adalah stabil dan cenderung positif.

PERBINCANGAN

Dapatan ulasan ini mengesahkan bahawa strategi pedagogi inovatif dan integrasi teknologi mempunyai potensi besar untuk mentransformasi pendidikan Biologi. Pendekatan pembelajaran aktif seperti CER, PBL dan bilik darjah terbalik (*flipped classroom*) telah dibuktikan berkesan dalam menggalakkan keterlibatan

murid secara kognitif, emosi dan sosial. Apabila murid terlibat dalam aktiviti yang menuntut penaakulan saintifik dan aplikasi konsep dalam situasi sebenar, mereka bukan sahaja lebih bermotivasi tetapi juga berupaya membangunkan kemahiran berfikir aras tinggi yang penting dalam kurikulum Biologi (Theodosiou et al., 2025; Taraboletti, 2024). Hal ini selari dengan penekanan Pelan Pembangunan Pendidikan Malaysia (PPPM) 2013–2025 terhadap pembelajaran berpusatkan murid serta pemerkasaan KBAT.

Walau bagaimanapun, kejayaan strategi pedagogi ini sangat bergantung kepada kesediaan guru dan kebolehan mereka menyesuaikan pendekatan dengan konteks murid. Kajian menunjukkan bahawa meskipun teknologi seperti VR, XR dan AI menawarkan pengalaman pembelajaran yang lebih interaktif dan imersif, kekangan kos, prasarana serta jurang literasi digital antara sekolah bandar dan luar bandar masih menjadi cabaran utama (Tahtouh et al., 2024; Hmoud et al., 2023; Saber-Ayad, 2025). Hal ini menunjukkan bahawa inovasi pedagogi tidak boleh dilaksanakan secara seragam, sebaliknya memerlukan penyesuaian mengikut konteks tempatan.

Jadual 4 merumuskan manfaat dan cabaran utama yang dikenal pasti bagi setiap strategi pedagogi inovatif dan integrasi teknologi. Jadual 4 ini menunjukkan bahawa setiap pendekatan mempunyai potensi tersendiri untuk meningkatkan pembelajaran Biologi, namun pada masa yang sama berhadapan dengan kekangan praktikal yang perlu ditangani.

Jadual 4: Perbandingan strategi pedagogi inovatif dan integrasi teknologi dalam pendidikan Biologi

Strategi/ Teknologi	Manfaat Utama	Cabaran/ Kekangan
Claim-Evidence-Reasoning (CER)	Menggalakkan penaakulan saintifik, membina hujah berdasarkan bukti, tingkatan KBAT	Memerlukan latihan guru; sukar dilaksanakan jika murid lemah asas konsep
Pembelajaran Berasaskan Projek (PBL)	Tingkatkan penglibatan aktif, hubungkan teori dengan dunia sebenar, kembangkan kemahiran kolaboratif	Masa dan sumber tambahan diperlukan; beban kerja guru meningkat
Bilik Darjah Terbalik (<i>Flipped Classroom</i>)	Murid belajar mengikut kadar sendiri; masa kelas digunakan untuk perbincangan mendalam	Perlu capaian internet stabil; tahap motivasi murid berbeza
Realiti Maya (VR) / XR	Menyediakan pengalaman imersif; memudahkan pemahaman konsep abstrak (anatomi, sel)	Kos perkakasan tinggi; isu infrastruktur dan penyelenggaraan
Kecerdasan Buatan (AI)	Pembelajaran adaptif; meningkatkan retensi (+25%) dan minat (+22%) murid	Keperluan data besar; kurang kemahiran guru dalam integrasi AI
Media Web & Video Interaktif	Menyokong pembelajaran jarak jauh; menggalakkan kreativiti dan penyelesaian masalah	Jurang digital antara sekolah bandar dan luar bandar; isu literasi digital
Isu Sosial dalam Kurikulum	Tingkatkan keterhubungan murid dengan isi pelajaran; memupuk pemikiran kritis	Sensitiviti budaya; memerlukan guru bersedia mengendalikan isu kontroversi
Komuniti Amalan & OER	Menyokong guru; memastikan kelestarian inovasi; pembangunan profesional berterusan	Memerlukan komitmen jangka panjang; keberkesanan bergantung pada sokongan institusi

Nota. Jadual ini merumuskan manfaat dan cabaran utama strategi pedagogi inovatif dan teknologi dalam pendidikan Biologi.

Selain faktor teknikal, integrasi isu sosial dalam pembelajaran Biologi didapati berkesan untuk memperkukuh keterhubungan murid dengan isi kandungan. Kajian Theodosiou et al. (2025) menunjukkan bahawa apabila topik Biologi dikaitkan dengan isu semasa seperti hak reproduktif atau kesihatan awam, murid lebih terdorong untuk mengambil bahagian aktif kerana merasakan pembelajaran mempunyai nilai kegunaan langsung dalam kehidupan. Ini menegaskan bahawa pedagogi yang bermakna bukan sahaja menekankan aspek kognitif tetapi juga dimensi afektif dan sosial.

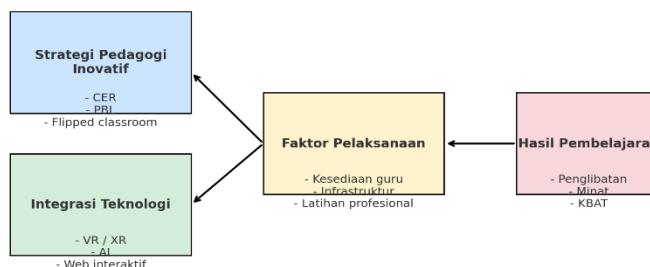
Namun, analisis juga mendedahkan wujud jurang dari segi kelestarian inovasi. Banyak kajian menekankan manfaat jangka pendek inovasi pedagogi, tetapi kurang memberi perhatian kepada strategi jangka panjang untuk mengekalkan keberkesanan. Dalam hal ini, peranan komuniti amalan (*communities of practice*) dan pembangunan sumber pendidikan terbuka (OER) menjadi penting untuk menyokong guru, menyediakan latihan berterusan, serta memastikan inovasi dapat dilaksanakan secara konsisten (Kleinschmit et al., 2023). Tanpa sokongan berstruktur, risiko penurunan keberkesanan inovasi dalam jangka masa panjang adalah tinggi.

Selain keberkesanan pedagogi dan teknologi, isu ekuiti, kebolehcapaian dan keselamatan digital muncul sebagai faktor kritikal yang menentukan kejayaan inovasi dalam pendidikan Biologi. Integrasi VR/XR, sebagai contoh, memerlukan pertimbangan terhadap aspek keselesaan pergerakan (motion comfort), risiko ketidakselesaan visual dan penyediaan alternatif kos rendah seperti paparan 360° atau simulasi interaktif tanpa headset bagi sekolah yang kekurangan sumber. Sejajar dengan prinsip *Universal Design for Learning* (UDL), bahan pembelajaran perlu dioptimumkan agar dapat diakses oleh semua murid termasuk mereka dengan kekangan fizikal atau digital. Bagi penggunaan AI dan platform pembelajaran adaptif, isu seperti tadbir urus data, privasi pelajar, dan risiko bias algoritma harus ditangani secara beretika dan mematuhi piawaian perlindungan data pendidikan. Dalam konteks Malaysia dan rantau Asia Tenggara, jurang digital antara sekolah bandar dan luar bandar menjadi moderator penting terhadap keberkesanan teknologi; justeru, laluan alternatif berkapasiti rendah (low-tech pathways) seperti video resolusi rendah, modul PDF interaktif atau bahan bercetak perlu terus disediakan untuk memastikan tiada murid terpinggir. Pertimbangan terhadap aspek-aspek ini amat penting bagi memastikan inovasi pedagogi berasaskan teknologi dapat dilaksanakan secara inklusif, adil dan mampan.

Dalam konteks Malaysia, dapatan ulasan ini sejajar dengan keutamaan Pelan Pembangunan Pendidikan Malaysia (PPPM) 2013–2025, khususnya aspek pendigitalan pendidikan, pemerkasaan pedagogi abad ke-21 dan peningkatan akses teknologi di sekolah. Walau bagaimanapun, pelaksanaan inovasi seperti VR/XR, AI dan pembelajaran adaptif perlu mengambil kira realiti sekolah bandar dan luar bandar yang mempunyai tahap prasarana berbeza. Data KPM menunjukkan bahawa sekolah luar bandar masih berhadapan dengan kekangan jalur lebar, kekurangan peranti, dan perbezaan tahap literasi digital guru, menjadikan keberkesanan inovasi teknologi sangat bergantung kepada sokongan infrastruktur serta latihan profesional. Keadaan ini turut mencerminkan pola yang dilaporkan di rantau Asia Tenggara, termasuk Indonesia, Thailand dan Vietnam, di mana jurang digital, kualiti sambungan Internet dan ketidaksamaan sumber sekolah menjadi moderator penting terhadap kejayaan pedagogi inovatif. Oleh itu, pelaksanaan strategi teknologi dalam pendidikan Biologi perlu disepadukan dengan dasar dan intervensi yang lebih sistematik, seperti pembangunan pusat sumber digital berpusat, penyediaan bahan pembelajaran versi low-tech untuk sekolah berkapasiti rendah, serta latihan pedagogi digital yang berstruktur bagi guru Biologi. Tanpa pertimbangan kontekstual ini, inovasi sukar mencapai keberkesanan optimum di peringkat bilik darjah.

Berdasarkan sintesis literatur, Rajah 2 dibangunkan sebagai kerangka konseptual yang menggambarkan hubungan antara strategi pedagogi inovatif, integrasi teknologi, faktor pelaksanaan dan hasil pembelajaran. Rajah 2 ini menjelaskan bahawa pencapaian, minat dan penglibatan murid hanya dapat ditingkatkan apabila inovasi disokong oleh infrastruktur, kesediaan guru serta latihan profesional yang berterusan.

Rajah 2. Kerangka konseptual integrasi strategi pedagogi inovatif dan teknologi dalam pendidikan Biologi



Rajah 2: Kerangka konseptual integrasi strategi pedagogi inovatif dan teknologi dalam pendidikan Biologi

Nota. Rajah ini menggambarkan hubungan strategi pedagogi inovatif dan teknologi dengan hasil pembelajaran Biologi.

Secara keseluruhannya, perbincangan ini menegaskan bahawa inovasi pedagogi dalam pendidikan Biologi tidak boleh dilihat secara terpisah daripada ekosistem pendidikan yang lebih luas. Kejayaan pelaksanaannya memerlukan keselarasan antara dasar pendidikan, pembangunan profesional guru, ketersediaan infrastruktur serta kesedaran tentang kepelbagaian keperluan murid. Hanya dengan pendekatan holistik sebegini, transformasi pembelajaran Biologi yang efektif, inklusif dan mampan dapat direalisasikan.

LIMITASI DAN CADANGAN KAJIAN MASA HADAPAN

Ulasan ini mempunyai beberapa batasan yang perlu dipertimbangkan. Walaupun pencarian literatur telah menggunakan pangkalan data utama seperti Scopus, Web of Science, ERIC dan Google Scholar kemungkinan terdapat kajian yang tidak diindeks atau diterbitkan dalam bahasa selain Melayu dan Inggeris tidak dapat diketepikan. Ketiadaan meta-analisis berangka juga mengehadkan keupayaan untuk menghasilkan anggaran kesan yang lebih tepat kerana heterogeniti reka bentuk kajian dan ukuran hasil. Di samping itu, walaupun 20% artikel telah disemak silang bagi meningkatkan konsistensi, ketiadaan pengiraan statistik inter-rater seperti Cohen's Kappa menunjukkan potensi bias pemilihan masih wujud. Beberapa artikel yang disintesis terdiri daripada kajian bukan rawak dan ulasan naratif yang mempunyai risiko bias metodologi lebih tinggi.

Sehubungan itu, kajian masa hadapan disarankan untuk melaksanakan penyelidikan empirikal berskala besar menggunakan reka bentuk eksperimen atau quasi-eksperimen bagi menilai keberkesanan strategi pedagogi inovatif dan teknologi dalam konteks sekolah menengah Malaysia. Kajian longitudinal turut diperlukan untuk menilai kesan jangka panjang terhadap kemahiran abad ke-21 termasuk literasi digital dan pemikiran kritis. Selain itu, pembangunan pendekatan low-tech bagi sekolah berinfrastruktur rendah sangat penting untuk mengurangkan jurang digital antara sekolah bandar dan luar bandar. Penyelidikan berkaitan etika penggunaan AI, privasi data serta bias algoritma dalam pendidikan Biologi juga perlu diberi perhatian. Akhirnya, kajian kualitatif mendalam yang meneliti pengalaman guru dan murid boleh memberikan maklumat yang lebih kontekstual tentang penerimaan, cabaran dan sokongan yang diperlukan untuk melaksanakan inovasi pedagogi secara mampan.

KESIMPULAN

Secara keseluruhannya, Ulasan ini menegaskan bahawa strategi pedagogi inovatif dan integrasi teknologi mampu memberikan impak signifikan terhadap pengajaran dan pembelajaran Biologi. Pendekatan aktif seperti *Claim-Evidence-Reasoning (CER)*, pembelajaran berasaskan projek (PBL) dan bilik darjah terbalik (*flipped-classroom*) terbukti berkesan meningkatkan penglibatan, minat serta kemahiran berfikir aras tinggi murid. Pada masa yang sama, integrasi teknologi seperti realiti maya (VR), kecerdasan buatan (AI) dan media pembelajaran berasaskan web dapat menyediakan pengalaman pembelajaran yang lebih interaktif, peribadi dan fleksibel.

Walau bagaimanapun, keberkesanan strategi ini masih dipengaruhi oleh cabaran praktikal seperti kos pelaksanaan, jurang infrastruktur digital, serta tahap kesediaan guru dan murid. Justeru, transformasi pendidikan Biologi hanya dapat direalisasikan melalui pendekatan holistik yang melibatkan dasar pendidikan inklusif, latihan profesional berterusan untuk guru, serta sokongan institusi bagi memastikan kelestarian inovasi pedagogi.

Selain itu, kajian lanjutan boleh dilaksanakan untuk menilai secara empirikal keberkesanan gabungan strategi pedagogi inovatif dan teknologi dalam konteks sekolah menengah Malaysia. Penyelidikan masa hadapan juga wajar memberi tumpuan kepada kesan jangka panjang pendekatan ini terhadap pembangunan kemahiran abad ke-21, khususnya kemahiran berfikir aras tinggi (KBAT) dan literasi digital murid. Dengan cara ini, inovasi pedagogi bukan sahaja memberi manfaat segera dalam bilik darjah, tetapi juga menyumbang kepada pembentukan generasi pelajar yang lebih bersedia menghadapi cabaran global.

PERNYATAAN PENGGUNAAN AI GENERATIF

Semasa penyediaan manuskrip ini, penulis telah menggunakan perisian Kecerdasan Buatan Generatif (AI), khususnya *ChatGPT*, bagi tujuan penambahbaikan kejelasan penulisan, penyusunan ayat dan semakan bahasa. Selepas menggunakan perkhidmatan tersebut, semua kandungan telah disemak, disunting dan disahkan semula oleh penulis. Penulis bertanggung jawab sepenuhnya terhadap ketepatan, keaslian serta integriti keseluruhan kandungan dalam manuskrip ini.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan jutaan terima kasih kepada semua pihak yang terlibat dalam kajian ini secara langsung mahupun tidak langsung.

Konflik Kepentingan: Tiada konflik kepentingan dalam kajian ini

RUJUKAN

- Aleksandrovich, S. I., Ramazan, T., Utegaliyeva, R., Sarimbayeva, B., Keubassova, G., Bissalyeva, R. N., Syman, K., & Abdikarimova, G. (2024). Transformative applications in biology education: A case study on the efficacy of adaptive learning with numerical insights. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 22(2), 395–408. <https://doi.org/10.22124/CJES.2024.7731>
- Arslan, A., & Turk, M. (2024). Wikipedia as an academic service-learning tool in science and technology: Higher education case from Siberia. *Journal of Community Genetics*, 15(2), 147–161. <https://doi.org/10.1007/s12687-023-00692-6>
- Helikar, T., Cutucache, C. E., Dahlquist, L. M., Herek, T. A., Larson, J. J., & Rogers, J. A. (2015). Integrating interactive computational modeling in biology curricula. *PLOS Computational Biology*, 11(3), e1004131. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004131>

- Hmoud, M., Swaity, H., Karram, O., Shibli, H., Swaity, S., & Daher, W. M. (2023). High school students' engagement in biology in the context of XR technology. *IEEE Access*, 11, 137053–137066. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3338176>
- Kleinschmit, A. J., Rosenwald, A. G., Ryder, E. F., Donovan, S. S. S., Murdoch, B., Grandgenett, N. F., Pauley, M. A., Triplett, E. W., Tapprich, W. E., & Morgan, W. R. (2023). Accelerating STEM education reform: Linked communities of practice promote creation of open educational resources and sustainable professional development. *International Journal of STEM Education*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40594-023-00405-y>
- Lacey, M. M., Francis, N. J., & Smith, D. P. (2024). Redefining online biology education: A study on interactive branched video utilisation and student learning experiences. *FEBS Open Bio*, 14(2), 230–240. <https://doi.org/10.1002/2211-5463.13767>
- Lewis, J., & Wood-Robinson, C. (2000). Genes, chromosomes, cell division and inheritance – do students see any relationship? *International Journal of Science Education*, 22(2), 177–195. <https://doi.org/10.1080/095006900289949>
- Morra, C. N., Fultz, R. S., & Raut, S. A. (2022). A lesson from the pandemic: Utilizing digital tools to support student engagement during instructional assistant-led sessions. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 23(3), e00143–22. <https://doi.org/10.1128/jmbe.00143-22>
- Nur Izwani, N. (2021). Persepsi pelajar terhadap pembelajaran Biologi di sekolah menengah: Satu kajian kes. *Jurnal Pendidikan Sains Malaysia*, 15(2), 45–56.
- Radwan, I. A., El Moshy, S., Rady, D., Korany, N. S., Maaty, F. A. N. A., Elfaied, F. I., Monir, L. M., Ibrahim, M. S., Ragab, M. A., & Osman, N. M. R. (2025). The evolving landscape of oral biology education: A comparative study of teaching strategies. *BMC Medical Education*, 25(1). <https://doi.org/10.1186/s12909-025-07338-w>
- Saber-Ayad, M. M. (2025). Discrepancies in global genomics education. In *Genomics and Society* (pp. 161–171). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-22384-6.00010-X>
- Shiaching, H. (2001). Different gender students' participation in the high- and low-achieving middle school questioning-orientated biology classrooms in Taiwan. *Research in Science and Technological Education*, 19(2), 147–158. <https://doi.org/10.1080/02635140120087696>
- Tahtouh, M., Masri, N., Alfahel, M., Antar, G., Dayal, A., Khamis, H., Kuruvani, M., & Kachaamy, G. (2024). Exploring the virtual frontier: The impact of virtual reality on undergraduate biology education at the American University in Dubai. *International Journal of Information and Education Technology*, 14(5), 675–680. <https://doi.org/10.18178/ijiet.2024.14.5.2092>
- Taraboletti, A. A. (2024). Sourdough as a model organism for facilitating undergraduate biochemistry and biology education. *Journal of Chemical Education*, 101(3), 1180–1189. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00913>
- Theodosiou, N. A., Cassat Green, S., & Napier, E. C. (2025). Introducing societal issues in an upper level STEM course increases student engagement and knowledge transfer. *Developmental Biology*, 525, 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2025.05.029>
- Uşak, 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>
- Yanti, F., Lufri, L., Ahda, Y., Sepriani, R., & Ockta, Y. (2025). Web-based biology learning media for distance education: Systematic literature review. *Multidisciplinary Reviews*, 8(5). <https://doi.org/10.31893/multirev.2025109>