

TRANSFORMASI DIGITAL PENDIDIKAN HIJAU: PEMETAAN BIBLIOMETRIK INTEGRASI AI DALAM ESD (2009-2025)

DIGITAL TRANSFORMATION OF GREEN EDUCATION: A BIBLIOMETRIC MAPPING OF AI INTEGRATION IN ESD (2009-2025)

Nur Fatiha Nordin ^{1*}
Hishamuddin Bin Ahmad ²
Somakala Jeryaraman ³

¹Faculty of Human Development, Universiti Pendidikan Sultan Idris, 35900 Tanjong Malim, Perak, Malaysia.
(E-mail: p20251003352@siswa.upsi.edu.my; hishamuddin.a@fpm.upsi.edu.my;
p20251003406@siswa.upsi.edu.my)

*Corresponding author: hishamuddin.a@fpm.upsi.edu.my

Article history

Received date : 19-2-2026
Revised date : 20-2-2026
Accepted date : 4-3-2026
Published date : 14-3-2026

To cite this document:

Nordin, N. F., Ahmad, H., & Jeryaraman, S. (2026).
Transformasi digital pendidikan hijau: Pemetaan
bibliometrik integrasi AI dalam ESD (2009-2025).
*Journal of Islamic, Social, Economics and
Development (JISED)*, 11 (81), 207 – 222.

Abstrak: Kajian ini memperincikan analisis bibliometrik secara menyeluruh tentang perkembangan intelektual dan trend penyelidikan global yang berkaitan dengan pengintegrasian Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence, AI) dalam Pendidikan Pembangunan Lestari (Educational Sustainable Development, ESD). Selain itu, kajian ini juga memetakan trajektori penerbitan, memperlihatkan peralihan ketara daripada peringkat awal kepada peningkatan eksponen. Peralihan ini didorong oleh keperluan mendesak untuk agenda pendigitalan pasca-pandemik dan Matlamat Pembangunan Lestari (SDG). Proses ini dilakukan dengan menggunakan pangkalan data utama seperti Scopus dan Web of Science. Tambahan itu juga, analisis ini turut memfokuskan struktur pengetahuan, pengarang terkenal dan jaringan kerjasama antarabangsa yang mendominasi perbincangan tentang transformasi digital dalam pendidikan hijau. Justeru, hasil kajian mendapati bahawa terdapat peningkatan yang ketara dalam penerbitan bermula pada tahun 2023 dan pada tahun 2025 rekod tertinggi penerbitan dapat dicapai. Hal ini kerana pada tahun 2025, revolusi AI Generatif berkembang pesat. Analisis artikel sebanyak 2, 607 menunjukkan bahawa terdapat banyak perbezaan dalam penyelidikan mengenai aspek pentaksiran berasaskan teknologi adaptif ini. Hal ini kerana, kajian sedia ada lebih menumpukan pada aspek pengajaran berbanding penilaian. Kesimpulannya, kajian ini dapat mengesahkan bahawa AI adalah berfungsi sebagai pemangkin masa depan ESD sekaligus dapat mengisi kelompangan dalam pedagogi sains yang lestari.

Keywords: Kecerdasan Buatan, Pendidikan Pembangunan Lestari, Analisis Bibliometrik, Transformasi Digital, Teknologi Pendidikan.

Abstract: *This study shows a comprehensive bibliometric analysis of the intellectual evolution and global research trends concerning the integration of Artificial Intelligence (AI) in Education for Sustainable Development (ESD). It maps the publication trajectory, revealing a significant transition from the foundational stages to a period of exponential growth. This shift is driven by the urgent demand for post-pandemic digitalization agendas and the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs). Data was synthesized from primary databases, specifically Scopus and Web of Science. Furthermore, the analysis examines the knowledge structure, prominent authors, and international collaborative networks that dominate the discourse on digital transformation within green education. The findings indicate a substantial surge in publications beginning in 2023, reaching a peak in 2025, which correlates with the rapid advancement of the Generative AI revolution. An analysis of 2,607 articles highlights a significant research disparity regarding adaptive technology-based assessment; existing literature remains predominantly focused on pedagogical aspects rather than evaluation. In conclusion, this study confirms that AI serves as a critical catalyst for the future of ESD, effectively addressing existing gaps in sustainable science pedagogy.*

Keywords: *Artificial Intelligence (AI), Education for Sustainable Development (ESD), Bibliometric Analysis, Digital Transformation, Educational Technology.*

Pengenalan

Seiring Revolusi Perindustrian 5.0 (*Industrial Revolution*, IR 5.0) dan agenda yang terkandung dalam Matlamat Pembangunan Mampan (*Sustainable Development Goals*, SDG-30), sistem pendidikan di Malaysia turut menuntut perubahan yang mampan. Justeru, transformasi pendidikan ini dapat direalisasikan dengan mengaplikasikan Pendidikan untuk Pembangunan Lestari (*Educational Sustainable Development*, ESD) sepertimana yang telah digariskan oleh UNESCO (2020). Objektif ESD bukan hanya bertindak untuk melahirkan murid yang berpengetahuan bahkan juga mampu bersikap terhadap kelestarian alam sekitar (UNESCO, 2020). Seiring dengan anjakan paradigma dunia pendidikan global masa kini, pengintegrasian teknologi Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligence*, AI) di dalam sistem pendidikan mampu menyediakan pembelajaran secara personal dan juga dapat memberikan maklum balas secara automatik kepada murid (Fischer, King, & Redman, 2025; Schutte, Bayram, Vennix, & van der Veen, 2025; Tu, Chen, & Huang, 2025).

Walaupun kedua-dua bidang ini berkembang pesat secara berasingan, penggunaan AI untuk mengembangkan ESD masih lagi pada peringkat permulaan. Sinergi ini akan menawarkan transformasi digital yang boleh menjadikan pembelajaran sains dan ESD lebih interaktif dan berkesan (Chiu, Xia, Zhou, Chai, & Cheng, 2023). Walau bagaimanapun, penyelidikan semasa mengenai penggunaan AI dalam ESD masih lagi dalam keadaan samar-samar (Flores-Vivar & García-Peñalvo, 2023). Tujuan kajian bibliometrik ini adalah untuk mengkaji struktur intelektual dan perkembangan trend penerbitan global mengenai penggabungan teknologi pintar, AI dalam pendidikan kelestarian alam sekitar. Kajian ini juga akan mengenal pasti pengarang prolifik, jaringan kerjasama, dan isu akademik utama dengan menggunakan data daripada pangkalan data berimpak tinggi. Hal ini akan memberi gambaran menyeluruh tentang bagaimana teknologi digital mampu mengubah ESD (Zhai et al. 2021).

Isu utama yang telah dikenal pasti adalah ketidakseimbangan dalam fokus kajian. Kebanyakan kajian AI dalam pendidikan lebih menumpukan kepada aspek teknikal algoritma atau pentaksiran untuk subjek teras seperti Matematik dan Bahasa, tetapi mengabaikan konteks nilai

kompleks seperti ESD. Hal ini disokong oleh kenyataan daripada Memari dan Ruggles (2025) yang menyatakan bahawa kebanyakan kajian hanya memfokuskan kepada murid di gred rendah (65 %), subjek matematik (38 %) manakala penyelesaian masalah nyata ESD adalah sangat terhad (15 %). Kajian literatur terkini menunjukkan bahawa menilai kompetensi kelestarian adalah mencabar kerana ESD melibatkan penilaian etika dan tingkah laku, bukan sekadar menilai kognitif (Rieckmann, 2018). Tambahan pula, kekurangan kerangka konseptual yang menghubungkan keupayaan analitik AI dengan pedagogi ESD menyebabkan guru sains tidak mempunyai panduan yang mencukupi tentang penggunaan alat pintar dengan berkesan. Kenyataan ini bertepatan dengan kajian Chiu et al. (2023) yang menyatakan bahawa integrasi AI dalam kurikulum sekolah menjadi lebih sukar disebabkan ketiadaan kerangka kerja kepimpinan digital. Selain itu UNESCO (2023) turut menyatakan bahawa sistem pendidikan global turut mengalami kekangan dalam membuat garis panduan pedagogi yang jelas terutama dalam penggunaan AI dan matlamat ESD.

Selain itu juga, kekurangan tinjauan sistematik atau analisis bibliometrik yang khusus bagi mengkaji perhubungan antara AI dan ESD (Li, Saat, & Ku Bahador, 2025; Setiawan, Ardianto, & Windiyani, 2025). Majoriti ulasan literatur bersifat naratif dan gagal memberikan data kuantitatif tentang jurang penyelidikan yang sebenar (Donthu, Kumar, Mukherjee, Pandey, & Lim, 2021; Snyder, 2019). Tanpa pemetaan bibliometrik yang jelas, sukar bagi penyelidik untuk menentukan sama ada teknologi AI yang dibangunkan benar-benar menyokong matlamat kelestarian atau sekadar pendigitalan bahan pengajaran konvensional (Crompton & Burke, 2023). Oleh yang demikian, pembangunan modul yang inovatif berasaskan bukti empirikal adalah amat sukar dihasilkan disebabkan ketiadaan peta jalan penyelidikan ini. Hal ini selari dengan dapatan kajian Jamaluddin et al. (2025) yang menyatakan bahawa antara faktor yang menjadi penghalang utama kepada pengintegrasian AI secara berkesan ke dalam sistem pendidikan di Malaysia adalah disebabkan oleh kekurangan bukti empirikal dan jurang dalam agenda penyelidikan dalam bidang ini.

Implikasinya, ketidakupayaan bagi menangani kajian literatur yang kabur akan memberikan kesan terhadap pembentukan kurikulum sains pada masa akan datang. Tambahan pula, disebabkan kefahaman yang tidak jelas mengenai trend teknologi dalam ESD, maka pembangunan pentaksiran formatif akan kekal statik dan kurang responsif terhadap keperluan murid generasi digital. Hal ini akan menjadikan matlamat sebenar pendidikan kelestarian tidak akan tercapai apabila murid hanya menghafal fakta tanpa menguasai domain emosi dan tingkah laku terhadap ESD (Yilmaz & Deniz, 2024)

Justeru, pelaksanaan pentaksiran yang menyeluruh terhadap ketiga-tiga domain ESD oleh para pendidik akan terhalang. Selain itu, disebabkan ketiadaan analisis bibliometrik maka wujudnya pertindihan kajian dan juga pembaziran sumber penyelidikan dari sudut akademik dan penyelidikan. Oleh yang demikian, penyelidik berkemungkinan akan membangunkan alat pentaksiran berasaskan AI yang tidak relevan dengan keperluan ESD sains menegah atas disebabkan tidak mengetahui trend teknologi terkini. Tuntasnya, sasaran terhadap SDG 4 iaitu pendidikan berkualiti dan inklusif akan mengalami kelambatan disebabkan penggunaan teknologi yang sepatutnya menjadi pemangkin namun sebaliknya menjadi bebanan kognitif tanpa hala tuju yang jelas. Kenyataan ini selaras dengan laporan UNESCO (2023) yang menyatakan bahawa tanpa peta jalan penyelidikan yang jelas dan ketidaksediaan guru terhadap ESD akan menyebabkan matlamat SDG 4 akan terhalang.

Objektif utama kajian ini adalah untuk meneroka dan menganalisis trend secara global mengenai pertumbuhan literatur saintifik khususnya mengenai penggunaan AI dalam ESD. Selain itu, kajian ini juga bertujuan untuk mengenal pasti pengarang, institusi dan negara yang paling produktif dalam meneroka bidang AI dan ESD ini. Tambahan pula, kajian ini turut dilakukan bagi memetakan hubungan kerjasama antarabangsa yang dapat membentuk landskap pengetahuan semasa. Melalui kajian ini juga dapat memberikan gambaran keseluruhan tentang bagaimana teknologi pintar membantu pendidikan memahami nilai kelestarian.

Selain itu juga, kajian ini secara khususnya bertujuan untuk mengenal pasti kelompangan pengetahuan dalam kajian literatur yang sedia ada terutama dalam aspek pentaksiran dan juga pembelajaran diperibadikan. Kajian ini bertujuan untuk menyokong keperluan mendesak untuk mereka bentuk dan membangunkan sebuah modul intervensi baharu dengan melihat perubahan dalam tema penyelidikan. Dengan yang demikian, analisis ini akan menunjukkan bahawa komponen penilaian pintar dalam ESD adalah satu keperluan mendesak yang belum diteroka sepenuhnya. Justeru, artikel ini memfokuskan analisis untuk menjawab persoalan kajian seperti berikut:

1. Apakah trend penerbitan dokumen-dokumen kajian integrasi teknologi AI dan ESD?
2. Apakah penerbitan dokumen kajian integrasi teknologi AI dan ESD paling tinggi?
3. Siapakah pengkaji paling prolifik dalam penerbitan dokumen kajian integrasi teknologi AI dan ESD?
4. i) Apakah tema utama dan trend teknologi terkini yang muncul dalam literatur berkaitan integrasi AI dan ESD berdasarkan analisis *co-occurrence* kata kunci?
ii) Apakah dokumen atau teori asas yang menjadi tunjang kepada kajian AI dalam ESD melalui analisis *co-citation*?
iii) Bagaimanakah corak kerjasama global antara negara-negara dalam memacu penyelidikan mengenai integrasi AI bagi tujuan kelestarian (ESD)?

Kajian Literatur

Isu dan Cabaran Pelaksanaan ESD (Peringkat Global dan Malaysia)

Pelaksanaan Pendidikan untuk Pembangunan Lestari (ESD) sememangnya mempunyai pelbagai cabaran kompleks dari pelbagai dimensi yang berlaku bukan hanya di Malaysia bahkan juga di peringkat global. Hal ini juga melibatkan pelbagai peringkat daripada pendekatan berasaskan sistem kepada amalan pengajaran dan pembelajaran di dalam bilik darjah. Pada asasnya, isu utama adalah berpunca daripada paradigma sosioekonomi yang berkuasa. Hal ini dijelaskan melalui kajian daripada Foley (2024) yang mendapati bahawa Paradigma Sosial Dominan (*Dominant Social Paradigm - DSP*) adalah falsafah neoliberal yang berpusatkan manusia dan lebih mengutamakan pertumbuhan ekonomi tanpa had. Selari dengan itu juga, DSP dikatakan akan membentuk dan mengukuhkan halangan lain yang menghalang penyepaduan Paradigma Sosial Dominan. Tambahan itu juga, ESD sering dilihat sebagai elemen tambahan dan bukannya asas kerana paradigma yang perlu diserap ke dalam sistem pendidikan (Foley, 2024). Hal ini bertepatan juga dengan halangan yang berlaku di Malaysia, yang mana sistem pendidikan adalah lebih memfokuskan peperiksaan dan lebih menekankan standard piawaian tradisional tanpa mempedulikan matlamat ESD secara tuntas (Munasi, 2024; Alifa, Sri Rahayu, & Alsulami, 2025). Dengan yang demikian, kurikulum yang kaku akan muncul disebabkan oleh fokus yang berlebihan terhadap peperiksaan sekaligus menghalang pendekatan ESD yang memerlukan masa dan ruang pembelajaran yang lebih banyak (Letchumanan & Che Rose, 2021; Alifa et al., 2025).

Walaupun punca utama kegagalan pelaksanaan ESD yang selalu disebut adalah guru kurang menerima latihan yang mencukupi (Papavasileiou, Konteos, Kalogiannidis, Kalfas, & Papaevaggelou, 2025), analisis yang lebih mendalam mendedahkan masalah yang lebih kompleks berlaku dalam pelaksanaan ESD. Bukan sahaja guru tidak mempunyai pemahaman yang mencukupi tentang kandungan ESD, tetapi latihan yang ditawarkan juga tidak mencabar epistemologi pengajaran tradisional yang dipegang oleh guru. Sebagai contoh, guru sains di Indonesia dan Malaysia sering menghadapi kesukaran untuk menghubungkan dimensi sosial-ekonomi ESD dengan kandungan sains. Hal ini berlaku kerana mereka telah dididik dalam pengajaran yang berpusatkan guru, iaitu pengajaran yang memisahkan fakta daripada konteks masyarakat dan nilai (Eliyawati et al., 2023; Zainal Abidin et al., 2023). Latihan ESD ke atas guru hanya akan dilihat sebagai beban tambahan jika hanya memasukkan maklumat baharu tanpa mengubah cara guru berfikir mengenai proses pengajaran dan pembelajaran yang sepatutnya dilakukan. Hal ini dapat dijelaskan mengapa guru mempunyai sikap negatif dan tidak mahu berubah dalam melaksanakan ESD (DeWitt, Alias, & Ying, 2024).

Selain itu, menerusi sorotan literatur yang dijalankan terdapat aspek paling kritikal iaitu ketiadaan mekanisma pentaksiran yang berkesan bagi menilai ESD. Walaupun terdapat peningkatan terhadap penyelidikan di peringkat global tentang kajian ESD, namun tumpuan terhadap pentaksiran formatif bagi ESD masih lagi dalam keadaan yang perlu diberikan perhatian yang khusus (Kusumaningrum et al., 2023). Hal ini dijelaskan menerusi kajian di Indonesia yang mana tidak terdapat alat khusus untuk menilai keupayaan guru sains dalam mengajar ESD akan menyukarkan pengawasan sekolah terhadap keberkesanan pengajaran (Eliyawati et al., 2023). Tambahan itu juga, terdapat keperluan yang semakin mendesak terhadap penggunaan teknologi. Munasi (2024) dalam kajiannya menyatakan bahawa guru-guru di Afrika Selatan telah menyatakan bahawa sokongan teknologi diperlukan untuk memulakan pengajaran ESD. Hal ini turut berlaku di Greece yang mana 90.4% guru melaporkan tentang halangan utama melaksanakan pengajaran dan pembelajaran ESD ialah disebabkan oleh kekurangan penggunaan alat digital (Papavasileiou et al., 2025). Perkara ini turut sama berlaku di Malaysia apabila penggunaan teknologi seperti realiti maya (VR) boleh membantu mengatasi masalah logistik dalam aktiviti pendidikan Alam Sekitar di Malaysia (DeWitt et al., 2024). Selain itu juga, hasil dapatan daripada Letchumanan dan Che Rose (2021), menyatakan bahawa Pelaksanaan program ESD seperti SLAAS menghadapi kesukaran kerana kekurangan sokongan dan bimbingan berterusan daripada agensi luar, termasuk dalam menyediakan teknologi.

Cabaran Dalam Pentaksiran ESD

Perbezaan epistemologi antara sifat ESD yang berasaskan nilai dan tindakan dengan sifat sains yang objektif menyebabkan masalah yang paling penting dalam mentaksir ESD. Sheldrake, Walshe, dan Hargreaves (2025) dalam kajian mereka mendapati bahawa guru sains sering menggunakan pendekatan neutral yang hanya memberikan fokus kepada fakta semata-mata. Akibatnya, mereka tidak dapat menilai elemen nilai atau kecenderungan bertindak yang dianggap subjektif oleh murid mereka. Oleh yang demikian, guru sains akan menghadapi dilema pedagogi apabila perlu memilih sama ada memenuhi tuntutan transformasi ESD atau mengekalkan tradisi disiplin sains yang kaku.

Selain itu, kegagalan untuk melaksanakan penjajaran konstruktif juga turut menjadikan pentaksiran ESD kurang berkesan. Hal ini dapat dilihat menerusi kajian daripada Salani, Salani, Kgotlaetsile, dan Maundeni (2025) yang menunjukkan bahawa walaupun kurikulum memerlukan pelajar untuk berfikir secara kritis, masih terdapat guru yang menggunakan

pendekatan berpusatkan guru. Akibatnya, pentaksiran ini tidak dapat mengukur kemahiran sebenar murid terhadap kompetensi ESD. Hal ini dapat diperkuatkan lagi dengan kajian daripada Anwar et al. (2025) yang mendapati bahawa guru sains masih kurang pemahaman konseptual tentang cara mentaksir ESD, walaupun mereka menunjukkan sikap dan komitmen yang sangat positif terhadap ESD. Tambahan itu juga, masih ramai guru yang gagal untuk membezakan diantara Pendidikan Alam Sekitar (EE) dan Pendidikan untuk Pembangunan Lestari (ESD). Oleh itu, alat penilaian yang mampu mentaksir kompetensi ESD tidak dapat dihasilkan kerana guru tidak berupaya mengubah amalan pedagogi mereka secara menyeluruh terutamanya mengikut spesifikasi domain ESD (Holst, Singer-Brodowski, Brock, & de Haan, 2024).

Secara keseluruhan, analisis literatur ini mencadangkan bahawa cabaran yang berkaitan dengan pentaksiran ESD bukan hanya sekadar berkait dengan isu teknikal namun ianya juga berpunca daripada masalah struktur sistem pendidikan dan kebolehan guru. Dalam pendidikan kelestarian, terdapat halangan yang ketara yang disebabkan oleh kegagalan untuk menggabungkan objektif sains dengan prinsip ESD, serta kekurangan kemahiran guru untuk mencipta alat pentaksiran formatif. Justeru, satu mekanisme intervensi yang bukan sahaja mampu menyediakan latihan guru tetapi juga menyediakan alat sokongan pintar adalah penting. Dengan menyediakan kerangka pentaksiran yang mengintegrasikan elemen formatif secara automatik, dan membantu guru sains menilai dimensi tindakan tanpa mengetepikan fakta saintifik, Modul ECO-ASSESS dianggap sebagai penyelesaian strategik untuk masalah ini.

Peranan AI Dalam Pentaksiran

Pentaksiran yang mengintegrasikan AI merupakan satu mekanisme penilaian yang bersifat dinamik apabila mampu mengubah penilaian manual yang bersifat statik kepada penilaian yang mampu menjana maklum balas murid dalam masa yang nyata. Hal ini sekaligus dapat menjimatkan masa guru kerana teknologi ini mampu memberikan maklum balas secara automatik. Kenyataan ini turut disokong oleh kajian daripada Mpolomoka (2025) yang menyatakan bahawa AI berupaya menjana item- item secara automatik dan mampu memberikan markah terhadap soalan esei. Selain itu juga, penilaian berbantuan AI akan menjadikan penilaian tersebut dilakukan dengan pantas dan pemberian markah akan menjadi lebih konsisten. Manakala dalam konteks penilaian di dalam bilik darjah pula, Yilmaz dan Deniz (2024) mendapati bahawa AI mampu mengkategorikan teks secara teknikal. Oleh yang demikian, dengan penggunaan AI maka respons murid dapat dilakukan dengan sangat cepat. Hal ini membantu guru untuk menjalankan intervensi kepada murid yang memerlukan perhatian yang lebih berbanding menjalankan kerja-kerja pengkeranian (Yilmaz & Deniz, 2024). Walau bagaimanapun, terdapat jurang pedagogi yang dizahirkan secara eksplisit oleh Koshiry dan Tony (2025) mengenai reka bentuk yang menumpukan kepada pedagogi AI adalah sangat terhad. Dalam kajian ini ada menyebut bahawa kajian yang sebelum ini hanya memfokuskan kepada kecekapan teknikal sahaja tanpa mendasari ciri-ciri reka bentuk alat penilaian yang berasaskan AI untuk menilai secara mendalam. Hal ini menunjukkan bahawa walaupun teknologi AI ini wujud, masih lagi kekurangan kerangka pedagogi yang jelas dan berkesan.

Selain itu, peranan AI dalam pentaksiran juga telah melangkaui aspek kecekapan yang mana AI kini mampu memberikan maklum balas secara konstruktif dan dapat diperibadikan. Hal ini dibuktikan oleh kajian daripada Chuang dan Yan (2025) menyatakan bahawa *Generative AI (GenAI)* bukan hanya dapat memberikan maklum balas dalam masa yang nyata bahkan mampu juga memberikan maklum balas secara terperinci seolah-olah ia dapat bertindak sebagai tutor

pintar maya. Dengan yang demikian, hal ini jelas menunjukkan bahawa AI dalam pentaksiran mampu memberikan bimbingan yang berterusan kepada murid dengan bercirikan maklum balas automatik dan juga bersifat adaptif. Walau bagaimanapun, Jekri, Han, dan Shaafi (2025) dalam kajiannya menyatakan bahawa terdapat percanggahan antara sikap postif guru tentang AI, dan juga tahap pengetahuan dan kemahiran teknikal guru yang masih lagi ditahap rendah.

Kaedah Kajian

Strategi Pencarian Data

Kajian ini menggunakan pendekatan bibliometrik kuantitatif. Kajian ini dilakukan dengan membuat proses penyaringan sistematik pangkalan data berindeks tinggi. Manakala tempoh kajian adalah mengambil kira perkembangan terkini sehingga tahun 2026. Strategi carian adalah menggunakan kata kunci *Boolean* yang menggabungkan frasa seperti “*Artificial Intelligence (AI)*”, “*Pendidikan untuk Pembangunan Lestari (ESD)*”, “*Pentaksiran Formatif*” dan “*Pembelajaran Mesin (Machine Learning, ML)*”. Pencarian artikel menggunakan *Boolean String* iaitu (TITLE-ABS-KEY (("Artificial Intelligence" OR "AI" OR "Machine Learning" OR "Deep Learning" OR "Natural Language Processing" OR "Intelligent Tutoring System*" OR "Adaptive Learning" OR "Smart Education" OR "Digital Transformation" OR "Educational Technology") AND ("Education for Sustainable Development" OR "ESD" OR "Sustainability Education" OR "Environmental Education" OR "Green Education" OR "Climate Change Education" OR "SDGs")). Selain itu, kriteria penolakan yang ketat digunakan untuk menyingkirkan istilah perubatan yang tidak berkaitan, seperti *Endoscopic Submucosal Dissection*. Proses pembersihan data ini memastikan bahawa skop kajian yang dihasilkan adalah relevan dengan sains sosial dan teknologi pendidikan.

Perisian *BiblioPro* digunakan untuk membina peta rangkaian bibliometrik. Peta ini digunakan untuk menganalisis dan juga visualisasi data. Peta ini merangkumi analisis pembentukan kata kunci (*co-occurrence*), jaringan pengarang bersama (*co-authorship*), dan sitasi dokumen. Selain itu, hubungan intelektual antara penyelidik, perkembangan topik dari masa ke masa, dan kluster tema utama juga boleh dikenal pasti melalui analisis ini. Metodologi ini bukan hanya memberikan gambaran visual yang jelas tentang struktur holistik bidang kajian, namun membolehkan interpretasi data yang lebih tepat tentang hala tuju penyelidikan yang berkaitan dengan integrasi kecerdasan buatan dalam ESD.

Analisis Data

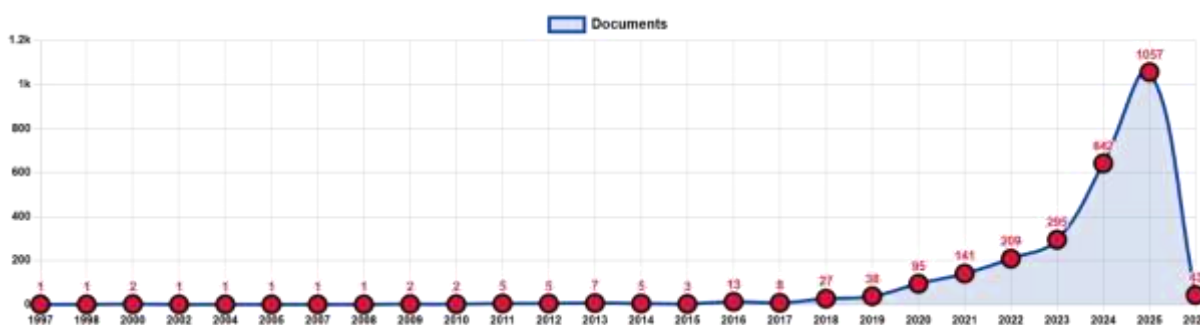
Prosedur menganalisis data kemudiannya akan dijalankan dengan menggunakan perisian *BiblioPro*. Perisian ini berfungsi untuk menjana pemetaan rangkaian yang komprehensif. Metodologi ini membolehkan interpretasi struktur intelektual melalui analisis pembentukan kata kunci (*co-occurrence*), kolaborasi pengarang (*co-authorship*), dan sitasi dokumen. Melalui teknik visualisasi ini, hubungan antara domain penyelidikan yang berbeza serta evolusi tema dapat dikenal pasti secara empirikal. Analisis ini tidak hanya mendedahkan statistik penerbitan, malah merumuskan kluster tema utama yang mendasari integrasi AI sebagai pemangkin transformasi dalam agenda ESD. Oleh yang demikian, prosedur ini adalah asas yang kukuh untuk memahami dinamika penyelidikan global dan mengenal pasti jurang literatur yang masih belum diterokai secara mendalam.

Keputusan

Analisis Trend Kajian AI dalam ESD

Rajah 1 di bawah menunjukkan analisis trend penerbitan dari tahun 1997 sehingga tahun 2026, yang mana dapat dilihat bahawa terdapat evolusi yang dramatik dalam landskap penyelidikan ini. Evolusi ini bermula dengan tempoh inkubasi yang panjang iaitu antara tahun 1997 sehingga tahun 2018. Tempoh ini dianggap sebagai tempoh inkubasi kerana jumlah dokumen yang terhasil adalah kekal rendah iaitu berjumlah 30 buah penerbitan sahaja dalam tempoh setahun. Oleh yang demikian, fasa ini dapat memberi gambaran bahawa integrasi teknologi dalam kelestarian masih berada diperingkat konsep awal. Walau bagaimanapun, tahun 2019 dan 2020 adalah titik perubahan yang jelas apabila jumlah penerbitan dokumen meningkat secara konsisten sehingga melepasi angka 100 buah dokumen. Hal ini berkemungkinan besar disebabkan oleh desakan global terhadap pendigitalan pasca pandemik Covid-19 serta pengukuhan agenda Matlamat Pembangunan Lestari, SDG.

Fasa paling kritikal adalah bermula dari tahun 2023 sehingga tahun 2025, yang mana pada ketika ini telah berlaku ledakan eksponen (*exponential explosion*) yang sangat luar biasa. Jumlah penerbitan meningkat dengan mendadak daripada 295 dokumen pada tahun 2023 kepada rekod tertinggi sebanyak 1,057 dokumen pada tahun 2025. Peningkatan ini menunjukkan lebih 250% dalam tempoh dua tahun sahaja. Hal ini berlaku disebabkan oleh revolusi *Generative AI* pada peringkat global yang telah membuktikan bahawa penyelidik sedang berlumba-lumba untuk meneroka aplikasi AI terutama dalam konteks sosial dan pendidikan. Walaupun data tahun 2026 menunjukkan hanya terdapat 43 dokumen sahaja namun pengumpulan data adalah sekitar awal tahun dan tidak dinafikan bahawa AI kini berada pada kemuncak populariti akademik.



Rajah 1: Trend Kajian AI Dalam ESD

Artikel Paling Kerap Dipetik

Jadual 1 menunjukkan analisis artikel yang paling kerap disitasi. Analisis sitasi dokumen mendapati bahawa artikel akademik kini didominasi oleh kajian yang menghubungkan pendigitalan dengan pencapaian SDG secara makro. Artikel yang paling banyak disitasi adalah artikel daripada Mondejar, M.E. et al. (2021) iaitu sebanyak 633 sitasi manakala artikel kedua yang banyak disitasi adalah kajian daripada Goralski, M.A. et al. (2020) iaitu sebanyak 569 sitasi. Daripada jumlah sitasi yang membabitkan artikel-artikel dalam tempoh yang singkat (2020-2021) menunjukkan bahawa topik transformasi digital dalam kelestarian bukan sekadar trend, tetapi merupakan agenda utama penyelidikan global yang berkembang pesat selepas pandemik.

Namun, antara penemuan paling signifikan adalah artikel daripada Abulibdeh, A. et al. (2024) yang menerima 456 sitasi dalam tempoh kurang daripada satu tahun sekaligus berada di tempat keempat dalam senarai. Hal ini adalah suatu perkara yang sangat mengejutkan. Artikel ini memfokuskan secara khusus mengenai AI dan ESD. Dengan yang demikian, penyelidikan terhadap AI dan ESD adalah indikator yang paling kuat bahawa penyelidikan masa kini banyak tertumpu kepada dua aspek ini. Tambahan pula, artikel daripada Tapalova, O. et al. (2022) yang bertajuk *Personalised Learning Pathways* yang menerima 385 sitasi turut memberikan data secara empirikal mengenai pembangunan modul AI yang bersifat personal dan adaptif terutama dalam konteks pendidikan hijau.

Jadual 1: Artikel Paling Kerap Dipetik Bagi AI Dan ESD

Kedudukan	Tajuk Artikel	Penulis	Tahun	Jumlah Sitasi
1	<i>Digitalization to achieve sustainable development goals: Steps towards a Smart G...</i>	Mondejar, M.E. et al.	2021	663
2	<i>Artificial intelligence and sustainable development</i>	Goralski, M.A. et al.	2020	569
3	<i>Unleashing the convergence amid digitalization and sustainability towards pursui...</i>	del Rio Castro, G. et al.	2021	464
4	<i>Navigating the confluence of artificial intelligence and education for sustainab...</i>	Abulibdeh, A. et al.	2024	456
5	<i>Digital transformation and localizing the Sustainable Development Goals (SDGs)</i>	ElMassah, S. et al.	2020	390
6	<i>Artificial Intelligence in Education: AIEd for Personalised Learning Pathways</i>	Tapalova, O. et al.	2022	358
7	<i>Artificial intelligence in the industry 4.0, and its impact on poverty, innovati...</i>	Mhlanga, D.	2021	290
8	<i>Sustainable soil use and management: An interdisciplinary and systematic approac...</i>	Hou, D. et al.	2020	284
9	<i>A conceptual framework for understanding the contribution of building materials ...</i>	Omer, M.A.B. et al.	2020	274
10	<i>Digital technologies can enhance climate resilience of critical infrastructure</i>	Argyroudis, S.A. et al.	2022	250

Pengarang Paling Kerap Dipetik

Jadual 2 di bawah menunjukkan senarai sepuluh pengarang utama berdasarkan jumlah penerbitan, jumlah sitasi dan purata sitasi bagi setiap artikel. Dari aspek jumlah artikel, Liu, Y. dan Singh, R. menduduki tempat paling atas dengan masing-masing menghasilkan 17 buah

penerbitan. Walau bagaimanapun, terdapat jurang yang ketara terhadap aspek kualiti dan pengaruh penyelidikan. Walaupun Liu, Y. mempunyai bilangan penerbitan yang paling tinggi, jumlah sitasinya iaitu sebanyak 132 adalah jauh lebih rendah berbanding Singh, R. yang memperoleh 373 sitasi. Hal ini menunjukkan bahawa kekerapan penerbitan tidak semestinya selari dengan impak sesuatu kajian. Tambahan pula apabila meneliti purata sitasi, pengarang yang berada di kedudukan lebih rendah dalam hierarki jumlah penerbitan sebenarnya menunjukkan impak yang lebih besar bagi setiap karya yang dihasilkan. Gupta, S., yang berada di kedudukan ke-9 dengan 13 penerbitan, mencatatkan purata sitasi tertinggi iaitu 32.08, diikuti oleh Singh, R. iaitu sebanyak 21.94 dan Wang, Y. iaitu sebanyak 21.56. Manakala, Li, Y. mencatatkan prestasi yang paling rendah dari segi impak dengan purata hanya 1.77 sitasi meskipun mempunyai jumlah penerbitan yang sama dengan Gupta, S. Oleh itu, kualiti penyelidikan yang diterjemahkan melalui jumlah sitasi merupakan indikator yang lebih tepat bagi mengukur kewibawaan akademik seseorang penyelidik berbanding jumlah output penulisan semata-mata.

Walaupun bagaimanapun, analisis dari aspek impak sitasi memperlihatkan bahawa kuantiti penerbitan tidak sentiasa sejajar dengan pengaruh akademik. Hal ini dapat dijelaskan apabila Gupta, S. yang berada di tangga ke-9 dengan jumlah penerbitan sebanyak 13 buah, sebenarnya ialah pengarang paling berpengaruh dengan jumlah sitasi tertinggi iaitu 417 dan purata sitasi per dokumen yang tinggi iaitu sebanyak 32.08 sitasi. Manakala Liu, Y. adalah pengarang yang paling produktif, namun hanya mencatatkan purata sebanyak 7.76 sitasi.

Jadual 2: Pengarang Paling Kerap Dipetik

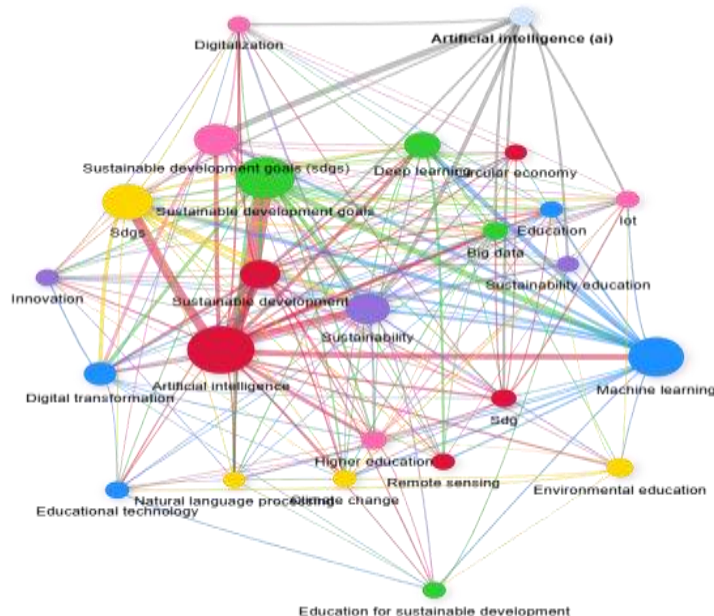
Kedudukan	Penulis	Jumlah Penerbitan	Bilangan Sitasi	Purata Sitasi
1	Liu, Y.	17	132	7.76
2	Singh, R.	17	373	21.94
3	Wang, H.	16	83	5.19
4	Wang, Y.	16	345	21.56
5	Zhang, Y.	16	126	7.88
6	Raman, R.	14	243	17.36
7	Wang, J.	13	226	17.38
8	Li, Y.	13	23	1.77
9	Gupta, S.	13	417	32.08
10	Zhang, H.	12	201	16.75

Analisis Kata Kunci (Co-Occurrence), Jaringan Pengarang Bersama (Co-Authorship), Dan Sitasi Dokumen

Kata Kunci (Co-Occurrence) Bagi AI Dalam ESD

Rajah 2 di bawah ialah analisis bagi pembentukan kata kunci (co-occurrence) bagi ingerasi AI dan ESD. Rajah di bawah menggambarkan sebuah visualisasi rangkaian yang memaparkan struktur intelektual yang lebih koheren dan tepat sasaran, di mana nod *Artificial intelligence* dan *Sustainable development* terlihat sebagai tunjang utama yang mengikat keseluruhan penyelidikan akademik. Manakala garisan penghubung yang tebal antara kedua-dua nod ini, serta hubungannya dengan *Machine learning*, *Deep learning*, dan *big data*. Hal ini membuktikan bahawa integrasi teknologi data termaju dalam agenda kelestarian kini telah berkembang menjadi satu disiplin kajian yang mampan, dan bukan lagi sekadar isu sampingan.

Selain itu, dari sudut tema penyelidikan, peta ini mendedahkan hubungan penting antara teknologi dan pedagogi melalui kehadiran nod *Educational Technology*, *Higher education*, dan *Digital transformation* yang saling berinteraksi dengan kluster *SDGs* dan *Climate change*. Kewujudan nod spesifik seperti *Natural language processing* (NLP) yang berhubung dengan konteks pendidikan memberi petunjuk kuat bahawa teknologi berasaskan bahasa semakin giat diteroka sebagai alat penyelesaian isu pendidikan alam sekitar.

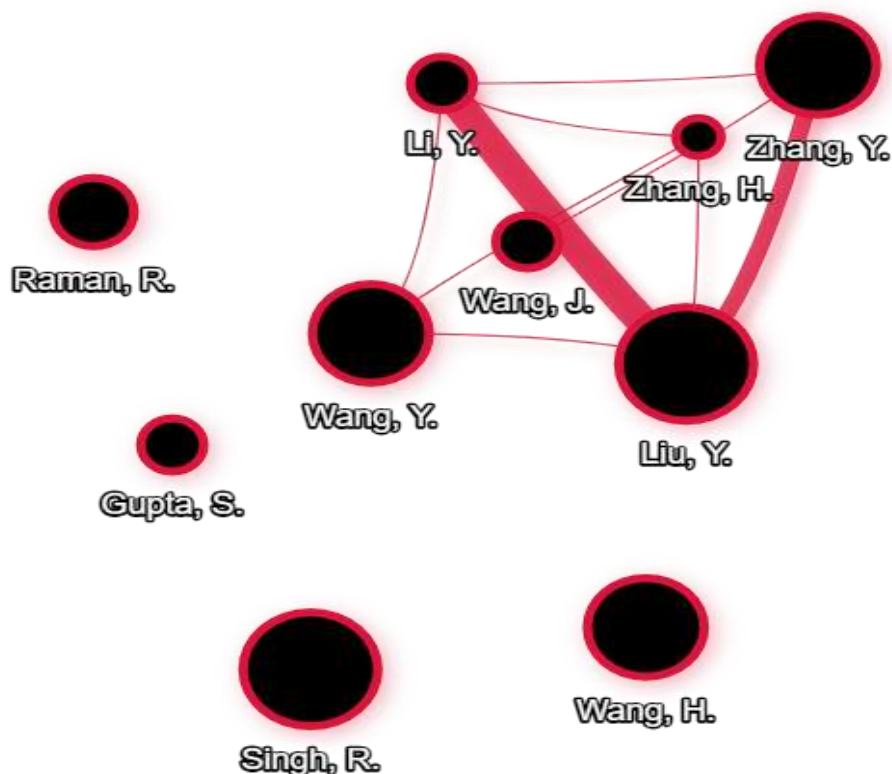


Rajah 2: Kata Kunci (Co-Occurrence) Bagi AI Dalam ESD

Jaringan Pengarang Bersama (Co-Authorship) Bagi AI Dalam ESD.

Rajah 3 di bawah menunjukkan sebuah kluster kolaboratif yang dominan dengan memfokuskan kajian dalam kalangan penyeldidik dari Asia Timur. Hal ini dapat dijelaskan dengan garisan-garisan tebal yang berhubung antara satu sama lain adalah milik Liu, Y., Wang, Y., dan Wang, J. Dengan ini dapat disimpulkan bahawa sebahagian besar hasil penerbitan tersebut adalah terhasil daripada kerjasama berpasukan. Tambahan pula, kedudukan pengarang Liu, Y yang berada di tengah-tengah jaringan ini menandakan bahawa beliau adalah penggerak utama dalam kajian penyelidikan.

Selain itu, visualisasi ini turut mendedahkan pecahan-pecahan intelektual yang menonjol secara ketara dalam bidang ini. Penyelidik seperti Singh, R, Gupta, S dan Raman, R juga muncul sebagai nod besar. Nod yang besar ini menandakan produktiviti yang tinggi terhadap kajian dalam bidang ini. Walau bagaimanapun nod yang besar ini dilihat dalam keadaan yang terapung dan terpencil tanpa pautan dengan kluster utama iaitu Liu, Y. Hal ini turut memberi implikasi yang penting bahawa bidang AI dalam ESD sedang giat berkembang di pelbagai wilayah atau institusi yang berbeza. Daripada Rajah 3 di bawah ini juga dapat disimpulkan bahawa penyelidik-penyelidik ini kemungkinan bekerja secara individu dan memfokuskan terhadap sub-tema yang berlainan. Justeru untuk mendapatkan gambaran literatur yang komprehensif dan menyeluruh maka sintesis artikel daripada kedua-dua kelompok sama ada berpasukan atau solo adalah perlu dilaksanakan.

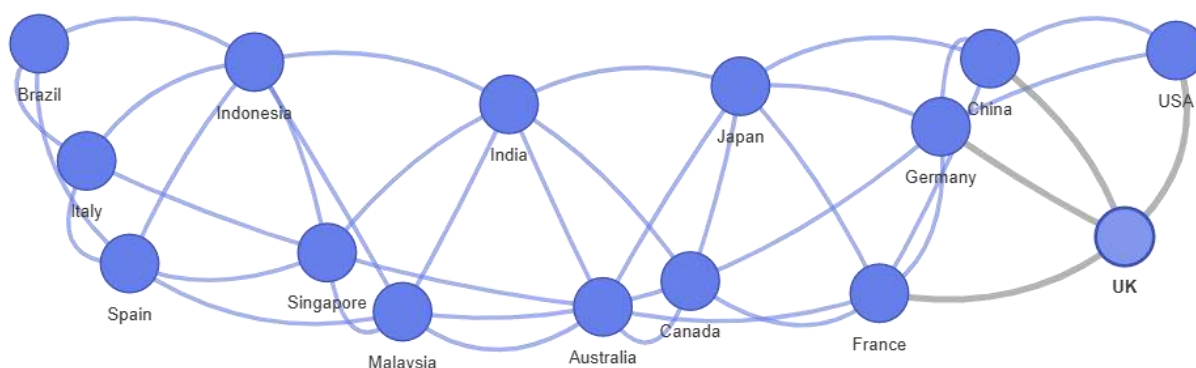


Rajah 3: Jaringan Pengarang Bersama (Co-Authorship) Bagi Integrasi AI Dalam ESD.

Jaringan Kerjasama Global Antara Negara-Negara Bagi AI Dalam ESD.

Rajah 4 di bawah menggambarkan Rangkaian Kerjasama Negara yang memperlihatkan bahawa China, Amerika Syarikat (*United States of America, USA*) dan United Kingdom (UK) sebagai segitiga kuasa akademik yang mendominasi hub intelektual utama global. Manakala, garisan penghubung yang tebal dan ketara antara ketiga-tiga negara tersebut menandakan terdapat kekerapan kolaborasi merentasi sempadan yang sangat tinggi. Hal ini dapat dibuktikan bahawa kemajuan dalam integrasi AI dan ESD banyak dipacu oleh kajian daripada Amerika Utara, Eropah dan Asia Timur. Tambahan pula, kedudukan strategik Jerman yang rapat dengan kluster ini dapat memperkukuhkan lagi pengaruh negara maju dalam menetapkan agenda penyelidikan antarabangsa.

Selain itu, dalam konteks negara serantau pula, Malaysia turut dilihat berhubung secara aktif dengan nod strategik seperti India, Australia dan Singapura. Hal ini dapat membuktikan bahawa Malaysia bukan hanya negara pemerhati bahkan menjadi peserta aktif dalam penyelidikan global ini. Tambahan pula, jaringan antara Malaysia dengan negara-negara maju dan membangun turut menunjukkan kewujudan aliran pertukaran teknologi dan pedagogi yang dinamik. Oleh yang demikian, struktur rangkaian yang saling berkait ini dapat memberi pengesahan bahawa isu AI dalam ESD adalah fenomena global yang merentasi sempadan negara.



Rajah 4: Jaringan Kerjasama Global Antara Negara-Negara Bagi AI Dalam ESD

Perbincangan

Kajian mendapati bahawa penerbitan telah meningkat secara mendadak sebanyak lebih 250% dalam tempoh dua tahun terkini iaitu dari tahun 2023 sehingga tahun 2025. Hal ini menunjukkan bahawa AI telah diintegrasikan ke dalam ESD. Lonjakan ini dikaitkan dengan kemunculan AI dan kebimbangan global terhadap krisis iklim, yang turut mendorong penggunaan solusi digital dalam sistem pendidikan. Selain itu, dominasi akademik yang terdiri daripada China, Amerika Syarikat, dan United Kingdom, menunjukkan bahawa negara-negara ini mempunyai infrastruktur teknologi yang mampan dan dasar pendidikan yang progresif.

Selain itu, analisis tema juga mendapati bahawa fokus telah berubah daripada perbincangan umum tentang kelestarian kepada aplikasi spesifik seperti *Smart Green Planet* dan *Personalised Learning Pathways*. Walaupun terdapat banyak kajian mengenai teknologi pengajaran, namun kaedah pentaksiran yang mengintegrasikan AI masih kurang dibuat kajian berbanding bidang lain. Oleh itu, kekurangan ini menyokong hujah bahawa pembangunan modul yang mengintegrasikan AI dalam pentaksiran formatif terhadap ESD adalah perlu dilaksanakan.

Kesimpulan

Secara keseluruhan, pemetaan bibliometrik ini menunjukkan bahawa pengintegrasian AI dengan ESD telah menjadi tajuk perbincangan penting bagi mencapai Matlamat Pembangunan Lestari (SDG). Hal ini dapat dilihat apabila jumlah literatur yang semakin meningkat dan jaringan kerjasama antarabangsa. Selain itu, komuniti saintifik di seluruh dunia juga sedang berusaha untuk menemui cara terbaik bagi menggabungkan keupayaan teknologi dengan keperluan untuk mengajar nilai manusia. Kajian ini juga menunjukkan bahawa pendidik dan penggubal dasar mesti segera mengubah suai kurikulum sains untuk masa hadapan. Terdapat banyak peluang untuk inovasi baharu selepas penemuan mengenai kelemahan dalam bidang pentaksiran digital. Kesimpulannya, untuk mewujudkan generasi lestari yang celik teknologi, kerjasama pintar antara manusia dan mesin adalah penting untuk masa depan pendidikan hijau.

Penghargaan

Penyelidikan ini tidak menerima sebarang geran khusus daripada agensi pembiayaan dalam sektor awam, komersial, atau tidak berasaskan keuntungan. Setinggi-tinggi penghargaan turut dirakamkan terhadap pihak Universiti Pendidikan Sultan Idris (UPSI) dan Fakulti Pembangunan Manusia atas sokongan prasarana dan akademik yang diberikan sepanjang penyelidikan ini dijalankan. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Kementerian Pendidikan Malaysia (KPM) atas kebenaran dan kerjasama dalam menjayakan kajian ini. Akhir sekali, penghargaan ini juga diberikan kepada semua pihak yang terlibat secara langsung atau tidak langsung dalam menyumbang penghasilan artikel ini.

Rujukan

- Alifa, F., Sri Rahayu, O. S., & Alsulami, N. M. (2025). Toward sustainability: Evaluating ESD implementation in K-12 schools: A systematic review. *J-PEK (Jurnal Pembelajaran Kimia)*, 10(1), 58–79. <https://doi.org/10.15294/jpii.v14i3.22908>
- Anwar, Y., Widodo, A., Fatih, Z., Kartika, D., Ariska, M., & Yusliani, N. (2025). Education for sustainable development based on technological pedagogical content knowledge in biology education: Assessing teachers' readiness. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 14(3). <https://doi.org/10.15294/jpii.v14i3.22908>
- Chiu, T. K. F., Xia, Q., Zhou, X., Chai, C. S., & Cheng, M. (2023). Systematic literature review on opportunities, challenges, and future research recommendations of artificial intelligence in education. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 4, 100118. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100118>
- Chuang, P. L., & Yan, X. (2025). Language assessment in the era of generative artificial intelligence: Opportunities, challenges, and future directions. *System*, 134, 103846. <https://doi.org/10.1016/j.system.2025.103846>
- Crompton, H., & Burke, D. (2023). Artificial intelligence in higher education: The state of the field. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 20(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00392-8>
- DeWitt, D., Alias, N., & Ying, T. W. (2024). Sustainable environmental education: Issues in the implementation for a sustainable future. *Journal of Issue in Education*, 47, 17–29.
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Eliyawati, Widodo, A., Kaniawati, I., & Fujii, H. (2023). The development and validation of an instrument for assessing science teacher competency to teach ESD. *Sustainability*, 15, 3276. <https://doi.org/10.3390/su15043276>
- Fischer, D., King, J., & Redman, A. (2025). Rethinking learning assessment in education for sustainable development: A call for action. *Journal of Education for Sustainable Development*, 1–18. <https://doi.org/10.1177/09734082251355050>
- Flores-Vivar, J., & García-Peñalvo, F. (2023). Reflections on the ethics, potential, and challenges of artificial intelligence in the framework of quality education (SDG4). *Comunicar*, 31(74). <https://doi.org/10.3916/C74-2023-03>
- Foley, H. (2024). Education for sustainable development barriers. *Journal of Sustainable Development*, 14(1), 1–52.
- Holst, J., Singer-Brodowski, M., Brock, A., & de Haan, G. (2024). Monitoring SDG 4.7: Assessing education for sustainable development in policies, curricula, training of educators and student assessment (input-indicator). *Sustainable Development*, 32(4), 3908–3923. <https://doi.org/10.1002/sd.2865>
- Jamaluddin, F., Jamaluddin, A. H., Jamaluddin, F., & Jamaluddin, F. (2025). *Malaysia's AI-driven education landscape: Policies, applications, and comparative insights for a digital future*. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.21858>
- Jekri, A., Han, C. G. K., & Shaafi, N. F. (2025). Cabaran dan potensi kecerdasan buatan generatif dalam pendidikan STEM: Suara guru sains di Sabah. *Innovative Teaching and Learning Journal*, 9(1), 316–325. <https://doi.org/10.11113/itlj.v9.186>
- Koshiry, A. E., & Tony, M. A. A. (2025). Modern learning strategies in the age of digital transformation: Future insights and practical challenges. *Educational Process: International Journal*, 17, e2025313. <https://doi.org/10.22521/edupij.2025.17.313>
- Kusumaningrum, M., Kuswanto, H., Jumadi, Suyanto, S., Suhartini, Purwasih, D., & Prabawati, R. (2023). A bibliometric review of research on education for sustainable

- development, 2019-2023. *International Electronic Journal of Elementary Education*.
<https://doi.org/10.26822/iejee.2023.315>
- Letchumanan, K., & Rose, R. A. C. (2021). Cabaran dan isu yang dihadapi dalam pelaksanaan Program Sekolah Lestari di Malaysia. *Malaysian Journal of Society and Space*, 17(1), 238–254.
- Li, D., Saat, R. M., & Ku Bahador, K. M. (2025). Bridging gaps: A bibliometric analysis of digital technology in accounting education and its role in sustainability. *International Journal of Business and Society*, 26(3), 956–982. <https://doi.org/10.33736/ijbs.8774.2025>
- Memari, M., & Ruggles, K. (2025). *Artificial intelligence in elementary STEM education: A systematic review of current applications and future challenges*. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.00105>
- Mpolomoka, D. (2025). Utilizing artificial intelligence for assessment in higher education. *Pedagogical Research*, 10, em0243. <https://doi.org/10.29333/pr/16677>
- Munasi, K. R. (2024). Evaluating the integration of education for sustainable development in the life sciences curriculum: A case study of grade 11 teachers in Vhembe East District. *Sustainability*, 16, 10918. <https://doi.org/10.3390/su162410918>
- Papavasileiou, A., Konteos, G., Kalogiannidis, S., Kalfas, D., & Papaevaggelou, O. (2025). Sustainable development goals: Evaluating teacher training programs in Greek secondary schools. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 21, 823–846. <https://doi.org/10.37394/232015.2025.21.69>
- Rieckmann, M. (2018). Learning to transform the world: Key competencies in education for sustainable development. In *Issues and trends in education for sustainable development* (pp. 39–59). Paris, France: UNESCO Publishing.
- Salani, E., Salani, G., Kgotlaetsile, M., & Maundeni, W. (2025). Teachers' perspectives on the challenges of implementing Vygotsky's social constructivist outcome-based assessment in secondary schools in Botswana. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, 24(4), 545–567. <https://doi.org/10.26803/ijlter.24.4.25>
- Schutte, B. G., Bayram, D., Vennix, J., & van der Veen, J. (2025). Exploring the implementation of challenge-based learning for sustainability education in Dutch secondary education: Teachers' experiences. *Environmental Education Research*, 31(6), 1166–1192. <https://doi.org/10.1080/13504622.2025.2458723>
- Setiawan, B., Ardianto, D., & Windiyani, T. (2025). Integrative trends in future-ready education: STEM, ESD, and artificial intelligence in Jakarta's primary schools. *IJELS*, 1(2), 63–78. <https://doi.org/10.64421/ijels.v1i2.6>
- Sheldrake, R., Walshe, N., & Hargreaves, E. (2025). Agentic action as an aim for sustainability education: Views from secondary school teachers in England. *Environmental Education Research*, 31(6), 1117–1134. <https://doi.org/10.1080/13504622.2025.2464240>
- 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>
- Tu, Y., Chen, J., & Huang, C. (2025). Empowering personalized learning with generative artificial intelligence: Mechanisms, challenges and pathways. *Frontiers of Digital Education*, 2. <https://doi.org/10.1007/s44366-025-0056-9>
- UNESCO. (2020). *Education for sustainable development: A roadmap*. Paris, France: UNESCO. <https://doi.org/10.54675/YFRI7470>
- UNESCO. (2023). *Guidance for generative AI in education and research*. Paris, France: UNESCO. Diperoleh dari <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386693>
- Valderrama-Hernández, R., Barron, A., Solis-Espallargas, C., & Limon, D. (2025). An instrument to analyse the sustainability competence of university students in education

- sciences. *International Journal of Sustainability in Higher Education*.
<https://doi.org/10.1108/IJSHE-01-2024-0041>
- Yılmaz, K., & Deniz, K. Z. (2024). Natural language processing and machine learning applications for assessment and evaluation in education: Opportunities and new approaches. *Journal of Measurement and Evaluation in Education and Psychology*, 15(4), 421–445. <https://doi.org/10.21031/epod.1551568>
- Zhai, X., Chu, X., Chai, C. S., Jong, M. S.-Y., Istenic, A., & Spector, J. M. (2021). A review of artificial intelligence (AI) in education from 2010 to 2020. *Complexity*, 2021, 8812542. <https://doi.org/10.1155/2021/8812542>
- Zainal Abidin, M. S., Mokhtar, M., & Arsat, M. (2023). School leaders' challenges in education for sustainable development: A scoping review. *International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development*, 12(1), 401–420. <https://doi.org/10.6007/IJARPED/v12-i1/15922>