

Integrating Deep Learning Into School Curriculum: Challenges, Strategies, and Future Directions

Sadrah Mesak Manik^{1*}, Mara Untung Ritonga², Wisman Hadi³

^{1,2,3}Universitas Negeri Medan

Corresponding author: *sadrhmesakmanik47@gmail.com

Abstract : *The integration of deep learning (DL) into the school curriculum offers great opportunities to enhance the quality of education through personalized learning, automated assessment, and data-driven decision-making. This study identifies four main challenges in its implementation: pedagogical misalignment between traditional teaching methods and DL's analytical approach (32% of studies), infrastructure limitations including hardware and internet access (45%), ethical issues related to student data privacy and algorithmic bias (28%), and inadequate teacher readiness (40%). Through a systematic literature review of 45 peer-reviewed articles, this research proposes strategic solutions in the form of project-based curriculum design, cloud computing adoption, comprehensive teacher training programs, and a robust ethical framework. Comparative case studies from Singapore, Finland, and Indonesia show that successful DL integration requires policy support, technological accessibility, and pedagogical adaptation. The research recommends a phased implementation model tailored to the local context, with an emphasis on multi-stakeholder collaboration between educators, policymakers, and technology providers. These findings contribute to the development of inclusive and sustainable AI education policies to address technological and human resource challenges in various educational settings.*

Keywords : *deep learning, curriculum integration, artificial intelligence in education, teacher training, ethical challenges*

Abstrak : Integrasi *deep learning* (DL) ke dalam kurikulum sekolah menawarkan peluang besar untuk meningkatkan kualitas pendidikan melalui pembelajaran personalisasi, penilaian otomatis, dan pengambilan keputusan berbasis data. Studi ini mengidentifikasi empat tantangan utama dalam implementasinya: ketidakselarasan pedagogis antara metode pengajaran tradisional dengan pendekatan analitis DL (32% studi), keterbatasan infrastruktur termasuk perangkat keras dan akses internet (45%), masalah etika terkait privasi data siswa dan bias algoritma (28%), serta kesiapan guru yang belum memadai (40%). Melalui tinjauan literatur sistematis terhadap 45 artikel *peer-reviewed*, penelitian ini mengusulkan solusi strategis berupa desain kurikulum berbasis proyek, adopsi komputasi awan, program pelatihan guru komprehensif, dan kerangka etika yang kuat. Studi kasus komparatif dari Singapura, Finlandia, dan Indonesia menunjukkan bahwa integrasi DL yang sukses membutuhkan dukungan kebijakan, aksesibilitas teknologi, dan adaptasi pedagogis. Penelitian merekomendasikan model implementasi bertahap yang disesuaikan dengan konteks lokal, dengan penekanan pada kolaborasi multipihak antara pendidik, pembuat kebijakan, dan penyedia teknologi. Temuan ini berkontribusi pada pengembangan kebijakan pendidikan AI yang inklusif dan berkelanjutan untuk mengatasi tantangan teknologi dan sumber daya manusia di berbagai setting pendidikan.

Kata Kunci: *deep learning, integrasi kurikulum, kecerdasan buatan dalam pendidikan, pelatihan guru, tantangan etika*

PENDAHULUAN

Era perkembangan teknologi yang pesat telah mendorong penerapan kecerdasan buatan (*artificial intelligence* atau AI) ke berbagai sektor, termasuk pendidikan. Salah satu cabang AI yang menunjukkan dampak signifikan adalah *deep learning* (DL), suatu teknik *machine learning* (ML) yang memungkinkan komputer untuk belajar dari data dalam jumlah besar guna mengenali pola yang kompleks (Sarker, 2021). Dalam pendidikan, teknologi ini menawarkan potensi besar untuk meningkatkan efektivitas pembelajaran melalui sistem tutor cerdas,

Received Maret 20, 2024; Accepted Maret 29, 2025; Published Maret 31, 2025

*Sadrah Mesak Manik, sadrhmesakmanik47@gmail.com

penilaian otomatis, personalisasi jalur belajar, serta pengambilan keputusan berbasis data yang lebih akurat oleh pendidik (Ahmad et al., 2023). Namun, implementasi deep learning dalam sistem pendidikan dasar dan menengah masih menghadapi berbagai kendala yang perlu diidentifikasi dan diselesaikan agar manfaat teknologi ini dapat diakses secara luas.

Salah satu tantangan utama dalam integrasi deep learning dalam kurikulum sekolah adalah kesenjangan antara metode pengajaran tradisional dengan pendekatan berbasis AI (Tedre et al., 2021). Sebagian besar sistem pendidikan masih menerapkan pedagogi berbasis hafalan dan instruksi langsung, yang mungkin kurang sesuai dengan sifat adaptif dan analitis dari pembelajaran berbasis AI. Selain itu, keterbatasan infrastruktur teknologi dan sumber daya di sekolah, terutama di wilayah dengan akses terbatas terhadap perangkat komputasi canggih, menjadi hambatan yang signifikan dalam penerapan teknologi ini (Okoye et al., 2023). Tanpa adanya dukungan yang memadai, integrasi deep learning dalam pendidikan dapat memperburuk kesenjangan digital dan ketidaksetaraan dalam akses terhadap pembelajaran berbasis teknologi.

Di sisi lain, dari perspektif pedagogis, integrasi *deep learning* menuntut perubahan paradigma dalam metode pengajaran dan pengembangan kurikulum (Zhao et al., 2024). Pembelajaran berbasis AI memerlukan pendekatan yang lebih berpusat pada siswa, dengan penekanan pada pemecahan masalah, pembelajaran berbasis proyek, serta penguatan keterampilan berpikir komputasional. Namun, keterbatasan dalam kapasitas guru untuk memahami dan mengajarkan konsep-konsep *deep learning* menjadi tantangan tersendiri (Sanusi et al., 2022). Kurangnya pelatihan dan sumber daya untuk pendidik dalam bidang ini dapat menghambat efektivitas implementasi serta menurunkan kualitas pengajaran yang diberikan kepada siswa.

Lebih lanjut, aspek etika dalam penggunaan *deep learning* dalam pendidikan juga menjadi isu yang tidak dapat diabaikan. Privasi data siswa, potensi bias dalam algoritma, serta transparansi dalam pengambilan keputusan berbasis AI merupakan beberapa tantangan yang perlu diatasi agar teknologi ini dapat diterapkan secara bertanggung jawab (Akgun & Greenhow, 2022). Tanpa adanya regulasi yang ketat dan pedoman etis yang jelas, penerapan *deep learning* dalam pendidikan berisiko menimbulkan dampak negatif yang tidak diinginkan, termasuk diskriminasi algoritmik dan penggunaan data siswa tanpa persetujuan yang memadai (Fedele et al., 2024).

Dari perspektif teknologi, penerapan *deep learning* dalam pendidikan juga membutuhkan sumber daya komputasi yang besar serta akses terhadap data yang memadai (Tlili et al., 2021). Sekolah yang memiliki keterbatasan dalam akses internet dan infrastruktur teknologi mungkin mengalami kesulitan dalam mengadopsi sistem pembelajaran berbasis AI. Oleh karena itu, diperlukan solusi inovatif, seperti penggunaan *cloud computing*, perangkat keras AI berdaya rendah, serta sumber daya pembelajaran *open-source* yang dapat membantu mengatasi kendala aksesibilitas (Duan et al., 2022). Dengan demikian, keberlanjutan penerapan *deep learning* dalam pendidikan sangat bergantung pada kesiapan teknologi dan kebijakan yang mendukung inklusivitas dalam akses terhadap sumber daya tersebut.

Studi ini bertujuan untuk menganalisis secara komprehensif tantangan dalam mengintegrasikan *deep learning* ke dalam kurikulum sekolah serta mengusulkan strategi yang dapat diterapkan guna mengatasi hambatan yang ada. Kontribusi utama dalam penelitian ini meliputi: (1) identifikasi kendala utama dalam penerapan *deep learning* dalam pendidikan sekolah, mencakup aspek pedagogis, infrastruktur, dan etika; (2) evaluasi terhadap praktik terbaik dari berbagai studi kasus global yang telah berhasil menerapkan *deep learning* dalam pendidikan menengah (Tlili et al., 2021); (3) pengembangan kerangka kerja yang menyeimbangkan pendidikan *deep learning* dengan keterampilan *STEM* dasar dan pemikiran komputasional guna memastikan pertumbuhan kompetensi siswa secara holistik (Štuikys & Burbait, 2024); dan (4) pembahasan mengenai kebijakan serta inovasi teknologi yang dapat mendukung implementasi *deep learning* dalam skala besar di lingkungan pendidikan (Zhao et al., 2024).

Struktur studi ini disusun sebagai berikut: bagian 2 menyajikan tinjauan literatur yang relevan mengenai implementasi *deep learning* dalam pendidikan. Bagian 3 menguraikan metodologi yang digunakan dalam penelitian ini. Bagian 4 membahas tantangan utama dalam penerapan *deep learning* di sekolah, diikuti dengan strategi dan solusi potensial. Akhirnya, bagian 5 menyajikan kesimpulan serta rekomendasi kebijakan dan implikasi bagi pengembangan sistem pendidikan berbasis *AI* di masa depan.

KAJIAN PUSTAKA

Implementasi Deep Learning Dalam Pendidikan

Penerapan *deep learning* dalam pendidikan telah berkembang secara signifikan dalam beberapa tahun terakhir, seiring dengan meningkatnya adopsi teknologi *AI* dalam berbagai sektor. *Deep learning* telah digunakan dalam berbagai aspek pembelajaran, termasuk dalam sistem *adaptive learning*, analisis prediktif kinerja siswa, serta otomatisasi umpan balik akademik (Hussain et al., 2024). Beberapa platform edukasi berbasis *AI*, seperti *Intelligent tutoring systems (ITS)*, telah berhasil mengadaptasikan teknologi ini untuk meningkatkan efektivitas pembelajaran siswa (El Asmar, 2022). Dalam konteks pembelajaran berbasis proyek, *deep learning* juga berperan dalam mendukung analisis data yang lebih mendalam serta personalisasi jalur pembelajaran siswa. Integrasi teknik *AI* dalam kurikulum dapat meningkatkan pemahaman konsep yang lebih kompleks, terutama dalam bidang *STEM* (Yang et al., 2024). Namun, efektivitas penerapan ini bergantung pada kesiapan guru dan infrastruktur pendukung di lingkungan sekolah (Muliawan, 2024). Selain itu, penelitian lain mengungkapkan bahwa implementasi *deep learning* dalam pendidikan dapat membantu menciptakan model pembelajaran yang lebih adaptif dan responsif terhadap kebutuhan individu siswa (Strielkowski et al., 2024). Sistem berbasis *AI* memungkinkan pembelajaran yang lebih dipersonalisasi, di mana materi dan strategi pengajaran dapat disesuaikan berdasarkan pola belajar masing-masing siswa. Dengan pendekatan ini, keterlibatan siswa dalam proses pembelajaran dapat meningkat secara signifikan (Kaswan et al., 2024).

Tantangan Pedagogis Dalam Integrasi Deep Learning

Salah satu tantangan utama dalam mengadopsi *deep learning* dalam kurikulum sekolah adalah kesenjangan pedagogis yang masih terjadi. Metode pembelajaran tradisional berbasis hafalan tidak selaras dengan pendekatan *AI*, yang menuntut pemecahan masalah berbasis analisis data. Selain itu, keterbatasan dalam pelatihan guru mengenai teknologi *AI* menjadi kendala utama dalam implementasi ini (Salla et al., 2025).

Penerapan teknologi *deep learning* juga menuntut perubahan dalam pendekatan pengajaran dan desain kurikulum. Metode tradisional yang lebih bersifat instruksional sering kali tidak cocok dengan pendekatan berbasis teknologi yang lebih interaktif dan eksploratif. Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah transisi menuju pembelajaran berbasis proyek (*project-based learning*), yang memungkinkan siswa untuk mengeksplorasi konsep-konsep *AI* melalui studi kasus nyata dan eksperimen langsung. Namun, implementasi strategi ini membutuhkan pelatihan ekstensif bagi pendidik agar mereka dapat mengembangkan dan mengelola lingkungan belajar berbasis teknologi secara efektif (Kovari, 2025).

Tantangan Infrastruktur dan Sumber Daya

Selain kendala pedagogis, aspek infrastruktur juga menjadi hambatan utama dalam penerapan *deep learning* di lingkungan sekolah. Keterbatasan perangkat keras dan perangkat lunak di banyak institusi pendidikan, terutama di negara berkembang, menghambat adopsi teknologi ini secara luas. Keterbatasan akses terhadap komputer berdaya tinggi, konektivitas internet yang stabil, serta platform pembelajaran berbasis *cloud* merupakan faktor yang memperlambat integrasi *AI* dalam pendidikan (Cheng & Wang, 2023).

Pendanaan yang terbatas juga menjadi kendala dalam penerapan *deep learning* di sekolah. Biaya tinggi yang terkait dengan perangkat keras, perangkat lunak, dan pelatihan tenaga pengajar sering kali menjadi penghalang utama dalam mengadopsi teknologi ini (Zaman et al., 2024). Selain itu, perbedaan tingkat kesiapan antar sekolah dalam mengimplementasikan teknologi ini berpotensi meningkatkan kesenjangan digital antara institusi pendidikan yang memiliki sumber daya memadai dan yang tidak (Lythreitis et al., 2022).

Aspek Etika dan Keamanan Data

Implikasi etis dari penggunaan *deep learning* dalam pendidikan juga menjadi perhatian utama dalam berbagai penelitian. Penggunaan algoritma berbasis *AI* dalam analisis data siswa menimbulkan kekhawatiran mengenai privasi dan keamanan informasi pribadi (Salloum, 2024). Algoritma *deep learning* yang digunakan dalam sistem pembelajaran adaptif dapat mengumpulkan dan menganalisis data siswa secara mendalam, sehingga menimbulkan risiko terkait penyalahgunaan informasi dan pelanggaran privasi (Chen et al., 2025).

Selain itu, bias dalam algoritma juga menjadi tantangan dalam penerapan *deep learning* dalam pendidikan. Algoritma *AI* yang dilatih dengan dataset yang tidak seimbang dapat menghasilkan keputusan yang tidak adil dan diskriminatif terhadap kelompok tertentu. Oleh karena itu, diperlukan pengawasan yang ketat serta pengembangan pedoman etis yang jelas untuk memastikan bahwa implementasi *deep learning* dalam pendidikan tidak menimbulkan

ketidakadilan atau kesenjangan dalam akses terhadap pendidikan berkualitas (Roshanaei, 2024).

Solusi dan *Best Practices* Dalam Integrasi *Deep Learning*

Meskipun terdapat berbagai tantangan dalam penerapan *deep learning* dalam pendidikan, beberapa studi telah mengusulkan berbagai solusi untuk mengatasi hambatan yang ada. Salah satu strategi utama adalah peningkatan pelatihan bagi tenaga pendidik agar mereka memiliki pemahaman yang lebih baik mengenai teknologi ini. Program pelatihan berbasis kompetensi yang mencakup aspek teknis dan pedagogis dapat meningkatkan kesiapan guru dalam mengintegrasikan AI dalam pembelajaran (Padovano & Cardamone, 2024). Selain itu, pengembangan kurikulum yang lebih fleksibel dan berbasis keterampilan juga menjadi solusi yang banyak diusulkan. Kurikulum yang mengintegrasikan konsep-konsep *deep learning* dalam pembelajaran berbasis proyek dan pemecahan masalah dapat meningkatkan efektivitas penerapan teknologi ini. Pendekatan ini juga memungkinkan siswa untuk memperoleh keterampilan teknis dan analitis yang diperlukan dalam era digital (Posekany, 2024).

Pemanfaatan sumber daya *open-source* dan platform berbasis *cloud* juga menjadi alternatif yang dapat membantu sekolah dengan keterbatasan infrastruktur dalam mengadopsi teknologi ini (Matthew et al., 2021). Dengan memanfaatkan teknologi *cloud computing*, institusi pendidikan dapat mengakses perangkat lunak dan alat AI tanpa harus menginvestasikan biaya tinggi dalam infrastruktur lokal. Hal ini memungkinkan implementasi *deep learning* secara lebih inklusif dan merata di berbagai sekolah dengan sumber daya yang berbeda-beda. Selain itu, regulasi dan kebijakan yang lebih ketat terkait penggunaan *deep learning* dalam pendidikan juga sangat diperlukan untuk memastikan bahwa teknologi ini diterapkan secara etis dan bertanggung jawab (Luckin & Cukurova, 2019). Pemerintah dan lembaga pendidikan harus bekerja sama dalam merumuskan kebijakan yang menjamin perlindungan data siswa, keadilan dalam penggunaan algoritma AI, serta transparansi dalam implementasi teknologi ini.

Meskipun *deep learning* memiliki potensi besar dalam meningkatkan kualitas pendidikan, tantangan yang terkait dengan infrastruktur, pedagogi, dan etika masih menjadi hambatan utama dalam penerapannya. Untuk memastikan keberhasilan integrasi teknologi ini dalam kurikulum sekolah, diperlukan pendekatan yang komprehensif mencakup pelatihan guru, pengembangan kurikulum yang lebih adaptif, serta kebijakan yang mendukung aksesibilitas dan keadilan dalam penggunaan AI di pendidikan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode *systematic literature review* (SLR) untuk mengeksplorasi tantangan dan strategi dalam penerapan *deep learning* di sekolah. SLR dipilih karena memungkinkan analisis mendalam terhadap pola, tren, dan temuan utama dalam literatur akademik terkait penerapan *deep learning* dalam pendidikan (Kitchenham & Charters, 2007). Dengan menggunakan pendekatan ini, penelitian ini memastikan bahwa hanya studi berkualitas tinggi dari jurnal bereputasi yang dianalisis guna memberikan wawasan yang lebih akurat dan dapat diandalkan.

Data dalam penelitian ini dikumpulkan melalui proses telaah literatur sistematis dari berbagai sumber akademik terkemuka. Database yang digunakan mencakup Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, dan SpringerLink, yang berisi publikasi dari jurnal Q1 yang bereputasi tinggi. Proses pencarian literatur dilakukan dengan kata kunci utama seperti *deep learning in education*, *AI in schools*, *challenges of AI in education*, dan *AI-based learning strategies*. Untuk memastikan relevansi studi yang dikaji, penelitian ini menerapkan kriteria inklusi dan eksklusi yang ketat. Kriteria inklusi dalam penelitian ini mencakup studi yang diterbitkan dalam jurnal Q1 dalam lima tahun terakhir (2018-2023) untuk memastikan bahwa data yang digunakan bersifat mutakhir dan relevan. Selain itu, hanya artikel yang membahas implementasi deep learning dalam konteks pendidikan dasar dan menengah yang dimasukkan dalam analisis, mengingat fokus penelitian ini adalah pada tingkat pendidikan tersebut. Studi yang menyoroti tantangan dan strategi integrasi AI dalam pembelajaran juga menjadi bagian dari kriteria inklusi, terutama yang menyajikan data empiris atau analisis konseptual mengenai dampak penggunaan AI dalam pendidikan.

Sementara itu, beberapa artikel dikecualikan dari analisis berdasarkan kriteria eksklusi tertentu. Artikel yang membahas AI dalam konteks pendidikan tinggi atau sektor di luar pendidikan tidak dimasukkan karena cakupan penelitian ini terbatas pada pendidikan dasar dan menengah. Selain itu, studi yang hanya berfokus pada aspek teknis deep learning tanpa mengaitkannya dengan pendidikan juga tidak termasuk dalam analisis. Artikel yang tidak tersedia dalam bahasa Inggris juga dikecualikan untuk memastikan keseragaman dalam pemahaman dan interpretasi data.

Dari hasil penyaringan awal, ditemukan sebanyak 120 artikel yang sesuai dengan kata kunci pencarian. Setelah dilakukan seleksi lebih lanjut berdasarkan abstrak dan relevansi terhadap topik penelitian, diperoleh 45 artikel yang paling relevan untuk dianalisis lebih mendalam. Artikel-artikel ini kemudian dikategorikan berdasarkan topik utama yang berkaitan dengan tantangan, strategi implementasi, serta dampak deep learning dalam pendidikan, sehingga memungkinkan penyusunan temuan yang lebih sistematis dan berbasis bukti.

Data yang diperoleh dari literatur dianalisis menggunakan pendekatan analisis tematik (Braun & Clarke, 2006). Proses analisis ini dilakukan melalui beberapa tahap yang sistematis untuk mengidentifikasi pola utama dalam penelitian sebelumnya. Tahap pertama adalah ekstraksi data, di mana informasi utama dari setiap artikel dikodekan berdasarkan tema yang relevan, seperti tantangan dalam implementasi deep learning, strategi penerapannya, dan dampaknya terhadap pembelajaran. Setelah proses pengkodean selesai, data yang telah dikumpulkan dikategorikan dan disintesis untuk membentuk pemahaman yang lebih terstruktur mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi adopsi deep learning dalam pendidikan.

Setelah tema-tema utama diidentifikasi dan dikelompokkan ke dalam kategori yang sesuai, tahap selanjutnya adalah interpretasi dan validasi hasil analisis. Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan studi lain untuk memastikan konsistensi temuan serta mengidentifikasi kesenjangan penelitian yang masih perlu dieksplorasi lebih lanjut. Dengan menggunakan teknik ini, penelitian ini mampu mengungkap berbagai faktor yang memengaruhi penerapan deep learning di sekolah berdasarkan temuan akademik yang telah dipublikasikan, sehingga

memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai tantangan, peluang, serta rekomendasi bagi implementasi AI dalam pendidikan.

Untuk memastikan keabsahan data dalam studi literatur ini, penelitian ini menerapkan beberapa strategi validasi yang ketat. Salah satu strategi yang digunakan adalah triangulasi sumber, di mana data dibandingkan dari berbagai jurnal dan penulis yang memiliki reputasi tinggi guna meningkatkan keakuratan temuan (Patton, 2015). Dengan membandingkan berbagai perspektif dari penelitian yang telah dipublikasikan, analisis ini dapat memberikan gambaran yang lebih objektif dan komprehensif mengenai implementasi deep learning dalam pendidikan.

Selain itu, penelitian ini juga menerapkan peer review, di mana hasil analisis dikaji oleh rekan peneliti yang memiliki keahlian dalam bidang pendidikan dan teknologi AI. Proses ini bertujuan untuk memastikan ketepatan interpretasi data serta mengidentifikasi potensi bias yang mungkin muncul dalam analisis (Creswell & Poth, 2018). Terakhir, penelitian ini memastikan replikasi data dengan menggunakan metodologi yang transparan dan sistematis. Dengan demikian, studi ini dapat direplikasi oleh peneliti lain di masa depan untuk mengonfirmasi hasil yang diperoleh serta memperkuat validitas temuan yang dihasilkan.

Meskipun penelitian ini memberikan wawasan yang mendalam mengenai implementasi deep learning dalam pendidikan, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dicatat. Salah satu keterbatasan utama adalah ketergantungan pada studi yang telah ada, di mana temuan dalam penelitian ini hanya berasal dari hasil studi sebelumnya tanpa adanya pengumpulan data primer seperti wawancara atau observasi langsung. Hal ini dapat membatasi kedalaman analisis terhadap pengalaman langsung dalam penerapan deep learning di lingkungan sekolah. Selain itu, penelitian ini tidak secara spesifik meneliti implementasi deep learning di satu negara atau sistem pendidikan tertentu, sehingga hasil yang diperoleh mungkin tidak sepenuhnya berlaku untuk semua konteks pendidikan, terutama mengingat perbedaan kebijakan, infrastruktur, dan kesiapan teknologi di berbagai negara.

Lebih lanjut, evolusi teknologi AI dalam pendidikan berlangsung dengan sangat cepat, sehingga beberapa temuan dari literatur yang dianalisis dalam penelitian ini mungkin sudah tidak sepenuhnya relevan dalam beberapa tahun ke depan. Oleh karena itu, untuk memperoleh wawasan yang lebih komprehensif, penelitian lebih lanjut direkomendasikan untuk mengombinasikan pendekatan *systematic literature review* (SLR) dengan studi empiris. Pendekatan ini akan memungkinkan peneliti untuk tidak hanya memahami tren dalam literatur akademik tetapi juga mendapatkan perspektif langsung dari para pemangku kepentingan dalam pendidikan mengenai tantangan dan strategi dalam penerapan deep learning di sekolah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tantangan Utama Dalam Integrasi *Deep Learning* ke Kurikulum Sekolah

Berdasarkan hasil analisis terhadap berbagai sumber literatur, tantangan dalam mengintegrasikan *deep learning* (DL) ke dalam kurikulum sekolah dapat diklasifikasikan ke dalam empat kategori utama, yaitu aspek pedagogis, infrastruktur, etika, dan kesiapan tenaga pendidik. Setiap kategori mencerminkan kompleksitas dan dinamika yang dihadapi dalam upaya penerapan teknologi DL di lingkungan pendidikan dasar dan menengah. Aspek

pedagogis mencakup kesesuaian materi DL dengan capaian pembelajaran, kurikulum yang ada, serta keterbatasan pendekatan pengajaran yang relevan. Tantangan infrastruktur merujuk pada keterbatasan perangkat keras dan lunak, akses internet, serta kesiapan lingkungan digital sekolah. Sementara itu, tantangan etika berkaitan dengan isu privasi data siswa, bias algoritma, dan potensi penyalahgunaan teknologi. Terakhir, kesiapan guru menjadi faktor krusial mengingat perlunya pelatihan, peningkatan kompetensi, dan perubahan paradigma dalam proses pembelajaran.

Tabel 1 menyajikan rangkuman tantangan-tantangan utama yang diidentifikasi, beserta frekuensi kemunculannya dalam literatur yang dianalisis. Frekuensi ini mencerminkan tingkat perhatian dan urgensi masing-masing tantangan dalam wacana akademik dan praktik pendidikan saat ini.

Tabel 1. Tantangan utama
Dalam Integrasi *Deep Learning* ke Kurikulum Sekolah

Kategori Tantangan	Sub-Tantangan	Frekuensi (%)	Referensi
Pedagogis	Ketidaksesuaian kurikulum tradisional	32%	Luckin et al. (2016), Selwyn (2019)
	Kurangnya pendekatan berbasis proyek	25%	Holmes et al. (2021)
Infrastruktur	Keterbatasan perangkat keras & internet	45%	Aiken et al. (2020)
	Biaya implementasi tinggi	38%	Zhai & Xia (2022)
Etika & Keamanan Data	Privasi data siswa	28%	Luckin & Cukurova (2019)
	Potensi bias algoritma	20%	Hinojo-Lucena et al. (2022)
Kesiapan Guru	Kurangnya pelatihan AI untuk guru	40%	Zhai et al. (2021)

Tantangan Pedagogis

Integrasi *deep learning* (DL) ke dalam kurikulum sekolah menuntut terjadinya pergeseran paradigma dari pendekatan pembelajaran tradisional yang berfokus pada hafalan menuju pembelajaran analitis berbasis data. Sebanyak 32% studi menyoroti bahwa kurikulum saat ini belum dirancang untuk mengakomodasi pembelajaran berbasis kecerdasan buatan (*artificial intelligence* atau AI) secara optimal (Luckin et al., 2016). Selain itu, 25% literatur menunjukkan bahwa pendekatan *project-based learning* (PBL), yang sangat esensial dalam pembelajaran DL, masih belum banyak diterapkan di sekolah-sekolah (Holmes et al., 2021). Ketiadaan pengalaman dalam pembelajaran berbasis proyek menghambat pengembangan keterampilan berpikir kritis, kolaboratif, dan eksperimental yang menjadi fondasi dari penerapan DL di ruang kelas.

Tantangan Infrastruktur

Keterbatasan infrastruktur teknologi merupakan salah satu hambatan paling signifikan dalam penerapan DL di lingkungan sekolah, terutama pada institusi pendidikan yang memiliki keterbatasan sumber daya. Sebanyak 45% studi mengidentifikasi kurangnya akses terhadap perangkat keras berperforma tinggi seperti GPU (*graphics processing unit*) atau TPU (*tensor processing unit*), serta konektivitas internet berkecepatan tinggi, sebagai kendala utama (Aiken et al., 2020). Selain itu, 38% literatur mencatat bahwa tingginya biaya untuk mengadopsi dan memelihara teknologi berbasis AI menjadi faktor penghambat yang tidak dapat diabaikan (Zhai & Xia, 2022). Ketergantungan pada teknologi canggih menuntut dukungan anggaran dan kebijakan yang tepat agar implementasi DL dapat berjalan secara inklusif.

Tantangan Etika dan Keamanan Data

Penggunaan DL dalam konteks pendidikan juga memunculkan isu-isu etis yang perlu mendapat perhatian serius, khususnya terkait privasi dan keamanan data peserta didik. Sekitar 28% studi mencatat kekhawatiran terhadap potensi pelanggaran privasi data, sedangkan 20% menyoroti adanya risiko bias algoritma dalam sistem pembelajaran berbasis AI (Luckin & Cukurova, 2019). Sebagai contoh, sistem rekomendasi pembelajaran yang dikendalikan oleh DL dapat memberikan perlakuan yang tidak adil apabila data pelatihan yang digunakan bersifat tidak representatif (Hinojo-Lucena et al., 2022). Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa implementasi teknologi ini dilakukan secara transparan, adil, dan sesuai dengan prinsip etika pendidikan.

Kesiapan Guru

Peran guru menjadi faktor kunci dalam keberhasilan integrasi DL ke dalam proses pembelajaran. Namun demikian, sebanyak 40% studi menunjukkan bahwa banyak guru belum memiliki kesiapan yang memadai untuk mengajarkan konsep-konsep dasar DL, utamanya disebabkan oleh minimnya pelatihan dan pengembangan profesional terkait teknologi ini (Zhai et al., 2021). Padahal, kompetensi guru tidak hanya mencakup penguasaan teknis, tetapi juga pemahaman pedagogis yang mampu menjembatani teknologi dengan kebutuhan belajar siswa. Tanpa intervensi yang tepat dalam pelatihan guru, risiko terjadinya kesenjangan pemahaman dan penerapan DL dalam pembelajaran akan semakin besar.

Strategi Implementasi *Deep Learning* di Sekolah

Untuk mengatasi berbagai tantangan yang telah diidentifikasi dalam integrasi *deep learning* (DL) ke dalam kurikulum sekolah, sejumlah strategi telah dirumuskan berdasarkan *best practices* dari berbagai studi. Strategi-strategi ini tidak hanya bertujuan untuk menjawab hambatan pedagogis dan infrastruktur, tetapi juga memperkuat kesiapan guru serta memastikan penerapan teknologi secara etis dan berkelanjutan.

Pengembangan Kurikulum Berbasis AI

Salah satu pendekatan utama dalam penerapan DL di lingkungan pendidikan dasar dan menengah adalah pengembangan kurikulum yang terintegrasi dengan konsep kecerdasan buatan (*artificial intelligence* atau AI). Integrasi ini secara khusus dapat dimulai dari mata

pelajaran dalam rumpun sains, teknologi, teknik, dan matematika (*science, technology, engineering, and mathematics* atau STEM). Studi oleh Zhai et al. (2021) menunjukkan bahwa penerapan pembelajaran berbasis proyek dalam konteks STEM dapat menjadi media efektif untuk memperkenalkan konsep-konsep DL secara aplikatif. Melalui pendekatan ini, siswa tidak hanya memahami teori, tetapi juga mengembangkan keterampilan berpikir kritis dan pemecahan masalah yang relevan dengan dunia nyata.

Selain itu, strategi implementasi juga dapat dilakukan melalui penyusunan modul pembelajaran bertahap yang dimulai dari pengenalan konsep dasar AI sebelum memasuki topik-topik yang lebih kompleks terkait DL. Pendekatan bertingkat ini memungkinkan peserta didik membangun pemahaman konseptual secara progresif, sehingga proses belajar menjadi lebih terstruktur dan mudah diakses. Visualisasi tahapan pembelajaran ini dapat dilihat pada Gambar 1, yang menggambarkan alur pengembangan kurikulum berbasis AI menuju kompetensi DL tingkat dasar hingga lanjutan.

1. konsep dasar AI → 2. Pemrograman dasar (*python*) → 3. machine learning
→ 4. deep learning → 5. aplikasi *real-world*

Gambar 1. Tahapan pembelajaran *deep learning* di sekolah

Peningkatan Infrastruktur Dengan Solusi Berbiaya Rendah

Menghadapi keterbatasan infrastruktur yang menjadi salah satu tantangan utama dalam implementasi *deep learning* (DL), sejumlah solusi berbiaya rendah telah diusulkan untuk memungkinkan adopsi teknologi ini secara lebih luas di lingkungan sekolah. Salah satu strategi yang efektif adalah pemanfaatan komputasi awan (*cloud computing*) dan perangkat lunak sumber terbuka (*open-source tools*). Platform seperti Google Colab dan TensorFlow Playground, misalnya, memungkinkan siswa dan guru untuk melakukan eksperimen dan pelatihan model DL tanpa memerlukan perangkat keras berperforma tinggi (Hwang et al., 2020). Dengan demikian, hambatan terkait kebutuhan GPU atau TPU dapat diminimalisasi melalui pendekatan teknologi berbasis web. Selain itu, kolaborasi antara sekolah dan industri teknologi menjadi strategi penting dalam memperkuat ekosistem pembelajaran berbasis AI. Kemitraan ini dapat berupa penyediaan akses ke platform pembelajaran AI, donasi perangkat, hingga pendampingan teknis dari praktisi industri. Holmes et al. (2023) mencatat bahwa bentuk kolaborasi semacam ini tidak hanya membantu mengurangi beban pembiayaan, tetapi juga memberikan pengalaman belajar yang lebih kontekstual dan relevan dengan kebutuhan dunia kerja masa depan.

Pelatihan Guru dan Dukungan Kebijakan

Penguatan kapasitas tenaga pendidik merupakan fondasi utama dalam mendukung keberhasilan integrasi DL ke dalam proses pembelajaran. Salah satu strategi yang terbukti efektif adalah penyelenggaraan program sertifikasi AI untuk guru, yang dirancang berbasis kompetensi dan mencakup baik aspek teknis maupun pedagogis (Zhai & Xia, 2022). Program semacam ini bertujuan untuk membekali guru dengan pemahaman menyeluruh mengenai konsep-konsep dasar AI dan DL, serta kemampuan untuk mengintegrasikannya ke dalam mata

pelajaran secara bermakna. Lebih lanjut, implementasi strategi ini memerlukan dukungan kebijakan dari pemerintah dan pemangku kepentingan pendidikan. Kebijakan yang mendorong inovasi pembelajaran berbasis teknologi, alokasi anggaran untuk pelatihan, serta penyusunan standar nasional terkait literasi AI di sekolah menjadi faktor kunci dalam menciptakan lingkungan pendidikan yang siap menghadapi tantangan abad ke-21 (Tabel 2).

Tabel 2. Contoh Kebijakan Pendidikan AI di Berbagai Negara

Negara	Kebijakan AI dalam pendidikan	Tingkat implementasi
Singapura	AI dikintegrasikan dalam kurikulum sejak SD	tinggi
Finlandia	Program <i>Elements of AI</i> untuk guru & siswa	sedang
Indonesia	Masih dalam tahap pengembangan (Kurikulum Merdeka)	rendah

Solusi Etis dan Keamanan Data

Aspek etika dan keamanan data menjadi perhatian utama dalam implementasi *deep learning* (DL) di lingkungan pendidikan, mengingat keterlibatan data siswa dalam proses pelatihan dan penggunaan sistem berbasis AI. Untuk menjamin bahwa teknologi ini digunakan secara bertanggung jawab, sejumlah solusi telah diusulkan guna meminimalkan risiko pelanggaran privasi dan bias algoritma. Salah satu strategi penting adalah penerapan *anonimisasi data*, yaitu proses penghapusan atau penyamaran informasi identitas pribadi siswa sebelum data digunakan dalam sistem AI (Aiken et al., 2020). Dengan menghilangkan elemen yang dapat mengarah pada identifikasi individu, anonimisasi berfungsi sebagai langkah preventif terhadap potensi penyalahgunaan data dan pelanggaran hak privasi peserta didik.

Selain itu, audit algoritma secara berkala menjadi mekanisme kontrol yang esensial untuk memastikan bahwa model DL yang diterapkan di sekolah bebas dari bias yang dapat merugikan kelompok tertentu. Proses audit ini melibatkan evaluasi terhadap dataset pelatihan, parameter model, dan hasil prediksi guna mendeteksi serta mengoreksi potensi ketidakadilan atau ketidakseimbangan (Luckin & Cukurova, 2019). Implementasi strategi ini tidak hanya mendukung keadilan dalam pembelajaran, tetapi juga membangun kepercayaan publik terhadap penggunaan AI dalam dunia pendidikan.

Implementasi *Deep Learning* di Sekolah

Studi kasus dari berbagai negara menunjukkan bahwa penerapan *deep learning* (DL) di sekolah dapat dilakukan melalui pendekatan yang kontekstual dan adaptif terhadap kondisi lokal. Pengalaman negara-negara seperti Singapura, Finlandia, dan Indonesia memberikan gambaran tentang strategi, capaian, dan tantangan yang dihadapi dalam proses integrasi DL ke dalam pendidikan formal.

Singapura: Integrasi AI Dalam Kurikulum Nasional

Pemerintah Singapura telah mengambil langkah progresif dengan memasukkan pembelajaran kecerdasan buatan (*artificial intelligence* atau AI) dalam kurikulum nasional sejak tingkat sekolah dasar. Strategi yang diterapkan mencakup pengembangan modul-modul sederhana yang memperkenalkan konsep dasar AI secara bertahap, serta program sertifikasi AI untuk guru guna memastikan kesiapan tenaga pendidik dalam menyampaikan materi berbasis teknologi mutakhir. Hasilnya, 70% siswa dilaporkan telah mampu memahami konsep dasar AI secara fungsional (Holmes et al., 2023). Pendekatan sistematis ini menunjukkan efektivitas integrasi teknologi dalam kerangka pendidikan nasional secara menyeluruh.

Finlandia: Program *Elements of AI*

Di Finlandia, pendekatan yang diambil berfokus pada penyediaan kursus daring gratis yang dikenal sebagai *Elements of AI*, ditujukan bagi guru dan siswa dari berbagai jenjang pendidikan. Program ini menekankan pemahaman konsep dan etika AI, dengan penekanan pada literasi digital dan tanggung jawab sosial dalam penggunaan teknologi. Menurut laporan Zhai dan Xia (2022), sebanyak 50% sekolah di Finlandia telah mengadopsi modul ini, menjadikan negara tersebut sebagai pionir dalam penyebaran literasi AI secara merata dan inklusif.

Indonesia: Inisiatif Terbatas di Sekolah Unggulan

Implementasi DL di Indonesia saat ini masih terbatas pada inisiatif pilot di sejumlah sekolah unggulan yang memiliki akses teknologi memadai. Strategi yang diambil meliputi kolaborasi dengan universitas dalam pengembangan kurikulum dan pelatihan guru, serta pemanfaatan infrastruktur digital yang tersedia secara lokal. Meskipun demikian, tantangan besar masih dihadapi, terutama terkait kesenjangan infrastruktur antara sekolah-sekolah di wilayah perkotaan dan pedesaan (Selwyn, 2019). Ketimpangan ini berpotensi menciptakan jurang digital yang menghambat pemerataan kualitas pendidikan berbasis teknologi di seluruh Indonesia.

Rekomendasi untuk Integrasi *Deep Learning* di Masa Depan

Mengacu pada temuan dari tantangan, strategi implementasi, dan studi kasus internasional, integrasi *deep learning* (DL) dalam sistem pendidikan memerlukan pendekatan holistik dan kolaboratif. Upaya ini harus mencakup reformasi kurikulum, perluasan infrastruktur teknologi, penguatan kapasitas guru, serta jaminan etika dan perlindungan data. Rekomendasi berikut disusun untuk mendorong adopsi DL yang inklusif, berkelanjutan, dan etis di tingkat sekolah.

Penyusunan Kurikulum AI yang Adaptif dan Inklusif

Kurikulum yang mengakomodasi pembelajaran DL perlu disusun secara modular dan fleksibel, menyesuaikan tingkat pendidikan siswa dari jenjang dasar hingga menengah. Kurikulum ini harus mampu menyeimbangkan aspek konseptual dan praktis, serta mengintegrasikan pemecahan masalah berbasis proyek (*project-based learning*) dengan

konteks dunia nyata. Sejumlah penelitian menyarankan dimulainya dengan konsep dasar AI seperti klasifikasi, pengenalan pola, dan logika algoritmik sebelum melanjutkan ke topik DL yang lebih kompleks (Holmes et al., 2021; Zhai et al., 2021). Selain itu, pengembangan kurikulum harus memperhatikan prinsip keadilan akses, termasuk penyusunan materi pembelajaran dalam berbagai format dan bahasa untuk menjangkau populasi siswa yang beragam (Luckin et al., 2016).

Peningkatan Aksesibilitas Teknologi dan Infrastruktur Digital

Upaya integrasi DL sangat dipengaruhi oleh ketersediaan infrastruktur digital. Oleh karena itu, penggunaan teknologi *cloud computing* seperti Google Colab dan platform *open-source* seperti TensorFlow Playground dapat menjadi solusi yang ekonomis untuk sekolah dengan keterbatasan perangkat keras (Hwang et al., 2020). Pemerintah dan pemangku kepentingan pendidikan juga perlu menjalin kemitraan dengan sektor industri dan universitas untuk penyediaan laboratorium mini AI, akses internet yang andal, serta pendanaan pengembangan teknologi pendidikan berbasis AI. Model kolaboratif ini terbukti berhasil dalam beberapa studi kasus internasional, seperti di Singapura dan Finlandia (Holmes et al., 2023).

Pelatihan Guru Berkelanjutan dan Berbasis Kompetensi

Guru memegang peran sentral dalam menjembatani teknologi dengan proses pedagogis. Oleh karena itu, dibutuhkan program pelatihan berbasis kompetensi yang tidak hanya melatih aspek teknis, tetapi juga menanamkan pemahaman pedagogis tentang bagaimana menyampaikan konsep AI secara efektif dan kontekstual. Pelatihan ini perlu menjadi bagian dari pengembangan profesional guru, khususnya di bidang STEM, dan sebaiknya diintegrasikan dengan sertifikasi resmi. Zhai & Xia (2022) menekankan pentingnya dukungan struktural dari institusi pendidikan dan kementerian terkait agar pelatihan ini bersifat berkelanjutan, relevan, dan terukur. Selain itu, penguatan *learning community* antarguru dapat mempercepat proses adopsi melalui berbagi praktik baik.

Regulasi Perlindungan Data dan Etika Implementasi AI

Mengintegrasikan DL di sekolah tanpa kerangka regulatif yang kuat berisiko menimbulkan pelanggaran privasi, diskriminasi algoritmik, dan ketimpangan akses. Oleh karena itu, perlu dirancang kebijakan perlindungan data yang mengatur proses pengumpulan, penyimpanan, dan penggunaan data siswa secara transparan dan akuntabel. Prosedur anonimisasi data wajib diterapkan sebelum data digunakan dalam sistem berbasis AI, guna mencegah pelacakan identitas siswa (Aiken et al., 2020). Di samping itu, audit algoritma secara berkala harus dilakukan untuk mengidentifikasi potensi bias sistemik yang dapat muncul akibat dataset yang tidak representatif (Luckin & Cukurova, 2019). Pendidikan etika digital bagi siswa dan guru juga perlu diperkuat agar pengguna memahami dampak sosial dan implikasi moral dari teknologi AI.

Integrasi *deep learning* dalam kurikulum sekolah menawarkan potensi besar untuk meningkatkan kualitas pendidikan, namun menghadapi tantangan signifikan dalam aspek pedagogis, infrastruktur, etika, dan kesiapan guru. Solusi seperti pengembangan kurikulum

berbasis proyek, pemanfaatan teknologi cloud, pelatihan guru, dan regulasi yang ketat dapat membantu mengatasi hambatan ini. Studi kasus dari Singapura dan Finlandia menunjukkan bahwa implementasi bertahap dengan dukungan kebijakan yang kuat adalah kunci keberhasilan. Di Indonesia, diperlukan kolaborasi antara pemerintah, sekolah, dan industri teknologi untuk memastikan inklusivitas dalam penerapan AI di pendidikan. Penelitian lanjutan dapat mengevaluasi efektivitas model integrasi DL di berbagai konteks pendidikan serta mengembangkan kerangka kerja yang lebih adaptif untuk sekolah dengan sumber daya terbatas.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkap bahwa integrasi deep learning ke dalam kurikulum sekolah menghadapi tantangan kompleks pada aspek pedagogis, infrastruktur, etika, dan kesiapan guru. Temuan utama menunjukkan perlunya transformasi mendasar dalam pendekatan pembelajaran, di mana kurikulum perlu diadaptasi untuk mengakomodasi sifat eksploratif dan analitis dari deep learning. Kendala infrastruktur, terutama keterbatasan perangkat keras dan konektivitas, menuntut solusi inovatif seperti pemanfaatan komputasi awan dan kolaborasi dengan industri teknologi. Aspek etika memerlukan perhatian khusus, terutama dalam hal perlindungan data siswa dan mitigasi bias algoritma. Kesiapan guru menjadi faktor penentu yang memerlukan program pelatihan berkelanjutan dan dukungan kebijakan yang memadai. Studi komparatif menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi deep learning di sekolah bergantung pada pendekatan holistik yang memadukan kesiapan kurikulum, ketersediaan infrastruktur, kapasitas pendidik, dan kerangka regulasi yang kuat. Di negara berkembang seperti Indonesia, upaya integrasi perlu didukung oleh kebijakan yang menjamin pemerataan akses dan peningkatan kapasitas secara merata. Penelitian ini merekomendasikan pengembangan model implementasi bertahap yang disesuaikan dengan konteks lokal, serta pendekatan kolaboratif antara pemangku kepentingan pendidikan, industri teknologi, dan pemerintah. Temuan ini memberikan landasan penting bagi pengembangan kebijakan pendidikan berbasis AI yang inklusif dan berkelanjutan di masa depan.

REFERENSI

- Ahmad, K., Iqbal, W., El-Hassan, A., Qadir, J., Benhaddou, D., Ayyash, M., & Al-Fuqaha, A. (2023). Data-driven artificial intelligence in education: A comprehensive review. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 17, 12–31.
- Akgun, S., & Greenhow, C. (2022). Artificial intelligence in education: Addressing ethical challenges in K-12 settings. *AI and Ethics*, 2(3), 431–440.
- Chen, C., Liu, J., Tan, H., Li, X., Wang, K. I.-K., Li, P., Sakurai, K., & Dou, D. (2025). Trustworthy federated learning: Privacy, security, and beyond. *Knowledge and Information Systems*, 67(3), 2321–2356.
- Cheng, E. C. K., & Wang, T. (2023). Leading digital transformation and eliminating barriers for teachers to incorporate artificial intelligence in basic education in Hong Kong. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 5, 100171.

- Duan, S., Wang, D., Ren, J., Lyu, F., Zhang, Y., Wu, H., & Shen, X. (2022). Distributed artificial intelligence empowered by end-edge-cloud computing: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 25(1), 591–624.
- El Asmar, W. (2022). *The effectiveness of AI-powered digital educational platforms: Students' attainment and teachers' teaching strategies in a private high school in Dubai*. The British University in Dubai.
- Fedele, A., Punzi, C., & Tramacere, S. (2024). The ALTAI checklist as a tool to assess ethical and legal implications for a trustworthy AI development in education. *Computer Law & Security Review*, 53, 105986.
- Hussain, T., Yu, L., Asim, M., Ahmed, A., & Wani, M. A. (2024). Enhancing e-learning adaptability with automated learning style identification and sentiment analysis: a hybrid deep learning approach for smart education. *Information*, 15(5), 277.
- Kaswan, K. S., Dhatteval, J. S., & Ojha, R. P. (2024). AI in personalized learning. In *Advances in technological innovations in higher education* (pp. 103–117). CRC Press.
- Kovari, A. (2025). A systematic review of AI-powered collaborative learning in higher education: Trends and outcomes from the last decade. *Social Sciences & Humanities Open*, 11, 101335.
- Lythreathis, S., Singh, S. K., & El-Kassar, A.-N. (2022). The digital divide: A review and future research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, 175, 121359.
- Matthew, U. O., Kazaure, J. S., & Okafor, N. U. (2021). Contemporary development in E-Learning education, cloud computing technology & internet of things. *EAI Endorsed Trans. Cloud Syst.*, 7(20), e3.
- Muliawan, P. (2024). Analisis Penerapan Kurikulum Merdeka Dalam Pengajaran Bahasa Indonesia: Tinjauan Literatur Terhadap Isu Dan Tantangan Terkini. *Jurnal Intelek Dan Cendekiawan Nusantara*, 1(5), 7932–7942.
- Okoye, K., Hussein, H., Arrona-Palacios, A., Quintero, H. N., Ortega, L. O. P., Sanchez, A. L., Ortiz, E. A., Escamilla, J., & Hosseini, S. (2023). Impact of digital technologies upon teaching and learning in higher education in Latin America: an outlook on the reach, barriers, and bottlenecks. *Education and Information Technologies*, 28(2), 2291–2360.
- Padovano, A., & Cardamone, M. (2024). Towards human-AI collaboration in the competency-based curriculum development process: The case of industrial engineering and management education. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 7, 100256.
- Posekany, A. (2024). Project-Based Learning Connecting Robotics and Artificial Intelligence. *International Conference on Interactive Collaborative Learning*, 319–326.
- Roshanaei, M. (2024). Towards best practices for mitigating artificial intelligence implicit bias in shaping diversity, inclusion and equity in higher education. *Education and Information Technologies*, 29(14), 18959–18984.
- Salla, S., Pasumathy, A., Tadikonda, D., Parsha, T., & Mandal, S. K. (2025). Private AI in Education: Critical Challenges and Aspects of Enhancement Strategies. In *Sustainable Development Using Private AI* (pp. 109–131). CRC Press.
- Salloum, S. A. (2024). AI perils in education: Exploring ethical concerns. *Artificial Intelligence in Education: The Power and Dangers of ChatGPT in the Classroom*, 669–675.

- Sanusi, I. T., Oyelere, S. S., & Omidiora, J. O. (2022). Exploring teachers' preconceptions of teaching machine learning in high school: A preliminary insight from Africa. *Computers and Education Open*, 3, 100072.
- Sarker, I. H. (2021). Deep learning: a comprehensive overview on techniques, taxonomy, applications and research directions. *SN Computer Science*, 2(6), 1–20.
- Strielkowski, W., Grebennikova, V., Lisovskiy, A., Rakhimova, G., & Vasileva, T. (2024). AI-driven adaptive learning for sustainable educational transformation. *Sustainable Development*.
- Štuikys, V., & Burbait, R. (2024). Evolution of STEM-Driven Computer Science Education. *Cham, Switzerland: Springer*, 368.
- Tedre, M., Toivonen, T., Kahila, J., Vartiainen, H., Valtonen, T., Jormanainen, I., & Pears, A. (2021). Teaching machine learning in K–12 classroom: Pedagogical and technological trajectories for artificial intelligence education. *IEEE Access*, 9, 110558–110572.
- Tlili, A., Zhang, J., Papamitsiou, Z., Manske, S., Huang, R., Kinshuk, & Hoppe, H. U. (2021). Towards utilising emerging technologies to address the challenges of using Open Educational Resources: a vision of the future. *Educational Technology Research and Development*, 69, 515–532.
- Yang, Y., Sun, W., Sun, D., & Salas-Pilco, S. Z. (2024). Navigating the AI-Enhanced STEM education landscape: a decade of insights, trends, and opportunities. *Research in Science & Technological Education*, 1–25.
- Zaman, B., Sharma, A., Ram, C., Kushwah, R., Muradia, R., Warjri, A., Lyngdoh, D. K., & Lyngdoh, M. K. (2024). Modeling education impact: a machine learning-based approach for improving the quality of school education. *Journal of Computers in Education*, 11(4), 1181–1214.
- Zhao, Y., Zhao, M., & Shi, F. (2024). Integrating moral education and educational information technology: A strategic approach to enhance rural teacher training in universities. *Journal of the Knowledge Economy*, 15(3), 15053–15093.