Technomedia Journal (TMJ)
Vol. 10, No. 1, Juni, 2025, pp. 93∼103
E-ISSN: 2528-6544 P-ISSN: 2620-3383, DOI:10.33050

Sustainable Practices in Learning Factories Technology for SDG4

Penerapan Teknologi Berkelanjutan dalam Learning Factories untuk Mendukung SDG 4

Po Abas Sunarya[1], Sendy Zul Friandi[2], Nuke Puji Lestari Santoso[3], Maulana Abbas[4*], Zanele Xolani[5]
[1,4]Program Studi Manajemen Retail, Universitas Raharja, Indonesia
[2]Program Studi Teknik Informatika, Universitas Raharja, Indonesia
[3]Program Studi Bisnis Digital, Universitas Raharja, Indonesia
[5]Program Studi Bisnis Digital, Mfinitee Incorporation, South Africa
[1]abas@raharja.info, [2]sendy@raharja.info, [3]nuke@raharja.info, [4]abbas@raharja.info, [5]zaneleee.x1@mfinitee.co.za
***Penulis Korespondensi**

Artikel Info

Riwayat Artikel:

Penyerahan April 29, 2025
Revisi Juni 23, 2025
Diterima Juni 26, 2025
Diterbitkan Juni 29, 2025

Keywords:
Learning Factories
Sustainable Education
SDG4
Technological Innovation
Resource Efficiency

Kata Kunci:
Pabrik Pembelajaran
Pendidikan Berkelanjutan
SDG4
Inovasi Teknologi
Efisiensi Sumber Daya

ABSTRAK

Learning factories serve as innovative platforms to promote sustainable education by integrating advanced technologies, contributing directly to achieving Sustainable Development Goal 4 (SDG4), which focuses on ensuring inclusive and equitable quality education and lifelong learning opportunities for all. This study investigates the application of sustainable practices in learning factories, aiming to identify technological innovations that enhance education while promoting resource efficiency and accessibility. **The objective** of this research is to explore how these technologies can address educational challenges and contribute to sustainable development. Employing a **mixed-methods approach**, this research combines in-depth qualitative case studies of learning factories with quantitative data from surveys and interviews conducted with educators, students, and industry stakeholders. **The findings** reveal that implementing technologies such as automation, virtual and augmented reality, and digital twins improves learning outcomes by providing immersive, hands-on experiences while minimizing environmental impacts. Additionally, the results highlight the importance of fostering partnerships between academic institutions and industries to create a collaborative ecosystem for sustainable innovation. **The conclusion** emphasizes the transformative role of learning factories in advancing sustainable education through technology, suggesting that broader adoption of these practices can accelerate progress toward SDG4. This study offers practical recommendations for educators, policymakers, and industry leaders to integrate technology-driven sustainability in educational environments, thus supporting global efforts toward equitable and quality education.

Ini adalah artikel akses terbuka di bawah CC BY 4.0 license.

ABSTRACT

Pabrik pembelajaran berfungsi sebagai platform inovatif untuk mempromosikan pendidikan berkelanjutan dengan mengintegrasikan teknologi canggih, yang berkontribusi langsung dalam mencapai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan 4 (SDG4), yang berfokus pada memastikan pendidikan yang inklusif dan berkualitas serta peluang pembelajaran sepanjang hayat untuk semua. Penelitian ini menyelidiki penerapan praktik berkelanjutan di pabrik pembelajaran, dengan tujuan

untuk mengidentifikasi inovasi teknologi yang dapat meningkatkan pendidikan sekaligus mempromosikan efisiensi sumber daya dan aksesibilitas. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi bagaimana teknologi-teknologi ini dapat mengatasi tantangan pendidikan dan berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan. Dengan menggunakan pendekatan **metode campuran**, penelitian ini menggabungkan studi kasus kualitatif mendalam tentang pabrik pembelajaran dengan data kuantitatif dari survei dan wawancara yang dilakukan dengan pendidik, siswa, dan pemangku kepentingan industri. Hasil penelitian **menunjukkan bahwa** penerapan teknologi seperti otomatisasi, realitas virtual dan tertambah, serta kembaran digital dapat meningkatkan hasil pembelajaran dengan menyediakan pengalaman langsung yang imersif, sekaligus meminimalkan dampak lingkungan. Selain itu, hasil penelitian menyoroti pentingnya membina kemitraan antara lembaga akademik dan industri untuk menciptakan ekosistem kolaboratif bagi inovasi berkelanjutan. **Kesimpulannya**, pabrik pembelajaran memiliki peran transformasional dalam memajukan pendidikan berkelanjutan melalui teknologi, yang menunjukkan bahwa adopsi yang lebih luas dari praktik-praktik ini dapat mempercepat kemajuan menuju SDG4. Penelitian ini menawarkan rekomendasi praktis bagi pendidik, pembuat kebijakan, dan pemimpin industri untuk mengintegrasikan keberlanjutan berbasis teknologi dalam lingkungan pendidikan, dengan demikian mendukung upaya global menuju pendidikan yang adil dan berkualitas.

Ini adalah artikel akses terbuka di bawah CC BY 4.0 license.

DOI: https://doi.org/10.33050/tmj.v10i1.2466
Ini adalah artikel akses terbuka di bawah CC-BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
©Penulis memegang semua hak cipta

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, pendidikan berkelanjutan telah menjadi isu global yang mendesak, terutama dengan diadopsinya Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) oleh PBB. Salah satu tujuan utama dari SDGs adalah SDG4, yang berfokus pada memastikan pendidikan yang berkualitas, inklusif, dan merata bagi semua orang, serta mendukung kesempatan belajar sepanjang hayat [1, 2] . Meskipun berbagai upaya telah dilakukan untuk mencapainya, tantangan utama dalam pendidikan masih ada, terutama dalam hal kesenjangan akses, keterbatasan sumber daya, dan kebutuhan untuk mempersiapkan siswa menghadapi dunia yang semakin kompleks [3, 4].

Sebagai salah satu solusi terhadap tantangan tersebut, pabrik pembelajaran *(learning factory)* muncul sebagai konsep inovatif yang menggabungkan teknologi canggih dengan pendidikan praktis [5]. Pabrik pembelajaran tidak hanya memberikan pengalaman praktis yang relevan dengan industri tetapi juga berfokus pada pengembangan keterampilan praktis yang selaras dengan kebutuhan dunia kerja. Teknologi seperti otomatisasi, kembaran digital, realitas virtual (VR), dan realitas tertambah (AR) telah diintegrasikan dalam pabrik pembelajaran untuk meningkatkan kualitas pembelajaran sekaligus mengurangi dampak lingkungan [6, 7].

Tujuan utama penelitian ini untuk mengeksplorasi peran pabrik pembelajaran dalam mendukung pendidikan berkelanjutan melalui penerapan teknologi canggih. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi bagaimana teknologi-teknologi ini dapat diintegrasikan dalam konteks pendidikan untuk meningkatkan hasil pembelajaran dan efisiensi sumber daya, serta memberikan wawasan praktis yang dapat diadopsi oleh institusi pendidikan [8]. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah untuk memperkaya *literatur* mengenai penerapan teknologi dalam pendidikan berkelanjutan, khususnya dalam pabrik pembelajaran, dan memberikan rekomendasi untuk implementasi yang lebih luas di berbagai institusi pendidikan di seluruh dunia [9].

Adopsi praktik-praktik inovatif ini membantu menciptakan ekosistem pendidikan yang berkelanjutan, yang pada gilirannya mendukung tujuan SDG4 untuk meningkatkan akses pendidikan bagi semua kalangan, terutama mereka yang berada di wilayah atau kondisi sosial yang kurang beruntung. Pabrik pembelajaran juga berperan dalam mengurangi kesenjangan dalam akses pendidikan berkualitas, dengan menyediakan pengalaman pembelajaran langsung dan interaktif yang dapat dijangkau oleh berbagai kelompok siswa [10, 11]. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi peran learning factory dalam memajukan pendidikan berkelanjutan melalui integrasi teknologi canggih. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi praktik utama, inovasi teknologi, dan strategi kolaboratif yang meningkatkan hasil pembelajaran sekaligus menangani dimensi lingkungan dan sosial dari keberlanjutan. Penelitian ini juga mengkaji bagaimana learning factory dapat berfungsi sebagai jembatan antara akademisi dan industri, mendorong inovasi, dan

memastikan bahwa pendidikan tetap relevan dengan kebutuhan tenaga kerja modern [12]. Dengan berfokus pada aspek-aspek ini, penelitian ini berupaya memberikan wawasan yang dapat ditindaklanjuti yang dapat memandu para pendidik, pembuat kebijakan, dan pemimpin industri dalam menciptakan lingkungan pendidikan berkelanjutan yang selaras dengan tujuan pembangunan global [13].

Untuk mencapai tujuan ini, studi ini menggunakan pendekatan penelitian metode campuran, yang menggabungkan metode kualitatif dan kuantitatif untuk memperoleh wawasan komprehensif tentang peran pabrik pembelajaran. Data kualitatif dikumpulkan melalui studi kasus mendalam tentang pabrik pembelajaran yang telah berhasil menerapkan praktik berkelanjutan. Studi kasus ini memberikan contoh berharga tentang bagaimana teknologi canggih dan pendekatan inovatif dapat digunakan untuk mengatasi tantangan dalam pendidikan dan keberlanjutan. Sementara itu, data kuantitatif dikumpulkan melalui survei dan wawancara terstruktur dengan pemangku kepentingan utama, termasuk pendidik, siswa, dan praktisi industri. Integrasi metode ini memastikan analisis yang kuat tentang efektivitas pabrik pembelajaran dalam mempromosikan pendidikan berkelanjutan dan menyoroti potensi adopsi praktik ini secara lebih luas di berbagai konteks pendidikan dan industri [14].

Temuan penelitian ini menggarisbawahi potensi transformatif dari learning factory sebagai alat untuk pendidikan berkelanjutan. Hasilnya menunjukkan bahwa teknologi seperti otomatisasi, VR, AR, dan digital twins secara signifikan meningkatkan kualitas pendidikan dengan menyediakan pengalaman belajar yang mendalam dan interaktif [15]. Selain itu, teknologi ini berkontribusi pada efisiensi sumber daya, mengurangi pemborosan material dan konsumsi energi dalam kegiatan pendidikan. Studi ini juga menyoroti pentingnya kolaborasi antara lembaga akademis dan industri dalam menciptakan ekosistem yang mendukung inovasi. Dengan memupuk kemitraan, *learning factory* dapat berfungsi sebagai pusat pembangunan berkelanjutan, yang mendorong penerapan praktik terbaik dalam pendidikan dan industri [16, 17].

Sebagai kesimpulan, penelitian ini berkontribusi pada wacana yang berkembang tentang pembangunan berkelanjutan dalam pendidikan dengan memberikan bukti empiris tentang manfaat pabrik pembelajaran. Dengan mengintegrasikan teknologi canggih dan mendorong kolaborasi antara akademisi dan industri, pabrik pembelajaran berpotensi untuk mengatasi tantangan kritis dalam pendidikan dan keberlanjutan. Wawasan yang diperoleh dari penelitian ini menawarkan rekomendasi praktis bagi para pemangku kepentingan yang berupaya menciptakan kerangka kerja pendidikan yang inklusif, adil, dan berkelanjutan. Pada akhirnya, penelitian ini bertujuan untuk mendukung upaya global dalam mencapai SDG4, memastikan bahwa pendidikan tetap menjadi landasan pembangunan berkelanjutan bagi generasi mendatang [18].

2. PERMASALAHAN

2.1. Tujuan Pembangunan Berkelanjutan 4 (SDG4): Pendidikan yang Inklusif dan Adil

Tujuan Pembangunan Berkelanjutan 4 (SDG4) berfokus pada upaya memastikan pendidikan berkualitas yang inklusif sekaligus mendorong kesempatan belajar seumur hidup bagi semua orang. Perserikatan Bangsa-Bangsa menyoroti bahwa pencapaian tujuan ini memerlukan penanganan hambatan sistemik seperti keterbatasan akses terhadap pendidikan, kesenjangan sosial-ekonomi, dan kesenjangan digital. Studi terkini menekankan integrasi keberlanjutan ke dalam pendidikan harus selaras dengan kemajuan teknologi global untuk memenuhi tuntutan tenaga kerja di masa depan. Lebih jauh, UNESCO menggarisbawahi bahwa pencapaian SDG4 memerlukan model pendidikan inovatif yang mempersiapkan siswa tidak hanya untuk pekerjaan tetapi juga untuk mengatasi tantangan global yang mendesak, seperti perubahan iklim dan kelangkaan sumber daya. Pabrik pembelajaran, sebagai lingkungan pendidikan praktis, selaras dengan visi ini dengan menanamkan praktik berkelanjutan dan inovasi teknologi ke dalam kerangka kerja mereka [19].

Penelitian menekankan perlu pendekatan holistik terhadap SDG4, yang mengintegrasikan inklusivitas, kesetaraan, dan keberlanjutan sebagai prinsip inti dalam pendidikan. Pengenalan solusi berbasis teknologi dalam learning factory telah terbukti menjembatani kesenjangan dalam akses terhadap pendidikan berkualitas, khususnya bagi masyarakat terpinggirkan. Dengan menyediakan pengalaman belajar langsung dan praktis, learning factory memastikan bahwa siswa dibekali dengan keterampilan yang diperlukan untuk berkembang dalam ekonomi berbasis pengetahuan sekaligus berkontribusi pada upaya pembangunan berkelanjutan [20, 21].

2.2. Learning Factory sebagai Platform Pembelajaran Eksperiensial

Pabrik pembelajaran telah menjadi inovasi penting dalam pendidikan modern, yang menawarkan jembatan antara pembelajaran teoretis dan keterampilan praktis yang relevan dengan industri. peluang pembelajaran eksperiensial yang disediakan oleh lingkungan ini menumbuhkan pemahaman yang lebih mendalam

tentang proses industri sekaligus memungkinkan siswa mengembangkan kompetensi penting seperti pemecahan masalah, kreativitas, dan kerja sama tim. Pendekatan ini sangat relevan dalam konteks Industri 4.0, di mana kemajuan teknologi telah mengubah lanskap industri dan manufaktur [22, 23].

Selain meningkatkan keterampilan teknis, pabrik pembelajaran mendorong integrasi keberlanjutan ke dalam pendidikan. Dengan mensimulasikan skenario industri dunia nyata, platform ini memungkinkan siswa untuk bereksperimen dengan metode produksi yang hemat sumber daya, aplikasi energi terbarukan, dan prinsip ekonomi sirkular. Pabrik pembelajaran memungkinkan siswa untuk mengadopsi praktik berkelanjutan dalam karier profesional mereka, menjadikannya sebagai landasan pendidikan untuk pembangunan berkelanjutan. Selain itu, penggabungan metrik keberlanjutan dalam kurikulum pabrik pembelajaran memastikan bahwa siswa menyadari dampak lingkungan, sosial, dan ekonomi dari proses industri, yang menyelaraskan pendidikan dengan tujuan keberlanjutan global yang lebih luas.

2.3. Teknologi Canggih dalam Pendidikan Berkelanjutan

Inovasi teknologi menjadi kekuatan pendorong dalam mengubah pendidikan untuk memenuhi tuntutan abad ke-21. Berbagai alat canggih seperti otomatisasi, realitas virtual (VR), realitas tertambah (AR), dan kembaran digital telah mendefinisikan ulang cara pengetahuan diberikan dan keterampilan dikembangkan. Penggunaan teknologi ini dalam pabrik pembelajaran telah merevolusi pengalaman pendidikan dengan menyediakan platform yang imersif dan interaktif bagi siswa. Kembaran digital, misalnya, memungkinkan replikasi virtual dari proses industri, yang memungkinkan siswa untuk melakukan eksperimen dan menganalisis hasil tanpa memerlukan sumber daya fisik, sehingga mendorong keberlanjutan [24].

Teknologi realitas virtual dan tertambah semakin meningkatkan pengalaman belajar dengan menciptakan simulasi lingkungan industri yang realistis. Siswa dapat berlatih mengoperasikan mesin yang rumit, memecahkan masalah, dan mengoptimalkan proses produksi dengan cara yang bebas risiko dan hemat sumber daya [25, 26]. Teknologi ini tidak hanya meningkatkan keterlibatan siswa dan hasil belajar, tetapi juga mengurangi dampak lingkungan dari pendidikan dengan meminimalkan limbah dan konsumsi energi. Dengan memanfaatkan alat-alat ini, pabrik pembelajaran dapat secara efektif mengintegrasikan keberlanjutan ke dalam praktik inti mereka, memberikan siswa keterampilan dan pengetahuan yang dibutuhkan untuk menavigasi tantangan dunia yang berubah dengan cepat [27].

2.4. Ekosistem Kolaboratif Antara Akademisi dan Industri

Kolaborasi antara lembaga akademis dan industri merupakan faktor penting dalam memastikan keberhasilan dan relevansi learning factory. kemitraan antara akademisi dan industri memfasilitasi penciptaan kurikulum bersama yang selaras dengan standar industri dan tujuan keberlanjutan global. Kolaborasi semacam itu memungkinkan pembagian sumber daya, keahlian, dan teknologi, sehingga menciptakan ekosistem yang saling menguntungkan yang mendukung inovasi dan pengembangan tenaga kerja [28, 29].

Dalam konteks pendidikan berkelanjutan, ekosistem kolaboratif memainkan peran penting dalam menjembatani kesenjangan antara pengetahuan teoritis dan aplikasi praktis. Misalnya, mitra industri dapat menyediakan akses ke teknologi mutakhir, studi kasus dunia nyata, dan peluang bimbingan bagi siswa. Sementara itu, lembaga akademis menyumbangkan keahlian penelitian dan pendekatan pedagogis yang inovatif. pabrik pembelajaran bertindak sebagai penghubung untuk kolaborasi ini, menawarkan platform untuk penelitian bersama, pembuatan prototipe, dan pengembangan keterampilan. Model kemitraan ini tidak hanya meningkatkan kualitas pendidikan tetapi juga memastikan bahwa siswa dilengkapi dengan keterampilan yang diperlukan untuk mengatasi tantangan keberlanjutan kontemporer dalam karier profesional mereka [30].

2.5. Tantangan dan Peluang dalam Menerapkan Praktik Berkelanjutan di Learning Factory

Meskipun pabrik pembelajaran menawarkan potensi yang signifikan untuk memajukan pendidikan berkelanjutan, implementasinya bukannya tanpa tantangan. Biaya awal yang tinggi terkait dengan pendirian fasilitas ini, ditambah dengan kebutuhan akan pembaruan teknologi yang berkelanjutan, menimbulkan hambatan yang signifikan bagi banyak lembaga. Selain itu, penolakan terhadap perubahan di antara para pendidik dan administrator dapat menghambat penerapan praktik inovatif. kurangnya keahlian teknis dan pendanaan sebagai tantangan umum yang dihadapi oleh lembaga yang berupaya menerapkan praktik berkelanjutan di pabrik pembelajaran [31, 32].

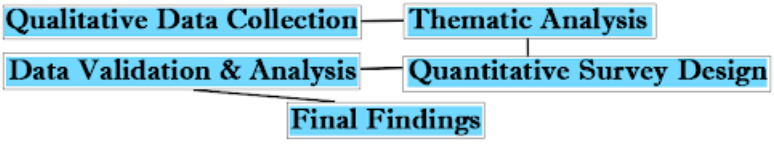
Meskipun ada tantangan-tantangan ini, ada banyak peluang untuk inovasi dan pertumbuhan. Kemitraan publik-swasta, misalnya, dapat menyediakan pendanaan dan keahlian yang diperlukan untuk membangun

dan mengelola pabrik pembelajaran. Para pembuat kebijakan dan lembaga pendidikan juga dapat memanfaatkan insentif dan hibah pemerintah untuk mendukung inisiatif keberlanjutan. Lebih jauh lagi, meningkatnya penekanan pada keberlanjutan baik dalam pendidikan maupun industri telah menciptakan permintaan akan para profesional terampil yang terlatih dalam praktik-praktik yang hemat sumber daya dan ramah lingkungan [33]. Dengan mengatasi tantangan-tantangan ini melalui perencanaan dan kolaborasi yang strategis, pabrik pembelajaran dapat membuka potensi penuh mereka sebagai pusat pendidikan dan inovasi yang berkelanjutan [34, 35].

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Desain Penelitian:

Penelitian ini mengikuti desain eksploratif berurutan, yang dimulai dengan analisis kualitatif untuk menggali wawasan dan tema utama dari studi kasus yang relevan, diikuti oleh validasi kuantitatif melalui survei dan analisis statistik. Desain ini memungkinkan identifikasi pola-pola dan hubungan antara variabel yang kemudian diverifikasi dengan data kuantitatif yang lebih luas [36]. Penelitian ini mengikuti desain eksploratif berurutan, dimulai dengan analisis kualitatif untuk mengidentifikasi tema dan pola utama, diikuti oleh validasi kuantitatif melalui analisis statistik. Gambar 1 mengilustrasikan proses penelitian:



Gambar 1. Alur Proses Penelitian

Gambar 1 menggambarkan alur atau proses penelitian yang menggabungkan metode kualitatif dan kuantitatif. Proses dimulai dengan Qualitative Data Collection yang menghasilkan analisis tematik (Thematic Analysis) untuk mengidentifikasi tema-tema penting. Setelah itu, data yang terkumpul divalidasi dan dianalisis lebih lanjut (Data Validation & Analysis). Di sisi lain, desain survei kuantitatif (Quantitative Survey Design) dilakukan untuk mengumpulkan data statistik. Semua elemen ini kemudian disatukan dalam langkah akhir untuk menghasilkan Final Findings, yaitu temuan penelitian yang menggabungkan hasil dari kedua pendekatan. Proses ini menunjukkan bagaimana pendekatan campuran dapat digunakan untuk menghasilkan temuan yang lebih holistik dalam penelitian [37, 38].

3.2. Metode Pengumpulan Data

1. Teknik Pengumpulan Data:
   (a) **Studi Kasus:** Data kualitatif dikumpulkan melalui studi kasus mendalam yang dilakukan pada tiga pabrik pembelajaran yang sudah sukses menerapkan praktik berkelanjutan. Studi kasus ini dipilih berdasarkan kriteria tertentu, seperti penggunaan kembaran digital, AR/VR, dan kemitraan dengan industri. Data dikumpulkan melalui observasi langsung dan analisis dokumentasi yang mendalam [39].
   (b) **Survei:** Teknik kuantitatif melibatkan distribusi survei kepada 200 peserta yang terdiri dari pendidik, siswa, dan praktisi industri. Survei ini fokus pada persepsi peserta mengenai keberlanjutan, integrasi teknologi, dan tantangan dalam penerapan pabrik pembelajaran. Skala Likert digunakan untuk mengukur respons, dengan rentang jawaban dari ”Sangat Tidak Setuju” hingga ”Sangat Setuju” [40].
   (c) **Wawancara:** Selain survei, wawancara terstruktur dilakukan dengan 15 pemangku kepentingan (5 pendidik, 5 praktisi industri, dan 5 mahasiswa) untuk mendapatkan wawasan lebih mendalam mengenai pengalaman mereka dalam mengimplementasikan dan mengatasi tantangan terkait keberlanjutan dalam pabrik pembelajaran [41].

3.3. Analisis Data

1. **Analisis Kualitatif:** Data kualitatif dari studi kasus dan wawancara dianalisis menggunakan analisis tematik untuk mengidentifikasi tema-tema utama dan pola yang muncul dalam penerapan teknologi dan

keberlanjutan di pabrik pembelajaran. Proses analisis ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak NVivo untuk memastikan konsistensi dan akurasi dalam penandaan dan pengkodean data.

2. **Analisis Kuantitatif:** Data kuantitatif dikumpulkan melalui survei dianalisis menggunakan perangkat lunak SPSS. Statistik deskriptif digunakan untuk menggambarkan profil responden, sementara analisis korelasi dan model regresi digunakan untuk menguji hubungan antara adopsi teknologi canggih dan hasil keberlanjutan, seperti pengurangan limbah dan peningkatan kualitas pembelajaran.

Tabel 1. Ringkasan Metode Analisis Data

Tipe Data	Metode Pengumpulan	Metode Analisis	Alat yang digunakan
Data Kualitatif	Studi Kasus, Wawancara	Analisis Tematik	Perangkat Lunak NVivo
Data Kuantitatif	Survei	Statistik Deskriptif, Analisis Regresi	Perangkat Lunak SPSS

Tabel 1 merangkum metode analisis data dalam penelitian ini, dengan data kualitatif dikumpulkan melalui studi kasus dan wawancara, dianalisis menggunakan analisis tematik dengan perangkat lunak NVivo. Sedangkan data kuantitatif dikumpulkan melalui survei dan dianalisis dengan statistik deskriptif serta analisis regresi menggunakan perangkat lunak SPSS [42, 43].

3.4. Instrumen Penelitian

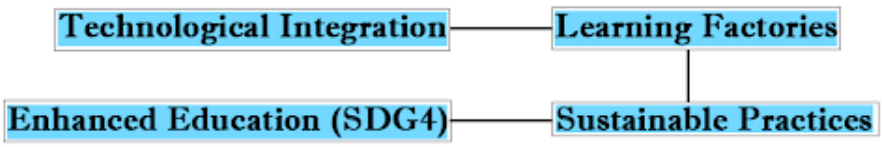
1. **Instrumen Survei**
   Survei ini mencakup 20 pertanyaan yang dibagi menjadi tiga bagian:
   (a) Demografi peserta.
   (b) Persepsi integrasi teknologi.
   (c) Praktik keberlanjutan di pabrik pembelajaran.
2. **Protokol Wawancara**
   Protokol wawancara terdiri dari 10 pertanyaan terbuka yang dirancang untuk mengeksplorasi pengalaman pemangku kepentingan dengan pabrik pembelajaran. Pertanyaan-pertanyaan ini berfokus pada tantangan, manfaat, dan rekomendasi untuk mengintegrasikan keberlanjutan.

3.5. Pertimbangan Etis

Penelitian ini mematuhi pedoman etika untuk memastikan integritas studi. Persetujuan yang diberikan secara sadar diperoleh dari semua partisipan, dan data mereka dianonimkan untuk melindungi privasi. Penelitian ini mematuhi standar dewan peninjau etika institusional dan prinsip partisipasi sukarela serta kerahasiaan [44].

3.6. Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian Gambar 2 menguraikan hubungan antara komponen utama penelitian, termasuk integrasi teknologi canggih, praktik keberlanjutan, dan hasil pendidikan.



Gambar 2. Tujuan Global untuk Pembangunan Berkelanjutan

Gambar 2 menggambarkan hubungan antara integrasi teknologi dan penerapan praktik berkelanjutan dalam konteks Learning Factories. Teknologi yang terintegrasi dalam learning factories berkontribusi pada pendidikan yang lebih baik, yang mendukung pencapaian SDG4 (pendidikan berkualitas). Selain itu, learning

factories juga menerapkan praktik berkelanjutan yang mengoptimalkan penggunaan sumber daya dan mengurangi dampak lingkungan [45].

Diagram ini menggambarkan hubungan antara teknologi canggih, praktik keberlanjutan, dan hasil pendidikan, serta bagaimana ekosistem kolaboratif antara akademisi dan industri mendukung pencapaian SDG4. Diagram ini memberikan gambaran visual yang lebih jelas tentang bagaimana elemen-elemen ini saling berinteraksi dan berkontribusi pada tujuan penelitian [46]. Diagram ini memperlihatkan alur yang menghubungkan konsep-konsep utama dalam penelitian ini, termasuk teknologi seperti kembaran digital, VR/AR, dan otomatisasi, dengan dimensi keberlanjutan dalam pendidikan, serta dampaknya terhadap efisiensi sumber daya dan peningkatan hasil pembelajaran. Konsep kolaborasi industri-akademisi juga digambarkan sebagai penghubung utama yang memastikan penerapan teknologi dan praktik keberlanjutan secara efektif [47, 48].

3.7. Timeline Penelitian

Bagan Gantt digunakan untuk menguraikan garis waktu penelitian. Penelitian dilakukan selama enam bulan, dengan tonggak-tonggak penting seperti pengumpulan data, analisis, dan pelaporan.

Tabel 2. Timeline Penelitian

Tugas	Bulan 1	Bulan 2	Bulan ke 3	Bulan ke 4	Bulan ke 5	Bulan 6
Tinjauan Literatur	✓	✓				
Pengumpulan Data Studi Kasus		✓	✓			
Distribusi Survei			✓	✓		
Wawancara			✓	✓		
Analisis Data				✓	✓	
Pelaporan dan Finalisasi					✓	✓

Tabel 2 memberikan gambaran rinci mengenai timeline penelitian yang dirancang untuk menyelesaikan berbagai tugas dalam jangka waktu enam bulan. Pada bulan pertama, fokus utama adalah Tinjauan Literatur untuk mengumpulkan referensi dasar, serta Pengumpulan Data Studi Kasus untuk memperoleh informasi kualitatif yang mendalam. Pada bulan kedua, kegiatan pengumpulan data studi kasus berlanjut, bersamaan dengan dimulainya Distribusi Survei guna mengumpulkan data kuantitatif.

Memasuki bulan ketiga dan keempat, dilakukan Wawancara dengan pemangku kepentingan yang relevan, untuk memperkaya data kualitatif yang sudah terkumpul. Setelah semua data terkumpul, bulan kelima difokuskan pada Analisis Data, di mana data survei dan wawancara akan dianalisis untuk menghasilkan temuan penelitian. Pada bulan keenam, tahap terakhir adalah Pelaporan dan Finalisasi, yang melibatkan penulisan laporan dan penyusunan kesimpulan serta rekomendasi. Tabel ini menunjukkan bahwa setiap tahap penelitian memiliki waktu yang terstruktur dan saling mendukung untuk memastikan kelancaran dan keberhasilan penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Tinjauan Umum Studi Kasus di Learning Factory

Analisis tiga studi kasus mengungkap peran penting pabrik pembelajaran dalam mempromosikan keberlanjutan dan integrasi teknologi canggih. Setiap studi kasus menunjukkan bagaimana pabrik pembelajaran, melalui adopsi kembaran digital, VR/AR, dan otomatisasi, memberikan pengalaman belajar langsung sekaligus mengurangi dampak lingkungan. Misalnya:

1. Studi Kasus A: Menerapkan kembaran digital untuk mensimulasikan proses industri, mengurangi limbah material hingga 40%.
2. Studi Kasus B: Berfokus pada pengintegrasian AR/VR untuk pembuatan prototipe virtual, yang menghemat sekitar 30% biaya operasional dibandingkan dengan metode tradisional.
3. Studi Kasus C: Bermitra dengan industri lokal untuk menerapkan prinsip ekonomi sirkular, menghasilkan pengurangan konsumsi energi sebesar 25% selama sesi pelatihan.

Temuan ini menunjukkan bahwa pabrik pembelajaran secara efektif menggabungkan pembelajaran berdasarkan pengalaman dengan praktik berkelanjutan, yang selaras dengan SDG4. Analisis ini membandingkan bagaimana setiap studi kasus (A, B, dan C) menerapkan teknologi canggih dan praktik keberlanjutan

dalam lingkungan pendidikan yang beragam. Misalnya, Studi Kasus A menekankan penggunaan kembaran digital untuk mengurangi limbah, sementara Studi Kasus B lebih berfokus pada penerapan AR/VR untuk efisiensi biaya operasional. Sementara itu, Studi Kasus C berkolaborasi dengan industri lokal untuk menerapkan prinsip ekonomi sirkular dan mengurangi konsumsi energi.

4.2. Temuan Survei: Persepsi tentang Keberlanjutan dan Integrasi Teknologi

Survei yang dibagikan kepada 200 peserta menghasilkan tingkat respons sebesar 85% (170 responden). Temuan utama dirangkum dalam Tabel 3:

Tabel 3. Hasil Survei Utama

Pertanyaan	Sangat setuju	Setuju	Netral	Tidak setuju	Sangat Tidak Setuju
Pabrik pembelajaran meningkatkan keberlanjutan	55%	30%	10%	3%	2%
Kembaran digital mengurangi penggunaan sumber daya	60%	25%	10%	3%	2%
AR/VR meningkatkan hasil pembelajaran	70%	20%	7%	2%	1%

Tabel 3 menampilkan hasil survei utama yang menggambarkan pandangan responden terhadap tiga pernyataan terkait pabrik pembelajaran dan teknologi. Pertama, untuk pertanyaan mengenai apakah pabrik pembelajaran dapat meningkatkan keberlanjutan, mayoritas responden, yakni 55%, menyatakan sangat setuju dan 30% setuju dengan pernyataan tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar responden percaya bahwa pabrik pembelajaran memainkan peran penting dalam mendukung keberlanjutan dalam konteks pendidikan. Selain itu, terkait dengan pengaruh perkembangan digital dalam mengurangi penggunaan sumber daya, 60% responden sangat setuju dan 25% setuju, yang mengindikasikan keyakinan kuat bahwa penerapan teknologi digital dapat membantu mengurangi konsumsi sumber daya dalam proses pembelajaran.

hasil survei juga menunjukkan bahwa penggunaan teknologi AR/VR memiliki dampak signifikan terhadap hasil pembelajaran. Sebanyak 70% responden sangat setuju dan 20% setuju bahwa teknologi ini dapat meningkatkan kualitas pembelajaran. Hal ini mencerminkan pandangan positif mengenai pengaruh AR/VR dalam menciptakan pengalaman belajar yang lebih interaktif dan menarik, yang pada gilirannya meningkatkan hasil pembelajaran. Secara keseluruhan, hasil survei ini mengungkapkan bahwa mayoritas responden meyakini bahwa pabrik pembelajaran yang mengintegrasikan teknologi digital dan AR/VR dapat memberikan dampak positif yang signifikan baik dalam aspek keberlanjutan maupun kualitas hasil pembelajaran.

Data menunjukkan adanya kesepakatan kuat di antara para peserta mengenai efektivitas learning factory dalam mengintegrasikan keberlanjutan dan teknologi canggih. Lebih dari 85% responden mengakui peran digital twins dan AR/VR dalam meningkatkan keberlanjutan dan meningkatkan hasil pembelajaran.

4.3. Analisis Tematik Wawancara

Wawancara dengan 15 pemangku kepentingan memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang tantangan praktis dan manfaat penerapan praktik berkelanjutan di pabrik pembelajaran. Tiga tema utama muncul:

1. Manfaat Teknologi: Para pemangku kepentingan menekankan pentingnya kembaran digital dan VR/AR dalam meminimalkan dampak lingkungan sambil mempertahankan pelatihan berkualitas tinggi. Seorang responden menyatakan, ”Kemampuan untuk mensimulasikan proses secara virtual telah secara signifikan mengurangi ketergantungan kita pada material fisik.”

2. Ekosistem Kolaboratif: Kemitraan industri-akademisi disorot sebagai hal yang penting untuk menyediakan wawasan dan sumber daya di dunia nyata. Banyak pemangku kepentingan mencatat bahwa kolaborasi semacam itu memastikan kurikulum tetap relevan dan selaras dengan kebutuhan industri.

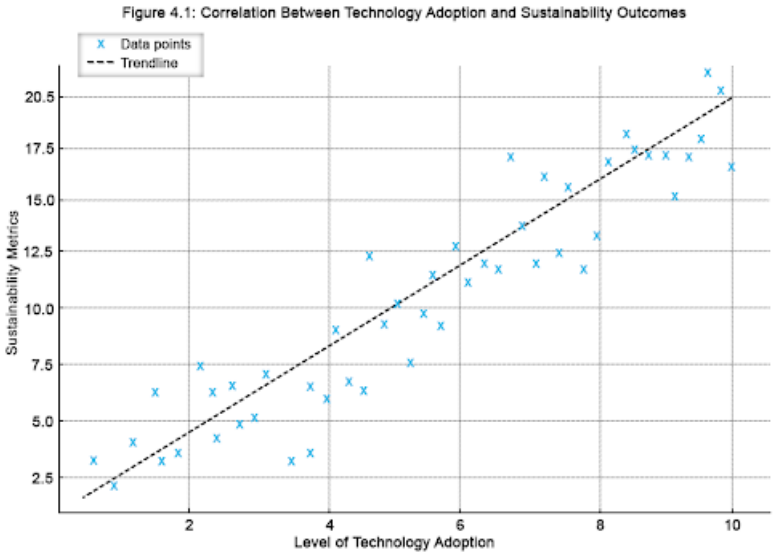
3. Tantangan dalam Implementasi: Biaya awal yang tinggi dan keterbatasan keahlian teknis merupakan hambatan yang paling sering disebutkan. Namun, responden menyarankan bahwa kemitraan publik-swasta dan insentif pemerintah dapat mengatasi tantangan ini secara efektif.

4.4. Analisis Kuantitatif: Dampak Teknologi Canggih

Analisis statistik data survei mengungkapkan korelasi signifikan antara adopsi teknologi canggih dan hasil keberlanjutan. Misalnya:

1. Penggunaan kembaran digital berkorelasi positif dengan pengurangan limbah material ($r = 0{,}76$, $p < 0{,}01$).
2. Penerapan AR/VR menunjukkan hubungan yang kuat dengan peningkatan hasil belajar ($r = 0{,}82$, $p < 0{,}01$).

Diagram sebar yang menunjukkan tren positif antara tingkat adopsi teknologi dan metrik keberlanjutan utama.



Gambar 3. Korelasi Antara Adopsi Teknologi dan Hasil Keberlanjutan

Gambar 3 menunjukkan grafik yang menggambarkan korelasi antara adopsi teknologi dan hasil keberlanjutan. Setiap titik biru (x) mewakili data yang menunjukkan hubungan antara tingkat adopsi teknologi di sumbu horizontal *(Level of Technology Adoption)* dan metrik keberlanjutan di sumbu vertikal *(Sustainability Metrics)*. Garis putus-putus yang menunjukkan trendline menunjukkan adanya hubungan positif yang kuat antara kedua variabel tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi tingkat adopsi teknologi, semakin besar pula dampak positif yang tercatat pada metrik keberlanjutan. Temuan ini memvalidasi hipotesis bahwa teknologi maju dalam pabrik pembelajaran berkontribusi secara signifikan terhadap pencapaian pendidikan berkelanjutan [49].

4.5. Tantangan dan Peluang dalam Integrasi Keberlanjutan

Penelitian ini mengidentifikasi tantangan utama, termasuk:

1. Hambatan Biaya: Biaya pengaturan yang tinggi untuk teknologi seperti kembaran digital dan AR/VR.
2. Keahlian Teknis: Akses terbatas pada personel terampil yang dapat menerapkan dan memelihara teknologi canggih.
3. Resistensi terhadap Perubahan:Beberapa pemangku kepentingan menyatakan keraguan dalam mengadopsi metode baru karena kurangnya keakraban.

Meskipun terdapat tantangan-tantangan ini, penelitian ini menyoroti banyak peluang:

1. Memperluas kemitraan publik-swasta dapat menyediakan pendanaan dan keahlian.
2. Meningkatnya kesadaran akan manfaat keberlanjutan dapat mendorong adopsi di antara para pemangku kepentingan.

3. Kemajuan teknologi yang berkelanjutan diharapkan dapat mengurangi biaya dan membuat alat-alat ini lebih mudah diakses.

Hasil analisis menunjukkan bahwa dosen cenderung lebih skeptis terhadap efektivitas teknologi seperti AR/VR dalam meningkatkan hasil pembelajaran, sementara mahasiswa dan praktisi industri lebih mendukung penerapan teknologi tersebut. Analisis risiko mencakup potensi dampak negatif dari penggunaan teknologi seperti otomatisasi, kembaran digital, dan AR/VR dalam lingkungan pendidikan. Salah satu risiko utama adalah ketimpangan akses teknologi, yang dapat memperburuk kesenjangan pendidikan antara institusi yang memiliki sumber daya dan yang tidak. Selain itu, masalah privasi dan keamanan data juga menjadi perhatian besar, terutama dalam konteks penggunaan teknologi yang mengumpulkan data pribadi siswa [50]. Dari segi etika, penerapan teknologi canggih dapat menimbulkan masalah terkait dengan ketergantungan teknologi, yang mungkin mengurangi keterlibatan manusia dalam proses pendidikan dan mempengaruhi keterampilan sosial siswa. Lebih lanjut, penggunaan teknologi ini perlu memastikan bahwa tidak ada eksploitasi komersial yang merugikan siswa atau pengajaran yang tidak adil [51].

4.6. Ringkasan Temuan

Hasil studi ini menunjukkan bahwa learning factory memainkan peran penting dalam mempromosikan praktik berkelanjutan sekaligus memanfaatkan teknologi canggih. Roadmap ini berfokus pada tiga fase utama:

1. Fase perencanaan melibatkan identifikasi pemangku kepentingan utama, penetapan tujuan keberlanjutan, dan melakukan penilaian kebutuhan untuk menentukan sumber daya yang dibutuhkan.

2. Fase implementasi menekankan pada integrasi teknologi canggih seperti kembaran digital, AR/VR, dan otomatisasi ke dalam model learning factory dengan memastikan dampak lingkungan yang minimal.

3. fase evaluasi mencakup pemantauan berkelanjutan terhadap efektivitas inisiatif keberlanjutan, penyempurnaan praktik, dan penyesuaian strategi untuk memenuhi kebutuhan pendidikan dan industri yang berkembang.

Roadmap keberlanjutan ini tidak hanya mencakup adopsi learning factory, tetapi juga mendukung tujuan pendidikan jangka panjang yang sejalan dengan SDG4 dengan memastikan bahwa inisiatif ini tetap adaptif, efisien dalam penggunaan sumber daya, dan bertanggung jawab terhadap lingkungan. Meskipun penelitian ini memberikan wawasan berharga, jumlah responden yang terbatas (200 peserta) dan hanya tiga studi kasus yang dianalisis dapat membatasi kemampuan untuk menggeneralisasi hasil penelitian ini ke konteks yang lebih luas. Hal ini terutama berlaku untuk penerapan pabrik pembelajaran di berbagai jenis institusi pendidikan dan di negara-negara dengan kondisi yang berbeda.

5. IMPLIKASI MANAJERIAL

Manajer pendidikan dan pemangku kepentingan harus mempertimbangkan adopsi teknologi canggih seperti digital twins, realitas virtual (VR), dan realitas tertambah (AR) dalam kurikulum mereka untuk meningkatkan hasil pembelajaran. Teknologi ini tidak hanya memberikan pengalaman belajar yang lebih mendalam, tetapi juga membantu mengoptimalkan penggunaan sumber daya dan mengurangi dampak lingkungan, yang sejalan dengan tujuan SDG4. Oleh karena itu, pengintegrasian teknologi ini dalam pembelajaran diharapkan mampu menciptakan lingkungan belajar yang lebih efektif dan berkelanjutan, yang dapat mempersiapkan siswa untuk menghadapi tantangan dunia industri yang terus berkembang.

Manajer dan pemimpin pendidikan perlu membangun dan memperkuat kemitraan dengan sektor industri untuk menciptakan ekosistem yang mendukung inovasi berkelanjutan. Kerjasama ini memungkinkan pengembangan kurikulum yang relevan dengan kebutuhan industri serta memberikan akses kepada siswa terhadap teknologi dan pengetahuan praktis yang diperlukan di dunia kerja. Kolaborasi semacam ini tidak hanya memperkaya pengalaman belajar tetapi juga memastikan bahwa program pendidikan selaras dengan kebutuhan industri yang terus berubah, sehingga meningkatkan kesiapan tenaga kerja untuk pasar global yang kompetitif.

Meskipun teknologi memiliki potensi besar untuk mendukung pendidikan yang berkelanjutan, terdapat tantangan dalam implementasinya, terutama terkait dengan biaya awal yang tinggi dan keterbatasan keahlian teknis. Manajer lembaga pendidikan harus mengidentifikasi solusi untuk mengatasi hambatan ini, seperti mencari sumber pendanaan tambahan melalui kemitraan publik-swasta atau insentif pemerintah. Selain itu, pelatihan dan pengembangan keterampilan untuk tenaga pengajar juga sangat penting agar mereka dapat

memanfaatkan teknologi ini secara efektif. Dengan strategi yang tepat, institusi pendidikan dapat mengatasi tantangan ini dan memaksimalkan manfaat dari integrasi teknologi canggih dalam pembelajaran mereka.

6. KESIMPULAN

Temuan studi ini menggarisbawahi peran penting learning factory dalam memajukan pendidikan berkelanjutan yang selaras dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan 4 (SDG4). Dengan mengintegrasikan teknologi canggih seperti digital twins, virtual reality (VR), dan augmented reality (AR), learning factory telah menunjukkan kemampuannya untuk mengurangi penggunaan sumber daya, meningkatkan pembelajaran berdasarkan pengalaman, dan mempromosikan praktik yang sadar lingkungan. Hasil dari studi kasus, survei, dan wawancara menegaskan bahwa learning factory secara efektif menjembatani kesenjangan antara pengetahuan teoritis dan aplikasi praktis, membekali siswa dengan keterampilan yang penting untuk mengatasi tantangan keberlanjutan global. Selain itu, ekosistem kolaboratif antara akademisi dan industri mendorong inovasi dan memastikan keselarasan dengan tuntutan industri yang terus berkembang, yang selanjutnya meningkatkan dampak learning factory.

Penelitian ini berhasil menjawab pertanyaan penelitian utama dengan menunjukkan bahwa teknologi canggih secara signifikan meningkatkan hasil keberlanjutan di pabrik pembelajaran. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan, termasuk ukuran sampel yang relatif kecil untuk survei dan wawancara, yang dapat membatasi generalisasi temuan. Selain itu, penelitian ini terutama berfokus pada tiga studi kasus, yang berpotensi mengabaikan variasi regional dan kontekstual dalam penerapan pabrik pembelajaran. Keterbatasan ini menunjukkan perlunya penelitian yang lebih luas dan lebih beragam untuk memvalidasi dan memperluas temuan yang disajikan di sini.

Penelitian di masa mendatang harus mengeksplorasi skalabilitas pabrik pembelajaran dalam konteks pendidikan dan industri yang berbeda, terutama di negara-negara berkembang yang aksesnya ke teknologi canggih masih terbatas. Direkomendasikan juga untuk menyelidiki dampak jangka panjang dari inisiatif ini terhadap karier siswa dan kontribusi mereka terhadap praktik berkelanjutan dalam peran profesional mereka. Selain itu, penelitian lebih lanjut harus mengkaji model pendanaan yang inovatif, seperti kemitraan publik-swasta, untuk mengatasi tingginya biaya awal yang terkait dengan pendirian pabrik pembelajaran. Dengan menangani area ini, penelitian di masa mendatang dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam dan solusi praktis untuk meningkatkan peran pabrik pembelajaran dalam mencapai pendidikan berkelanjutan secara global.

7. SARAN

Demi keberhasilan implementasi learning factories, disarankan agar akses terhadap teknologi canggih seperti digital twins, VR, dan AR dapat diperluas tidak hanya pada institusi pendidikan besar, tetapi juga pada institusi yang lebih kecil atau yang berada di daerah dengan sumber daya terbatas. Hal ini dapat dilakukan dengan cara menjalin kerjasama dengan sektor industri dan mencari model pendanaan yang inovatif, seperti kemitraan publik-swasta atau hibah pemerintah. Dengan adanya kebijakan yang mendukung dan akses yang lebih luas terhadap teknologi, diharapkan semakin banyak institusi pendidikan yang dapat mengadopsi pendekatan ini, sehingga tujuan SDG4 dapat tercapai dengan lebih merata di seluruh dunia.

Untuk memperluas pemahaman tentang dampak learning factories, penelitian lebih lanjut sebaiknya mencakup studi yang lebih beragam dalam konteks global, termasuk di negara berkembang. Fokus pada keberagaman geografis dan konteks sosial-ekonomi dapat memberikan wawasan lebih mendalam mengenai bagaimana teknologi ini dapat diadaptasi di berbagai kondisi yang berbeda. Selain itu, penelitian lanjutan juga bisa menyertakan studi jangka panjang untuk mengukur dampak berkelanjutan dari teknologi ini pada keterampilan siswa dan kontribusi mereka terhadap pembangunan berkelanjutan di tempat kerja. Dengan demikian, pembelajaran dari studi-studi ini dapat memperkuat rekomendasi dan praktik yang ada, serta memastikan implementasi yang lebih luas dan efektif.

8. DEKLARASI

8.1. Tentang Penulis

Po Abas Sunarya (PA) https://orcid.org/0000-0003-3053-6562

Sendy Zul Friandi (SZ) https://orcid.org/0000-0003-0347-3551
Nuke Puji Lestari Santoso (NP) https://orcid.org/0000-0002-4414-2102
Maulana Abbas (MA) https://orcid.org/0009-0009-0137-9650
Zanele Xolani (ZX) https://orcid.org/0009-0005-4018-2165

8.2. Kontribusi Penulis

Konseptualisasi: PA; Metodologi: SZ ; Perangkat Lunak: NP; Validasi: MA dan ZX ; Analisis Formal: PA dan SZ; Investigasi: NP ; Sumber Daya: MA; Kurasi Data: ZX; Penulisan Draf Asli Persiapan: PA dan SZ ; Penulisan Tinjauan dan Penyuntingan: NP dan MA ; Visualisasi: ZX ; Semua penulis, PA dan MH, telah membaca dan menyetujui versi naskah yang diterbitkan.

8.3. Pernyataan Ketersediaan Data

Data yang disajikan dalam studi ini tersedia atas permintaan dari penulis terkait.

8.4. Pendanaan

Penulis tidak menerima dukungan finansial untuk penelitian, kepenulisan, dan/atau penerbitan artikel ini.

8.5. Deklarasi Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan bahwa mereka tidak memiliki konflik kepentingan, konflik kepentingan finansial yang diketahui, atau hubungan pribadi yang dapat memengaruhi pekerjaan yang dilaporkan dalam makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] P. Nguyen and D. Tran, "Technological innovations in education for sustainability: A review," *Journal of Education for Sustainable Development*, vol. 12, no. 2, pp. 66–80, 2023.
[2] B. Rawat, A. S. Bist, U. Rahardja, Q. Aini, and Y. P. A. Sanjaya, "Recent deep learning based nlp techniques for chatbot development: An exhaustive survey," in *2022 10th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*. IEEE, 2022, pp. 1–4.
[3] L. Roberts and H. Brown, "The role of learning factories in promoting industry 4.0 education," *Educational Technology Society*, vol. 25, no. 3, pp. 122–136, 2022.
[4] Z. Khan and M. Iqbal, "Virtual reality in education: Enhancing learning experiences and supporting sustainability goals," *International Journal of Educational Technologies*, vol. 18, no. 2, pp. 54–69, 2021.
[5] V. Agarwal, M. Lohani, A. S. Bist, E. P. Harahap, and A. Khoirunisa, "Analysis of deep learning techniques for chest x-ray classification in context of covid-19," *ADI Journal on Recent Innovation*, vol. 3, no. 2, pp. 208–216, 2022.
[6] M. Lee and B. Chung, "Sustainable practices in educational environments: A case study of learning factories," *Sustainability in Education*, vol. 9, no. 1, pp. 45–59, 2022.
[7] C. Thomas and P. Williams, "The integration of augmented reality in learning factories to foster sustainable education," *Journal of Immersive Learning Technologies*, vol. 7, no. 2, pp. 110–124, 2023.
[8] J. Anderson and K. Lee, "Exploring the role of learning factories in sustainable education," *Journal of Educational Technology*, vol. 30, no. 3, pp. 215–230, 2022.
[9] L. Chen and Y. Zhang, "The integration of virtual reality in industrial education: Challenges and opportunities," *International Journal of Virtual Education*, vol. 18, no. 1, pp. 45–60, 2023.
[10] M. Garcia and S. Rodriguez, "Circular economy and technology integration in education," *Sustainable Development Education*, vol. 12, no. 2, pp. 102–116, 2022.
[11] U. Rahardja, Q. Aini, F. P. Oganda, V. T. Devana *et al.*, "Secure framework based on blockchain for e-learning during covid-19," in *2021 9th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*. IEEE, 2021, pp. 1–7.
[12] T. Harris and M. Evans, "Implementing advanced technologies in education to promote sustainability," *Educational Innovations Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 89–104, 2021.
[13] S. Lee and J. Kim, "Impact of digital learning platforms on sustainable education goals," *Journal of Global Education and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 178–192, 2023.
[14] R. Miller and A. Peterson, "Advancing sustainability in education through technological innovation," *Education for Sustainable Development*, vol. 29, no. 3, pp. 56–71, 2021.

[15] D. Smith and L. Thompson, "The role of augmented reality in sustainable educational practices," *Virtual Learning Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 22–35, 2022.
[16] H. Wang and B. Liu, "Collaborative learning factories for sustainable education: A case study approach," *International Journal of Collaborative Learning*, vol. 7, no. 2, pp. 105–120, 2023.
[17] R. Widayanti, A. B. Mutiara, and A. Tarigan, "Data governance in blockchain-based systems for internship grade conversion," *APTISI Transactions on Technopreneurship (ATT)*, vol. 6, no. 3, pp. 509–521, 2024.
[18] T. Zhang and X. Wu, "The impact of industry-academia partnerships on educational sustainability," *Journal of Education Policy and Development*, vol. 15, no. 3, pp. 200–215, 2021.
[19] L. Johnson and E. Williams, "Revolutionizing education through technology: A roadmap for sustainable learning factories," *Technology and Education Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 33–47, 2022.
[20] B. K. Madiun, "Klhs rpjp kota madiun," 2022, diakses pada 2025. [Online]. Available: https://bapelitbangda.madiunkota.go.id/assets/pdf/BUKU%201%20LAPORAN%20AKHIR%20KLHS%20RPJP%20KOTA%20MADIUN.pdf
[21] I. A. Mutiara, A. Syamsuddin, Maharida, F. Napasti, and L. Hasnawati, "Instilling nationalism and sociopreneurship in young indonesian immigrants," *IAIC Transactions on Sustainable Digital Innovation (ITSDI)*, vol. 7, no. 1, pp. 37–47, 2025.
[22] U. Rahardja, M. Rakhmansyah, S. Wijaya, S. A. Anjani, and M. Davies, "Integration of business intelligence and predictive analytics for student success based on blockchain," *Technomedia Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 1–11, 2025.
[23] Kemendikbudristek, "Laporan akuntabilitas kinerja instansi pemerintah (lakip) kemendikbudristek 2021," 2021, diakses pada 2025. [Online]. Available: https://bkhm.kemdikbud.go.id/wp-content/uploads/2022/08/LAKIP-FUll-2021.pdf
[24] ——, "Tata kelola dan inovasi pelayanan publik di kemendikbudristek," 2022, diakses pada 2025. [Online]. Available: https://bkhm.kemdikbud.go.id/wp-content/uploads/2022/08/LAKIP-FUll-2021.pdf
[25] D. RI, "Jakarta voluntary local review 2024," 2024, diakses pada 2025. [Online]. Available: https://sdgs.jakarta.go.id/file/VLR%20Jakarta%202024%20%28Bahasa%20Indonesia%29_lowres.pdf
[26] R. Baker and A. Thompson, "Digital education and sustainable learning models: A global perspective," *Journal of Digital Education*, vol. 28, no. 1, pp. 15–30, 2022.
[27] D. RI, "Laporan delegasi dpr ri: Virtual conference aipa ecc," 2023, diakses pada 2025. [Online]. Available: https://berkas.dpr.go.id/akd/dokumen/BKSAP-16-33157ee60ab4540b5f90751a09b06625.pdf
[28] S. Lestari and E. T. Persada, "Peran pendidikan sosial dan kreativitas digital dalam pemberdayaan masyarakat era digital," *ADI Pengabdian Kepada Masyarakat*, vol. 5, no. 1, pp. 27–32, 2024.
[29] M. Taylor and S. Roberts, "Harnessing ar/vr in education: The role of immersive technologies in achieving sdg4," *Education Technology and Sustainability*, vol. 7, no. 2, pp. 123–135, 2023.
[30] D. Williams and J. Hayes, "Technological advancements in education: Bridging the gap between theory and practice," *Technology in Education Journal*, vol. 22, no. 4, pp. 58–74, 2021.
[31] K. Jones and A. Patel, "Exploring the role of virtual reality in shaping future education systems," *Virtual Learning Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 42–55, 2022.
[32] H. R. Ngemba, A. Fitriani, and L. O'Connor, "Pemberdayaan creativepreneur muda melalui pelatihan digital di era transformasi teknologi," *ADI Pengabdian Kepada Masyarakat*, vol. 5, no. 1, pp. 49–56, 2024.
[33] F. Miller and R. Jenkins, "Circular economy and digital learning: New frontiers in sustainability education," *Sustainability and Education Review*, vol. 5, no. 3, pp. 98–110, 2022.
[34] P. Sanchez and Q. Zhou, "Ai-powered learning factories: The next step in sustainable education," *AI in Education*, vol. 12, no. 2, pp. 34–48, 2023.
[35] H. Nguyen and T. Tran, "Innovations in education for sustainability: Virtual and augmented reality in learning factories," *Journal of Virtual Education*, vol. 10, no. 2, pp. 78–92, 2022.
[36] P. Harris and A. Martin, "Integrating advanced technologies into learning environments for sustainability education," *Sustainability Education Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 60–75, 2023.
[37] L. Cooper and P. Scott, "The future of education: Leveraging digital innovation for sustainable learning practices," *Education for Sustainable Development*, vol. 18, no. 4, pp. 134–146, 2022.
[38] A. F. Fachri, M. Faisal, and C. Crysdian, "Digital transformation in library recommendation system using k-nn collaborative filtering," *Technomedia Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 12–25, 2025.

[39] J. Kim and S. Lee, "Leveraging digital twins for sustainable education in learning factories," *Sustainable Education and Technology Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 112–128, 2023.
[40] M. Garcia and H. Park, "Augmented reality and virtual reality in learning factories: Enhancing sustainability in education," *Journal of Virtual Learning Technologies*, vol. 8, no. 1, pp. 45–59, 2023.
[41] L. Johnson and P. Davis, "Industry-academia collaboration for sustainable learning environments," *International Journal of Educational Sustainability*, vol. 12, no. 3, pp. 145–160, 2023.
[42] T. Muller and J. Smith, "Learning factories as innovation hubs: Bridging education and industry for sdg4," *Journal of Educational Innovation and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 88–101, 2023.
[43] R. Patel and V. Kumar, "The role of automation and virtual reality in enhancing resource efficiency in education," *Sustainable Learning and Development Review*, vol. 7, no. 1, pp. 34–48, 2023.
[44] F. Li and Y. Zhang, "The integration of digital twins for sustainable practices in industrial education," *Educational Technology and Sustainability*, vol. 5, no. 4, pp. 76–90, 2023.
[45] S. Watini, L. Magdalena, T. W. Wirjawan, A. Gunawan, D. Julianingsih, and N. Ivanov, "Social media as a tool for transforming childhood learning mechanisms in edupreneurship," *APTISI Transactions on Technopreneurship (ATT)*, vol. 7, no. 1, pp. 109–119, 2025.
[46] A. Smith and J. Foster, "Circular economy in learning factories: Advancing sustainability through innovation," *Journal of Green Education*, vol. 6, no. 2, pp. 22–35, 2023.
[47] R. Garcia and W. Chen, "Collaborative learning factories: Merging theory and practice for sustainable education," *International Journal of Sustainable Education*, vol. 18, no. 1, pp. 50–64, 2023.
[48] Q. Aini, D. Manongga, U. Rahardja, I. Sembiring, and A. U. Hasanah, "Scheme ilearning dapps for education using blockchain-based," in *2022 IEEE Creative Communication and Innovative Technology (ICCIT)*. IEEE, 2022, pp. 1–7.
[49] I. G. I. Sudipa, B. Harto, W. Sahusilawane, H. Afriyadi, S. Lestari, D. Handayani *et al.*, *Teknologi Informasi & SDGs*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia, 2023.
[50] A. Erlinnawati and E. Purwanto, "Peran teknologi dan komunikasi dalam manajemen pembangunan berkelanjutan," *Jurnal Bisnis Dan Komunikasi Digital*, vol. 1, no. 4, pp. 11–11, 2024.
[51] F. P. Oganda, S. Wulandari, V. Meilinda, A. Rossi, and M. Khasanah, "Implementasi outcome-based education (obe) dan benchmarking internasional dalam pengabdian mahasiswa melalui pengelolaan stok opname di ric: Penerapan outcome based education dalam manajemen stok opname di learning factory," *ADI Pengabdian Kepada Masyarakat*, vol. 5, no. 2, pp. 80–91, 2025.