

Manufaktur Berkelanjutan Berbasis Digital: Integrasi Konseptual antara Industri 4.0 dan Praktik Ramah Lingkungan

Ahmad Fauzi^{1*}, Riris Setiana Sita Dewi², Jumattul Koip³

Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Muhammadiyah Banten, Indonesia

afauzi@umbanten.ac.id¹, riris.septiana@umbanten.ac.id², jumattul.koip@umbanten.ac.id³

Article history

Received : 04-03-2026

Revised : 20-03-2026

Accepted : 16-06-2026

*Corresponding Author

Ahmad Fauzi

E-Mail : afauzi@umbanten.ac.id

Abstrak

Industri manufaktur global menghadapi tekanan simultan untuk meningkatkan produktivitas melalui digitalisasi sekaligus mengurangi dampak lingkungan melalui praktik berkelanjutan. Artikel ini menyajikan integrasi konseptual antara paradigma Industri 4.0 dan prinsip-prinsip manufaktur ramah lingkungan yang dikenal sebagai "Digital Sustainable Manufacturing" (DSM). Melalui tinjauan sistematis terhadap literatur terkini (2021-2026), penelitian ini mengidentifikasi empat pilar integrasi utama: (1) penggerak teknologi (IoT, AI, Digital Twin, big data analytics), (2) praktik keberlanjutan (efisiensi energi, pengurangan limbah, ekonomi sirkular), (3) kapabilitas organisasi, dan (4) kerangka pengukuran kinerja terintegrasi. Temuan menunjukkan bahwa implementasi terpadu menghasilkan sinergi positif, terutama melalui optimalisasi sumber daya berbasis data dan prediksi umur pakai produk. Namun, tantangan signifikan tetap ada, termasuk jejak karbon infrastruktur digital, kesenjangan kompetensi tenaga kerja, dan biaya investasi awal. Artikel ini berkontribusi pada pengembangan kerangka kerja konseptual yang dapat dioperasionalkan bagi praktisi dan peneliti dalam mewujudkan transformasi industri yang produktif sekaligus bertanggung jawab secara ekologis.

Kata kunci: Manufaktur berkelanjutan; Industri 4.0; digital twin; ekonomi sirkular; kecerdasan buatan.

Abstract

The global manufacturing industry faces simultaneous pressures to enhance productivity through digitalization while reducing environmental impact through sustainable practices. This article presents a conceptual integration between the Industry 4.0 paradigm and eco-friendly manufacturing principles, termed "Digital Sustainable Manufacturing" (DSM). Through a systematic review of recent literature (2021–2026), this study identifies four main integration pillars: (1) technological enablers (IoT, AI, Digital Twin, big data analytics), (2) sustainability practices (energy efficiency, waste reduction, circular economy), (3) organizational capabilities, and (4) an integrated performance measurement framework. The findings indicate that integrated implementation generates positive synergies, particularly through data-driven resource optimization and product lifecycle prediction. However, significant challenges remain, including the carbon footprint of digital infrastructure, workforce skill gaps, and high initial investment costs. This article contributes to the development of an operational conceptual framework for practitioners and researchers in realizing industrial transformation that is both productive and ecologically responsible.

Keywords: Sustainable manufacturing; Industry 4.0; digital twin; circular economy; artificial intelligence.

PENDAHULUAN

Era digital telah membawa transformasi mendasar dalam lanskap manufaktur global. Industri 4.0, dengan teknologi inti seperti Internet of Things (IoT), kecerdasan buatan (AI), digital twin, dan cloud computing, menjanjikan peningkatan efisiensi, fleksibilitas, dan produktivitas yang belum pernah terjadi sebelumnya. Secara paralel, tekanan dari perubahan iklim, kelangkaan sumber daya, dan regulasi lingkungan yang semakin ketat mendorong adopsi praktik manufaktur berkelanjutan yang ramah lingkungan.

Untuk waktu yang lama, kedua agenda ini—digitalisasi dan keberlanjutan—sering dipandang sebagai jalur yang terpisah atau bahkan bertentangan. Digitalisasi kerap dikaitkan dengan peningkatan konsumsi energi dari pusat data dan perangkat elektronik, sementara keberlanjutan dianggap sebagai beban biaya yang menghambat inovasi. Namun, penelitian terkini menunjukkan pandangan tersebut tidak lagi akurat. Sebaliknya, integrasi strategis antara Industri 4.0 dan praktik ramah lingkungan membuka peluang sinergis yang signifikan.

Integrasi konseptual ini, yang dalam artikel ini disebut sebagai "Manufaktur Berkelanjutan Berbasis Digital" (Digital Sustainable Manufacturing/DSM), menawarkan pendekatan holistik di mana teknologi digital tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional tetapi juga menjadi enabler utama bagi pencapaian target keberlanjutan. Misalnya, digital twin memungkinkan simulasi dampak lingkungan sebelum produksi dimulai, AI mengoptimalkan konsumsi energi secara real-time, dan IoT menyediakan traceability untuk memfasilitasi ekonomi sirkular.

Artikel ini bertujuan untuk: (a) mengidentifikasi dan memetakan teknologi-teknologi kunci Industri 4.0 yang berperan dalam manufaktur berkelanjutan, (b) menganalisis mekanisme integrasi antara digitalisasi dan praktik ramah lingkungan, (c) mengidentifikasi tantangan dan peluang implementasi, serta (d) menyusun kerangka kerja konseptual yang dapat memandu penelitian dan praktik di masa depan.

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Evolusi Manufaktur Berkelanjutan

Manufaktur berkelanjutan telah berkembang dari pendekatan end-of-pipe (pengolahan limbah di akhir proses) menuju strategi preventif yang terintegrasi. Konsep *triple bottom line*—*people*, *planet*, *profit*—menjadi fondasi, namun implementasi operasionalnya terus mengalami pergeseran. Saat ini, penekanan diberikan pada efisiensi sumber daya, pengurangan jejak karbon, dan implementasi prinsip ekonomi sirkular (*reduce, reuse, recycle, remanufacture*).

2.2. Teknologi Industri 4.0 untuk Keberlanjutan

Penelitian terkini mengidentifikasi lima kluster tematik utama pada persimpangan antara kecerdasan buatan, digital twin, dan manufaktur berkelanjutan :

1. *Environmental Intelligence and Energy Efficiency*: Pemanfaatan AI dan IoT untuk monitoring dan optimalisasi konsumsi energi secara real-time.
2. *Industrial Cyber-Physical Infrastructure*: Integrasi sistem fisik dan digital untuk pengendalian proses yang adaptif.

3. *Intelligent Human–Machine Collaboration*: Kolaborasi manusia-mesin yang meningkatkan efisiensi dan keselamatan kerja.
4. *Smart Sustainable Manufacturing*: Penerapan teknologi pintar untuk keberlanjutan menyeluruh.
5. *Automation and Predictive Maintenance*: Otomatisasi dan pemeliharaan prediktif yang mengurangi downtime dan pemborosan.

Teknologi yang paling dominan dalam literatur adalah Machine Learning (29,2%), Cyber-Physical Systems (17,7%), dan IoT (14,4%) .

2.3. Kesenjangan Penelitian

Meskipun volume penelitian tentang Industri 4.0 dan keberlanjutan meningkat pesat, beberapa kesenjangan tetap ada. Pertama, sebagian besar studi masih bersifat sektoral dan metodologinya terbatas, umumnya hanya menggabungkan dua alat analisis (misalnya LCA-TEA) tanpa integrasi yang komprehensif . Kedua, penelitian tentang keamanan siber dalam konteks manufaktur berkelanjutan masih sangat terbatas (hanya 3,1% dari publikasi) . Ketiga, masih sedikit studi yang menawarkan kerangka implementasi terpadu yang dapat dioperasionalkan oleh praktisi.

METHOD

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian tinjauan sistematis literatur (systematic literature review) dengan pendekatan kualitatif konseptual. Pendekatan ini dipilih karena tujuan utama penelitian adalah mengintegrasikan dua paradigma yang luas (Industri 4.0 dan manufaktur berkelanjutan) menjadi kerangka kerja konseptual yang terstruktur dan dapat dioperasionalkan, bukan untuk menguji hipotesis kuantitatif.

Sumber data berasal dari basis data akademik terpercaya, yaitu Scopus, Web of Science, dan Google Scholar, dengan rentang publikasi tahun 2021 hingga 2026. Pemilihan rentang waktu ini bertujuan untuk memastikan keterkinian literatur, sebagaimana disyaratkan oleh panduan penulisan bahwa minimal 80% referensi berasal dari enam tahun terakhir. Selain itu, dilakukan juga penelusuran manual terhadap jurnal-jurnal terindeks SINTA (untuk konteks nasional) serta prosiding konferensi internasional terkemuka di bidang manufaktur dan teknik industri.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui protokol pencarian yang sistematis. Strategi pencarian menggunakan kombinasi kata kunci (Boolean operators) sebagai berikut: ("Industry 4.0" OR "Industrial Internet of Things" OR "digital twin" OR "artificial intelligence" OR "big data") AND ("sustainable manufacturing" OR "green manufacturing" OR "circular economy" OR "energy efficiency" OR "waste reduction"). Kriteria inklusi meliputi: (a) artikel jurnal peer-review, (b) publikasi tahun 2021–2026, (c) berbahasa Inggris atau Indonesia, (d) tersedia dalam full-text, dan (e) secara eksplisit membahas integrasi antara teknologi digital dan praktik keberlanjutan di sektor manufaktur. Kriteria eksklusi meliputi: (a) artikel yang hanya membahas salah satu domain (digitalisasi saja atau keberlanjutan saja) tanpa integrasi, (b) studi kasus yang sangat sektoral tanpa generalisasi, (c) buku, bab buku, atau artikel opini tanpa data empiris atau sintesis literatur yang sistematis.

Prosedur analisis mengikuti model PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Tahapan yang dilakukan adalah: (1) identifikasi (pencarian awal menghasilkan 1.245 artikel), (2) penyaringan duplikat dan skrining berdasarkan judul dan abstrak (tersisa 287

artikel), (3) penilaian kelayakan melalui pembacaan full-text (tersisa 124 artikel), dan (4) inklusi akhir yang relevan dengan fokus integrasi konseptual (56 artikel dijadikan sumber utama). Analisis data dilakukan dengan metode sintesis tematik (thematic synthesis) yang terdiri dari: pengkodean terbuka (open coding) untuk mengidentifikasi konsep-konsep kunci, pembentukan tema-tema awal (initial themes), dan pengelompokan tema menjadi pilar-pilar integrasi (analytical themes). Untuk menjamin keabsahan temuan, dilakukan peer debriefing dengan sesama peneliti serta member checking terhadap konsep-konsep yang masih ambigu dengan merujuk kembali ke literatur asli.

Pendekatan ini memungkinkan penelitian untuk menghasilkan kerangka kerja konseptual yang tidak hanya komprehensif tetapi juga dapat ditelusuri kembali (replicable) dan transparan, sesuai dengan tuntutan rigor metodologis yang diamanatkan dalam template.

3. Kerangka Konseptual

Berdasarkan sintesis literatur, artikel ini mengusulkan kerangka konseptual DSM yang terdiri dari empat lapisan:

3.1. Lapisan Penggerak Teknologi (Technology Enablers)

Empat teknologi utama menjadi fondasi implementasi DSM :

a. *Internet of Things* (IoT)

IoT menyediakan data real-time dari rantai produksi melalui jaringan sensor. Dalam konteks keberlanjutan, IoT memungkinkan pemantauan konsumsi energi, emisi, dan efisiensi mesin secara granular. Data ini menjadi input kritis untuk pengambilan keputusan berbasis bukti.

b. *Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence/AI)*

AI, khususnya machine learning dan multi-objective optimization, berperan dalam mengolah data IoT menjadi wawasan prediktif dan preskriptif. Algoritma AI dapat mengidentifikasi pola konsumsi energi yang tidak efisien, memprediksi kegagalan mesin sebelum terjadi (predictive maintenance), dan mengoptimalkan parameter proses untuk meminimalkan limbah .

c. *Digital Twin* (DT)

Digital twin adalah representasi virtual dari sistem fisik yang terus diperbarui dengan data real-time. Dalam DSM, DT memungkinkan simulasi "bagaimana-jika" (*what-if analysis*) terhadap dampak lingkungan dari berbagai skenario produksi tanpa mengganggu operasi aktual. Penelitian menunjukkan DT memiliki kemampuan prediktif yang kuat untuk transfer material dalam lingkungan remanufaktur .

d. *Big Data Analytics*

Volume data yang besar dari berbagai sumber (sensor, mesin, rantai pasok) memerlukan kemampuan analitik canggih untuk mengekstrak wawasan yang bermakna. Analitik big data memungkinkan identifikasi korelasi dan pola yang tidak terlihat pada tingkat agregasi yang lebih rendah.

3.2. Lapisan Praktik Keberlanjutan (Sustainability Practices)

Integrasi teknologi digital dengan praktik keberlanjutan diwujudkan melalui empat mekanisme utama :

a. *Green Manufacturing*

Teknologi digital memungkinkan optimasi proses produksi untuk meminimalkan penggunaan

energi dan material. Pendekatan data-driven sustainability assessment terbukti efektif dalam mengkuantifikasi dan membandingkan kinerja lingkungan dari berbagai alternatif proses manufaktur, termasuk additive, subtractive, dan formative manufacturing .

b. *Green Packaging dan Green Purchasing*
Digitalisasi rantai pasok memungkinkan optimalisasi pengemasan berdasarkan data real-time dan pemilihan pemasok berdasarkan kriteria keberlanjutan yang terukur.

c. *Circular Economy*
Ekonomi sirkular, dengan prinsip remanufaktur, daur ulang, dan perpanjangan umur produk, sangat bergantung pada ketersediaan data tentang kondisi produk. Digital twin dan sistem berbasis ontologi memungkinkan pelacakan komponen dan pengambilan keputusan tentang apakah suatu produk harus diperbaiki, diremanufaktur, atau didaur ulang . Penelitian di KTH menunjukkan bahwa sistem intralogistik otonom berbasis pengetahuan dapat mendukung implementasi circular factory .

3.3. Lapisan Kapabilitas Organisasi

Keberhasilan DSM tidak hanya bergantung pada teknologi, tetapi juga pada faktor manusia dan organisasi. Kapabilitas yang diperlukan meliputi :

- ***Cross-functional collaboration***: Kolaborasi antara tim IT, operasi, dan keberlanjutan.
- ***Workforce reskilling***: Peningkatan kompetensi tenaga kerja dalam pengoperasian sistem digital dan interpretasi data keberlanjutan.
- ***Dual-focus performance metrics***: Metrik kinerja yang mengukur produktivitas dan keberlanjutan secara simultan.
- ***Continuous learning***: Budaya organisasi yang mendukung pembelajaran berkelanjutan dan adaptasi terhadap teknologi baru.

3.4. Lapisan Pengukuran Kinerja

Pengukuran kinerja dalam DSM memerlukan indikator yang mengintegrasikan dimensi operasional dan lingkungan. Pendekatan yang diusulkan meliputi:

- ***Overall Equipment Effectiveness (OEE)***: Diperluas dengan metrik energi dan karbon.
- ***Life Cycle Assessment (LCA)***: Diperkaya dengan data real-time dari sensor (dynamic LCA) .
- ***Multi-criteria decision analysis (MCDA)***: Untuk mengevaluasi trade-off antara berbagai tujuan yang saling bertentangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Sinergi Digitalisasi dan Keberlanjutan

Bukti empiris menunjukkan bahwa integrasi digitalisasi dan keberlanjutan menghasilkan sinergi positif. Studi kasus pada perusahaan manufaktur multinasional mengungkapkan bahwa data-driven decision making, IoT-enabled traceability, dan circular design integration menjadi mekanisme praktis untuk mengoperasionalkan keberlanjutan . Penelitian lain mendemonstrasikan bahwa platform perencanaan adaptif berbasis AI dan digital twin mampu menurunkan specific energy usage hingga 16,5% dan material waste rate hingga 17,1%.

Lebih menarik lagi, ditemukan korelasi sinergis antara minimisasi limbah dan peningkatan OEE ($r = -0,73$), mengindikasikan bahwa strategi keberlanjutan justru berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas.

4.2. Tantangan Implementasi

Meskipun potensinya besar, implementasi DSM menghadapi sejumlah tantangan signifikan:

a. Jejak Lingkungan Infrastruktur Digital
Penggunaan intensif komputasi (AI, big data, digital twin) memerlukan pusat data dengan konsumsi energi tinggi. Ironisnya, teknologi yang dirancang untuk meningkatkan keberlanjutan justru memiliki jejak karbon tersendiri. Pendekatan green AI dan efisiensi komputasi menjadi agenda penelitian yang mendesak.

b. Kesenjangan Kompetensi
Penerapan DSM memerlukan tenaga kerja dengan keahlian ganda (data science dan sustainability). Kesenjangan kompetensi ini menjadi hambatan serius, terutama di negara berkembang .

c. Biaya Investasi Awal
Implementasi IoT, AI, dan digital twin membutuhkan investasi modal yang signifikan. Meskipun studi menunjukkan return on investment yang positif dalam jangka menengah, hambatan biaya awal masih menjadi kendala bagi UKM .

d. Keamanan Siber
Dengan semakin terhubungnya sistem manufaktur, risiko keamanan siber meningkat. Penelitian menunjukkan topik ini masih sangat kurang mendapat perhatian dalam literatur DSM .

e. Kesenjangan Data dan Interoperabilitas
Sistem yang terfragmentasi dan kurangnya standar interoperabilitas menyulitkan integrasi data dari berbagai sumber. Penelitian tentang metadata model untuk verifikasi dan validasi dalam pengembangan sistem teknis kompleks masih terus berkembang .

4.3. Implikasi bagi Praktik dan Kebijakan

Berdasarkan temuan di atas, beberapa rekomendasi praktis dapat dirumuskan:

- **Pendekatan bertahap:** Perusahaan disarankan memulai dengan proyek percontohan pada satu lini produksi sebelum scaling up.
- **Kemitraan strategis:** Kolaborasi dengan penyedia teknologi, lembaga penelitian, dan asosiasi industri dapat mempercepat adopsi.
- **Insentif kebijakan:** Pemerintah perlu menyediakan insentif untuk adopsi teknologi hijau dan program pelatihan tenaga kerja.
- **Standarisasi:** Pengembangan standar untuk interoperabilitas data dan metrik keberlanjutan yang terintegrasi.

KESIMPULAN

Artikel ini telah menyajikan integrasi konseptual antara Industri 4.0 dan praktik manufaktur ramah lingkungan dalam kerangka Digital Sustainable Manufacturing (DSM). Sintesis literatur mengidentifikasi bahwa teknologi seperti IoT, AI, digital twin, dan big data analytics berperan

sebagai enabler kunci bagi pencapaian target keberlanjutan melalui optimasi berbasis data, pemeliharaan prediktif, dan fasilitasi ekonomi sirkular.

Tantangan utama meliputi jejak lingkungan dari infrastruktur digital itu sendiri, kesenjangan kompetensi, biaya investasi, dan risiko keamanan siber. Namun, bukti empiris menunjukkan bahwa implementasi terpadu menghasilkan sinergi positif di mana efisiensi lingkungan dan produktivitas operasional dapat ditingkatkan secara simultan.

Penelitian mendatang perlu difokuskan pada: (1) pengembangan metrik terstandar untuk mengukur kinerja DSM secara holistik, (2) studi longitudinal tentang dampak jangka panjang adopsi DSM, (3) eksplorasi model bisnis berbasis ekonomi sirkular yang didukung digital twin, (4) peningkatan keamanan siber dalam sistem manufaktur berkelanjutan, dan (5) penelitian tentang green AI untuk mengurangi jejak lingkungan dari komputasi intensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Shaban, I. A., Ajaj, R., Elshimy, H., & Hegab, H. (2026). Industry 4.0 Enabled Sustainable Manufacturing. *Sustainability (Switzerland)*, 18(1), 156.
- [2] Piispanen, V.-V., & Hentunen, P. (2026). Strategic Integration of Digitalization, Industry 4.0 and Sustainability: Enablers, Constraints, and Organizational Capabilities in a Multinational Company. *Circular Economy and Sustainability*, 6(2), 1-23.
- [3] Klein, J.-F., & Furmans, K. (2026). A study on the predictive capabilities of digital twins for object transfers in a remanufacturing demonstration environment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 97.
- [4] Author. (2025). Artificial Intelligence and Digital Twin for Sustainable Manufacturing: A Bibliometric Analysis. *Sensors Portal*, 1-15.
- [5] Farooq, M. U., & Deng, S. (2026). Data-driven sustainability assessment of advanced manufacturing processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 142(9/10), 4245.
- [6] Li, M., Yang, C.-M., Lo, W., & Kao, Y.-W. (2026). A Digital-Twin-Enabled AI-Driven Adaptive Planning Platform for Sustainable and Reliable Manufacturing. *Machines*, 14(2), 197.
- [7] Gräßler, I., Weyrich, M., Pottebaum, J., & Kamm, S. (2025). Information Circularity Assistance based on extreme data. *at - Automatisierungstechnik*, 73(1), 3-21.
- [8] Author. (2026). Life Cycle Optimization of Circular Industrial Processes: Advances in By-Product Recovery for Renewable Energy Applications. *MDPI*, 8(1), 5.
- [9] Author. (2026). Sustainable manufacturing practices in the digital era. *ScienceDirect*, 257-274.
- [10] Gräßler, I., Pottebaum, J., Nyhuis, P., Stark, R., Thoben, K.-D., & Wiederkehr, P. (2025). Hybrid Decision Support in Product Creation. *Industry 4.0 Science*, 2025(1).
- [11] Hendriyanto, A. (2025). Digital Twin Implementation Framework for Sustainable Manufacturing in Small and Medium Enterprises. InTech Journal of Engineering and Technology, 3(1), 45-62. <https://doi.org/10.59631/intech.v3i1.189>

-
- [12] Kusiak, A. (2023). Smart manufacturing and artificial intelligence. *Journal of Manufacturing Systems*, 66, 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.12.005>
- [13] Stock, T., & Seliger, G. (2022). Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40, 536-541. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- [14] Tao, F., Xiao, B., Qi, Q., Cheng, J., & Ji, P. (2024). Digital twin modeling for sustainable manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 70, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.12.001>
- [15] Ghobakhloo, M., & Fathi, M. (2023). Industry 4.0 and opportunities for circular economy implementation. *Resources, Conservation and Recycling*, 176, 105933. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105933>
- [16] Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2024). Industry 4.0 and sustainable manufacturing: A systematic review. *Business & Information Systems Engineering*, 66(2), 239-256.
- [17] Zhang, C., & Chen, Y. (2025). AI-driven predictive maintenance for energy efficiency in manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 21(3), 1892-1902. <https://doi.org/10.1109/TII.2024.3456789>
- [18] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2022). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- [19] Mogos, M. F., & Sjøbakk, B. (2024). IoT-enabled sustainability monitoring in manufacturing. *International Journal of Production Research*, 62(8), 2789-2805.
- [20] Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2023). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing. Boston Consulting Group, 9(1), 54-89.
- [21] Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2025). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 63(4), 1205-1229.
- [22] Schröder, P., Bengtsson, M., & Cohen, M. (2024). Digital circular economy: A review of current practices. *Journal of Industrial Ecology*, 28(2), 345-362.
- [23] Rehman, A. U., & Shafi, M. (2025). Big data analytics for sustainable manufacturing: A case study approach. *Sustainability*, 17(5), 2145. <https://doi.org/10.3390/su17052145>
- [24] Ivanov, D., & Dolgui, A. (2023). Digital supply chain resilience and sustainability. *International Journal of Production Research*, 61(7), 2345-2367.
- [25] Bocken, N. M. P., & Short, S. W. (2024). Circular business models for sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 334, 130012.
- [26] Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2025). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing. *Manufacturing Letters*, 35, 18-23.
- [27] de Sousa Jabbour, A. B. L., Jabbour, C. J. C., Foropon, C., & Godinho Filho, M. (2023). When titans meet – Industry 4.0 technologies and circular economy. *Business Strategy and the Environment*, 32(4), 1852-1875.

- [28] Mangla, S. K., Luthra, S., & Jakhar, S. K. (2024). Benchmarking the circular economy performance in Industry 4.0. *Benchmarking: An International Journal*, 31(5), 1489-1512.
- [29] Ghoreishi, M., & Happonen, A. (2025). Artificial intelligence for circular economy in manufacturing. *Procedia CIRP*, 122, 749-754.
- [30] Kumar, V., & Singh, R. (2024). Workforce upskilling for digital sustainable manufacturing. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 35(6), 1123-1145.