

Arsitektur Metaverse Industri Berbasis Digital Twin untuk Desain Sistem Produksi yang Dapat Beradaptasi

Farah Azzahra^{1*}, Setyawati Dewi²

^{1*2} Universitas Lampung, Indonesia

Alamat: Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1, Gedong Meneng, Kecamatan Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung

Email : farahazzahra@unila.ac.id¹ , setyawatidewi@unila.ac.id²

Korespondensi penulis: farahazzahra@unila.ac.id

Abstract The industrial metaverse, powered by digital twin (DT) technology, is emerging as a transformative paradigm for designing adaptable, resilient, and human-centric production systems in the Industry 4.0 and 5.0 era. This study examines digital twin-based industrial metaverse architecture and how this technology enables the design of adaptable production systems. Based on a systematic review of recent developments from various European projects, academic initiatives, and industrial implementations, this research identifies a typical multi-layer architecture: (1) the physical layer comprising production equipment, IoT sensors, and control systems; (2) the connectivity and data layer enabling real-time data exchange through standard protocols; (3) the digital twin layer encompassing virtually synchronized models; and (4) the metaverse application layer delivering immersive interfaces through XR for collaborative design, simulation, and decision-making. Implementations in the automotive industry demonstrate that ISO 23247-compliant industrial metaverse architecture supports "what-if" simulations for quality prediction and process optimization leveraging AI mechanisms. The European MODUL4R project also emphasizes the role of the industrial metaverse in predicting unwanted events through real-time simulation and enabling system reconfiguration to prevent losses. The Siemens-NVIDIA collaboration through the Xcelerator and Omniverse technologies also demonstrates how integrated DT architecture can enable simulation of hundreds of factory layouts in hours, accelerating design time from weeks to days. This research concludes that DT-based industrial metaverse offers a robust framework for adaptable production system design, yet implementation requires attention to interoperability standardization, distributed data management, and cybersecurity to realize its full potential.

Keywords: industrial metaverse, digital twin, adaptable production systems, architecture, Industry 5.0

Abstrak Metaverse industri yang didukung oleh teknologi digital twin (DT) muncul sebagai paradigma transformatif untuk merancang sistem produksi yang adaptif, tangguh, dan berpusat pada manusia di era Industry 4.0 dan 5.0. Penelitian ini mengkaji arsitektur metaverse industri berbasis DT dan bagaimana teknologi ini memungkinkan desain sistem produksi yang dapat beradaptasi. Berdasarkan tinjauan sistematis terhadap perkembangan terkini dari berbagai proyek Eropa, inisiatif akademik, dan implementasi industri, penelitian ini mengidentifikasi arsitektur multi-lapis yang khas: (1) lapisan fisik yang terdiri dari peralatan produksi, sensor IoT, dan sistem kontrol; (2) lapisan konektivitas dan data yang memungkinkan pertukaran data real-time melalui protokol standar; (3) lapisan digital twin yang mencakup model virtual yang disinkronkan secara real-time; dan (4) lapisan aplikasi metaverse yang menghadirkan antarmuka imersif melalui XR untuk desain, simulasi, dan pengambilan keputusan kolaboratif. Implementasi di industri otomotif menunjukkan bahwa arsitektur metaverse industri berbasis ISO 23247 mampu mendukung simulasi "what-if" untuk prediksi kualitas dan optimasi proses dengan memanfaatkan mekanisme AI. Proyek MODUL4R Eropa juga menekankan peran metaverse industri dalam memprediksi kejadian yang tidak diinginkan melalui simulasi real-time dan memungkinkan rekonfigurasi sistem untuk mencegah kerugian. Kolaborasi Siemens-NVIDIA melalui teknologi Xcelerator dan Omniverse juga mendemonstrasikan bagaimana arsitektur DT yang terintegrasi dapat memungkinkan simulasi ratusan tata letak pabrik dalam hitungan jam, mempercepat waktu desain dari minggu menjadi hari. Penelitian ini menyimpulkan bahwa metaverse industri berbasis DT menawarkan kerangka kerja yang kuat untuk desain sistem produksi yang adaptif, namun implementasinya memerlukan perhatian pada standarisasi interoperabilitas, manajemen data terdistribusi, dan keamanan siber untuk mewujudkan potensi penuhnya.

Kata Kunci: metaverse industri, digital twin, sistem produksi adaptif, arsitektur, Industry 5.0

1. LATAR BELAKANG

1.1. Metaverse Industri: Dari Konsep ke Implementasi

Konsep metaverse industri muncul sebagai perpanjangan dari *evolusi Industry 4.0* dan *Industry 5.0*, yang membuka jalur baru untuk mengintegrasikan ekosistem digital canggih dalam rekayasa produksi. Metaverse industri didefinisikan sebagai konvergensi teknologi imersif XR, data real-time, dan ruang kolaboratif virtual yang memungkinkan pengembangan Sistem Informasi Cerdas (SIS) yang meningkatkan kecerdasan, kemampuan beradaptasi, dan konektivitas.

Meskipun fondasi teknologi untuk digitalisasi industri sebagian besar telah tersedia dan kemajuan dalam AI serta teknologi XR terus berkembang pesat, implementasi di dunia nyata masih berada pada tahap awal. Ini terlihat dari berbagai proyek penelitian Eropa yang baru mulai menunjukkan hasil nyata, serta kolaborasi industri seperti Siemens dan NVIDIA yang masih mengembangkan teknologi stack untuk masa depan.

1.2. Digital Twin sebagai Fondasi Metaverse Industri

Digital twin (DT) memainkan peran krusial dalam mewujudkan metaverse industri. Berbeda dengan simulasi konvensional yang bersifat statis dan offline, DT dalam konteks metaverse industri bersifat dinamis, disinkronkan secara real-time dengan aset fisik, dan mampu melakukan prediksi serta optimasi. Seperti yang diungkapkan oleh Siemens, DT holistik menyatukan visualisasi 3D, simulasi, dan data pabrik ke dalam satu lingkungan, memungkinkan desain dengan konteks penuh dan co-simulasi skala besar.

Proyek MODUL4R Eropa menekankan pentingnya DT yang interoperable dan penggunaan simulasi real-time yang terhubung dengan metaverse industri untuk memprediksi kemungkinan kejadian yang tidak diinginkan. Ini memungkinkan rekonfigurasi sistem untuk mencegah potensi kerugian dari hasil optimal. Sementara itu, proyek Core-Tech4.0 di Vietnam bertujuan mengembangkan solusi digital twin yang hemat biaya untuk UKM dengan memanfaatkan platform NVIDIA Omniverse untuk mendemonstrasikan konsep metaverse industri untuk pemesinan CNC.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1. Definisi dan Karakteristik Metaverse Industri

Metaverse industri adalah ruang virtual persisten yang mengintegrasikan dunia fisik dan digital, memungkinkan interaksi real-time, kolaborasi, dan pengambilan keputusan berbasis data dalam konteks industri. Definisi ini menyoroti beberapa karakteristik kunci:

- a. Imersif: Menggunakan teknologi XR (VR, AR, MR) untuk menciptakan pengalaman yang mendalam dan intuitif.
- b. Real-time: Terintegrasi dengan data IoT dan sistem kontrol untuk mencerminkan kondisi aktual secara real-time.
- c. Kolaboratif: Memungkinkan tim yang tersebar secara geografis untuk bekerja bersama dalam lingkungan virtual yang sama.
- d. Cerdas: Didukung oleh AI dan analitik untuk prediksi, optimasi, dan pengambilan keputusan otonom.

2.2. Arsitektur Referensi Metaverse Industri

Berdasarkan sintesis dari berbagai sumber, arsitektur metaverse industri umumnya terdiri dari empat lapisan utama:

2.2.1 Lapisan 1: Fisik dan Perangkat

Terdiri dari peralatan produksi, sensor IoT, PLC, dan sistem kontrol. Contoh implementasi mencakup pusat permesinan artikulasi lima sumbu dan robot industri enam sumbu. Proyek Core-Tech4.0 mengembangkan jaringan sensor dan *platform IoT* untuk mesin CNC untuk memungkinkan pengumpulan data real-time dan deteksi kesalahan.

2.2.2 Lapisan 2: Konektivitas dan Data

Menyediakan infrastruktur untuk pengumpulan dan transmisi data real-time. Proyek MODUL4R menekankan penggunaan antarmuka cerdas, pengontrol siap AAS, dan sensor serta perangkat cerdas untuk mencapai operasi manufaktur yang tangguh dan responsif cepat. Protokol seperti OPC-UA dan MQTT digunakan untuk interoperabilitas.

2.2.3 Lapisan 3: Digital Twin

Representasi virtual dari sistem fisik yang disinkronkan secara real-time. Arsitektur yang mematuhi standar ISO 23247 diusulkan untuk mendukung pengembangan solusi yang interoperable dan terstandarisasi, dengan studi kasus di jalur perakitan otomotif untuk proses inspeksi kualitas. Lapisan ini juga mencakup pemodelan dinamika proses dan validasi sinkronisasi fisika-virtual.

2.2.4 Lapisan 4: Aplikasi Metaverse dan AI

Lapisan ini menghadirkan antarmuka imersif melalui XR dan kecerdasan buatan untuk simulasi, optimasi, dan pengambilan keputusan. Siemens mendemonstrasikan penggunaan AI untuk mensimulasikan ratusan tata letak pabrik potensial untuk menemukan desain paling efisien. Proyek MODUL4R mengimplementasikan fungsi Reaktif, Koordinasi, dan Kognitif melalui layanan cerdas untuk proses produksi yang fleksibel dan adaptif.

2.3. Desain Sistem Produksi yang Dapat Beradaptasi

Desain sistem produksi yang dapat beradaptasi (*adaptable production system design*) adalah kemampuan untuk merancang dan mengonfigurasi ulang sistem produksi secara cepat dan efisien untuk merespons perubahan permintaan, produk, atau kondisi operasional. Metaverse industri berbasis DT memungkinkan adaptasi melalui:

- a. Simulasi dan Optimasi Layout: Dengan DT dan AI, ratusan konfigurasi tata letak pabrik dapat disimulasikan dalam hitungan jam untuk mengidentifikasi desain yang paling efisien.
- b. Virtual Commissioning: Validasi peralatan dan logika kontrol secara virtual sebelum implementasi fisik, mengurangi risiko dan biaya. Siemens mendemonstrasikan hal ini dengan menghubungkan simulasi dinamis langsung ke peralatan kontrol otomatisasi (PLC).
- c. Rekonfigurasi Cepat: Proyek MODUL4R menekankan kemampuan rekonfigurasi sistem melalui fungsi Koordinasi untuk mencegah potensi kerugian dari hasil optimal. Penelitian tentang unit lini produksi cerdas yang dapat dikonfigurasi ulang menunjukkan bahwa perubahan cepat dapat dicapai dengan menyesuaikan informasi posisi program robot dan memprogram ulang proses pemesinan.
- d. Prediksi dan Pencegahan: Simulasi real-time di metaverse industri memprediksi kemungkinan kejadian yang tidak diinginkan, memungkinkan tindakan preventif. Arsitektur DT yang mematuhi ISO 23247 juga menunjukkan kemampuan untuk secara akurat memprediksi output untuk parameter kualitas kritis berdasarkan skenario pengukuran hipotetis.
- e. Pemanfaatan Pengetahuan Tacit: Metaverse memungkinkan eksternalisasi dan transfer pengetahuan tacit melalui penangkapan perilaku ahli (*motion tracking, gesture recording*) dan rekonstruksinya dalam skenario pelatihan atau alur kerja simulasi.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Pendekatan dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur sistematis dan analisis konseptual. Metode ini dipilih untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis secara komprehensif berbagai bukti ilmiah dan praktik industri tentang arsitektur metaverse industri berbasis digital twin. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk menggabungkan wawasan dari berbagai sumber mulai dari proyek penelitian Eropa yang sedang berjalan hingga kolaborasi industri mutakhir untuk membangun pemahaman yang holistik tentang lanskap teknologi yang masih berkembang ini.

3.2. Strategi Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan pada empat kelompok sumber utama:

3.2.1 Proyek Penelitian dan Inisiatif Strategis

- a. Proyek-proyek yang didanai Uni Eropa (misalnya MODUL4R) yang fokus pada rantai pasok tangguh dan responsif cepat
- b. Inisiatif kolaborasi internasional yang mengembangkan teknologi digital twin dan metaverse industri
- c. Program penelitian nasional yang mendukung transformasi digital UKM

3.2.2 Literatur Akademik Peer-Review

- a. Jurnal-jurnal terkemuka di bidang manufaktur dan sistem produksi (*ScienceDirect, IEEE Xplore*)
- b. Prosiding konferensi internasional tentang rekayasa produksi dan sistem cerdas
- c. Artikel yang membahas arsitektur digital twin, metaverse industri, dan desain sistem produksi adaptif

3.2.3 Laporan Industri dan Kolaborasi Teknologi

- a. Publikasi dari perusahaan teknologi terkemuka (Siemens, NVIDIA) tentang implementasi metaverse industri
- b. Studi kasus dari implementasi di industri otomotif dan manufaktur presisi
- c. Buku putih dan laporan teknis tentang standar interoperabilitas (ISO 23247)

3.2.4 Konsep dan Kerangka Teoritis

- a. Publikasi tentang Smart Information Systems (SIS) dalam rekayasa produksi
- b. Kerangka teoritis tentang sistem produksi yang adaptif dan tangguh
- c. Literatur tentang Industry 4.0 dan Industry 5.0

3.3. Kriteria Pemilihan Literatur

Untuk memastikan kualitas dan relevansi, peneliti menerapkan kriteria inklusi dan eksklusi:

3.3.1 Kriteria Inklusi:

- a. Artikel atau laporan yang membahas arsitektur digital twin atau metaverse industri
- b. Studi yang memberikan bukti implementasi di industri manufaktur
- c. Publikasi yang membahas desain sistem produksi yang dapat beradaptasi
- d. Sumber yang diterbitkan dalam 5 tahun terakhir (2021-2026)
- e. Tersedia teks lengkap dalam bahasa Inggris

3.3.2 Kriteria Eksklusi:

- a. Studi yang hanya berfokus pada digital twin tanpa kaitannya dengan metaverse industri
- b. Literatur yang tidak memberikan bukti implementasi atau studi kasus
- c. Publikasi yang tidak tersedia teks lengkap
- d. Artikel yang tidak relevan dengan topik utama

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Temuan Utama

Data penelitian disajikan pada table 4.1 berikut :

Tabel 4.1 temuan utama

Sumber	Lapisan Fisik	Lapisan Konektivitas	Lapisan Digital Twin	Lapisan Aplikasi Metaverse
MODUL4R Proyek	Peralatan manufaktur, sensor cerdas	Antarmuka cerdas, AAS controllers, IEC61499 CPS	DT interoperable, simulasi real-time	Metaverse industri, simulasi "on the fly"
ISO 23247 DT Framework	Aset produksi (jalur perakitan)	Protokol standar	DT yang mematuhi ISO, what-if simulation	AI-based mechanisms, prediksi kualitas
Siemens-NVIDIA	Pabrik, mesin, PLC	Siemens Xcelerator	DT holistik dengan 3D, simulasi, data	NVIDIA Omniverse, AI-driven optimasi
Core-Tech4.0	Mesin CNC, sensor IoT	Cloud platform, IoT	DT hemat biaya (NVIDIA Omniverse)	Industrial Metaverse untuk CNC machining
Smart Information Systems	Sistem produksi, material	IoT, IIoT	Digital twins, real-time monitoring	XR, metaverse untuk desain dan pelatihan

4.2. Arsitektur Multi-Lapis: Dari Fisik ke Metaverse

Temuan penelitian menunjukkan bahwa arsitektur metaverse industri berbasis DT terdiri dari empat lapisan utama yang saling terintegrasi. Arsitektur ini memungkinkan transformasi data dari dunia fisik menjadi wawasan yang dapat ditindaklanjuti dan pengalaman imersif.

4.2.1 Lapisan Fisik dan Perangkat berfungsi sebagai sumber data.

Proyek Core-Tech4.0 mengembangkan jaringan sensor dan platform IoT untuk mesin CNC, yang memungkinkan pengumpulan data real-time, deteksi kesalahan, dan pengambilan keputusan cerdas. Di sisi lain, penelitian tentang unit lini produksi cerdas yang dapat dikonfigurasi ulang menunjukkan integrasi pusat permesinan artikulasi lima sumbu dan robot industri enam sumbu sebagai perangkat fisik.

4.2.2 Lapisan Konektivitas dan Data menjembatani kesenjangan antara fisik dan digital.

MODUL4R mengintegrasikan teknologi modular inovatif seperti antarmuka cerdas, pengontrol siap AAS, dan sensor serta perangkat cerdas untuk mencapai operasi manufaktur yang tangguh. Lapisan ini memungkinkan interoperabilitas data dan dukungan keputusan multi-level untuk fleksibilitas dan kemampuan adaptasi proses secara keseluruhan.

Lapisan Digital Twin adalah jantung dari arsitektur. Arsitektur yang mematuhi standar ISO 23247 diusulkan untuk mendukung pengembangan solusi DT yang interoperable dan terstandarisasi, dengan studi kasus di jalur perakitan otomotif. DT yang dihasilkan mampu memprediksi output untuk parameter kualitas kritis berdasarkan skenario pengukuran hipotetis. Siemens juga mengembangkan DT holistik yang menyatukan visualisasi 3D, simulasi, dan data pabrik ke dalam satu lingkungan.

4.2.3 Lapisan Aplikasi Metaverse dan AI memanfaatkan DT untuk pengalaman imersif dan pengambilan keputusan cerdas.

Siemens dan NVIDIA mendemonstrasikan bagaimana DT yang terintegrasi dengan NVIDIA Omniverse memungkinkan simulasi ratusan tata letak pabrik dalam hitungan jam, mempercepat waktu desain dari minggu menjadi hari. Proyek MODUL4R juga menekankan peran metaverse industri dalam memprediksi kejadian yang tidak diinginkan dan memungkinkan rekonfigurasi sistem. Lapisan aplikasi ini mencakup fungsi Reaktif, Koordinasi, dan Kognitif melalui layanan cerdas untuk proses produksi yang fleksibel dan adaptif.

4.3. Digital Twin untuk Desain dan Optimasi Adaptif

Salah satu aplikasi paling signifikan dari arsitektur metaverse industri adalah desain sistem produksi yang adaptif. Siemens mendemonstrasikan bagaimana DT yang terintegrasi dengan AI dapat mensimulasikan ratusan tata letak pabrik potensial untuk menemukan desain paling efisien dalam hitungan jam, bukan hari atau minggu. DT ini kemudian dapat merender model pabrik yang fotorealistik dan berbasis fisika.

Keunggulan lain adalah virtual commissioning, di mana simulasi dinamis terhubung langsung ke peralatan kontrol otomatisasi (PLC) untuk memvalidasi kinerja peralatan dan fungsionalitas logika kontrol. Selain itu, rekonfigurasi cepat dimungkinkan dengan menyesuaikan program robot dan memprogram ulang proses pemesinan, yang menunjukkan kemampuan adaptasi sistem produksi. MODUL4R juga menekankan

bahwa korelasi hasil produksi dengan kinerja dan proses untuk setiap desain akan memungkinkan rekonfigurasi sistem untuk mencegah potensi kerugian dari hasil optimal.

4.4. Tantangan Implementasi dan Kesenjangan Penelitian

Meskipun potensinya besar, implementasi metaverse industri berbasis DT menghadapi berbagai tantangan. Tantangan pertama adalah kompleksitas teknologi, perubahan infrastruktur yang diperlukan, kebutuhan pelatihan ekstensif bagi karyawan, dan masalah keamanan siber. Kedua, interoperabilitas dan manajemen data terdistribusi menimbulkan tantangan signifikan terhadap stabilitas dan prediktabilitas sistem. Pembaruan asinkron yang berkelanjutan pada DT individu dan model AI generatif yang mendasarinya menciptakan ketergantungan dinamis yang tidak dapat dikelola secara memadai oleh sistem manajemen persyaratan terpusat tradisional karena masalah kepercayaan, transparansi, dan integritas data.

Tantangan lainnya adalah kebutuhan validasi empiris. Sebagian besar temuan masih bersifat teoritis dan memerlukan validasi empiris untuk mengukur peningkatan kinerja yang dapat diukur. Selain itu, pengalaman pengguna (*user experience*) menjadi faktor kritis, sehingga penelitian masa depan perlu fokus pada desain antarmuka yang intuitif dan ramah pengguna, termasuk pengembangan head-mounted display generasi berikutnya yang menyeimbangkan fidelitas visual dengan ergonomi untuk mendukung penggunaan yang berkepanjangan tanpa ketidaknyamanan.

4.5. Implikasi untuk Era Manufaktur 5.0

Temuan penelitian ini memiliki implikasi penting untuk transisi menuju Industry 5.0, yang menekankan integrasi elemen manusia dan keberlanjutan. Metaverse industri memungkinkan kolaborasi manusia-mesin yang lebih baik melalui antarmuka XR yang intuitif dan imersif. Selain itu, pemanfaatan pengetahuan tacit melalui penangkapan perilaku ahli dalam lingkungan XR memungkinkan pelestarian dan transfer keahlian, yang sangat penting seiring dengan pensiunnya pekerja senior.

Metaverse industri juga mendukung keberlanjutan dengan memungkinkan simulasi dan optimasi efisiensi energi, pengurangan limbah, dan desain siklus hidup produk. Seperti yang dinyatakan dalam MODUL4R, proyek ini memungkinkan proses yang tangguh, fleksibel, dan berkelanjutan untuk produksi volume rendah dan terdistribusi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

- a. Metaverse industri berbasis digital twin menawarkan arsitektur multi-lapis yang kuat untuk desain sistem produksi yang adaptif, yang terdiri dari lapisan fisik, konektivitas, digital twin, dan aplikasi metaverse. Arsitektur ini memungkinkan transformasi data real-time menjadi wawasan yang dapat ditindaklanjuti dan pengalaman imersif untuk optimasi dan pengambilan keputusan.
- b. Implementasi di industri otomotif dan proyek penelitian Eropa menunjukkan hasil yang menjanjikan, seperti simulasi what-if untuk prediksi kualitas, rekonfigurasi cepat sistem, dan pengurangan waktu desain dari minggu menjadi hari. Kolaborasi Siemens-NVIDIA menunjukkan bagaimana DT yang terintegrasi dengan AI dapat mensimulasikan ratusan tata letak pabrik dalam hitungan jam.
- c. Digital twin yang mematuhi standar ISO 23247 menawarkan jalur menuju solusi yang interoperable dan terstandarisasi, mendukung simulasi what-if untuk prediksi kualitas dan optimasi proses dengan memanfaatkan mekanisme AI.
- d. Tantangan implementasi yang signifikan tetap ada, termasuk kompleksitas teknologi, interoperabilitas data terdistribusi, keamanan siber, kebutuhan pelatihan ekstensif, dan validasi empiris. Keberhasilan integrasi metaverse ke dalam lingkungan industri menuntut perencanaan dan investasi substansial dari pemberi kerja dan karyawan.
- e. Metaverse industri berbasis DT sejalan dengan tujuan Industry 5.0 dengan memungkinkan kolaborasi manusia-mesin yang lebih baik, pelestarian pengetahuan tacit, dan dukungan terhadap keberlanjutan melalui optimasi efisiensi energi dan pengurangan limbah.

5.2. Saran

Bagi Peneliti:

- a. Melakukan studi empiris untuk memvalidasi manfaat kuantitatif dari arsitektur metaverse industri berbasis DT dalam berbagai konteks industri, untuk mengatasi keterbatasan temuan teoritis saat ini.
- b. Mengembangkan kerangka manajemen persyaratan terdistribusi yang dapat mengatasi tantangan pembaruan asinkron dan ketergantungan dinamis dalam jaringan DT, seperti yang diusulkan oleh penelitian tentang Web3 dan teknologi distributed ledger.

- c. Mengeksplorasi peran AI dalam memungkinkan lingkungan metaverse yang responsif, adaptif, dan personal, serta integrasi edge computing dan 5G untuk mengatasi tantangan latensi.

Bagi Praktisi Industri:

- a. Mengadopsi pendekatan bertahap untuk implementasi metaverse industri, dimulai dengan pilot project pada satu lini produksi sebelum memperluas ke seluruh fasilitas.
- b. Berinvestasi dalam pelatihan dan adaptasi karyawan terhadap mode kerja baru, karena pelatihan pengguna dan adaptasi terhadap mode kerja baru diidentifikasi sebagai faktor penting untuk adopsi.
- c. Memprioritaskan interoperabilitas data dengan mengadopsi standar industri seperti OPC-UA dan ISO 23247 untuk memfasilitasi integrasi dengan ekosistem yang ada dan memastikan solusi yang scalable.

DAFTAR REFERENSI

- MODUL4R Project. (2026). Industrial Manufacturing strategies for distributed control and resilient, rapidly responsive and reconfigurable supply chains. CORDIS, European Commission. <https://cordis.europa.eu/project/id/101091859>
- ScienceDirect. (2026). A digital twin-enabled Industrial Metaverse architecture for production system design: Evidence from an implementation in the automotive industry. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361526001119>
- IEEE Xplore. (2025). Digital twins are a crucial component in creating an industrial metaverse. IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11454546>
- VinIF. (2024). Core-Tech4.0: A data-driven multiphysics modeling and digital twin-based platform to optimize the production in small and medium-sized mechanical manufacturing enterprises. <https://vinif.org/en/annual/vinif-2024-da112-core-tech4-0/>
- Vitkovic, N., Manić, M., Mitković, M., et al. (2025). The Concept of Smart Information Systems in Production Engineering: A Metaverse Approach. 40th International Conference on Production Engineering of Serbia (ICPES 2025). <https://doi.org/10.46793/icpes25.314v>

- IEEE Xplore. (2025). Challenges of Digitizing Reality into a Connected Metaverse – the Complexity of Data Requirements of Distributed Digital Twins. IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11190105>
- Siemens Blog. (2025). Siemens showcases the future of AI-era manufacturing at NVIDIA GTC. Siemens Tecnomatix Blog. <https://blogs.sw.siemens.com/tecnomatix/siemens-showcases-the-future-of-ai-era-manufacturing-at-nvidia-gtc/>
- ICPES 2025. (2025). The Concept of Smart Information Systems in Production Engineering: The Metaverse Approach. University of Kragujevac. <http://spms.fink.rs/doc/2025/S7-3.html>
- Springer. (2025). Research on Flexible and Reconfigurable Intelligent Production Line Units Based on Digital Twin. Sustainable Manufacturing Innovations. https://doi.org/10.1007/978-3-031-84744-8_1
- IEEE Xplore. (2025). Industrial Metaverse Digital Twin: ISO 23247 Compliant Architecture for AI-Driven Simulation. IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11087908>
- Design And Reuse. (2025). Siemens and NVIDIA Preview Industrial Tech Stack for AI-Era Manufacturing. <https://www.design-reuse.com/news/202529658/siemens-and-nvidia-preview-industrial-tech-stack-for-ai-era-manufacturing/>
- ICPES 2025 PDF. (2025). The Concept of Smart Information Systems in Production Engineering: A Metaverse Approach (Full Paper).
- MODUL4R Project. (2026). Industrial Manufacturing strategies for distributed control and resilient, rapidly responsive and reconfigurable supply chains. CORDIS, European Commission. <https://cordis.europa.eu/project/id/101091859/reporting/es#>
- MODUL4R Project. (2025). Revolutionizing Digital Integration: From Static to Proactive Digital Twins. 6th Press Release. https://www.modular-project.eu/s/MODUL4r_6thPressRelease.pdf#1#
- Koprov, P., & Starly, B. (2025). Industrial metaverse meets IIoT: low-code platforms for machine-to-machine and human-to-machine integration. Manufacturing Letters, 44, 1254-1265. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2025.06.145>
- CIO. (2026). Siemens and Nvidia outline a radical realignment of manufacturing at CES. CIO.com. <https://www.cio.com/article/4114691/siemens-at-ces-ai-as-an-operating-system-for-industry.html#1>

Guo, J., Leng, J., Zhao, J. L., et al. (2024). Industrial metaverse towards Industry 5.0: Connotation, architecture, enablers, and challenges. *Journal of Manufacturing Systems*, 76, 25-42