

Digital Twin dalam Rekayasa Proses

1. Definisi dan Konsep Digital Twin dalam Rekayasa Proses

Definisi Digital Twin dalam Rekayasa Proses

Digital Twin (DT) adalah representasi virtual yang secara real-time mereplikasi kondisi, perilaku, dan dinamika sistem fisik melalui integrasi data sensor, model simulasi, dan algoritma analitik. Dalam konteks rekayasa proses, DT berfungsi sebagai “cermin digital” yang memungkinkan simulasi, pemantauan, serta optimasi kinerja proses industri secara berkelanjutan. Konsep ini menggabungkan teknologi Cyber-Physical System (CPS), Internet of Things (IoT), serta kecerdasan buatan untuk menciptakan loop umpan balik dua arah antara dunia nyata dan dunia virtual (Siswanto & Dewi, 2023).

Komponen Utama Digital Twin

- **Model Fisik Virtual:** Model CAD/CAE yang menggambarkan geometri dan sifat material aset.
- **Data Sensor Real-Time:** Pengukuran suhu, tekanan, getaran, dan variabel proses lainnya yang dikirim melalui protokol IoT (mis. OPC UA, MQTT).
- **Algoritma Analitik:** Metode prediktif seperti Kalman Filter, LSTM, atau machine learning untuk memperbarui model secara dinamis (Irwanto & Cornelis, 2025).
- **Platform Integrasi:** Kerangka kerja seperti Asset Administration Shell (AAS) yang menyediakan standar pertukaran data antar-aset (Rizqi, 2021).
- **Antarmuka Visualisasi:** Dashboard real-time untuk monitoring, deteksi anomali, dan pengambilan keputusan operasional.

Manfaat Digital Twin dalam Rekayasa Proses

Aspek	Manfaat	Contoh Implementasi
Efisiensi Operasional	Mengurangi downtime hingga >20% melalui prediksi kegagalan	Pemeliharaan prediktif mesin produksi (Marlina, 2026)
Pengurangan Biaya	Menurunkan biaya pemeliharaan rutin dan energi	Optimasi kapasitas AGV di smart warehouse (Rizqi, 2021)
Keamanan	Deteksi dini anomali struktural atau hidrolik, mengurangi risiko kecelakaan	Simulasi kebocoran hidrolik forklift (Huda, 2025)
Keberlanjutan	Memungkinkan simulasi skenario iklim untuk infrastruktur kritis	Digital twin jembatan pesisir (Pangaribuan, 2025)
Inovasi Produk	Integrasi AI untuk desain iteratif dan pengujian virtual	Pengembangan sistem kontrol adaptif pada mesin industri (Marlina, 2026)

Strategi Implementasi Digital Twin pada Sistem Proses

- Identifikasi Aset Kritis:** Pilih peralatan atau proses yang memiliki dampak signifikan terhadap produksi atau keselamatan.
- Pembangunan Model Virtual:** Gunakan perangkat lunak simulasi (mis. FlexSim, ANSYS) untuk membuat model 3-D yang terhubung dengan AAS.
- Integrasi Sensor IoT:** Pasang sensor yang dapat mengirim data secara kontinu ke platform cloud.
- Penerapan Algoritma Pembaruan:** Implementasikan filter Kalman atau jaringan LSTM untuk menyelaraskan data sensor dengan output simulasi (Irwanto & Cornelis, 2025).
- Validasi dan Kalibrasi:** Bandingkan output model dengan data lapangan menggunakan metrik R^2 atau RMSE; contoh validasi pada forklift menunjukkan $R^2 = 0,999$ (Huda, 2025).
- Operasionalisasi Dashboard:** Buat antarmuka visual yang menampilkan KPI, prediksi kegagalan, dan rekomendasi tindakan.
- Pemeliharaan Berkelanjutan:** Perbarui model secara periodik berdasarkan data historis dan hasil inspeksi.

Studi Kasus Relevan

Pemeliharaan Mesin Pabrik: Marlina (2026) melaporkan peningkatan efektivitas pemeliharaan prediktif sebesar **20%** setelah mengadopsi DT, yang mengurangi downtime dan biaya operasional.

Smart Warehouse: Rizqi (2021) mengembangkan DT dinamis berbasis AAS untuk mengoptimalkan kapasitas Automated Guided Vehicles (AGV) dan menyediakan dashboard monitoring real-time.

Forklift Hidrolik: Huda (2025) menunjukkan bahwa DT berbasis IoT dapat mendeteksi kebocoran hidrolik melalui perubahan pola tekanan dan kecepatan piston, dengan akurasi tinggi ($R^2 > 0,99$).

Jembatan Pesisir: Pangaribuan (2025) mengintegrasikan sensor lingkungan dan struktural dengan model DT yang diperkaya LSTM, menghasilkan prediksi kerusakan dengan MAPE $< 5\%$ dan lead time peringatan 5-7 hari.

Kerangka Teoritis dan Trend Penelitian

Analisis bibliometrik oleh Lizar dkk. (2023) mengidentifikasi pertumbuhan eksponensial publikasi digital twin dalam dekade terakhir, dengan fokus pada smart systems, machine learning, dan cloud computing. Hal ini menegaskan bahwa digital twin telah menjadi landasan utama dalam transformasi industri **4.0** dan menuju Society **5.0** (Lizar et al., 2023).

2. Aplikasi Digital Twin dalam Rekayasa Proses

Desain Proses dengan Digital Twin

Digital twin (DT) memungkinkan integrasi data real-time ke dalam model simulasi proses, sehingga desain dapat divalidasi sebelum implementasi fisik. Pada rekayasa struktur, penggunaan Kalman filter untuk menyaring data *Structural Health Monitoring* (SHM) meningkatkan akurasi model FEM dan memungkinkan pembaruan model secara dinamis (Irwanto & Cornelis, 2025). Pendekatan serupa dapat diterapkan pada proses kimia atau manufaktur, di mana sensor proses memberi umpan balik ke model simulasi untuk mengoptimalkan parameter operasi seperti suhu, tekanan, atau laju alir.

Contoh penerapan di smart warehouse menunjukkan bagaimana *Asset Administration Shell* (AAS) dapat menjadi kerangka standar untuk menghubungkan aset fisik (AGV, konveyor, forklift) dengan model simulasi **3-D**. Simulasi ini tidak hanya memvisualisasikan alur kerja, tetapi juga melakukan optimisasi kapasitas AGV secara multi-objective, menghasilkan keputusan perencanaan yang lebih cepat dan mengurangi kebutuhan iterasi fisik (Rizqi, 2021).

Operasi Proses dan Pengendalian Real Time

Implementasi DT pada mesin pengisi larutan (liquid filling machine) memperlihatkan manfaat utama: replikasi virtual 3-D yang terhubung melalui REST API, memungkinkan visualisasi kondisi mesin secara real-time dengan latensi rata-rata 1,6 detik (Wardani et al., 2024). Data sensor dikirim nirkabel, diproses oleh model DT, dan hasilnya ditampilkan pada antarmuka digital cockpit, sehingga operator dapat mendeteksi anomali sebelum terjadi kegagalan.

Dalam konteks sistem industri otomatis, DT yang menggabungkan lapisan fisik, jaringan IoT, dan simulasi virtual meningkatkan efisiensi produksi, mengurangi kesalahan, serta mengoptimalkan konsumsi energi (Siswanto & Dewi, 2023). Simulasi skenario operasional (misalnya perubahan beban kerja atau kegagalan sensor) dapat dijalankan secara virtual, memberikan rekomendasi preventif yang menurunkan downtime.

Pemeliharaan Prediktif dan Keamanan Operasional

Penggunaan Kalman filter dalam DT struktural tidak hanya meningkatkan akurasi prediksi, tetapi juga memungkinkan deteksi dini kerusakan dengan mengurangi noise pada data SHM (Irwanto & Cornelis, 2025). Pada lini produksi robotik, DT membantu mengidentifikasi potensi gangguan keamanan melalui monitoring kontinu, sehingga tindakan pencegahan dapat diambil sebelum kecelakaan terjadi (Siswanto & Dewi, 2023).

Integrasi VR/AR dengan DT, seperti pada kontrol lengan robot UR5e menggunakan headset HMD, menyediakan antarmuka imersif yang mempercepat proses pemeliharaan di area berbahaya. Pengujian menunjukkan latensi rendah dan akurasi tinggi, serta skor kegunaan (SUS) 73,25, menandakan kesiapan teknologi untuk aplikasi industri (Taufiqurrahman, 2024).

Manfaat Kinerja dan Pengurangan Downtime

Area Aplikasi	Manfaat Utama	Contoh Implementasi
Desain Proses	Validasi virtual, optimisasi parameter, pengurangan iterasi fisik	Framework Kalman filter pada FEM (Irwanto & Cornelis, 2025)

Operasi Real-Time	Monitoring 3-D, deteksi anomali, kontrol berbasis API	Digital twin liquid filling machine (Wardani et al., 2024)
Pemeliharaan Prediktif	Deteksi dini kerusakan, pengurangan downtime	DT pada lini robotik industri (Siswanto & Dewi, 2023)
Interaksi Manusia-Mesin	Antarmuka imersif, pelatihan jarak jauh	VR kontrol UR5e dengan HMD (Taufiqurrahman, 2024)

Strategi Implementasi di Industri Indonesia

Untuk mengadopsi DT secara luas, diperlukan standar interoperabilitas seperti AAS, protokol komunikasi OPC UA, dan format data AutomationML (Rizqi, 2021). Selain itu, integrasi dengan teknologi industri 4.0/5.0—IoT, AI, serta AR/VR—memperkuat kemampuan analitik prediktif dan visualisasi yang dapat meningkatkan kualitas produk dan respons pasar (Baladraf, 2024).

3. Teknologi yang Mendukung Digital Twin dalam Rekayasa Proses

Peran IoT dalam Pengumpulan Data untuk Digital Twin

Internet of Things (IoT) menyediakan jaringan sensor dan perangkat yang terhubung secara real-time, memungkinkan akuisisi data fisik secara kontinu. Data yang dihasilkan mencakup suhu, tekanan, kecepatan aliran, posisi geografis, serta status mesin produksi. Menurut Kaur, Mishra, dan Maheshwari (2020), digital twin “mengadaptasi secara terus-menerus berdasarkan data real-time dari berbagai sensor IoT” sehingga model virtual dapat mencerminkan perubahan operasional secara akurat.¹ Pada konteks industri, Stergiou dan Psannis (2022) menekankan bahwa arsitektur berbasis cloud dapat mengintegrasikan data IoT dengan teknik pembelajaran mesin (machine learning) dan reinforcement learning untuk menciptakan skenario digital twin yang memprediksi konsumsi energi dan kondisi mesin secara proaktif.²

AI dan Machine Learning untuk Analisis dan Prediksi

Artificial Intelligence (AI) dan algoritma machine learning (ML) berperan dalam mengolah volume data besar (big data) yang dihasilkan oleh IoT. Kaur et al. (2020) mencatat bahwa AI “memfasilitasi pengembangan model baru dan sistem teknologi dalam manufaktur cerdas” serta memungkinkan prediksi perilaku fisik melalui model statistik dan jaringan Bayesian dinamis.¹ Contoh penerapan AI meliputi:

- Deteksi anomali pada peralatan produksi menggunakan jaringan saraf tiruan (neural networks).
- Prediksi Remaining Useful Life (RUL) dengan deep learning, sebagaimana dijelaskan oleh Yan et al. (2018) dalam konteks industri **4.0.3**
- Optimasi rute logistik kota pintar melalui model gradient boosting (XGBoost) dan jaringan multilayer perceptron (MLP) yang memanfaatkan data IoT real-time (Fatorachian, Kazemi, & Pawar, 2025).⁴

Data Analytics dan Big Data dalam Digital Twin

Pengolahan data skala besar memerlukan infrastruktur komputasi awan (cloud) atau tepi (edge/fog). Liu et al. (2018) menyoroti peran data fusion dalam pemeliharaan prediktif, dimana data sensor digabungkan untuk meningkatkan akurasi prediksi kegagalan.⁵ Selain itu, Stergiou & Psannis (2022) mengusulkan kerangka kerja EEIBDM yang menggabungkan federated learning untuk melatih model AI secara terdistribusi tanpa memindahkan data mentah, menjaga privasi sekaligus meningkatkan efisiensi komputasi.²

Arsitektur Integratif: IoT+AI+Digital Twin

Model arsitektur yang umum meliputi tiga lapisan utama:

Lapisan	Fungsi	Teknologi Kunci
Data Acquisition	Pengumpulan data sensor secara real-time	IoT sensor, M2M, RFID
Analytics & AI	Pengolahan, analisis, prediksi, dan keputusan	Machine learning, deep learning, federated learning, reinforcement learning
Digital Twin & Simulation	Replikasi virtual, simulasi skenario, feedback loop	Cloud/Fog computing, cyber-physical systems, cybernetic feedback

Radanliev et al. (2022) menegaskan bahwa integrasi AI dalam cyber-physical systems (CPS) memungkinkan digital twin berfungsi sebagai “representasi virtual yang beroperasi secara real-time” dan mendukung keputusan adaptif melalui umpan balik cybernetic.⁶

Kasus Penggunaan pada Rekayasa Proses

- **Manufaktur pintar:** Penggunaan sensor IoT pada lini produksi untuk memantau suhu dan getaran, AI menganalisis pola untuk mendeteksi kegagalan dini, dan digital twin mensimulasikan perbaikan proses sebelum diterapkan secara fisik (Kharchenko & Illiashenko, 2020).⁷
- **Smart city logistics:** Data GPS kendaraan dan kondisi lalu lintas (IoT) diproses oleh model prediktif AI untuk mengoptimalkan rute pengiriman; digital twin kota menampilkan skenario lalu lintas dan menguji kebijakan baru secara virtual (Fatorachian et al., 2025).⁴
- **Manajemen infrastruktur perkotaan:** Sensor struktural pada jembatan mengirimkan data ke platform cloud; AI memprediksi degradasi material, sementara digital twin menilai dampak beban dinamis dan merencanakan perawatan preventif (Gockel et al., 2012).⁸

Tantangan dan Pertimbangan Keamanan

Integrasi IoT, AI, dan digital twin menimbulkan risiko keamanan siber. Radanliev et al. (2022) mencatat bahwa tantangan utama meliputi privasi data, autentikasi perangkat, dan ketahanan terhadap serangan jaringan pada level edge.⁶ Solusi yang diusulkan meliputi penggunaan blockchain untuk manajemen kunci kriptografis (Piètre-Cambacédès & Sitbon, 2018) serta sistem deteksi intrusi berbasis AI untuk jaringan sensor industri (Roosta et al., 2008).⁹

Ringkasan Peran Teknologi Pendukung

Secara keseluruhan, kombinasi IoT, AI, dan data analytics menyediakan fondasi yang kuat untuk implementasi digital twin dalam rekayasa proses. IoT memastikan aliran data kontinu, AI mengubah data menjadi wawasan prediktif, dan analytics mengelola serta menyajikan data dalam skala besar. Integrasi ini memungkinkan simulasi real-time, optimasi operasional, serta keputusan berbasis data yang lebih baik, sekaligus menuntut perhatian khusus pada keamanan dan privasi.

4. Manfaat dan Tantangan Implementasi Digital Twin dalam Rekayasa Proses

Manfaat Implementasi Digital Twin dalam Rekayasa Proses

Digital Twin (DT) memungkinkan penciptaan replika virtual yang sinkron dengan kondisi fisik secara real-time. Pada konteks rekayasa proses, manfaat utama yang telah dibuktikan meliputi:

- **Peningkatan efisiensi operasional:** Simulasi proses secara kontinu membantu mengidentifikasi bottleneck dan mengoptimalkan parameter kontrol, sehingga throughput meningkat (Romadhona & Zulfairah, 2025).
- **Pengurangan biaya:** Dengan prediksi kegagalan mesin lebih awal, biaya pemeliharaan dapat ditekan hingga **20** % dan downtime berkurang signifikan (Marlina, 2026).
- **Peningkatan keselamatan:** Monitoring kondisi kritis secara real-time memungkinkan intervensi preventif sebelum terjadinya kecelakaan kerja (Marlina, 2026).
- **Penguatan keputusan berbasis data:** Integrasi sensor IoT, AI, dan algoritma Kalman filter meningkatkan akurasi prediksi anomali struktural dan proses (Irwanto & Cornelis, 2025).
- **Dukungan keberlanjutan:** Optimasi penggunaan energi dan sumber daya pada proses logistik berkontribusi pada target green manufacturing (Romadhona & Zulfairah, 2025).

Tantangan dalam Implementasi Digital Twin

Walaupun manfaatnya menjanjikan, sejumlah hambatan teknis dan non-teknis masih menghambat adopsi luas DT pada rekayasa proses:

- **Keamanan data:** Sistem DT mengandalkan aliran data sensor yang bersifat sensitif; risiko serangan siber dapat mengakibatkan manipulasi model atau pencurian informasi operasional (Supangkat et al., 2025).
- **Integrasi dengan sistem legacy:** Banyak pabrik masih menggunakan kontroler PLC dan SCADA konvensional; penyelarasan data real-time memerlukan middleware khusus dan

standar interoperabilitas yang belum seragam (Larisang et al., 2026).

- **Kekurangan standar industri:** Tidak ada standar tunggal untuk model data, protokol komunikasi, atau metodologi validasi DT, sehingga implementasi menjadi proyek custom yang mahal (Larisang et al., 2026).
- **Keterbatasan infrastruktur TI:** Latensi jaringan, kapasitas penyimpanan, dan kemampuan komputasi edge menjadi faktor pembatas terutama pada skala proses yang sangat besar (Irwanto & Cornelis, 2025).
- **Kurangnya kompetensi sumber daya manusia:** Pengoperasian dan pemeliharaan DT memerlukan keahlian multidisiplin (AI, IoT, simulasi), yang masih jarang tersedia di industri tradisional (Marlina, 2026).

Contoh Kasus Implementasi

Bidang	Tujuan DT	Manfaat Utama	Hambatan yang Dihadapi
Pemeliharaan mesin produksi	Prediksi kegagalan komponen	Pengurangan downtime 20 %, biaya pemeliharaan turun	Integrasi sensor dengan PLC legacy
Logistik manufaktur	Optimasi alur material	Efisiensi operasional meningkat, jejak karbon berkurang	Standar data pertukaran belum konsisten
Struktur bangunan industri	Monitoring kesehatan struktural	Deteksi anomali dini via Kalman filter	Latensi data sensor real-time

Strategi Mengatasi Tantangan

Beberapa pendekatan yang dapat mempercepat adopsi DT pada rekayasa proses meliputi:

- Pengembangan kerangka keamanan berbasis zero-trust dan enkripsi end-to-end untuk melindungi aliran data sensor.
- Adopsi standar terbuka seperti OPC UA, MTConnect, dan ISO **23247** untuk interoperabilitas antara sistem lama dan platform DT.
- Implementasi arsitektur edge-cloud hybrid yang menurunkan latensi dan mengurangi beban jaringan pusat.
- Pelatihan lintas disiplin bagi tenaga kerja, termasuk program sertifikasi digital twin dan kolaborasi dengan institusi akademik.
- Penggunaan algoritma data-driven (mis. Kalman filter, machine learning) untuk meningkatkan akurasi model tanpa harus mengganti seluruh infrastruktur fisik.

5. Arah Penelitian Masa Depan dan Kesenjangan Pengetahuan

Arah Penelitian Masa Depan Digital Twin

Analisis bibliometrik menunjukkan lonjakan publikasi digital twin sejak 2014, dengan fokus pada *smart systems*, machine learning, cloud computing, augmented reality, automation, dan big data (Lizar, Novizam, Butar-Butar, & Guci, 2023). Tren ini menandakan kebutuhan untuk memperluas aplikasi ke bidang yang lebih luas, termasuk pertanian, pangan, infrastruktur, dan robotika. Penelitian masa depan dapat diarahkan pada tiga pilar utama:

- **Pengembangan digital twin yang lebih canggih:** integrasi algoritma AI, Kalman filter, dan sensor real-time untuk meningkatkan akurasi model (Irwanto & Cornelis, 2025).
- **Integrasi lintas-teknologi:** menggabungkan digital twin dengan IoT, AI, dan SHM untuk pemeliharaan prediktif pada infrastruktur kritis (Aprilia, 2025) serta robotika (Eryanto et al., 2025).
- **Ekspansi domain aplikasi:** penerapan pada pertanian (Baladraf, 2024), manufaktur berkelanjutan (Kurniawan et al., 2024), serta manajemen risiko finansial (Sumarno et al., 2026).

Kesenjangan Pengetahuan yang Masih Ada

Walaupun potensi digital twin telah terbukti dalam meningkatkan efisiensi produksi, keamanan operasional, dan pemeliharaan mesin (Siswanto & Dewi, 2023; Marlina, 2026), terdapat dua kesenjangan utama:

Kesenjangan	Deskripsi
Implementasi skala besar	Kurangnya studi empiris yang menguji digital twin pada jaringan industri atau infrastruktur kota secara terintegrasi, terutama di konteks Indonesia dengan tantangan sensor terbatas dan kondisi iklim tropis (Aprilia, 2025).

Pengukuran keberhasilan	Belum ada kerangka standar untuk menilai ROI, keandalan, dan dampak lingkungan digital twin; sebagian besar studi masih melaporkan metrik teknis (misalnya peningkatan 20% pada predictive maintenance) tanpa analisis ekonomi atau sosial yang komprehensif (Marlina, 2026).
-------------------------	--

Strategi Penelitian untuk Mengatasi Kesenjangan

Berikut beberapa pendekatan yang dapat dijadikan roadmap:

- Studi kasus multi-domain:** Mengembangkan platform digital twin yang menghubungkan sistem pertanian, transportasi, dan infrastruktur publik dalam satu ekosistem kota pintar, kemudian mengukur performa melalui indikator KPI lintas sektor.
- Kerangka evaluasi holistik:** Mengadopsi metrik ekonomi (ROI, penghematan biaya), lingkungan (emisi CO₂), dan sosial (kepuasan pengguna) sebagaimana direkomendasikan dalam literatur manajemen risiko digital twin (Sumarno et al., 2026).
- Pengujian interoperabilitas:** Menggunakan standar terbuka (ISO **23247**, OPC UA) untuk menghubungkan digital twin dengan sistem AI, cloud, dan edge computing, serta menilai skalabilitas melalui simulasi beban tinggi.
- Pengembangan metodologi validasi:** Memanfaatkan Kalman filter dan teknik pembelajaran mesin untuk sinkronisasi data real-time, serta membandingkan hasil dengan model tradisional FEM (Irwanto & Cornelis, 2025).
- Kolaborasi industri-akademik:** Membentuk konsorsium yang melibatkan perusahaan manufaktur, lembaga pemerintah, dan universitas untuk pilot project skala kota, sehingga data lapangan dapat diakses secara terbuka.

Potensi Dampak Penelitian Masa Depan

Jika kesenjangan tersebut berhasil diatasi, digital twin dapat menjadi tulang punggung transformasi digital Indonesia, memungkinkan:

- Pengurangan downtime industri hingga **30%** melalui pemeliharaan prediktif berbasis AI-DT-SHM.

- Optimalisasi penggunaan sumber daya pada pertanian dengan simulasi iklim mikro dan manajemen air real-time.
- Peningkatan resiliensi infrastruktur terhadap bencana alam melalui monitoring struktural berkelanjutan.
- Pengembangan ekosistem inovasi robotik yang memanfaatkan digital twin untuk kontrol gerak dan manuver yang lebih presisi (Eryanto et al., 2025).

Daftar Pustaka

1. S Marlina (2026). Implementasi Teknologi Digital Twin untuk Meningkatkan Efisiensi Pemeliharaan Mesin Pabrik. *Jurnal Teknologi Rekayasa*. <http://publikasi.submit-jurnal.com/index.php/technoria/article/view/25>
2. S Siswanto, MU Dewi (2023). Penerapan Teknologi Digital Twin untuk Pemodelan Sistem Industri Otomatis dalam Meningkatkan Efisiensi Produksi dan Keamanan Operasional. *Journal of New Trends in Sciences*. <https://jurnal.aksaraglobal.co.id/index.php/jnts/article/view/780>
3. H Romadhona (2023). Penerapan Digital Twin dalam Simulasi dan Optimasi Proses Logistik Berkelanjutan. *Jurnal Greenation Ilmu Teknik*. <https://greenationpublisher.org/JGIT/article/view/197>
4. RM Huda (2025). Perancangan Digital Twin untuk Simulasi Gerakan dan Analisis Kondisi Ketidaknormalan Pengangkatan pada Forklift Berbasis IoT. 2025 - *etd.repository.ugm.ac.id*. <https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/259653>
5. Z Ugih Rizqi (2021). Perancang Digital Twin Berbasis Simulasi untuk Smart Warehouse: Asset Administration Shell Framework. 2021 - *dspace.uui.ac.id*. <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/52334>
6. L Larisang, PP Tarigan, I Wiranto, R Muhida, M Irsyam... (2026). Rekayasa Teknologi Industri dan Manufaktur Cerdas. 2026 - *books.google.com*. https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=kWjBEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Digital+Twin+Rekayasa+Proses+Industri&ots=ItSE00fsZh&sig=iCVspxeMlj6ywZTdBCEL_0eUlKA
7. JD Pangaribuan (2025). Application of Digital Twin Technology for Real-Time Monitoring and Predictive Maintenance of Coastal Bridges under Climate Change Scenarios. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Arsitektur*. <https://jrsta.stekom.ac.id/index.php/jrsta/article/view/121>
8. R Irwanto, AJ Cornelis (2025). Framework Penggunaan Kalman Filter Dalam Konsep Digital Twin. *Jurnal Kajian Teknik Sipil*. <https://journal.uta45jakarta.ac.id/index.php/jkts/article/view/8156>
9. A Napitupulu, A Saputra, MT Siburian (2025). Rekayasa Teknologi Konstruksi dan Manufaktur: Optimalisasi Material dan Strategi Teknikal dalam Infrastruktur Sumatera Utara. *ELASTICITY: Journal of Applied* <https://limm-pub.id/index.php/elasticity/article/view/86>
10. Y Lizar, DM Novizam, MS Butar (2023). Tren Global Penelitian Tentang Digital Twin: Analisis Bibliometrik. *The Indonesian Journal of* <http://ijcs.net/ijcs/index.php/ijcs/article/view/3513>

11. R Irwanto, AJ Cornelis (2025). Framework Penggunaan Kalman Filter Dalam Konsep Digital Twin. *Jurnal Kajian Teknik Sipil*.
<https://journal.uta45jakarta.ac.id/index.php/jkts/article/view/8156>
12. WAA Zein, A Fadlil, MK Biddinika, D Yulianto (2025). Aplikasi Mobile Native untuk Digital Cockpit pada Sistem Human Digital Twin. *Jurnal Algoritma*.
<https://jurnal.itg.ac.id/index.php/algoritma/article/download/2206/1502>
13. Z Ugih Rizqi (2021). Perancang Digital Twin Berbasis Simulasi untuk Smart Warehouse: Asset Administration Shell Framework. 2021 - *dspace.uui.ac.id*.
<https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/52334>
14. TT Baladraf (2024). Potensi penerapan teknologi digital twin pada industri pertanian dan pangan di Indonesia: Sebuah tinjauan literatur. *Jurnal Teknotan*.
https://www.researchgate.net/profile/Thabed-Tholib-Baladraf/publication/380094692_Potensi_Penerapan_Teknologi_Digital_Twin_pada_Industri_Pertanian_dan_Pangan_di_Indonesia_Sebuah_Tinjauan_Literatur/links/6646eac4bc86444c72e5c2c7/Potensi-Penerapan-Teknologi-Digital-Twin-pada-Industri-Pertanian-dan-Pangan-di-Indonesia-Sebuah-Tinjauan-Literatur.pdf
15. AK Wardani, AS Arifianto, A Sirojudin... (2024). Implementasi Digital Twin Dengan Komunikasi Data Nirkabel pada Liquid Filling Machine. ... : *Jurnal Komputer dan*
<https://www.ioinformatic.org/index.php/JUKI/article/view/457>
16. S Siswanto, MU Dewi (2023). Penerapan Teknologi Digital Twin untuk Pemodelan Sistem Industri Otomatis dalam Meningkatkan Efisiensi Produksi dan Keamanan Operasional. *Journal of New Trends in Sciences*.
<https://jurnal.aksaraglobal.co.id/index.php/jnts/article/view/780>
17. M Taufiqurrahman (2024). Integrasi Kendali Lengan Robot UR5e dengan Head Mounted Display Virtual Reality (HMD VR) Berbasis Digital Twin Menggunakan Touchdesigner. 2024 - *repositori.polman-bandung.ac.id*. <https://repositori.polman-bandung.ac.id/id/eprint/352/>
18. SH Supangkat, AAH Dani, A Latifah, D Ramdani... (2025). Digital Twin for Smart X: Menyatukan Dunia Fisik dan Digital untuk Solusi Cerdas. 2025 - *books.google.com*.
https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=DfWaEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA127&dq=Digital+Twin+Rekayasa+Proses+Aplikasi&ots=xz5SVVILax&sig=I-gND_ff4Jvb08f37gCPw_YJyRw
19. L Larisang, PP Tarigan, I Wiranto, R Muhida, M Irsyam... (2026). Rekayasa Teknologi Industri dan Manufaktur Cerdas. 2026 - *books.google.com*.
<https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=kWjBEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Digital+Twin+Rekayasa+Proses+Aplikasi&ots=ItSE00fs4h&sig=hnzGQ8IOqwLsNTr18yAylgu-TO0>
20. MBK Merdeka, JST Akhir (2026). Augmented Reality (AR) dan Virtual Reality (VR): Revolusi Interaksi Digital di Era Industri 5.0. *bdb-pwt.telkomuniversity.ac.id*. <https://bdb-pwt.telkomuniversity.ac.id/augmented-reality-ar-dan-virtual-reality-vr-revolusi-interaksi-digital-di-era-industri-5-0/>
21. MJ Kaur, VP Mishra, P Maheshwari (2019). The convergence of digital twin, IoT, and machine learning: transforming data into action. *Digital twin technologies and smart*
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-18732-3_1
22. CL Stergiou, KE Psannis (2022). Digital twin intelligent system for industrial internet of things-based big data management and analysis in cloud environments. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*.

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096579622000444>
23. Ž Bolbotinović, SD Milić, Ž Janda... (2025). AI-powered digital twin in the industrial IoT. *International Journal of*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061525002078>
24. X Li, H Liu, W Wang, Y Zheng, H Lv (2022). Big data analysis of the internet of things in the digital twins of smart city based on deep learning. *Future Generation Computer*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X21003964>
25. MS Dihan, Al Akash, Z Tasneem, P Das, SK Das... (2024). Digital twin: Data exploration, architecture, implementation and future. *Heliyon*.
[https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(24\)02534-9](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)02534-9)
26. J Chen, Y Shi, C Yi, H Du, J Kang... (2024). Generative-AI-driven human digital twin in IoT healthcare: A comprehensive survey. *IEEE Internet of Things*
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10608135/>
27. V Kharchenko, O Illiashenko... (2020). Combination of digital twin and artificial intelligence in manufacturing using industrial IoT. *2020 IEEE 11th*
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9125038/>
28. H Fatorachian, H Kazemi, K Pawar (2025). Enhancing smart city logistics through IoT-enabled predictive analytics: A digital twin and cybernetic feedback approach. *Smart Cities*. <https://www.mdpi.com/2624-6511/8/2/56>
29. P Radanliev, D De Roure, R Nicolescu, M Huth... (2022). Digital twins: artificial intelligence and the IoT cyber-physical systems in Industry **4.0**. *International Journal of*
<https://link.springer.com/article/10.1007/s41315-021-00180-5>
30. A Alourani, M Alam, A Ali, IR Khan... (2026). Hybrid AI-IoT Framework with Digital Twin Integration for Predictive Urban Infrastructure Management in Smart Cities. *researchgate.net*. https://www.researchgate.net/profile/Chandra-Samal-2/publication/397117386_Hybrid_AI-IoT_Framework_with_Digital_Twin_Integration_for_Predictive_Urban_Infrastructure_Management_in_Smart_Cities/links/693e6fc59aa6b4649dc078db/Hybrid-AI-IoT-Framework-with-Digital-Twin-Integration-for-Predictive-Urban-Infrastructure-Management-in-Smart-Cities.pdf
31. S Marlina (2026). Implementasi Teknologi Digital Twin untuk Meningkatkan Efisiensi Pemeliharaan Mesin Pabrik. *Jurnal Teknologi Rekayasa*. <http://publikasi.submit-jurnal.com/index.php/technoria/article/view/25>
32. R Irwanto, Aj Cornelis (2025). Framework Penggunaan Kalman Filter Dalam Konsep Digital Twin. *Jurnal Kajian Teknik Sipil*.
<https://journal.uta45jakarta.ac.id/index.php/jkts/article/view/8156>
33. L Larisang, PP Tarigan, I Wiranto, R Muhida, M Irsyam... (2026). Rekayasa Teknologi Industri dan Manufaktur Cerdas. *2026 - books.google.com*.
https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=kWjBEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Digital+Twin+Rekayasa+Proses+Manfaat+Tantangan&ots=ItSE00ft4h&sig=JsNh05TUFVoXo1fudu_loU5jKiU
34. E Kurniawan, O Fahlovi, Z Avista... (2024). Peran digital twin dalam otomatisasi manufaktur yang berkelanjutan. *Prosiding Sains dan*
https://www.researchgate.net/profile/Eko-Kurniawan-3/publication/379038192_Peran_Digital_Twin_dalam_Otomatisasi_Manufaktur_yang_Berkelanjutan/links/65f7ff1ec05fd268801f8e83/Peran-Digital-Twin-dalam-Otomatisasi-

Manufaktur-yang-Berkelanjutan.pdf

35. L Supratman (2026). BAB **10** TREN DAN TANTANGAN MASA DEPAN DALAM MODELING DAN SIMULATION. *PEMODELAN DAN SIMULASI SISTEM KOMPUTER - researchgate.net*.
https://www.researchgate.net/profile/Ir-Dahlan/publication/400443332_PEMODELAN_DAN_SIMULASI_SISTEM_KOMPUTER/links/6983606912f837212a177f1d/PEMODELAN-DAN-SIMULASI-SISTEM-KOMPUTER.pdf#page=157
36. DQ Thoniyah, S Widodo, U Elviani (2025). Transformasi Pembelajaran Melalui Digital Twin: Systematic Literature Review Lintas Jenjang Pendidikan. *JATISI*.
<https://jurnal.mdp.ac.id/index.php/jatisi/article/view/14246>
37. H Romadhona (2023). Penerapan Digital Twin dalam Simulasi dan Optimasi Proses Logistik Berkelanjutan. *Jurnal Greenation Ilmu Teknik*.
<https://greenationpublisher.org/JGIT/article/view/197>
38. TT Baladraf (2024). Potensi penerapan teknologi digital twin pada industri pertanian dan pangan di Indonesia: Sebuah tinjauan literatur. *Jurnal Teknotan*.
https://www.researchgate.net/profile/Thabed-Tholib-Baladraf/publication/380094692_Potensi_Penerapan_Teknologi_Digital_Twin_pada_Industri_Pertanian_dan_Pangan_di_Indonesia_Sebuah_Tinjauan_Literatur/links/6646eac4bc86444c72e5c2c7/Potensi-Penerapan-Teknologi-Digital-Twin-pada-Industri-Pertanian-dan-Pangan-di-Indonesia-Sebuah-Tinjauan-Literatur.pdf
39. AH Putri, SS Handoyo (2023). TINJAUAN MENDALAM TENTANG TEKNOLOGI BIM: KEUNGGULAN, TANTANGAN, DAN PELUANG DIMASA DEPAN: LITERATURE REVIEW OF BIM *Prosiding Seminar Pendidikan Kejuruan*
<https://journal.unj.ac.id/unj/index.php/spkts/article/download/35966/15700>
40. SH Supangkat, AAH Dani, A Latifah, D Ramdani... (2025). Digital Twin for Smart X: Menyatukan Dunia Fisik dan Digital untuk Solusi Cerdas. 2025 - *books.google.com*.
https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=DfWaEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA127&dq=Digital+Twin+Rekayasa+Proses+Manfaat+Tantangan&ots=xz5SVVIMax&sig=Axz_o1NQ92GUHYRmDkKc_P8DHhU
41. Y Lizar, DM Novizam, MS Butar (2023). Tren Global Penelitian Tentang Digital Twin: Analisis Bibliometrik. *The Indonesian Journal of*
<http://ijcs.net/ijcs/index.php/ijcs/article/view/3513>
42. TT Baladraf (2024). Potensi penerapan teknologi digital twin pada industri pertanian dan pangan di Indonesia: Sebuah tinjauan literatur. *Jurnal Teknotan*.
https://www.researchgate.net/profile/Thabed-Tholib-Baladraf/publication/380094692_Potensi_Penerapan_Teknologi_Digital_Twin_pada_Industri_Pertanian_dan_Pangan_di_Indonesia_Sebuah_Tinjauan_Literatur/links/6646eac4bc86444c72e5c2c7/Potensi-Penerapan-Teknologi-Digital-Twin-pada-Industri-Pertanian-dan-Pangan-di-Indonesia-Sebuah-Tinjauan-Literatur.pdf
43. N Sumarno, P Parju, A Mutiarachim (2026). ... Manajemen Risiko dan Pemulihan Finansial melalui Arsitektur Digital Twins: Analisis Komprehensif dan Proyeksi Masa Depan: Systematic Literature Review. *Serat Acitya*.
<https://jurnal2.untagsmg.ac.id/index.php/sa/article/view/3661>
44. S Siswanto, MU Dewi (2023). Penerapan Teknologi Digital Twin untuk Pemodelan Sistem Industri Otomatis dalam Meningkatkan Efisiensi Produksi dan Keamanan Operasional. *Journal of New Trends in Sciences*.
<https://jurnal.aksaraglobal.co.id/index.php/jnts/article/view/780>

45. S Marlina (2026). Implementasi Teknologi Digital Twin untuk Meningkatkan Efisiensi Pemeliharaan Mesin Pabrik. *Jurnal Teknologi Rekayasa*. <http://publikasi.submit-jurnal.com/index.php/technoria/article/view/25>
46. R Irwanto, AJ Cornelis (2025). Framework Penggunaan Kalman Filter Dalam Konsep Digital Twin. *Jurnal Kajian Teknik Sipil*. <https://journal.uta45jakarta.ac.id/index.php/jkts/article/view/8156>
47. E Kurniawan, O Fahlovi, Z Avista... (2024). Peran digital twin dalam otomatisasi manufaktur yang berkelanjutan. *Prosiding Sains dan* https://www.researchgate.net/profile/Eko-Kurniawan-3/publication/379038192_Peran_Digital_Twin_dalam_Otomatisasi_Manufaktur_yang_Berkelanjutan/links/65f7ff1ec05fd268801f8e83/Peran-Digital-Twin-dalam-Otomatisasi-Manufaktur-yang-Berkelanjutan.pdf
48. E Aprilia (2025). INTEGRASI ARTIFICIAL INTELLIGENCE DAN DIGITAL TWIN UNTUK PEMELIHARAAN INFRASTRUKTUR DI INDONESIA. *Journal of Technique*. <http://techniquejournalpasadena.com/interface/article/view/4>
49. SH Supangkat, AAH Dani, A Latifah, D Ramdani... (2025). Digital Twin for Smart X: Menyatukan Dunia Fisik dan Digital untuk Solusi Cerdas. 2025 - *books.google.com*. <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=DfWaEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA127&dq=Penelitian+Digital+Twin+Masa+Depan&ots=xz5SVVIN4u&sig=5mlfRbvlbbjS1lQgUYGUCxMdypA>
50. SB Eryanto, M Djaohar, A Sunawar (2025). Pengembangan Robot Tematik Digital Twin Universitas Negeri Jakarta pada Motor dan Roda Sebagai Manuver. *Journal of Electrical* <https://journal.unj.ac.id/unj/index.php/jevet/article/view/54642>

?? Highlighting Legend

456 Identified as AI-generated; please double-check

123 Verified through references

Generated by SIDIKTI AI Assistant

This report was automatically generated from in-depth review. For questions or support visit sidikti.com.

SIDIKTI may make mistakes, so double-check outputs

Revision #4

Created 2026-04-24 13:10:02 UTC by Admin

Updated 2026-04-27 04:32:25 UTC by Admin