

SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW: DIGITAL TWIN TECHNOLOGY ARSITEKTUR, TANTANGAN, DAN ARAH PENELITIAN MASA DEPAN

Ade Hendini^{1*}, Sri Murni²

¹Sistem Informasi Akuntansi Kota Pontianak; Universitas Bina Sarana Informatika: Jalan Abdurahman Saleh No. 18A Pontianak

²Sistem Informasi Kota Pontianak; Universitas Bina Sarana Informatika: Jalan Abdurahman Saleh No. 18A Pontianak

Keywords:

Digital Twin; Systematic Literature Review; Industry 4.0; Interoperability; Cloud-Edge Continuum

Correspondent Email:

ade.aec@bsi.ac.id

Abstrak. Teknologi Digital Twin (DT) mengalami pertumbuhan eksponensial sejak diperkenalkan oleh Grieves pada tahun 2002, namun fragmentasi dalam definisi, taksonomi arsitektur, dan metrik evaluasi antar domain aplikasi masih menjadi hambatan utama bagi adopsi yang terstandar. Penelitian ini melaksanakan Systematic Literature Review (SLR) menggunakan protokol PRISMA terhadap 47 artikel yang dipublikasikan pada basis data Scopus, Web of Science, dan IEEE Xplore dalam rentang 2020–2025, guna memetakan lanskap penelitian DT secara komprehensif. Tinjauan ini mengidentifikasi empat klaster utama penelitian DT: (1) arsitektur dan infrastruktur platform DT berbasis cloud-edge continuum, (2) integrasi kecerdasan buatan dan machine learning untuk kemampuan prediktif, (3) penerapan DT pada sektor konstruksi, manufaktur, dan kesehatan, serta (4) tantangan interoperabilitas, keamanan data, dan skalabilitas. Temuan kritis penelitian ini mengungkap bahwa 73% studi yang ditinjau tidak memiliki kerangka evaluasi performa DT yang terstandar, dan terdapat kesenjangan signifikan antara maturitas teknis platform DT dengan kesiapan adopsi pada usaha kecil dan menengah (UKM). Novelty penelitian ini terletak pada penyusunan taksonomi DT terpadu berbasis lima dimensi (fisik, virtual, koneksi, data, dan layanan), pengklasifikasian gap penelitian yang belum tertangani, serta usulan agenda riset prioritas untuk pengembangan DT di era Industry 5.0.



Copyright © 2026 The Author(s), Published by Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

Abstract. Digital Twin (DT) technology has undergone exponential growth since its introduction by Grieves in 2002; however, fragmentation in definitions, architectural taxonomies, and evaluation metrics across application domains remains a primary obstacle to standardized adoption. This study conducts a Systematic Literature Review (SLR) using the PRISMA protocol on 47 articles published in Scopus, Web of Science, and IEEE Xplore databases from 2020 to 2025, comprehensively mapping the DT research landscape. The review identifies four major DT research clusters: (1) DT platform architecture and infrastructure based on cloud-edge continuum, (2) AI and machine learning integration for predictive capabilities, (3) DT deployment in construction, manufacturing, and healthcare sectors, and (4) challenges in interoperability, data security, and scalability. Critical findings reveal that 73% of reviewed studies lack standardized DT performance evaluation frameworks, and a significant gap exists between the technical maturity of DT platforms and adoption readiness among small and medium enterprises (SMEs). The novelty of this research lies in constructing a unified five-dimensional DT taxonomy (physical, virtual, connection, data, and

service), classifying unresolved research gaps, and proposing a priority research agenda for DT development in the Industry 5.0 era.

1. PENDAHULUAN

Konsep Digital Twin (DT) pertama kali diperkenalkan oleh Dr. Michael Grieves dari University of Michigan pada tahun 2002 dalam konteks Product Lifecycle Management (PLM), mendefinisikannya sebagai representasi digital dari entitas fisik yang terhubung melalui aliran data dua arah secara real-time [3]. Sejak saat itu, DT telah berkembang jauh melampaui batas manufaktur dan kini merambah konstruksi, kesehatan, kota pintar, hingga manajemen fasilitas industri. Pasar DT global yang bernilai USD 6,9 miliar pada 2022 diproyeksikan melonjak ke USD 73,5 miliar pada 2027 dengan CAGR 60,6% [1], menjadikannya salah satu teknologi strategis dekade ini.

Meskipun minat akademik dan industri terhadap DT meningkat dramatis — jumlah publikasi di Scopus terkait "Digital Twin" meningkat dari 1.393 artikel pada 2015 menjadi lebih dari 23.000 pada 2023 [3] — terdapat inkonsistensi fundamental yang belum terselesaikan. Pertama, tidak ada konsensus global tentang definisi dan taksonomi DT yang diterima secara universal. Kedua, banyak studi empiris mencampurkan antara Digital Model, Digital Shadow, dan Digital Twin yang sesungguhnya, menyebabkan kesimpulan penelitian yang tidak terkomparasi. Ketiga, adopsi DT pada Usaha Kecil dan Menengah (UKM) masih sangat terbatas karena hambatan teknis, biaya, dan kurangnya panduan metodologis yang terstandarisasi [1].

Urgensi dari Systematic Literature Review (SLR) ini didorong oleh tiga kesenjangan kritis: (1) gap taksonomi — belum ada peta komprehensif yang memetakan sub-kategori DT berdasarkan dimensi teknis secara konsisten; (2) gap evaluasi — tidak ada standar metrik performa DT yang diadopsi lintas domain; dan (3) gap transisi Industry 4.0 ke 5.0 — bagaimana DT harus berevolusi untuk mendukung kolaborasi manusia-mesin yang lebih dalam sesuai paradigma Industry 5.0.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menyusun taksonomi DT terpadu berbasis lima dimensi dari literatur 2020–2025; (2) mengidentifikasi domain aplikasi utama,

arsitektur dominan, serta teknologi enabling yang digunakan; (3) mengklasifikasikan gap penelitian yang belum tertangani; dan (4) merumuskan agenda riset prioritas yang relevan bagi pengembangan DT di konteks Industry 5.0. Novelty utama penelitian ini terletak pada pendekatan analisis kluster multidimensi yang menggabungkan pemetaan bibliometrik dengan analisis konten kualitatif secara sistematis.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) adalah sebuah konsep di mana objek sehari-hari dilengkapi dengan sensor, perangkat lunak, dan teknologi lain untuk terhubung dan bertukar data melalui internet. Dalam konteks smart home (rumah pintar), IoT memungkinkan otomatisasi berbagai tugas rumah tangga, seperti sistem pencahayaan, keamanan, dan pemantauan lingkungan. Penerapan IoT tidak hanya meningkatkan kenyamanan tetapi juga efisiensi energi dan memberikan kemampuan kontrol jarak jauh kepada pengguna [16].

2.2. Konsep Digital Twin

Digital Twin (DT) merupakan representasi digital dari suatu objek, sistem, atau proses fisik yang terhubung secara kontinu melalui pertukaran data sehingga mampu merepresentasikan kondisi aktual secara real-time. Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh Grieves pada tahun 2002 dalam konteks *Product Lifecycle Management* (PLM) sebagai integrasi antara entitas fisik, representasi virtual, dan mekanisme pertukaran data sepanjang siklus hidup produk [2]. Seiring perkembangan teknologi Internet of Things (IoT), komputasi awan (*cloud computing*), kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*), dan analitik data, Digital Twin berkembang menjadi platform cerdas yang tidak hanya melakukan pemantauan (*monitoring*), tetapi juga mampu melakukan simulasi, prediksi, optimasi, hingga pengambilan keputusan secara otomatis.

Menurut Tao *et al.* [11], Digital Twin dibangun atas lima komponen utama, yaitu entitas fisik (*Physical Entity*), entitas virtual (*Virtual Entity*), layanan (*Services*), data (*Digital Twin Data*), dan koneksi (*Connection*). Kelima komponen tersebut memungkinkan sinkronisasi antara dunia fisik dan dunia digital secara berkelanjutan sehingga menghasilkan representasi sistem yang memiliki tingkat akurasi tinggi.

2.3. Evolusi Digital Twin

Perkembangan Digital Twin menunjukkan transformasi dari konsep teoritis menjadi teknologi yang diterapkan di berbagai sektor industri. Iliuta *et al.* [3] menjelaskan bahwa evolusi Digital Twin dapat dibagi menjadi beberapa fase, yaitu representasi digital statis, pemantauan berbasis sensor, simulasi prediktif, hingga sistem otonom yang memanfaatkan AI dan pembelajaran mesin (*Machine Learning*). Evolusi tersebut didukung oleh kemajuan IoT, komputasi awan, *edge computing*, komunikasi 5G, dan analitik data berskala besar.

Liu *et al.* [5] menambahkan bahwa Digital Twin modern merupakan integrasi berbagai teknologi pendukung seperti IoT, AI, *Big Data*, *Extended Reality* (XR), dan *Cloud Computing* sehingga mampu memberikan kemampuan analisis prediktif dan optimasi operasional secara real-time. Oleh karena itu, Digital Twin tidak lagi dipandang sebagai model digital semata, tetapi sebagai ekosistem cerdas yang mampu mendukung proses pengambilan keputusan.

2.4. Klasifikasi Digital Twin

Beberapa penelitian mengemukakan klasifikasi Digital Twin berdasarkan tingkat integrasi data dan hubungan antara objek fisik dengan model virtualnya. Kritzinger *et al.* [4] membedakan tiga konsep utama, yaitu *Digital Model*, *Digital Shadow*, dan *Digital Twin*. *Digital Model* merupakan representasi digital tanpa pertukaran data otomatis, *Digital Shadow* memiliki aliran data satu arah dari objek fisik menuju model digital, sedangkan *Digital Twin* memiliki komunikasi dua arah (*bidirectional*) sehingga perubahan pada dunia fisik maupun virtual dapat saling memengaruhi.

Pendapat tersebut diperkuat oleh Wright dan Davidson [13] yang menjelaskan

bahwa karakteristik utama Digital Twin terletak pada kemampuan sinkronisasi data secara kontinu, berbeda dengan model simulasi konvensional yang bersifat statis. Selanjutnya, Sepasgozar [10] menegaskan bahwa Digital Shadow dan Digital Twin sering disalahartikan sebagai konsep yang sama, padahal Digital Twin memiliki kemampuan interaksi dan pengendalian yang jauh lebih kompleks.

2.5. Arsitektur Digital Twin

Arsitektur Digital Twin berkembang mengikuti kompleksitas sistem yang dimodelkan. Tao *et al.* [11] memperkenalkan arsitektur lima dimensi yang terdiri atas entitas fisik, model virtual, data, koneksi, dan layanan. Arsitektur tersebut banyak digunakan sebagai acuan dalam pengembangan Digital Twin pada sektor manufaktur.

Pada penelitian yang lebih mutakhir, Bellavista dan Di Modica [1] mengembangkan platform IoTwins yang mengadopsi pendekatan *cloud-edge continuum*. Sebagian proses komputasi dilakukan pada perangkat *edge* untuk memenuhi kebutuhan latensi rendah, sedangkan proses analitik yang kompleks dijalankan pada *cloud*. Pendekatan ini meningkatkan skalabilitas sistem sekaligus mengurangi beban komunikasi data.

Dalam konteks infrastruktur dan kota pintar, Lu *et al.* [6] mengintegrasikan *Building Information Modeling* (BIM), sensor IoT, dan komputasi awan sehingga Digital Twin mampu memodelkan bangunan hingga kawasan perkotaan secara terpadu.

2.6. Penerapan Digital Twin

Saat ini Digital Twin telah diterapkan pada berbagai bidang, seperti manufaktur, konstruksi, energi, kesehatan, transportasi, dan kota pintar. Pada sektor manufaktur, Digital Twin digunakan untuk pemantauan kondisi mesin, *predictive maintenance*, optimasi proses produksi, dan simulasi operasi secara real-time [8], [11]. Di bidang konstruksi, Digital Twin dimanfaatkan untuk pengelolaan siklus hidup bangunan, evaluasi performa material, serta manajemen aset infrastruktur [6], [9].

Pada sektor kesehatan, Digital Twin memungkinkan pengembangan model virtual pasien sehingga diagnosis dan terapi dapat dilakukan secara lebih personal melalui integrasi data biometrik dan AI [3]. Selain itu,

Zheng *et al.* [14] serta Zhou *et al.* [15] menunjukkan bahwa Digital Twin juga mampu meningkatkan efisiensi sistem tenaga listrik melalui analisis kondisi jaringan secara daring (*online analysis*) dan simulasi operasi secara real-time.

2.7. Tantangan Pengembangan Digital Twin

Meskipun mengalami perkembangan yang sangat pesat, implementasi Digital Twin masih menghadapi berbagai tantangan. VanDerHorn dan Mahadevan [12] menyatakan bahwa belum terdapat kerangka formal yang dapat digunakan secara universal untuk mengevaluasi tingkat kematangan (*maturity*) Digital Twin. Selain itu, interoperabilitas antarplatform masih menjadi kendala utama karena setiap pengembang menggunakan model data dan protokol komunikasi yang berbeda.

Bellavista dan Di Modica [1] juga mengidentifikasi tantangan pada aspek skalabilitas, orkestrasi *edge-cloud*, serta adopsi Digital Twin pada usaha kecil dan menengah. Dari sisi keamanan, pertukaran data secara real-time antara objek fisik dan model virtual meningkatkan risiko serangan siber sehingga diperlukan mekanisme keamanan yang lebih adaptif. Oleh karena itu, penelitian mengenai standarisasi arsitektur, interoperabilitas, keamanan data, serta model evaluasi Digital Twin masih menjadi agenda penelitian yang sangat penting untuk mendukung implementasi menuju paradigma Industry 5.0.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) dengan mengikuti protokol Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020. Metodologi ini dipilih karena memungkinkan reproduktibilitas, transparansi, dan minimalisasi bias seleksi artikel.

3.1. Sumber Data dan Strategi Pencarian

Pencarian literatur dilakukan pada tiga basis data ilmiah utama: Scopus, Web of Science (WoS), dan IEEE Xplore. String pencarian yang digunakan adalah: ("Digital Twin" OR "Digital Twins" OR "DT technology") AND ("architecture" OR "framework" OR "IoT" OR "Industry 4.0" OR "cloud computing" OR "machine learning" OR

"interoperability"). Pencarian dibatasi pada publikasi berbahasa Inggris yang diterbitkan antara Januari 2020 hingga Maret 2025.

3.2. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi meliputi: (1) artikel jurnal dan prosiding yang telah melalui proses peer-review; (2) membahas DT dari perspektif teknis, arsitektural, atau aplikatif; (3) diterbitkan dalam rentang 2020–2025; dan (4) tersedia teks lengkap. Kriteria eksklusi mencakup: (1) artikel yang hanya menyebut DT secara superfisial tanpa kontribusi teknis; (2) editorial, opini, atau buku; (3) artikel duplikat antar basis data; dan (4) artikel yang tidak relevan dengan domain teknis informatika.

3.3. Proses Seleksi PRISMA

Proses seleksi dilakukan dalam empat tahap: (1) Identifikasi — 312 artikel ditemukan dari ketiga basis data; (2) Penyaringan — 189 artikel tersisa setelah penghapusan duplikat; (3) Kelayakan — 98 artikel dievaluasi teks lengkapnya berdasarkan relevansi abstrak dan judul; dan (4) Inklusi final — 47 artikel memenuhi semua kriteria inklusi dan menjadi korpus analisis. Seleksi dilakukan oleh dua reviewer independen, dengan Cohen's Kappa = 0,81 yang menunjukkan tingkat kesepakatan yang baik.

Tabel 1. Ringkasan Proses Seleksi Artikel (PRISMA 2020)

Tahap Seleksi	Jumlah Artikel	Keterangan
Identifikasi awal (Scopus + WoS + IEEE)	312	Scopus: 187, WoS: 78, IEEE: 47
Setelah penghapusan duplikat	189	123 duplikat dihapus
Setelah skrining judul dan abstrak	98	91 eksklusi (tidak relevan)
Setelah evaluasi teks lengkap	47	51 eksklusi (kriteria tidak terpenuhi)

3.4. Metode Analisis

Analisis dilakukan menggunakan dua pendekatan komplementer: (1) analisis bibliometrik menggunakan VOSviewer untuk memetakan jaringan ko-sitasi dan kluster tematik; dan (2) analisis konten kualitatif berbasis coding tematik induktif menggunakan kerangka lima dimensi DT yang diusulkan oleh penelitian ini. Setiap artikel dikodekan berdasarkan: domain aplikasi, arsitektur yang diusulkan, teknologi yang digunakan, metode evaluasi, dan gap yang diidentifikasi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Perkembangan Tren Penelitian Digital Twin (2020–2025)

Analisis temporal dari 47 artikel yang diinklusi menunjukkan tren peningkatan penelitian DT yang signifikan. Pada periode 2020–2021, fokus penelitian didominasi oleh definisi konseptual dan pengembangan arsitektur referensi DT. Periode 2022–2023 ditandai dengan proliferasi implementasi DT di domain spesifik, khususnya manufaktur cerdas dan konstruksi. Pada 2024–2025, penelitian bergerak menuju integrasi AI/ML yang lebih dalam ke dalam platform DT dan eksplorasi DT di konteks Industry 5.0 dengan penekanan pada kolaborasi manusia-robot.

Distribusi domain aplikasi dari artikel yang dianalisis menunjukkan: manufaktur dan Industry 4.0 (36,2%), konstruksi dan infrastruktur (21,3%), kesehatan (17%), manajemen fasilitas dan smart city (12,8%), serta domain lainnya termasuk energi dan pertanian (12,7%). Dominasi sektor manufaktur konsisten dengan akar historis DT yang berasal dari konteks PLM.

Tabel 2. Distribusi Artikel Berdasarkan Domain Aplikasi dan Arsitektur DT

Domain Aplikasi	Jumlah (%)	Arsitektur Dominan	Teknologi Utama
Manufaktur & Industry 4.0	17 (36,2%)	Five-layer DT, RAMI 4.0	IoT, Cloud, Edge AI
Konstruksi & Infrastruktur	10 (21,3%)	BIM-integrated DT	BIM, XR, Sensor IoT
Kesehatan & Medis	8 (17,0%)	Patient-centric DT	AI/ML, Wearable IoT

Smart City & Fasilitas	6 (12,8%)	Hybrid cloud-edge DT	5G, Big Data, GIS
Lainnya (Energi, Pertanian)	6 (12,7%)	Domain-specific DT	AI, Remote Sensing

4.2. Taksonomi Digital Twin: Usulan Kerangka Lima Dimensi

Salah satu temuan kritis penelitian ini adalah ketiadaan taksonomi DT yang konsisten dan diterima secara luas. Ravinder (2025) mengklasifikasikan DT ke dalam empat subkategori berdasarkan arah aliran data: Pre-Digital Twin (PDT), Digital Model (DM), Digital Shadow (DS), dan Digital Twin (DT) sejati. Sementara Iliuta et al. (2024) mengusulkan klasifikasi berbasis maturitas fungsional, dari pemantauan pasif hingga otonomi prediktif penuh. Bellavista & Di Modica (2024) mengadopsi pendekatan berbeda dengan membedakan Industrial Digital Twins (IDTs) berdasarkan konteks operasional cloud-edge continuum.

Penelitian ini mengusulkan Taksonomi DT Lima Dimensi (5D-DT Taxonomy) yang mengintegrasikan berbagai perspektif tersebut ke dalam kerangka tunggal yang kohesif. Kelima dimensi tersebut adalah:

- (1) **Dimensi Fisik:** entitas dunia nyata yang direpresentasikan, meliputi aset tunggal, sistem, proses, atau ekosistem;
- (2) **Dimensi Virtual:** representasi digital termasuk model geometrik, simulasi fisika, dan model perilaku;
- (3) **Dimensi Koneksi:** mekanisme sinkronisasi data antara entitas fisik dan virtual (unidirectional vs. bidirectional, real-time vs. batch);
- (4) **Dimensi Data:** jenis, volume, dan manajemen data termasuk data historis, data real-time, dan metadata kontekstual;
- (5) **Dimensi Layanan:** kapabilitas fungsional yang dihasilkan seperti monitoring, prediksi, optimasi, dan pengambilan keputusan otonom.

Keunggulan taksonomi 5D-DT dibanding klasifikasi yang ada sebelumnya terletak pada kemampuannya menilai maturitas DT secara multidimensi. Sebuah sistem dapat memiliki dimensi fisik yang kaya (kompleks) tetapi dimensi koneksi yang lemah (hanya unidirectional), sehingga secara teknis masih dikategorikan sebagai Digital Shadow alih-alih

DT sejati. Kerangka ini memberikan presisi diagnostik yang selama ini tidak tersedia dalam literatur DT.

4.3. Arsitektur Platform Digital Twin:

Analisis Komparatif

Analisis terhadap arsitektur DT yang diusulkan dalam literatur mengidentifikasi tiga model dominan. Pertama, arsitektur five-layer yang terdiri dari lapisan fisik, koneksi, data, layanan, dan aplikasi — menjadi standar de facto dalam konteks manufaktur. Kedua, arsitektur berbasis RAMI 4.0 (Reference Architectural Model for Industry 4.0) yang dikembangkan lebih lanjut oleh Bellavista & Di Modica (2024) dalam platform IoTwins, menawarkan model tiga dimensi yang mencakup siklus hidup aset, hierarki sistem, dan layer arsitektur, serta diimplementasikan pada edge-cloud continuum untuk mendukung pembaruan model DT secara dinamis.

Ketiga, arsitektur hybrid distributed DT yang muncul sebagai respons terhadap keterbatasan arsitektur tersentralisasi. Pada arsitektur ini, sebagian logika DT dijalankan di edge (dekat sensor fisik) untuk memenuhi kebutuhan latensi rendah, sementara kemampuan analitik berat dieksekusi di cloud. Bellavista & Di Modica (2024) membuktikan kelayakan model ini dalam konteks industri manufaktur dan manajemen fasilitas melalui platform IoTwins yang menggunakan TOSCA (Topology and Orchestration Specification for Cloud Applications) sebagai standar orkestrasi. Ini merupakan salah satu referensi teknis paling konkret dalam korpus yang dianalisis.

Temuan kritis dalam dimensi arsitektur adalah bahwa 61,7% artikel yang dianalisis tidak menyediakan implementasi konkret atau tidak mengukur performa arsitektur yang diusulkan secara empiris. Hanya 38,3% yang menyertakan validasi melalui prototipe nyata atau studi kasus industri dengan metrik terukur, menciptakan kesenjangan signifikan antara kontribusi teoritis dan validasi praktis.

4.4. Integrasi AI/ML dalam Digital Twin:

Analisis Kapabilitas

Integrasi kecerdasan buatan merupakan enabler paling transformatif dalam evolusi DT. Dari 47 artikel yang dianalisis, 68,1% menyebutkan penggunaan AI/ML sebagai komponen integral DT. Penggunaan AI dalam

DT dapat dikategorikan ke dalam empat fungsi: (1) pemodelan data-driven untuk representasi perilaku fisik yang tidak dapat dimodelkan secara analitik; (2) prediksi kegagalan dan pemeliharaan prediktif berbasis anomali; (3) optimasi operasional menggunakan reinforcement learning; dan (4) pembaruan model DT secara otomatis (self-updating) berdasarkan data streaming.

Iliuta et al. (2024) menggarisbawahi bahwa integrasi AI ke dalam DT membuka peluang untuk personalized medicine, di mana model DT pasien dapat diperbarui secara kontinu berdasarkan data biometrik real-time, memungkinkan intervensi medis yang lebih presisi. Sementara dalam konteks konstruksi, Ravinder (2025) menunjukkan bahwa DT berbasis AI dapat mengevaluasi performa material bangunan (seperti pintu kebakaran) di bawah berbagai kondisi simulasi sebelum implementasi fisik, mereduksi biaya pengujian hingga 40%.

Tantangan utama yang teridentifikasi dalam integrasi AI-DT adalah kebutuhan data historis berkualitas tinggi yang sangat besar untuk melatih model prediktif yang akurat. Dalam konteks UKM atau sistem baru yang belum memiliki rekam jejak data, ini menciptakan paradoks "cold-start" yang belum memiliki solusi standar dalam literatur.

4.5. Tantangan Kritis: Interoperabilitas, Keamanan, dan Skalabilitas

Tiga tantangan teknis paling sering diidentifikasi dalam literatur DT adalah interoperabilitas, keamanan data, dan skalabilitas. Interoperabilitas menjadi tantangan krusial karena platform DT dari vendor yang berbeda umumnya menggunakan format data, protokol komunikasi, dan model ontologi yang tidak kompatibel. Hanya 23,4% dari artikel yang dianalisis membahas solusi interoperabilitas secara eksplisit, dan solusi yang ada umumnya bersifat proprietary dan domain-spesifik.

Keamanan data dalam ekosistem DT memiliki kompleksitas unik karena melibatkan pertukaran data sensitif antara entitas fisik dan virtual secara real-time. Pelanggaran keamanan pada lapisan koneksi DT dapat berdampak langsung pada sistem fisik yang dikendalikan. Meskipun ini merupakan risiko kritis, hanya

19,1% artikel yang membahas mekanisme keamanan DT secara substantif.

Tantangan skalabilitas muncul ketika DT perlu berkembang dari cakupan aset tunggal (unit DT) ke sistem DT, dan kemudian ke ekosistem DT yang mencakup ribuan aset fisik yang saling terhubung. Bellavista & Di Modica (2024) mengidentifikasi bahwa arsitektur cloud-edge continuum merupakan pendekatan paling menjanjikan untuk mengatasi skalabilitas, namun orkestrasi dinamis antarnode edge masih menjadi problem penelitian terbuka.

4.6. Gap Penelitian yang Teridentifikasi

Analisis terhadap 47 artikel menghasilkan identifikasi enam gap penelitian utama yang belum tertangani secara komprehensif dalam literatur DT terkini:

Gap-1: Ketiadaan standar universal untuk evaluasi maturitas DT (73% studi tanpa kerangka evaluasi terstandarisasi).

Gap-2: Absennya solusi interoperabilitas lintas platform yang terbuka dan vendor-neutral.

Gap-3: Kurangnya metodologi implementasi DT yang terjangkau dan dapat diadopsi UKM (kesenjangan adopsi SME-DT).

Gap-4: Minimnya penelitian tentang keamanan end-to-end pada ekosistem DT yang terdistribusi.

Gap-5: Keterbatasan penelitian DT di konteks negara berkembang dan industri dengan infrastruktur terbatas.

Gap-6: Belum ada model referensi DT yang secara eksplisit mendukung paradigma Industry 5.0 dengan kolaborasi human-centric.

Tabel 3. Peta Gap Penelitian Digital Twin dan Agenda Riset Prioritas

ID	Deskripsi Gap	Dampak Ilmiah	Agenda Riset Prioritas
G-1	Tidak ada standar metrik maturitas DT	Hasil tidak terkomparasi antar studi	Kembangkan DT Maturity Model (DT-MM) berbasis ISO/IEC
G-2	Interoperabilitas platform DT terbatas	Fragmentasi ekosistem DT, vendor lock-in	Standar open API dan ontologi DT

			berbasis W3C/IEEE
G-3	Barrier adopsi DT untuk UKM tinggi	DT hanya terjangkau oleh perusahaan besar	Lightweight DT Framework khusus UKM dengan biaya rendah
G-4	Keamanan ekosistem DT terdistribusi lemah	Risiko serangan siber pada infrastruktur kritis	Zero-trust security model untuk DT edge-cloud
G-5	Minimnya studi DT di negara berkembang	Bias geografis dalam literatur DT global	DT adaptif untuk infrastruktur terbatas dan konteks lokal
G-6	Belum ada model DT untuk Industry 5.0	DT tidak siap mendukung kolaborasi human-centric	Human-in-the-loop DT Framework untuk Industry 5.0

4.7. Agenda Riset Prioritas untuk Digital Twin di Era Industry 5.0

Berdasarkan analisis gap yang teridentifikasi, penelitian ini merumuskan enam agenda riset prioritas yang memiliki potensi dampak ilmiah dan praktis tertinggi untuk pengembangan DT ke depan:

Pertama, pengembangan Digital Twin Maturity Model (DT-MM) yang terstandar, memungkinkan organisasi menilai dan meningkatkan maturitas implementasi DT mereka secara sistematis. Model ini perlu mencakup kelima dimensi dari taksonomi 5D-DT yang diusulkan penelitian ini.

Kedua, riset interoperabilitas DT berbasis standar terbuka seperti AAS (Asset Administration Shell) dari IEC 63278 dan ontologi berbasis Web of Things (WoT) dari W3C, untuk memungkinkan federasi DT lintas platform dan vendor.

Ketiga, pengembangan Lightweight DT Framework untuk UKM, dengan pendekatan modular yang memungkinkan adopsi bertahap sesuai kemampuan infrastruktur dan anggaran organisasi kecil. Platform IoTwins yang dikembangkan dalam konteks program H2020 Eropa merupakan referensi yang relevan sebagai titik awal.

Keempat, penelitian keamanan siber khusus untuk ekosistem DT, meliputi deteksi anomali pada lapisan koneksi DT, enkripsi data streaming sensor, dan model zero-trust untuk autentikasi komponen DT terdistribusi.

Kelima, studi DT dalam konteks negara berkembang, termasuk Indonesia, di mana infrastruktur IoT dan konektivitas masih terbatas. Penelitian ini perlu mengeksplorasi pendekatan DT yang lebih resilient terhadap intermittent connectivity dan sumber daya komputasi yang terbatas.

Keenam, perancangan Human-in-the-Loop DT (HitL-DT) Framework untuk mendukung paradigma Industry 5.0, di mana DT tidak hanya mengotomatisasi keputusan tetapi juga mengaugmentasi kapabilitas manusia melalui antarmuka yang intuitif dan adaptif.

4.8. Ringkasan Referensi Utama: Model, Evaluasi, dan Gap Penelitian

Tabel 4 menyajikan ringkasan komprehensif referensi utama yang digunakan dalam SLR ini. Setiap entri mencakup informasi penulis, tahun, judul, model/arsitektur yang dihasilkan, metode evaluasi yang digunakan, serta gap penelitian yang diidentifikasi oleh masing-masing studi. Tabel ini disusun untuk memudahkan pembaca dalam memahami posisi kontributif setiap literatur dan menavigasi lanskap penelitian DT secara kritis.

Tabel 4. Ringkasan Referensi Utama Digital Twin: Model, Evaluasi, dan Gap Penelitian

Penulis & Tahun	Judul	Model / Arsitektur yang Dihasilkan	Metode Evaluasi	Gap Penelitian yang Diidentifikasi
Bellavista & Di Modica (2024)	IoTwins: Implementing Distributed and Hybrid Digital Twins in Industrial Manufacturing and Facility Management Settings	Hybrid distributed DT model; RAMI 4.0-inspired reference architecture; IoTwins open platform berbasis TOSCA pada cloud-edge continuum	Implementasi prototype industri nyata; studi kasus manufaktur & manajemen fasilitas; pengujian fungsional platform	Kurangnya panduan metodologis untuk adopsi DT di UKM; barrier teknis dan biaya untuk SME; belum ada orkestrasi dinamis antarmode edge
Iliuta et al. (2024)	Digital Twin — A Review of the Evolution from Concept to Technology and Its Analytical Perspectives on Applications in Various Fields	Kerangka review evolusi konsep DT; klasifikasi maturitas fungsional DT; analisis komparatif arsitektur DT lintas domain (manufaktur, medis, smart city)	Analisis bibliometrik (WoS, Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar 2015–2023); review sistematis literatur; analisis konten kualitatif	Tidak ada definisi DT yang diterima secara universal; kurangnya standar evaluasi lintas domain; tantangan integrasi AI-DT pada aplikasi medis

Ravinder (2025)	Reimagining Construction with Digital Twin Technology	Klasifikasi 4-subkategori DT (PDT, DM, DS, DT sejati); flowchart identifikasi subkategori berbasis arah aliran data dan kontrol; aplikasi DT pada siklus hidup produk konstruksi	Systematic literature review kualitatif; secondary data survey; studi kasus pintu kebakaran berbasis DT simulasi	Kualitas dan ketersediaan data untuk dynamic updating; keterbatasan pemodelan AI untuk prediksi; tantangan interoperabilitas antar model DT konstruksi
Tao et al. (2019)	Digital Twin in Industry: State-of-the-Art	Five-dimensional DT model (PE, VE, Ss, DD, CN); kerangka implementasi DT di industri manufaktur; peta teknologi enabling DT	Review state-of-the-art; studi kasus industri; analisis komparatif implementasi DT manufaktur	Standar interoperabilitas DT lintas platform belum ada; keamanan data dalam DT industri belum dikaji; skalabilitas dari unit DT ke ekosistem DT
Kritzinger et al. (2018)	Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification	Taksonomi 3-level DT manufaktur (Digital Model, Digital Shadow, Digital Twin); matriks klasifikasi berdasarkan integrasi data dan derajat otomatisasi	Categorical literature review; analisis konten artikel 2010–2018; coding tematik berbasis derajat integrasi data	Tidak ada standar terminologi DT yang konsisten; overlap definisi antara Digital Shadow dan DT sejati; minimnya validasi empiris di konteks manufaktur nyata
Qi & Tao (2018)	Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison	Kerangka integrasi DT-Big Data untuk smart manufacturing; model perbandingan 360 derajat antara DT dan Big Data; arsitektur CPS berbasis DT	Perbandingan konseptual 360 derajat; analisis literatur; mapping teknologi DT dan Big Data	Integrasi real-time antara DT dan Big Data masih terbatas; kurangnya model prediktif yang adaptif; kesulitan mengelola volume data sensor yang masif
VanDer Horn & Mahadevan (2021)	Digital Twin: Generalization, Characterization and Implementation	Kerangka generalisasi DT berbasis tiga komponen utama (fisik, virtual, koneksi data); karakterisasi formal DT untuk decision support system	Analisis konseptual formal; review literatur lintas domain; formulasi kerangka generalisasi berbasis set teori	Kurangnya kerangka formal yang dapat diaplikasikan lintas domain; tidak ada standar untuk mengukur fidelity DT; tantangan uncertainty quantification
Wright & Davidson (2020)	How to Tell the Difference Between a Model and a Digital Twin	Kriteria pembeda model konvensional vs. DT sejati; spektrum kontinum antara model statis dan DT dinamis real-time	Analisis konseptual; kajian komparatif studi kasus DT dan model konvensional; diskusi kriteria pembeda	Tidak ada konsensus tentang ambang batas kapabilitas yang membedakan model dari DT; terminologi yang overlapping menyebabkan klaim DT yang tidak akurat
Liu et al. (2021)	Review of Digital Twin About Concepts, Technologies, and Industrial Applications	Peta teknologi enabling DT (IoT, AI, Cloud, XR, 5G); kerangka siklus hidup DT empat fase; klasifikasi aplikasi industri DT	Literature review komprehensif; kategorisasi teknologi; analisis tren publikasi DT 2015–2021	Integrasi penuh XR dan DT untuk visualisasi real-time belum matang; kurangnya standar komputasi

				edge untuk DT; belum ada panduan implementasi end-to-end
Lu et al. (2020)	Developing a Digital Twin at Building and City Levels: Case Study of West Cambridge Campus	DT hierarkis multi-skala (unit bangunan hingga kampus/kota); integrasi BIM-IoT untuk DT infrastruktur; model data federasi untuk smart city DT	Studi kasus empiris (West Cambridge Campus UK); implementasi prototipe; pengujian integrasi sensor IoT dan BIM	Skalabilitas dari bangunan ke kota memerlukan orkestrasi data yang belum terstandar; interoperabilitas format data BIM vs. sensor IoT; privasi data pengguna gedung
Sepasgozar (2021)	Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite Smart, Sustainable Built Environments	Kerangka pembeda Digital Shadow vs. DT berbasis arah aliran data; model adopsi DT untuk lingkungan binaan berkelanjutan; paradigma DT untuk smart city	Analisis konseptual-komparatif; review literatur konstruksi dan smart city; framework evaluasi berbasis studi kasus	Terminologi Digital Shadow vs. DT sering disalahgunakan; kurangnya studi longitudinal dampak DT pada keberlanjutan lingkungan binaan
Zheng et al. (2019)	An Application Framework of Digital Twin and Its Case Studies	Application framework DT tiga-lapisan (fisik, virtual, layanan); model DT untuk sistem tenaga dan manufaktur; arsitektur integrasi CPS-DT	Studi kasus aplikasi nyata (sistem tenaga & manufaktur); pengujian performa model; analisis efisiensi komputasi	Keterbatasan komputasi real-time pada sistem DT kompleks; kurangnya standar API antarmuka DT; adaptasi model DT untuk sistem heterogen
Zhou et al. (2019)	Digital Twin Framework and Its Application to Power Grid Online Analysis	DT framework khusus jaringan listrik; model analisis online DT untuk smart grid; arsitektur pemantauan real-time berbasis DT	Studi kasus jaringan listrik nyata; pengujian analisis online; perbandingan performa dengan metode konvensional	Skalabilitas DT pada jaringan listrik yang sangat besar dan kompleks; keamanan siber infrastruktur kritis berbasis DT; generalisasi model ke grid lain
Grievies (2002)	Product Lifecycle Management: The New Paradigm for Enterprises	Konsep fondasi DT: "Conceptual Ideal for PLM"; model tiga komponen DT (fisik, virtual, koneksi); paradigma integrasi ruang fisik-virtual dalam PLM	Konseptual; tidak ada evaluasi empiris (studi awal); argumentasi teoritis berbasis kebutuhan industri PLM	Konsep awal belum memiliki implementasi teknis; tidak ada standar koneksi data fisik-virtual; skalabilitas dan kompleksitas sistem belum dibahas
Moher et al. (2009)	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement	Protokol PRISMA untuk SLR: checklist 27 item dan diagram alur 4-fase (identifikasi, skrining, kelayakan, inklusi); standar pelaporan SLR dan meta-analisis	Konsensus pakar multidisiplin; validasi iteratif checklist; pengujian pada studi kasus SLR nyata di bidang medis	Adaptasi PRISMA untuk domain non-medis seperti informatika dan teknik masih memerlukan penyesuaian; tantangan penerapan PRISMA pada grey literature dan multi-database

Berdasarkan Tabel 4, dapat diidentifikasi pola berulang pada kolom gap penelitian di seluruh referensi yang dianalisis. Tiga tema gap yang paling dominan adalah: (1) ketiadaan standar terminologi dan evaluasi yang disebut oleh 9 dari 15 referensi utama (60%); (2) tantangan interoperabilitas dan skalabilitas yang muncul pada 8 referensi (53,3%); dan (3) minimnya validasi empiris pada konteks implementasi nyata yang dialami oleh 7 referensi (46,7%). Pola ini mengkonfirmasi dan memperkuat temuan utama SLR ini bahwa komunitas riset DT membutuhkan standarisasi metodologis sebagai landasan untuk kemajuan ilmiah yang lebih terukur dan terkomparasi.

5. KESIMPULAN

Systematic Literature Review ini berhasil memetakan lanskap penelitian Digital Twin secara komprehensif melalui analisis terhadap 47 artikel berkualitas tinggi yang dipublikasikan pada 2020–2025. Temuan utama mengkonfirmasi bahwa DT telah berkembang dari konsep manufaktur yang relatif sempit menjadi paradigma teknologi lintas domain yang mencakup konstruksi, kesehatan, smart city, dan manajemen fasilitas industri.

Kontribusi novelty terpenting dari penelitian ini adalah: (1) penyusunan Taksonomi DT Lima Dimensi (5D-DT Taxonomy) yang mengintegrasikan berbagai perspektif klasifikasi yang ada dalam satu kerangka kohesif dan dapat dioperasionalkan; (2) identifikasi enam gap penelitian kritis yang belum tertangani, khususnya terkait standar evaluasi maturitas, interoperabilitas, dan kesiapan adopsi UKM; dan (3) perumusan agenda riset prioritas yang berorientasi pada tantangan Industry 5.0.

Temuan kritis yang paling menonjol adalah bahwa 73% dari studi DT yang ditinjau tidak memiliki kerangka evaluasi performa yang terstandar, mengindikasikan bahwa komunitas riset DT masih membutuhkan konsensus metodologis yang fundamental sebelum dapat melakukan komparasi hasil lintas studi secara bermakna. Hal ini menjadi tantangan sekaligus peluang bagi peneliti selanjutnya untuk mengisi gap ini dengan riset yang berpotensi berdampak tinggi.

Untuk penelitian mendatang, disarankan agar komunitas riset DT Indonesia mulai mengembangkan studi implementasi DT dalam konteks lokal, mengingat minimnya representasi penelitian dari negara berkembang dalam literatur DT global. Pengembangan DT yang adaptif terhadap infrastruktur terbatas namun tetap fungsional merupakan peluang riset yang strategis dan potensial untuk berkontribusi pada literatur internasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para reviewer dan editor Jurnal JITET atas masukan yang diberikan, serta kepada seluruh pihak yang telah mendukung penyelesaian penelitian ini

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Bellavista and G. Di Modica, "IoTwins: Implementing distributed and hybrid digital twins in industrial manufacturing and facility management settings," *Future Internet*, vol. 16, no. 2, Art. no. 65, 2024, doi: 10.3390/fi16020065.
- [2] M. Grieves, "Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises," *International Journal of Product Development*, vol. 2, no. 1–2, pp. 71–84, 2002.
- [3] M.-E. Iliuta, M.-A. Moisescu, E. Pop, A.-D. Ionita, S.-I. Caramihai, and T.-C. Mitulescu, "Digital twin—A review of the evolution from concept to technology and its analytical perspectives on applications in various fields," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 13, Art. no. 5454, 2024, doi: 10.3390/app14135454.
- [4] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn, "Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- [5] M. Liu, S. Fang, H. Dong, and C. Xu, "Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 58, pp. 346–361, 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.06.017.
- [6] Q. Lu, A. K. Parlikad, P. Woodall, G. Don Panfilo, X. Xie, Z. Liang, E. Konstantinou, J. Heaton, and J. Schooling, "Developing a digital twin at building and city levels: Case study of West Cambridge Campus," *Journal of Management in Engineering*, vol. 36, no. 3, Art. no. 05020004, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000763.
- [7] D. Moher, A. Liberati, J. Tetzlaff, D. G. Altman, and the PRISMA Group, "Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement," *PLOS Medicine*, vol. 6, no. 7, Art. no. e1000097, 2009, doi: 10.1371/journal.pmed.1000097.
- [8] Q. Qi and F. Tao, "Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3585–3593, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2793265.
- [9] B. Ravinder, "Reimagining construction with digital twin technology," *Journal of Informatics Education and Research*, vol. 5, no. 2, pp. 3026–3035, 2025, doi: 10.52783/jier.v5i2.2044.
- [10] S. M. E. Sepasgozar, "Differentiating digital twin from digital shadow: Elucidating a paradigm shift to expedite smart, sustainable built environments," *Buildings*, vol. 11, no. 4, Art. no. 151, 2021, doi: 10.3390/buildings11040151.
- [11] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, "Digital twin in industry: State-of-the-art," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, Apr. 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2873186.
- [12] E. VanDerHorn and S. Mahadevan, "Digital twin: Generalization, characterization and implementation," *Decision Support Systems*, vol. 145, Art. no. 113524, 2021, doi: 10.1016/j.dss.2021.113524.
- [13] L. Wright and S. Davidson, "How to tell the difference between a model and a digital twin," *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, vol. 7, no. 1, Art. no. 13, 2020, doi: 10.1186/s40323-020-00147-4.
- [14] Y. Zheng, S. Yang, and H. Cheng, "An application framework of digital twin and its case studies," *Future Generation Computer Systems*, vol. 91, pp. 292–307, 2019, doi: 10.1016/j.future.2018.11.022.
- [15] M. Zhou, J. Yan, and D. Feng, "Digital twin framework and its application to power grid online analysis," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 391–398, 2019, doi: 10.17775/CSEEJPES.2018.00520.
- [16] A. T. N. Maulana, M. R. C. Wijayanto, and M. D. A. Fadilah, "Implementasi kontrol jemuran serta monitoring suhu berbasis ESP32 dengan integrasi Blynk dan Telegram," *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, vol. 14, no. 1, pp. 492–500, 2026, doi: 10.23960/jitet.v14i1.8455.