



## Studi *Systematic Literature Review* (SLR) Perkembangan Teknologi *Digital Twin* untuk Strategi Perawatan Berkelanjutan pada Industri Proses Petrokimia: Pendekatan Lintas Sektor

(A *Systematic Literature Review* (SLR) On The Development Of *Digital Twin* Technology For Sustainable Maintenance Strategies In The Petrochemical Process Industry: Cross-Sectoral Perspective)

Silvia Febriani<sup>1</sup>, Dea Fajria Tatarizqa Japal<sup>2</sup>, Nurhasanah<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknologi Mesin Industri Petrokimia, Politeknik Industri Petrokimia Banten, Indonesia

<sup>2</sup> Program Studi Sustainable Finance, Universitas Islam Internasional Indonesia, Indonesia

<sup>3</sup> Program Studi Teknologi Mesin Industri Petrokimia, Politeknik Industri Petrokimia Banten, Indonesia

<sup>1</sup> [silvia.febriani@poltek-petrokimia.ac.id](mailto:silvia.febriani@poltek-petrokimia.ac.id), <sup>2</sup> [dea.japal@uiii.ac.id](mailto:dea.japal@uiii.ac.id), <sup>3</sup> [nurhasanah.nurhasanah@poltek-petrokimia.ac.id](mailto:nurhasanah.nurhasanah@poltek-petrokimia.ac.id)

**Penulis Korespondensi:** Silvia Febriani | **Email:** [silvia.febriani@poltek-petrokimia.ac.id](mailto:silvia.febriani@poltek-petrokimia.ac.id)

Diterima (Received): 13/04/2026 | Direvisi (Revised): 24/04/2026 | Diterima untuk Publikasi (Accepted): 27/04/2026

### ABSTRAK

Perkembangan teknologi *Digital Twin* dalam kerangka Revolusi Industri 4.0 telah mendorong transformasi strategi perawatan industri menuju pendekatan yang lebih adaptif, prediktif, dan berkelanjutan. Industri proses petrokimia, dengan karakteristik operasional berisiko tinggi, meliputi tekanan dan temperatur ekstrem, dinamika reaksi kimia yang kompleks, serta potensi kegagalan katastrosif akibat korosi dan kebocoran bahan berbahaya, memiliki urgensi yang sangat tinggi terhadap sistem pemantauan dan perawatan berbasis prediksi. Namun, kajian sistematis mengenai implementasi *Digital Twin* secara spesifik pada sektor petrokimia masih sangat terbatas dalam literatur ilmiah. Kondisi ini merupakan kesenjangan penelitian (*research gap*) yang signifikan dan menjadi justifikasi utama penelitian ini. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan memetakan perkembangan teknologi *Digital Twin* dalam mendukung strategi perawatan berkelanjutan pada industri proses petrokimia melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) berbasis protokol PRISMA. Sebanyak 40 artikel ilmiah terpilih dianalisis secara sistematis untuk mengidentifikasi tren publikasi, distribusi sektor industri, klasifikasi strategi perawatan, serta integrasi dimensi keberlanjutan. Artikel dari sektor manufaktur, otomotif, dan logistik diikutsertakan sebagai referensi *comparative benchmarking* untuk mengidentifikasi praktik terbaik yang dapat diadaptasi pada konteks petrokimia yang lebih kompleks, pendekatan ini adalah respons langsung terhadap minusnya literatur spesifik petrokimia dan merupakan strategi yang valid secara metodologis dalam SLR berbasis *research gap*. Hasil analisis menunjukkan bahwa penelitian *Digital Twin* mengalami peningkatan signifikan sejak tahun 2020 dan mencapai fase ekspansi strategis pada periode 2022–2023. Dominasi penelitian masih berada pada sektor manufaktur (43%), sementara sektor petrokimia relatif lebih terbatas (28%), temuan ini secara langsung mengkonfirmasi *research gap* yang menjadi fondasi penelitian ini. Dari perspektif strategi perawatan, *predictive maintenance* merupakan paradigma dominan yang berkontribusi signifikan terhadap optimalisasi sumber daya dan peningkatan keselamatan operasional. Namun demikian, integrasi *prescriptive maintenance* berbasis risiko serta dimensi keberlanjutan seperti pengurangan emisi dan manajemen siklus hidup aset, yang sangat kritis untuk petrokimia mengingat kewajiban dekarbonisasinya, masih belum berkembang secara optimal. Penelitian ini menyimpulkan bahwa *Digital Twin* memiliki potensi strategis untuk mentransformasikan sistem perawatan industri proses petrokimia menjadi lebih efisien, aman, dan berkelanjutan, dengan syarat integrasi simultan antara *predictive intelligence*, *risk-based optimization*, dan *sustainability-oriented lifecycle management* yang spesifik terhadap parameter unik petrokimia.

**Kata Kunci:** Digital Twin, Predictive Maintenance, Industri Petrokimia, Keberlanjutan, Systematic Literature Review

---

## ABSTRACT

The advancement of Digital Twin technology within the Industry 4.0 paradigm has transformed industrial maintenance strategies toward more adaptive, predictive, and sustainable approaches. Petrochemical process industries, characterised by high-risk operations, including extreme pressures and temperatures, complex chemical reaction dynamics, and catastrophic failure potential from corrosion and hazardous material leaks, face exceptionally high urgency for predictive monitoring and maintenance systems. However, systematic studies on Digital Twin implementation specifically within the petrochemical sector remain critically limited in the scientific literature, a significant research gap that constitutes the primary justification for this study. This study aims to analyse and map the development of Digital Twin technology in supporting sustainable maintenance strategies in petrochemical process industries through a Systematic Literature Review (SLR) guided by the PRISMA protocol. A total of 40 selected scientific articles were systematically analysed to identify publication trends, industrial sector distribution, maintenance strategy classification, and sustainability integration. Articles from manufacturing, automotive, and logistics sectors were included as comparative benchmarking references to identify best practices adaptable to the more complex petrochemical context, a methodologically valid strategy in research gap-driven SLR. The findings indicate that Digital Twin research has significantly increased since 2020, reaching a strategic expansion phase during 2022–2023. Research remains predominantly concentrated in the manufacturing sector (43%), while petrochemical applications are comparatively limited (28%), directly confirming the research gap underpinning this study. From a maintenance strategy perspective, predictive maintenance emerges as the dominant paradigm. Nevertheless, the integration of risk-based prescriptive maintenance and sustainability dimensions, particularly emission reduction and lifecycle asset management, which are critical for petrochemical decarbonisation obligations, remains underdeveloped. This study concludes that Digital Twin holds strategic potential to transform petrochemical maintenance systems, provided simultaneous integration of predictive intelligence, risk-based optimization, and petrochemical-specific sustainability-oriented lifecycle management is achieved.

**Keywords:** Digital Twin, Predictive Maintenance, Petrochemical Industry, Sustainability, Systematic Literature Review

---

© Author(s) 2026. This is an open access article under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0).

## 1. Pendahuluan

Perkembangan Revolusi Industri 4.0 telah membawa transformasi mendasar dalam sistem industri modern melalui integrasi teknologi digital ke dalam proses produksi dan pengelolaan aset. Transformasi ini ditandai oleh meningkatnya pemanfaatan *Cyber-Physical Systems* (CPS), *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*), analitik data skala besar, serta komputasi awan yang memungkinkan konektivitas antara sistem fisik dan digital secara *real-time*. Integrasi tersebut tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga mengubah paradigma pengambilan keputusan industri dari berbasis pengalaman menjadi berbasis data yang adaptif dan prediktif (Siswanto & Dewi, 2023). Seiring meningkatnya kompleksitas sistem produksi, kebutuhan terhadap teknologi yang mampu merepresentasikan sistem fisik secara virtual dan dinamis menjadi semakin krusial.

Salah satu teknologi kunci yang berkembang pesat dalam ekosistem Industri 4.0 adalah *Digital Twin*. *Digital Twin* merupakan representasi virtual dari entitas fisik yang terhubung secara dua arah melalui aliran data *real-time*, sehingga memungkinkan proses industri dimodelkan, dipantau, dianalisis, serta diuji secara digital sebelum diterapkan pada sistem aktual (Siswanto & Dewi, 2023). Berbeda dengan simulasi konvensional yang bersifat statis, *Digital Twin* bersifat dinamis karena model virtualnya terus diperbarui berdasarkan kondisi operasional aktual di lapangan. Dengan demikian, teknologi ini tidak hanya berfungsi sebagai alat visualisasi, tetapi juga sebagai sistem

analitik yang mampu mendukung pengambilan keputusan operasional secara prediktif dan preskriptif.

Secara konseptual, *Digital Twin* dibangun melalui integrasi teknologi pemodelan, sensorisasi, komunikasi data, dan analitik cerdas yang memungkinkan sinkronisasi antara ruang fisik dan ruang digital (Kurniawan et al., 2024). Integrasi ini menjadikan *Digital Twin* sebagai fondasi pengembangan *smart manufacturing* yang menekankan efisiensi, fleksibilitas, responsivitas, serta optimalisasi penggunaan sumber daya. Selain meningkatkan produktivitas, *Digital Twin* juga berkontribusi terhadap pengelolaan aset yang lebih berkelanjutan melalui pemantauan kondisi peralatan secara kontinu dan evaluasi siklus hidup aset secara komprehensif.

Konsep keberlanjutan (*sustainability*) dalam konteks industri modern tidak lagi terbatas pada efisiensi energi, tetapi juga mencakup keandalan aset, keselamatan operasional, serta pengurangan risiko kegagalan sistem yang berdampak pada lingkungan dan ekonomi. *Digital Twin* berperan penting dalam mendukung strategi perawatan berkelanjutan karena memungkinkan identifikasi dini potensi kegagalan, optimasi jadwal perawatan, serta pengurangan *downtime* yang tidak terencana. Pendekatan ini selaras dengan prinsip *sustainable asset management* yang bertujuan menjaga performa sistem dalam jangka panjang dengan biaya dan risiko minimal. Implementasi *Digital Twin* juga telah meluas ke berbagai sektor seperti manufaktur, logistik, energi, dan *supply chain*. Pada sektor logistik, misalnya,

*Digital Twin* digunakan untuk simulasi rantai pasok *real-time* guna meningkatkan efisiensi distribusi dan meminimalkan pemborosan sumber daya (Romadhona & Zulfairah, 2024). Sementara itu, pada sektor manufaktur, teknologi ini dimanfaatkan untuk optimasi proses produksi dan peningkatan keselamatan kerja (Siswanto & Dewi, 2023). Namun demikian, implementasi pada industri proses seperti petrokimia memiliki karakteristik yang jauh lebih kompleks dan kritis.

Industri petrokimia beroperasi dalam lingkungan berisiko tinggi dengan variabel proses yang saling terintegrasi, tekanan dan temperatur ekstrem, serta potensi dampak keselamatan dan lingkungan yang signifikan apabila terjadi kegagalan sistem. Parameter operasional yang unik pada industri ini, seperti laju korosi pada pipa dan reaktor bertekanan tinggi, dinamika reaksi eksoterm yang tidak terkontrol, serta manajemen bahan kimia berbahaya yang memerlukan tingkat presisi dan keandalan sistem perawatan yang jauh melebihi standar industri manufaktur konvensional. Oleh karena itu, strategi perawatan tradisional seperti *corrective maintenance* dan *preventive maintenance* seringkali tidak cukup untuk menjamin keandalan sistem dalam jangka panjang. *Digital Twin* menawarkan solusi melalui kemampuan simulasi performa peralatan, monitoring kondisi berbasis sensor, serta prediksi kegagalan sistem secara *real-time* (Gao, Jia & Liu, 2022).

Kajian SLR sebelumnya yang ada, seperti Ditzel et al. (2020) yang memetakan 40 studi mengenai *Digital Twin* dalam manufaktur, dan Kamble et al. (2022) yang menganalisis 98 artikel tentang *Digital Twin* untuk rantai pasok berkelanjutan, secara konsisten menunjukkan bahwa literatur yang ada terfokus pada sektor manufaktur diskrit. Keterbatasan spesifik dari studi-studi terdahulu tersebut adalah absennya analisis mendalam terhadap industri proses kontinu berisiko tinggi seperti petrokimia, yang memiliki karakteristik korosi, tekanan ekstrem, dan reaksi kimia berbahaya yang tidak ditemukan pada manufaktur umum. Kesenjangan ini secara kuantitatif terkonfirmasi dari data distribusi: dari 40 artikel yang dianalisis dalam studi ini, hanya sekitar 28% yang secara langsung membahas sektor petrokimia atau *chemical process industry*, sementara 43% membahas manufaktur umum. Kondisi ini mencerminkan ketidakseimbangan antara volume riset dan tingkat urgensi kebutuhan industri, dan menjadi *state of the art* sekaligus posisi penelitian ini dalam peta literatur global.

Pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) dipilih karena menawarkan kerangka analisis yang lebih sistematis, transparan, dan dapat direplikasi dibandingkan metode tinjauan literatur tradisional (*narrative review*). Berbeda dengan tinjauan naratif yang bersifat subjektif dalam pemilihan dan interpretasi literatur, SLR menggunakan protokol terstruktur, dalam penelitian ini mengacu pada panduan PRISMA (*Preferred Reporting Items*

*for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), untuk meminimalkan bias seleksi dan memastikan komprehensivitas cakupan literatur. Meskipun potensi *Digital Twin* dalam mendukung strategi perawatan berkelanjutan cukup besar, penelitian yang secara khusus memetakan perkembangan teknologi ini dalam konteks industri proses petrokimia masih sangat terbatas. Sebagian besar studi lebih berfokus pada manufaktur atau *supply chain*, sehingga diperlukan kajian sistematis untuk mengidentifikasi tren perkembangan, teknologi pendukung dominan, serta kesenjangan penelitian yang masih terbuka. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemetaan komprehensif terhadap perkembangan *Digital Twin* dalam mendukung strategi perawatan berkelanjutan pada industri proses petrokimia melalui pendekatan SLR berbasis protokol PRISMA.

## 2. Data dan Metodologi

### 2.1. Data dan Lokasi

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa artikel ilmiah sekunder yang diperoleh dari berbagai basis data akademik bereputasi, meliputi *Scopus*, *Web of Science*, *IEEE Xplore*, *Google Scholar*, dan *ScienceDirect*. Proses pengumpulan data dilakukan melalui pencarian literatur menggunakan kombinasi kata kunci dengan operator Boolean sebagai berikut:

**("Digital Twin") AND ("Petrochemical" OR "Chemical Process Industry")  
AND ("Predictive Maintenance" OR "Sustainable Maintenance" OR "Asset Management")  
AND ("Sustainability" OR "Industry 4.0" OR "Lifecycle Management")**

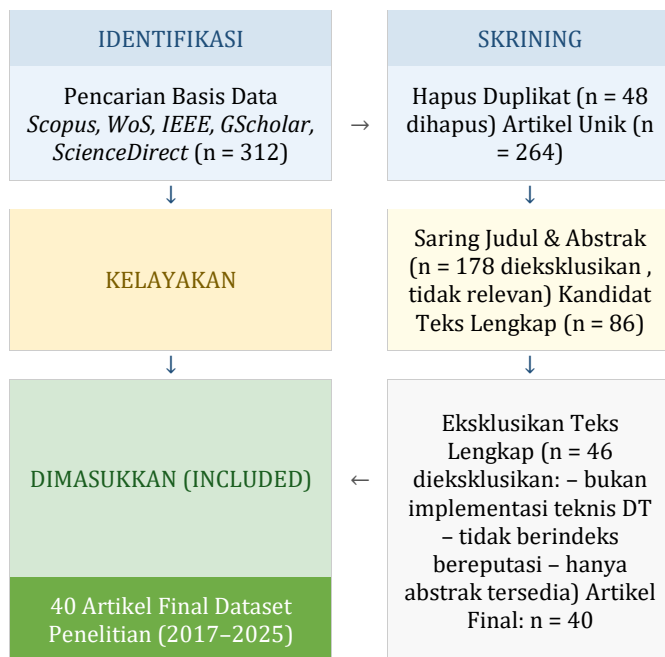
Penting untuk dicatat bahwa pencarian awal menggunakan kata kunci yang dibatasi secara ketat hanya pada sektor petrokimia ("*Digital Twin*" AND "*Petrochemical*") menghasilkan literatur yang sangat terbatas. Kondisi ini sendiri merupakan konfirmasi empiris dari *research gap* yang menjadi landasan penelitian ini. Untuk menghasilkan dataset yang representatif dan mampu memberikan konteks komparatif yang bermakna, strategi pencarian diperluas secara terstruktur untuk mencakup sektor-sektor yang memiliki kedekatan karakteristik operasional dengan petrokimia, seperti *chemical process industry*, manufaktur, dan energi. Artikel yang dianalisis mencakup rentang waktu 2017 hingga 2025 (Pal et al., 2023; Soleymanizadeh et al., 2023).

### 2.2. Metodologi : Pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) Berbasis Protokol PRISMA

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengkaji secara komprehensif perkembangan teknologi *Digital Twin* dalam mendukung strategi perawatan berkelanjutan pada

industri proses petrokimia. Pendekatan SLR dipilih karena mampu memberikan kerangka analisis yang sistematis, transparan, dan dapat direplikasi dalam mengidentifikasi serta mensintesis literatur ilmiah yang relevan, sekaligus meminimalkan bias subjektivitas melalui prosedur seleksi yang terstruktur (Romadhona & Zufairah, 2024). Berbeda dengan *narrative review* yang bergantung pada penilaian subjektif peneliti, SLR menerapkan kriteria inklusi dan eksklusi yang eksplisit, sehingga meningkatkan reproduktibilitas dan validitas temuan.

Penelitian ini mengacu pada protokol pelaporan PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) untuk memastikan transparansi dan kelengkapan pelaporan proses seleksi literatur. Diagram alir PRISMA (Gambar 1) menyajikan secara eksak alur dan jumlah artikel pada setiap tahapan seleksi: pencarian awal di lima basis data menghasilkan 312 rekaman, kemudian 48 rekaman dihapus karena duplikasi, menghasilkan 264 artikel unik. Setelah penyaringan berdasarkan judul dan abstrak, 178 artikel dieksklusikan karena tidak relevan, menghasilkan 86 artikel kandidat untuk evaluasi teks lengkap. Dari 86 artikel tersebut, 46 artikel dieksklusikan berdasarkan kriteria eksklusi yang ditetapkan secara eksplisit, sehingga diperoleh 40 artikel final yang menjadi dataset penelitian ini.



Gambar 1 Diagram Alir PRISMA-Proses Seleksi Literatur (Total Awal : n=312; Dataset Final: n=40)

Proses seleksi literatur dilakukan dengan mengacu pada kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan secara eksplisit. Kriteria inklusi mencakup: (1) artikel yang secara langsung membahas teknologi *Digital Twin*, (2) memiliki keterkaitan dengan strategi perawatan atau manajemen

aset, (3) mempertimbangkan aspek efisiensi atau keberlanjutan dalam sistem industri, (4) dipublikasikan dalam jurnal atau prosiding ilmiah terindeks di basis data bereputasi (*Scopus, WoS, IEEE*, atau setara), (5) tersedia dalam bentuk teks lengkap, dan (6) diterbitkan antara tahun 2017 hingga 2025. Kriteria eksklusi mencakup: (1) artikel yang tidak membahas implementasi teknis *Digital Twin*, (2) artikel opini atau editorial tanpa metodologi yang dapat diverifikasi, (3) artikel yang hanya tersedia dalam bentuk abstrak, dan (4) artikel yang tidak dapat diakses teks lengkapnya. Dengan demikian, kriteria subjektif "kualitas publikasi rendah" digantikan sepenuhnya oleh parameter terindeks yang terukur dan objektif.

Artikel dari sektor manufaktur, otomotif, dan logistik yang terpilih tidak dikecualikan, melainkan diintegrasikan sebagai referensi *comparative benchmarking*. Ini merupakan pendekatan metodologis yang disengaja dan valid dalam SLR: ketika literatur spesifik pada domain target sangat terbatas, seperti halnya petrokimia dalam konteks *Digital Twin*, literatur dari domain yang memiliki kemiripan karakteristik teknis dijadikan referensi komparatif untuk mengidentifikasi praktik terbaik yang potensial untuk diadaptasi. Tanpa data komparatif dari sektor yang lebih matang secara riset, tidak akan mungkin mengkuantifikasi kesenjangan penelitian secara akurat. Dengan demikian, inklusivitas lintas sektor ini bukan kelemahan metodologis, melainkan strategi yang memperkuat relevansi analisis dalam konteks *research gap* yang teridentifikasi.

Tahapan metodologi dalam penelitian ini meliputi: (1) perencanaan kajian dan perumusan tujuan penelitian; (2) identifikasi literatur melalui pencarian sistematis dengan kombinasi Boolean; (3) seleksi artikel melalui evaluasi judul, abstrak, dan isi sesuai kriteria PRISMA; (4) ekstraksi data, mencakup tahun publikasi, sektor industri, fokus penelitian, metode, dan kontribusi terhadap strategi perawatan berbasis *Digital Twin*; dan (5) sintesis dan analisis hasil secara tematik dan deskriptif dengan orientasi pada implikasi khusus industri petrokimia.

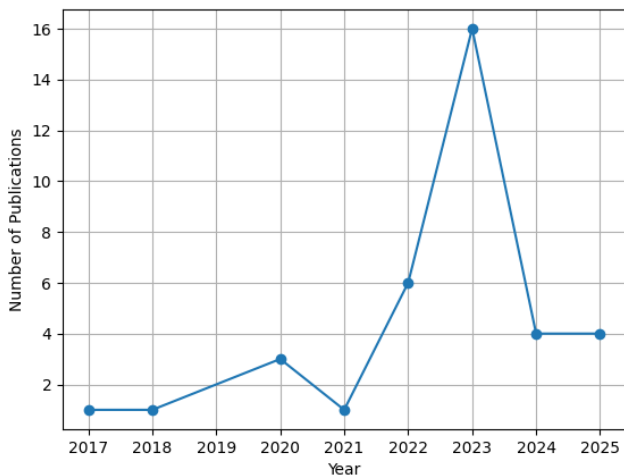
### 3. Hasil dan Pembahasan

Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi pola perkembangan teknologi *Digital Twin*, distribusi implementasi pada berbagai sektor industri, serta keterkaitannya dengan strategi perawatan dan dimensi keberlanjutan. Dengan pendekatan ini, pembahasan tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga analitis dalam mengkaitkan temuan penelitian dengan kebutuhan nyata industri proses petrokimia yang berisiko tinggi (Pal et al., 2023; Attaran et al., 2023).

Untuk memberikan pemahaman yang lebih terstruktur, hasil penelitian ini disajikan dalam beberapa subbagian utama yang mencakup analisis tren perkembangan penelitian, distribusi sektor industri, klasifikasi strategi perawatan, serta integrasi dimensi keberlanjutan. Setiap

subbagian dibahas secara mendalam untuk mengungkap pola, kesenjangan penelitian, serta implikasi terhadap pengembangan teknologi *Digital Twin* di masa depan. Dengan pendekatan ini, pembahasan tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga analitis dalam mengkaitkan temuan penelitian dengan kebutuhan nyata industri proses berisiko tinggi.

### 3.1. Evolusi dan Dinamika Perkembangan Riset *Digital Twin* (2017-2025)



Gambar 2 Evolusi Perkembangan Riset *Digital Twin* (2017-2025)

Perkembangan penelitian *Digital Twin* dalam konteks industri menunjukkan pola evolusi yang progresif dan terstruktur, yang dapat dianalisis melalui pendekatan siklus kematangan teknologi (*technology maturity lifecycle*). Berdasarkan 40 artikel yang dianalisis secara sistematis, periode 2017–2018 ditandai oleh jumlah publikasi yang sangat terbatas dan dominan bersifat konseptual. Pada fase ini, *Digital Twin* masih diposisikan sebagai bagian dari pengembangan *Cyber-Physical Systems* (CPS) dalam kerangka Industri 4.0, dengan fokus utama pada definisi, arsitektur sistem, serta integrasi antara ruang fisik dan virtual (Negri, Fumagalli & Macchi, 2017).

Memasuki tahun 2020, terjadi peningkatan jumlah publikasi yang signifikan yang mencerminkan pergeseran paradigma penelitian. *Digital Twin* mulai diintegrasikan dengan teknologi *Machine Learning* dan *data fusion* untuk mendukung *predictive maintenance* serta *fault diagnosis* berbasis kecerdasan buatan (Alexopoulos et al., 2020; Hu et al., 2020). Pada tahap ini, *Digital Twin* tidak lagi dipandang sebagai model simulasi statis, melainkan sebagai sistem dinamis yang mampu melakukan pembaruan model secara *real-time* berdasarkan data sensor industri. Perkembangan *Internet of Things* (IoT) memungkinkan akuisisi data operasional secara kontinu dan menjadi pendorong utama transformasi ini.

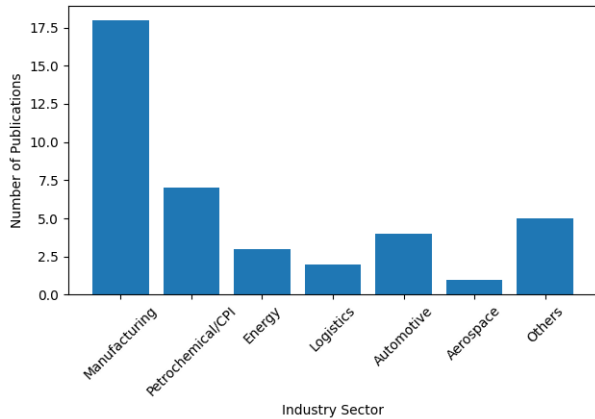
Lonjakan paling signifikan terjadi pada periode 2022–2023, dengan puncak publikasi pada tahun 2023. Fenomena ini dapat dianalisis sebagai fase ekspansi strategis, di mana *Digital Twin* mulai diintegrasikan dengan agenda keberlanjutan industri. Studi pada periode ini tidak hanya berfokus pada optimasi performa sistem, tetapi juga pada pengurangan emisi, efisiensi energi, serta integrasi *lifecycle asset management* (Pal et al., 2023; Shinkevich, Kasimova & Alekseeva, 2023). *Digital Twin* mulai diposisikan sebagai instrumen pendukung *sustainable process industry*, khususnya melalui *predictive maintenance* yang mampu mengurangi *downtime* dan pemborosan sumber daya. Integrasi *Artificial Intelligence* tingkat lanjut, seperti *Deep Reinforcement Learning* untuk optimasi proses, mulai menunjukkan potensi menuju pengambilan keputusan otonom berbasis *prescriptive analytics* (Khdoudi et al., 2024).

Memasuki periode 2024–2025, meskipun volume publikasi relatif stabil, karakter penelitian menunjukkan kedalaman analisis yang lebih tinggi dan fokus pada sektor spesifik seperti petrokimia dan *refinery*. Hal ini dikonfirmasi oleh studi terkini seperti Ezzat (2025) yang secara khusus membahas perkembangan operasional *refinery*-petrokimia menggunakan platform *Digital Twin* untuk mendukung dekarbonisasi dan optimalisasi performa operasional. Perkembangan ini konsisten dengan tren yang telah diletakkan dasar-dasarnya oleh studi-studi perintis dari sektor petrokimia, seperti implementasi *Process Digital Twin* berskala industri di fasilitas Saudi Aramco yang didokumentasikan oleh Al Ghazal et al. (2022), yang membuktikan kelayakan teknis dan strategis teknologi ini pada skala operasi petrokimia penuh. Kombinasi antara bukti kelayakan tahun 2022 dan realisasi operasional tahun 2024–2025 menunjukkan bahwa *Digital Twin* telah bergeser dari tahap eksperimental menuju tahap implementasi strategis yang matang pada industri proses berisiko tinggi.

Secara teoritis, pola perkembangan ini konsisten dengan model *S-Curve Technology Adoption*, di mana fase awal ditandai oleh eksplorasi konseptual, diikuti fase pertumbuhan cepat akibat integrasi teknologi pendukung, dan kemudian menuju fase stabilisasi dengan fokus pada optimalisasi dan spesialisasi. Namun demikian, pertumbuhan ini masih didominasi sektor manufaktur umum, sementara sektor petrokimia belum menunjukkan proporsi penelitian yang sebanding dengan kompleksitas dan risiko operasionalnya. Kondisi ini mengkonfirmasi *research gap* yang menjadi fondasi penelitian ini, sebuah pergeseran yang justru semakin mendesak mengingat bahwa industri petrokimia memiliki kewajiban dekarbonisasi yang jauh lebih besar namun kapasitas literatur *Digital Twin*-nya masih jauh tertinggal dari urgensinya. Dari perspektif *sustainable maintenance*, kesenjangan riset ini berkorelasi langsung dengan lambatnya adopsi *predictive* dan *prescriptive maintenance*

berbasis *Digital Twin* di sektor petrokimia, memperpanjang ketergantungan pada strategi perawatan konvensional yang kurang efisien secara energi dan lingkungan.

### 3.2. Distribusi Sektor Industri dalam Penelitian *Digital Twin*



Gambar 3 Distribusi Sektor Industri dalam Penelitian *Digital Twin* (2017-2025)

Distribusi sektor industri dari 40 penelitian yang dianalisis menunjukkan ketimpangan yang cukup jelas dalam fokus implementasi *Digital Twin*. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3, sektor manufaktur mendominasi penelitian dengan proporsi tertinggi sebesar sekitar 43%, sementara sektor petrokimia dan *chemical process industry* (CPI) berada pada posisi kedua dengan sekitar 28%. Sisanya terbagi antara sektor logistik/rantai pasok (12%), otomotif (10%), dan sektor lainnya termasuk pertanian, konstruksi, dan energi (7%). Dominasi sektor manufaktur menunjukkan bahwa *Digital Twin* secara historis berkembang kuat dalam konteks *discrete manufacturing* yang memiliki struktur proses lebih modular dan relatif lebih mudah dimodelkan dibandingkan industri proses kontinu (Soleymanzadeh et al., 2023; Attaran et al., 2023).

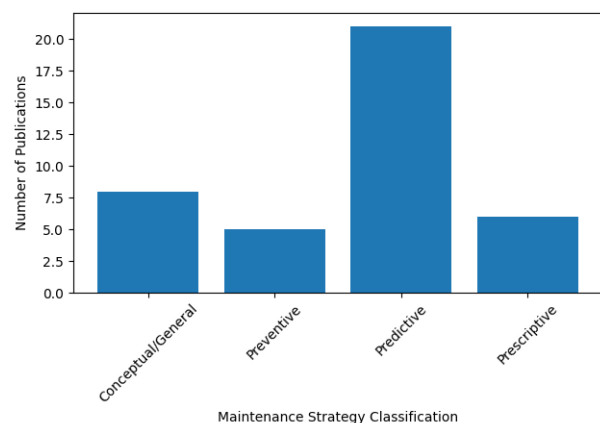
Perlu ditekankan bahwa keikutsertaan artikel dari sektor manufaktur (43%), logistik (12%), dan otomotif (10%) dalam dataset ini merupakan keputusan metodologis yang disengaja dan terstruktur, bukan ketidaksesuaian metodologi. Artikel-artikel dari sektor-sektor tersebut berfungsi sebagai referensi *comparative benchmarking* yang memungkinkan identifikasi praktik terbaik implementasi *Digital Twin* yang potensial untuk diadaptasi pada konteks petrokimia. Dalam metodologi SLR yang berfokus pada *research gap*, keterbatasan literatur spesifik pada domain target justru memperkuat perlunya perbandingan lintas sektor. Tanpa data komparatif dari sektor yang lebih matang secara riset, tidak akan mungkin mengkuantifikasi kesenjangan penelitian secara akurat, sehingga relevansinya terhadap judul penelitian ini tetap terjaga.

Sektor petrokimia dan CPI, meskipun hanya mencakup 28% dari total dataset, memberikan kontribusi analitis yang paling signifikan. Studi pada sektor ini umumnya berfokus pada monitoring proses, *fault diagnosis*, *predictive maintenance*, serta integrasi *lifecycle asset management* (Gao, Jia & Liu, 2022; Hu et al., 2020; Pal et al., 2023). Meskipun secara teknis kebutuhan industri petrokimia terhadap sistem prediktif jauh lebih kritis, jumlah publikasi masih belum sebanding dengan tingkat kompleksitas dan konsekuensi kegagalan sistem pada sektor tersebut.

Jika dianalisis secara struktural, dominasi sektor manufaktur dalam penelitian *Digital Twin* dapat dijelaskan oleh tiga faktor utama. Pertama, ketersediaan data diskrit dan modular pada sistem manufaktur memudahkan proses pemodelan dan validasi simulasi. Kedua, risiko implementasi teknologi baru pada manufaktur relatif lebih rendah dibandingkan pada industri proses berisiko tinggi. Ketiga, transformasi menuju *smart factory* menjadi prioritas strategis dalam agenda Industri 4.0 sehingga mendorong percepatan penelitian pada sektor tersebut.

Sebaliknya, industri petrokimia menghadapi tantangan lebih kompleks dalam implementasi *Digital Twin*, seperti kebutuhan komputasi tinggi untuk memodelkan dinamika reaksi kimia secara akurat, integrasi sistem *legacy* yang sudah ada, serta standarisasi model proses yang sangat spesifik (Pal et al., 2023). Tantangan unik pada industri petrokimia meliputi pemodelan korosi material akibat paparan zat kimia korosif secara kontinu, simulasi kegagalan katalis pada reaktor bertekanan tinggi, serta integrasi sistem pendeteksi kebocoran gas berbahaya ke dalam arsitektur *Digital Twin*. Kompleksitas ini menjadi faktor penghambat percepatan riset, meskipun urgensi kebutuhannya jauh lebih besar dibandingkan sektor lain mana pun.

### 3.3. Klasifikasi Strategi Perawatan dalam Penelitian *Digital Twin*



Gambar 4 Klasifikasi Strategi Perawatan dalam Penelitian *Digital Twin* (2017-2025)

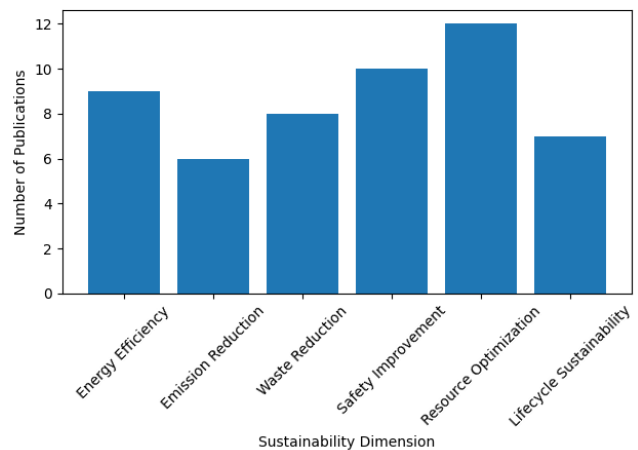
Berdasarkan Gambar 4, sebagian besar studi mengintegrasikan *Digital Twin* dengan sistem prediksi kegagalan berbasis data sensor, *Machine Learning*, atau *data fusion*, sementara pendekatan *prescriptive maintenance* masih relatif terbatas. Secara historis, strategi perawatan industri berkembang dari *corrective maintenance* menuju *preventive maintenance*, dan kemudian bertransformasi menjadi *condition-based maintenance* (CBM). *Digital Twin* secara alami terintegrasi dengan CBM karena kemampuannya untuk merepresentasikan kondisi aset secara *real-time* dan melakukan simulasi performa sistem berdasarkan data operasional aktual.

Untuk mengklasifikasikan lebih lanjut jenis-jenis perawatan yang diimplementasikan dalam studi *smart manufacturing* dan mengidentifikasi relevansinya terhadap petrokimia, dapat diidentifikasi empat kategori utama berdasarkan analisis terhadap 40 artikel: (a) *Predictive Maintenance* berbasis ML/sensor, kategori dominan pada sekitar 60% studi, mencakup prediksi *Remaining Useful Life* (RUL), deteksi anomali, dan *fault diagnosis* real-time; (b) *Condition-Based Monitoring* (CBM), mencakup pemantauan kontinu parameter operasional seperti vibrasi, temperatur, dan tekanan; (c) *Risk-Based Maintenance* (RBM), diterapkan pada studi yang mengintegrasikan analisis kekritisitas aset dan prioritas perawatan berdasarkan probabilitas dan dampak kegagalan; dan (d) *Prescriptive Maintenance*, masih dalam tahap awal dengan penggunaan *Deep Reinforcement Learning* dan optimasi skenario operasional. Pada industri petrokimia, kategori (a) dan (c) memiliki potensi implementasi tertinggi mengingat karakteristik risiko operasionalnya, korosi, ledakan, kebocoran, sementara kategori (d) merupakan arah pengembangan masa depan yang paling kritis dan mendesak.

Studi pada sektor petrokimia dan *chemical process industry* secara konsisten menekankan pentingnya *predictive maintenance* untuk meningkatkan keselamatan dan mengurangi risiko kegagalan sistem (Gao, Jia & Liu, 2022; Hu et al., 2020; Pal et al., 2023). Melalui integrasi sensor industri dan model virtual, *Digital Twin* mampu mendeteksi anomali proses, memprediksi degradasi peralatan, serta mengestimasi *Remaining Useful Life* (RUL) aset. Pada konteks khusus industri petrokimia, strategi perawatan berbasis *Digital Twin* perlu mempertimbangkan dimensi tambahan: (1) pemantauan laju korosi pada *pipeline* dan *vessel* bertekanan tinggi yang dapat menyebabkan kegagalan katastrofis, (2) monitoring integritas refraktori pada tungku dan reaktor bertemperatur tinggi, (3) prediksi *fouling* pada *heat exchanger* akibat akumulasi deposit kimia, dan (4) manajemen risiko pelepasan gas beracun secara kontinu. Aspek-aspek ini tidak relevan pada manufaktur umum, namun menjadi parameter kritis dalam desain sistem *Digital Twin* untuk petrokimia.

Secara teoritis, *Digital Twin* memiliki potensi besar untuk mendukung *Risk-Based Maintenance* (RBM) karena kemampuannya dalam mensimulasikan dampak kegagalan terhadap keseluruhan sistem proses. Namun, dari 40 studi yang dianalisis, hanya sebagian kecil yang secara eksplisit mengintegrasikan analisis risiko dan prioritas aset kritis ke dalam model *Digital Twin*. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengembangan *Digital Twin* untuk strategi perawatan berkelanjutan masih berada pada tahap transisi menuju integrasi penuh antara *predictive analytics* dan *risk-based optimization*, sebuah integrasi yang justru paling mendesak diimplementasikan pada industri petrokimia dengan tingkat risiko kegagalan tertinggi.

#### 3.4. Integrasi Dimensi Keberlanjutan (*Sustainability*) dalam Implementasi *Digital twin*



Gambar 5 Implementasi Dimensi Keberlanjutan pada Penelitian *Digital Twin* (2017-2025)

Analisis integrasi dimensi keberlanjutan dalam 40 artikel yang dikaji, dengan fokus khusus pada implikasinya terhadap industri proses petrokimia, menunjukkan pola yang secara konseptual mengindikasikan pergeseran paradigma dari sekadar optimasi teknis menuju optimasi sistem berkelanjutan. Berdasarkan Gambar 5, dimensi *sustainability* yang paling dominan adalah *resource optimization*, diikuti oleh *safety improvement* dan *energy efficiency*. Sementara itu, aspek *emission reduction* dan *lifecycle sustainability* masih relatif lebih rendah proporsinya. Pada konteks industri petrokimia, pola ini memiliki implikasi yang sangat signifikan, dan sekaligus sangat mengkhawatirkan, mengingat industri ini merupakan salah satu sektor emitter karbon terbesar secara global dengan risiko lingkungan yang besar akibat potensi kebocoran bahan kimia berbahaya.

Pertama, dominasi *resource optimization* dalam penelitian memang relevan untuk konteks petrokimia, namun dengan skala kompleksitas yang jauh berbeda dibandingkan manufaktur umum. Jika pada sektor manufaktur *resource optimization* diartikulasikan sebagai

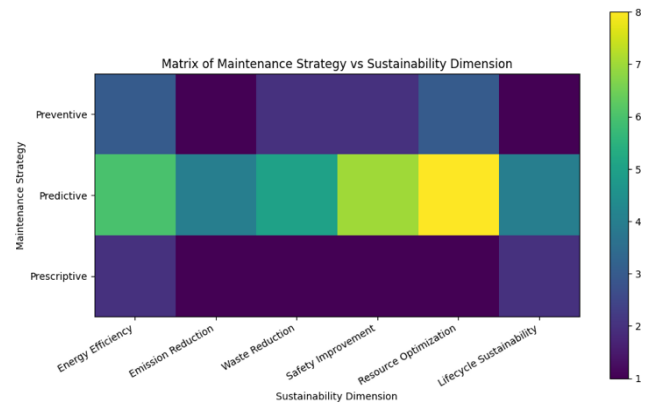
pengurangan pemborosan material dan optimasi aliran produksi (Soleymanizadeh et al., 2023; Kamble et al., 2022), maka pada industri petrokimia dimensi ini mencakup: optimasi penggunaan katalis pada reaktor (yang biaya penggantian sangat tinggi), efisiensi konversi bahan baku hidrokarbon untuk meminimalkan produk samping berbahaya, manajemen konsumsi energi pada unit distilasi bertekanan tinggi, serta minimalisasi pembuangan limbah kimia berbahaya yang diatur ketat oleh regulasi lingkungan. Kompleksitas ini menjadikan *Digital Twin* berbasis *resource optimization* untuk petrokimia memerlukan model yang jauh lebih rumit dibandingkan aplikasi manufaktur yang ada dalam dataset.

Kedua, dimensi *safety improvement* yang menempati posisi signifikan merupakan aspek yang paling langsung relevan dengan karakteristik unik industri petrokimia. Pada industri petrokimia dan *chemical process industry*, *Digital Twin* digunakan untuk *fault diagnosis* dan monitoring risiko proses secara *real-time* (Gao, Jia & Liu, 2022; Hu et al., 2020). Dari perspektif *Sustainable Asset Management*, peningkatan keselamatan operasional merupakan bagian integral dari keberlanjutan sosial karena mengurangi potensi kecelakaan kerja, ledakan, serta kebocoran bahan berbahaya yang dapat berdampak luas pada lingkungan dan masyarakat sekitar fasilitas petrokimia. Implementasi *Digital Twin* untuk *safety improvement* pada petrokimia secara spesifik mencakup: monitoring integritas struktur tangki penyimpanan LPG, deteksi dini kebocoran jalur pipa bertekanan, simulasi *hazard and operability* (HAZOP) secara dinamis berbasis kondisi aktual, dan prediksi kegagalan katastrofis pada kolom distilasi berisiko tinggi.

Ketiga, meskipun *energy efficiency* muncul sebagai dimensi penting dalam penelitian terbaru (Pal et al., 2023; Igbokwe et al., 2024), kontekstualisasinya pada industri petrokimia bersifat sangat spesifik. Unit operasi petrokimia seperti furnace, *heat exchanger network*, dan kolom distilasi merupakan konsumen energi terbesar dalam industri proses secara global. Implementasi *Digital Twin* untuk optimasi energi pada unit-unit ini berpotensi memberikan penghematan yang jauh lebih signifikan, baik secara ekonomis maupun emisi, dibandingkan aplikasi serupa pada manufaktur diskrit. Namun, hanya sebagian kecil penelitian dalam dataset yang secara eksplisit mengaitkan *Digital Twin* dengan target dekarbonisasi atau *carbon neutrality* secara kuantitatif dalam konteks petrokimia.

Keempat, dan paling kritis: dimensi *emission reduction* dan *lifecycle sustainability* masih sangat rendah proporsinya dalam literatur, sebuah temuan yang sangat signifikan untuk industri petrokimia. Industri ini bertanggung jawab atas sejumlah besar emisi Gas Rumah Kaca (GRK) global, baik dari proses pembakaran bahan bakar maupun dari *fugitive emissions* akibat kebocoran di sepanjang rantai proses. Minusnya penelitian *Digital Twin* yang secara eksplisit mengintegrasikan *lifecycle emission*

*tracking*, *carbon footprint monitoring* berbasis *real-time*, dan *circularity assessment* pada konteks petrokimia merupakan kesenjangan kritis yang harus segera diisi. Mengingat judul penelitian ini secara eksplisit menekankan "Strategi Perawatan Berkelanjutan (*Sustainable*)", temuan bahwa literatur masih sangat minim membahas aspek emisi dan siklus hidup pada petrokimia merupakan temuan yang paling penting dari seluruh analisis ini.



Gambar 6 Matriks Strategi Perawatan (*Maintenance Strategy*) dan Keberlanjutan (*Sustainability*)

Berdasarkan Gambar 6 (*Matrix of Maintenance Strategy vs Sustainability Dimension*), distribusi integrasi *Digital Twin* terhadap dimensi keberlanjutan tidak berkembang secara seimbang pada setiap strategi perawatan. Intensitas tertinggi berada pada *predictive maintenance* dengan dimensi *resource optimization* dan *safety improvement*. Sebaliknya, *prescriptive maintenance* menunjukkan intensitas yang jauh lebih rendah pada hampir seluruh dimensi *sustainability*. Temuan ini sejalan dengan prinsip *Lean Manufacturing* dan *Resource Efficiency Theory* (Pal et al., 2023; Soleymanizadeh et al., 2023).

Kontribusi *prescriptive maintenance* yang masih minimal menandakan bahwa penelitian umumnya berhenti pada tahap prediksi tanpa optimasi berbasis risiko dan keberlanjutan secara holistik. Padahal, *prescriptive Digital Twin* berpotensi mengoptimalkan risiko, biaya, dan dampak lingkungan secara simultan, kemampuan yang sangat dibutuhkan industri petrokimia. Dalam kerangka *Triple Bottom Line*, dimensi lingkungan (emisi, limbah, siklus hidup) masih jauh tertinggal dibandingkan dimensi ekonomi (efisiensi biaya dan produksi) pada penelitian-penelitian yang ada. Untuk industri petrokimia, yang memiliki kewajiban regulasi lingkungan yang ketat dan target dekarbonisasi yang semakin ambisius, ketidakseimbangan ini merupakan hambatan strategis yang harus diatasi melalui penelitian *Digital Twin* yang berorientasi pada *sustainability-oriented lifecycle management* secara komprehensif.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini memetakan perkembangan *Digital Twin* dalam mendukung strategi perawatan berkelanjutan pada industri proses petrokimia melalui tinjauan sistematis terhadap 40 publikasi ilmiah berbasis protokol PRISMA. Temuan utama mengkonfirmasi tiga proposisi fundamental: (1) terjadi peningkatan signifikan penelitian *Digital Twin* sejak tahun 2020, dengan pergeseran progresif dari eksplorasi konseptual menuju implementasi berbasis *predictive intelligence* dan keberlanjutan; (2) terdapat ketimpangan nyata antara volume riset yang didominasi sektor manufaktur (43%) dan tingkat urgensi kebutuhan industri petrokimia yang hanya terwakili 28% dalam dataset, sebuah *research gap* signifikan yang menjadi justifikasi utama penelitian ini; dan (3) integrasi dimensi keberlanjutan, khususnya *emission reduction* dan *lifecycle sustainability*, masih sangat terbatas pada konteks petrokimia, meski justru dimensi inilah yang paling kritis mengingat kewajiban dekarbonisasi sektor ini.

Industri petrokimia memiliki karakteristik operasional yang secara fundamental berbeda dari sektor manufaktur umum yang mendominasi literatur *Digital Twin* saat ini. Parameter unik seperti laju korosi pada *pipeline* dan *vessel* bertekanan tinggi, dinamika reaksi eksoterm yang kompleks, manajemen katalis dalam reaktor bertemperatur ekstrem, serta risiko kebocoran bahan kimia berbahaya, tidak dapat sepenuhnya dimodelkan menggunakan arsitektur *Digital Twin* yang dirancang untuk manufaktur diskrit. Meskipun literatur yang dianalisis didominasi oleh studi dari sektor manufaktur, studi-studi tersebut tetap memberikan nilai komparatif yang valid untuk mengidentifikasi praktik terbaik yang dapat diadaptasi, dengan modifikasi substansial, untuk konteks petrokimia yang jauh lebih kompleks. Justru keterbatasan literatur petrokimia-spesifik inilah yang memvalidasi relevansi pendekatan *comparative benchmarking* yang diterapkan dalam penelitian ini.

Mengingat judul penelitian ini secara eksplisit menekankan "Strategi Perawatan Berkelanjutan (*Sustainable*)", temuan bahwa dimensi *emission reduction* dan *lifecycle sustainability* masih sangat terbatas dalam literatur merupakan temuan kritis dan sangat penting. Industri petrokimia sebagai salah satu sektor emitter karbon terbesar secara global memiliki kewajiban strategis, baik secara regulasi maupun bisnis dalam konteks transisi energi, untuk mengintegrasikan *Digital Twin* sebagai instrumen manajemen dekarbonisasi yang komprehensif. Tantangan utama yang harus diatasi meliputi: (i) belum adanya standar arsitektur *Digital Twin* yang dirancang khusus untuk dinamika proses petrokimia; (ii) kurangnya dataset pelatihan yang mencakup parameter korosivitas dan kimia proses; dan (iii) kompleksitas validasi model virtual pada lingkungan berisiko tinggi yang tidak dapat dengan mudah dihentikan untuk pengujian.

Penelitian ke depan disarankan untuk: (1) mengembangkan arsitektur *Digital Twin* yang secara khusus dirancang untuk memodelkan parameter unik industri petrokimia, termasuk laju korosi elektrolitik dan galvanik pada material pipa dan reaktor, deaktivasi katalis pada kondisi suhu dan tekanan ekstrem, serta dinamika pembentukan dan dispersi gas beracun seperti  $H_2S$  dan  $NH_3$ ; (2) mengintegrasikan *framework predictive-prescriptive maintenance* berbasis *Risk-Based Maintenance* (RBM) dengan algoritma *Deep Reinforcement Learning* yang mampu mengoptimalkan keputusan perawatan mempertimbangkan risiko keselamatan, biaya operasional, dan dampak lingkungan secara simultan, parameter yang tidak relevan pada manufaktur tetapi bersifat kritis pada petrokimia; (3) mengembangkan indikator keberlanjutan yang spesifik untuk petrokimia, mencakup *lifecycle emission tracking* terintegrasi dengan *Digital Twin*, *carbon footprint monitoring* berbasis *real-time* pada level unit proses, dan penyelarasan dengan target Net Zero Emission 2060; (4) menstandarkan protokol integrasi *Digital Twin* dengan sistem keselamatan proses (*Safety Instrumented Systems/SIS*) dan sistem manajemen aset yang sudah ada di fasilitas petrokimia; dan (5) menginvestigasi penerapan *Digital Twin* berbasis *Generative AI* untuk simulasi skenario kegagalan yang jarang terjadi namun berdampak katastrofis, sebuah kapabilitas yang secara khusus dibutuhkan pada industri proses berisiko tinggi.

Secara keseluruhan, *Digital Twin* memiliki potensi transformatif yang sangat besar untuk merevolusi sistem perawatan industri proses petrokimia menjadi lebih efisien, aman, dan berkelanjutan. Namun, realisasi potensi ini membutuhkan komitmen riset yang lebih kuat dan terarah pada karakteristik unik sektor petrokimia, sebuah *research gap* yang nyata, kritis, dan mendesak untuk dipenuhi oleh komunitas ilmiah global demi mendukung transisi industri proses menuju masa depan yang lebih berkelanjutan.

#### 5. Referensi

- Al Ghazal, A. H., et al. (2022). Saudi Aramco's process digital twin: Advances and implementation strategy. *Proceedings of the SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. <https://doi.org/10.2118/211026-MS>
- Alexopoulos, K., Nikolakis, N., & Chrystoulouris, G. (2020). Digital twin-driven supervised machine learning for the development of artificial intelligence applications in manufacturing. *International Journal of Production Research*, 58(15), 1-17. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1747642>
- Attaran, M., Attaran, S., & Celik, B. (2023). The impact of digital twins on the evolution of intelligent manufacturing and Industry 4.0. *Discover Sustainability*, 4. <https://doi.org/10.1007/s43674-023-00058-y>

- Ditzel, L. F. S., et al. (2020). Digital twin in manufacture: A systematic review of literature. *Brazilian Journal of Development*, 6(9).  
<https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-158>
- Ezzat, A. A. (2025). Refinery-petrochemical operations developments. *Petroleum Engineering and Science Journal*.  
<https://doi.org/10.21608/pesj.2025.415581.1038>
- Gao, L., Jia, M., & Liu, D. (2022). Process digital twin and its application in petrochemical industry. *Journal of Software Engineering and Applications*, 15(8), 309–320. <https://doi.org/10.4236/jsea.2022.158018>
- Hu, S., Wang, S., Su, N., Li, X., & Zhang, Q. (2020). Digital twin-based reference architecture for petrochemical monitoring and fault diagnosis. *Oil & Gas Science and Technology*, 75.  
<https://doi.org/10.2516/OGST/2020095>
- Igbokwe, N., et al. (2024). The role of digital twins in optimizing renewable energy utilization and energy efficiency in manufacturing. *Sustainable Industrial Digital Business Journal*, 1(4).  
<https://doi.org/10.38035/sijdb.v1i4.262>
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., Parekh, H., Mani, V., & Belhadi, A. (2022). Digital twin for sustainable manufacturing supply chains: Current trends, future perspectives, and an implementation framework. *Technological Forecasting and Social Change*, 176.  
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121448>
- Khdoudi, A., Masrour, T., El Hassani, I., & El Mazgualdi, C. (2024). A deep-reinforcement-learning-based digital twin for manufacturing process optimization. *Systems*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/systems12020038>
- Kurniawan, et al. (2024). Peran digital twin dalam otomatisasi manufaktur berkelanjutan.
- Liu, H., Zhang, B., Wu, V., Yang, X., & Wang, L. (2025). Review of digital twin in the automotive industry on products, processes and systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Modeling*.  
<https://doi.org/10.53941/ijamm.2025.100006>
- Liu, Z., Meyendorf, N., & Mrad, N. (2018). The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin. *AIP Conference Proceedings*, 1955.  
<https://doi.org/10.1063/1.5031520>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Örs, E., Schmidt, R., Mighani, M., & Shalaby, M. (2020). A conceptual framework for AI-based operational digital twin in chemical process engineering. *Proceedings of IEEE ICE/ITMC*.  
<https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC49519.2020.9198575>
- Pal, P. K., Hens, A., Behera, N., & Lahiri, S. (2023). Digital twins: Transforming the chemical process industry: A review. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 101.  
<https://doi.org/10.1002/cjce.25611>
- Romadhona, H., & Zulfairah. (2024). Penerapan digital twin dalam simulasi dan optimasi proses logistik berkelanjutan. *Jurnal Global Ilmu Teknologi*, 1(4).  
<https://doi.org/10.38035/jgit.v1i4.197>
- Shinkevich, A. I., Kasimova, A., & Alekseeva, A. (2023). Using digital twins for greening the chemical industry. *Russian Engineering Research*, 43.  
<https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-4-87-94>
- Siswanto, S., & Dewi, M. U. (2023). Penerapan teknologi digital twin untuk pemodelan sistem industri otomatis dalam meningkatkan efisiensi produksi dan keamanan operasional. *Journal of New Trends in Sciences*, 1(4), 44–54.  
<https://doi.org/10.59031/jnts.v1i4.780>
- Soleymanzadeh, H., Qu, Q., Bamakan, S. M. H., & Zanjirchi, S. M. (2023). Digital twin empowering manufacturing paradigms: Lean, agile, just-in-time, flexible, resilience, sustainable. *Procedia Computer Science*, 219, 1480–1487.  
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.08.114>