

## **INTEGRASI ARTIFICIAL INTELLIGENCE DAN DIGITAL TWIN UNTUK PEMELIHARAAN INFRASTRUKTUR DI INDONESIA**

**Eci Aprilia**

[eciapriaprm@gmail.com](mailto:eciapriaprm@gmail.com)

### **ARTICLE INFO**

#### **Article History:**

Received: 2025

Revised: 2025

Accepted: 2025

#### **Keyword:**

Artificial Intelligence (AI),  
Digital Twin,  
Structural Health  
Monitoring (SHM),  
Predictive Maintenance,  
Infrastructure,

### **ABSTRACT**

Infrastructure plays a critical role in the economic and social development of countries, including Indonesia. Traditional, reactive maintenance methods often result in high operational costs, service disruptions, and safety risks. This study investigates the integration of Artificial Intelligence (AI) and Digital Twin (DT) technologies, supported by Structural Health Monitoring (SHM), as a predictive and adaptive approach for infrastructure maintenance. Through a systematic literature review of 15 international and 5 Indonesian studies published in the last decade, the research synthesizes global best practices and examines their relevance to Indonesia's infrastructure context. Findings indicate that DT enables real-time virtual representation of physical assets, AI enhances predictive accuracy through data-driven analysis, and SHM provides continuous structural condition monitoring. The integration of these technologies creates a synergistic framework that reduces downtime, optimizes operational costs, and extends asset lifespan. Despite promising international applications, Indonesia faces challenges such as limited sensor deployment, low data quality, high investment costs, and adaptation to tropical and disaster-prone conditions. This study highlights the theoretical and practical implications of AI-DT-SHM integration, offering an adaptive maintenance framework that addresses local constraints and bridges the gap between global trends and local implementation.

### **How to Cite:**

Aprilia, E. (2025). Integrasi Artificial Intelligence dan Digital Twin untuk Pemeliharaan Infrastruktur di Indonesia. *Interface: Journal of Technique*, 1(1), 21-33.

## PENDAHULUAN

Infrastruktur merupakan salah satu pilar penting pembangunan ekonomi dan sosial di berbagai negara, termasuk Indonesia. Banyak aset infrastruktur seperti jembatan, gedung, dan jalan telah mengalami penurunan kondisi akibat usia, beban operasional, dan faktor lingkungan, sehingga meningkatkan risiko kegagalan struktural. Pemeliharaan konvensional yang bersifat reaktif seringkali menimbulkan kerugian ekonomi, gangguan layanan publik, serta risiko keselamatan yang signifikan. Hal ini menunjukkan perlunya strategi pemeliharaan yang lebih proaktif, prediktif, dan berbasis data.

Tren global selama satu dekade terakhir menunjukkan bahwa penerapan *Artificial Intelligence* (AI) dan *Digital Twin* telah menjadi pendekatan yang efektif untuk pemeliharaan infrastruktur. Berbagai penelitian internasional menekankan penggunaan AI untuk menganalisis data sensor dari struktur, memprediksi kerusakan, dan mengoptimalkan jadwal pemeliharaan. *Digital Twin* memungkinkan representasi virtual dari aset fisik, sehingga prediksi kondisi masa depan dapat dilakukan dengan lebih akurat. Integrasi AI dan *Digital Twin* juga telah dibuktikan meningkatkan efisiensi pemeliharaan, mengurangi biaya operasional, dan memperpanjang umur layanan aset di berbagai proyek infrastruktur di Eropa, Amerika, dan Asia.

Di konteks Indonesia, penelitian terkait implementasi AI dan *Digital Twin* masih sangat terbatas. Beberapa studi awal menyoroti konsep dan potensi teknologi ini untuk mitigasi bencana, pemeliharaan prediktif pada jembatan tua, dan integrasi robotik pada proyek konstruksi. Namun, implementasi praktis di lapangan menghadapi kendala seperti keterbatasan data sensor, biaya investasi tinggi, serta sumber daya manusia yang masih minim. Perbedaan signifikan antara tren internasional dan kondisi lokal ini menunjukkan adanya gap penelitian yang perlu dijawab.

Pernyataan kebaruan dari artikel ini adalah menggabungkan pemahaman global terkait AI dan *Digital Twin* dengan kondisi infrastruktur dan tantangan di Indonesia. Penelitian ini bertujuan tidak hanya menyatukan temuan internasional, tetapi juga menyesuaikannya dengan konteks lokal untuk mengidentifikasi strategi pemeliharaan prediktif yang adaptif. Dengan demikian, kontribusi ilmiah dari penelitian ini terletak pada penyediaan kerangka pemeliharaan infrastruktur berbasis AI dan *Digital Twin* yang mempertimbangkan karakteristik lokal Indonesia, sekaligus menegaskan posisi penelitian ini di antara studi internasional dan lokal yang telah ada.

## METODE

Penelitian ini menggunakan metode literatur review sistematis untuk menganalisis penerapan *Artificial Intelligence* dan *Digital Twin* dalam pemeliharaan infrastruktur. Tujuan

penelitian adalah menyatukan temuan penelitian internasional, membandingkannya dengan konteks Indonesia, serta mengidentifikasi gap penelitian yang masih ada. Rumusan masalah difokuskan pada bagaimana teknologi AI dan *Digital Twin* meningkatkan pemeliharaan prediktif, tren implementasi global, dan relevansinya dengan kondisi infrastruktur di Indonesia.

Ruang lingkup penelitian mencakup 15 jurnal internasional dan 5 jurnal Indonesia yang diterbitkan dalam 10 tahun terakhir, dipilih berdasarkan relevansi terhadap topik pemeliharaan prediktif, *Digital Twin*, dan AI dalam infrastruktur. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui pencarian literatur di basis data ilmiah seperti *ScienceDirect*, *ResearchGate*, dan *Google Scholar*, dengan kriteria inklusi berupa publikasi *peer-reviewed* yang relevan dengan topik.

Analisis data dilakukan secara deskriptif kualitatif dengan pendekatan komparatif, yaitu membandingkan temuan dari jurnal internasional dengan penelitian lokal untuk menilai kesenjangan, tren, dan potensi adaptasi teknologi di Indonesia. Validitas analisis diperkuat dengan triangulasi antar-jurnal dan *cross-check* antar-penulis penelitian untuk memastikan interpretasi yang konsisten dan dapat dipertanggungjawabkan.

Dengan metode ini, penelitian tidak hanya menyajikan ringkasan literatur, tetapi juga menegaskan posisi penelitian di antara studi internasional dan lokal, sehingga memberikan kontribusi ilmiah berupa kerangka pemeliharaan berbasis AI dan *Digital Twin* yang adaptif terhadap kondisi infrastruktur di Indonesia.

## KAJIAN PUSTAKA

Pemeliharaan infrastruktur modern membutuhkan pendekatan yang proaktif dan berbasis data untuk mengurangi risiko kegagalan struktural, menekan biaya operasional, dan meningkatkan umur layanan aset. Seiring berkembangnya teknologi, *Artificial Intelligence* (AI) dan *Digital Twin* muncul sebagai solusi inovatif dalam pemeliharaan prediktif, khususnya pada jembatan, gedung tinggi, dan jalan. Kajian pustaka ini menyajikan konsep utama, temuan penelitian internasional, penelitian lokal Indonesia, dan analisis gap untuk menegaskan kebaruan penelitian.

### 1. *Digital Twin* dalam Infrastruktur

*Digital Twin* (DT) merupakan representasi virtual dinamis dari aset fisik, sistem, atau proses yang selalu diperbarui melalui sinkronisasi data *real-time* dan analisis komputasional. Teknologi ini memungkinkan integrasi model multi-domain, data sensor, dan algoritma *machine learning* untuk meniru, memprediksi, dan mengoptimalkan performa aset fisik. Dengan kata lain, *Digital Twin*

menciptakan jembatan antara dunia fisik dan digital, sehingga keputusan operasional dapat didasarkan pada kondisi nyata aset (Chen et al., 2025). Teknologi ini terdiri dari tiga komponen utama: aset fisik dengan sensor untuk mengumpulkan data kondisi dan performa, model virtual yang mencakup geometri, perilaku, dan aturan, serta sistem transmisi data dua arah yang memungkinkan model virtual memengaruhi keputusan atau kontrol pada aset nyata (Zhong et al., 2023).

*Digital Twin* beroperasi sepanjang siklus hidup aset, mulai dari perancangan, konstruksi, operasi, pemeliharaan, hingga pembongkaran. Data yang dikumpulkan dari sensor diolah menggunakan teknologi big data dan AI untuk membangun representasi *real-time*, mendeteksi anomali, serta menyusun strategi pemeliharaan prediktif. Platform *Digital Twin* menyediakan integrasi manajemen data, simulasi, dan visualisasi, sehingga pengambilan keputusan lebih cepat dan akurat (Sulistyo & Beatrix, 2024). *Digital Twin* dapat diklasifikasikan berdasarkan cakupan dan skala, mulai dari tingkat peralatan atau komponen hingga sistem atau pabrik, sehingga fleksibel diterapkan dari pemantauan *real-time* hingga simulasi “what-if” untuk pengambilan keputusan strategis (Chen et al., 2025).

Teknologi ini memungkinkan pemantauan kondisi aset secara real-time, mendukung pemeliharaan proaktif, optimasi operasional, dan pengambilan keputusan berbasis data, sementara integrasi dengan sensor IoT membantu efisiensi energi, pengelolaan risiko bencana, dan perencanaan strategis (Patandianan & Assidiq, 2022). Beberapa penerapannya termasuk Marina Bay Sands di Singapura untuk optimasi pencahayaan, efisiensi HVAC, dan prediksi pemeliharaan, The Edge di Amsterdam untuk manajemen energi dan prediksi perawatan fasilitas, serta DigiTwin London untuk analisis konsumsi energi, optimasi transportasi publik, dan perencanaan kota pintar (Watiet al., 2024).

## **2. Artificial Intelligence dalam Pemeliharaan Infrastruktur**

*Artificial Intelligence* (AI) telah menjadi teknologi kunci dalam industri dan pemeliharaan infrastruktur karena kemampuannya meniru fungsi kognitif melalui model berbasis data, sehingga memungkinkan operasi yang lebih otonom dan adaptif. Sistem AI mampu memproses input baru, mengekstrak pengetahuan dari data pelatihan, dan meningkatkan kinerjanya secara kontinu melalui pembelajaran iteratif.

Berbagai pendekatan AI, termasuk *supervised learning* untuk regresi dan klasifikasi, *unsupervised learning* untuk menemukan pola dalam data tak berlabel, dan *reinforcement learning* untuk mengoptimalkan tindakan berdasarkan umpan balik lingkungan, telah terbukti efektif. Selain itu, *deep learning* dengan *neural network* mampu menangani data kompleks, seperti citra dan pengukuran sensor temporal,

sehingga sangat berguna dalam pemeliharaan prediktif dan implementasi *Digital Twin*. Implementasi AI modern didukung oleh teknologi seperti *cloud computing* untuk pelatihan model berskala besar, *distributed systems* untuk pemrosesan paralel, dan *edge computing* untuk inferensi *real-time*. Sinergi antara teknologi ini dan algoritma AI memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat, prediktif, dan efisien dalam pemeliharaan aset infrastruktur (Chen et al., 2025).

Dalam konteks *Structural Health Monitoring* (SHM), AI menawarkan kemampuan inovatif untuk pemrosesan data, deteksi kerusakan, dan prediksi kegagalan struktur, sehingga sistem SHM menjadi lebih efisien, presisi, dan dapat beroperasi dengan intervensi manusia minimal. *Algoritma machine learning, deep learning, dan artificial neural networks* terbukti mampu mengekstraksi informasi penting dari data SHM dan mendukung pengembangan sistem pemantauan pintar dan otonom. Dengan demikian, AI menyediakan fondasi ilmiah dan praktis bagi pemeliharaan prediktif infrastruktur modern, terutama bila dikombinasikan dengan *Digital Twin* dan sensor SHM, sehingga memungkinkan prediksi kerusakan yang akurat, pengambilan keputusan berbasis data, serta optimasi biaya dan waktu operasional (Plevris & Papazafeiropoulos, 2024).

### **3. *Structural Health Monitoring* (SHM)**

*Structural Health Monitoring* (SHM) berbasis jaringan sensor terdistribusi yang permanen pada permukaan atau tertanam di dalam struktur komposit merupakan teknologi inovatif untuk menilai integritas struktural material komposit. Dengan jaringan sensor ini, SHM mampu memantau kondisi struktur dan lingkungan operasional secara *real-time*, memprediksi kerusakan yang mungkin terjadi, dan memungkinkan tindakan tepat waktu untuk memastikan keamanan penggunaan struktur. SHM menyediakan dasar teknis penting bagi strategi pemeliharaan berbasis kondisi, meningkatkan keselamatan, serta mengurangi biaya operasi dan pemeliharaan.

Umumnya, SHM dapat dibagi menjadi empat level: mendeteksi adanya kerusakan, mengidentifikasi lokasi kerusakan, menilai tingkat keparahan kerusakan, dan memprediksi sisa umur pakai struktur. Dalam dua dekade terakhir, banyak penelitian telah mengembangkan metode pemantauan kerusakan berbasis model fisik, namun sebagian besar hanya mampu memberikan monitoring kualitatif di laboratorium dan memiliki keterbatasan dalam kondisi kerusakan kompleks atau lingkungan operasional nyata.

Dengan munculnya era big data, algoritma *machine learning* telah diterapkan dalam SHM untuk mengekstraksi pola dari data besar tanpa memerlukan model fisik spesifik, sehingga mampu melakukan identifikasi dan prediksi kerusakan

secara cerdas. Pendekatan modern mengombinasikan jaringan sensor multifungsi dengan simulasi numerik dan teknik seperti *generative adversarial network* (GAN), memungkinkan pengambilan informasi multi-sumber yang heterogen, pemetaan hubungan antara sinyal sensor dan parameter kondisi struktural, serta pembangunan jaringan diagnosis mendalam untuk karakterisasi fitur adaptif dan identifikasi kuantitatif kerusakan.

#### 4. Integrasi AI + *Digital Twin* + SHM

Integrasi *Artificial Intelligence* (AI), *Digital Twin* (DT), dan *Structural Health Monitoring* (SHM) menciptakan pendekatan holistik dalam pemeliharaan infrastruktur modern. *Digital Twin* menyediakan representasi virtual *real-time* dari aset fisik, memungkinkan visualisasi kondisi struktur dan simulasi skenario operasional. SHM, melalui jaringan sensor terdistribusi, secara kontinu memantau kondisi fisik struktur, mendeteksi kerusakan, dan menyediakan data aktual yang menjadi input penting bagi model *Digital Twin*. Sementara itu, AI memproses data besar yang dikumpulkan oleh sensor SHM dan dianalisis dalam *Digital Twin*, mengekstraksi pola, memprediksi potensi kerusakan, dan mengoptimalkan strategi pemeliharaan prediktif.

Dengan kombinasi ini, setiap perubahan pada kondisi fisik terpantau secara langsung, dianalisis secara cerdas, dan divisualisasikan dalam model virtual yang memungkinkan pengambilan keputusan proaktif. Hubungan sinergis antara ketiganya memungkinkan pemeliharaan yang lebih efisien, prediktif, dan adaptif, mengurangi biaya operasional, meningkatkan keselamatan, serta memperpanjang umur pakai aset infrastruktur. Integrasi ini juga membuka peluang pengembangan sistem infrastruktur cerdas yang adaptif terhadap perubahan lingkungan dan kondisi operasional, sehingga menempatkan AI, *Digital Twin*, dan SHM sebagai fondasi utama bagi pengelolaan aset modern.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 1. Sintesis Temuan *Digital Twin* (DT)

*Digital Twin* (DT) adalah representasi virtual aset fisik yang mampu merefleksikan kondisi nyata secara *real-time* melalui sinkronisasi data sensor dan model digital. Literatur internasional (Chen et al., 2025; Zhong et al., 2023; Ogunleye et al., 2025; Sobowale et al., 2023) menunjukkan bahwa DT memungkinkan prediksi kerusakan, optimasi perawatan, simulasi skenario “*what-if*”, dan pemantauan siklus hidup aset. Model DT biasanya mencakup informasi geometri, perilaku, dan kondisi aset serta terhubung dengan platform analitik berbasis AI. Implementasi DT dalam pemeliharaan prediktif telah terbukti

mengurangi downtime, meningkatkan efisiensi operasi hingga 25–35%, dan memfasilitasi pengambilan keputusan adaptif.

Di Indonesia, penelitian terkait DT masih terbatas pada skala proyek tertentu. Beberapa studi (Sulistyo & Beatrix, 2024; Sanitha et al., 2025) menyoroti penerapan DT untuk manajemen energi gedung dan proyek konstruksi di perkotaan. Kendala utama adalah keterbatasan data sensor, biaya investasi tinggi, serta kurangnya infrastruktur untuk integrasi *real-time*.

## 2. Sintesis Temuan *Artificial Intelligence* (AI)

AI, terutama *machine learning* (ML) dan *deep learning* (DL), telah digunakan untuk memproses data besar dari sensor SHM dan *Digital Twin*. Hasil literatur internasional (Spencer et al., 2025; Bao et al., 2025; Cha et al., 2024; Plevris & Papazafeiropoulos, 2024) menunjukkan AI mampu:

- a. Mendeteksi kerusakan tersembunyi dan pola degradasi struktur;
- b. Memprediksi kegagalan struktural dengan presisi tinggi;
- c. Memberikan rekomendasi pemeliharaan berbasis data *real-time*.

AI memproses data sensor dari SHM dan DT untuk meningkatkan akurasi pemeliharaan prediktif. *Edge computing* dan *cloud computing* mendukung pengolahan data skala besar secara efisien, sedangkan algoritma adaptif memperkuat ketahanan sistem terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Di Indonesia, penerapan AI dalam infrastruktur masih pada tahap awal (Diana et al., 2025; Wati et al., 2024). AI digunakan dalam proyek pilot untuk analisis prediktif, namun keterbatasan kualitas data dan jumlah sensor membatasi efektivitas algoritma.

## 3. Sintesis Temuan *Structural Health Monitoring* (SHM)

SHM berbasis sensor terdistribusi memberikan informasi *real-time* tentang kondisi struktur, termasuk lokasi, tingkat keparahan, dan prediksi sisa umur aset. Literatur internasional (Qing et al., 2022; Alnaser et al., 2024; Kerkeni et al., 2025) menegaskan SHM sebagai fondasi untuk *condition-based maintenance*, yang memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data nyata, pengurangan biaya perawatan, dan peningkatan keselamatan.

Di Indonesia, implementasi SHM masih terbatas pada beberapa gedung cerdas dan proyek konstruksi, dengan sensor dan jaringan data yang relatif sedikit (Patandianan & Assidiq, 2022). Hal ini membatasi kemampuan sistem dalam melakukan pemeliharaan prediktif secara efektif.

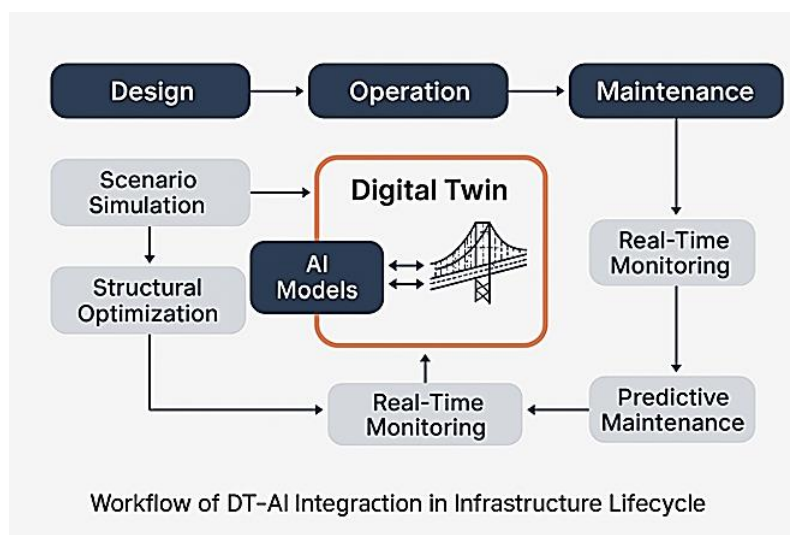
#### 4. Integrasi AI + *Digital Twin* + SHM

Integrasi ketiga teknologi ini memberikan sinergi yang signifikan:

- DT menyediakan model virtual dan simulasi skenario;
- SHM menyuplai data *real-time* tentang kondisi struktur;
- AI memproses data dan memprediksi kerusakan, memberikan rekomendasi perawatan.

Literatur internasional (Mrzyka et al., 2023; Nagrani & Narwane, 2025; Alnaser et al., 2024) menegaskan bahwa integrasi ini meningkatkan efektivitas pemeliharaan prediktif, mempersingkat downtime, dan memungkinkan strategi adaptif berbasis kondisi aset nyata. Studi di Indonesia (Diana et al., 2025; Wati et al., 2024) menunjukkan potensi besar, namun masih menghadapi tantangan: keterbatasan sensor, kualitas data, dan adaptasi algoritma AI terhadap kondisi tropis dan rawan bencana.

Gambar 1 menunjukkan alur kerja integrasi *Digital Twin* (DT) dan *Artificial Intelligence* (AI) dalam siklus hidup infrastruktur. Dimulai dari pengumpulan data sensor di lapangan, data tersebut diolah oleh model digital untuk mencerminkan kondisi nyata aset secara *real-time*. Selanjutnya, AI digunakan untuk menganalisis pola kerusakan atau degradasi, sehingga sistem dapat menghasilkan prediksi pemeliharaan yang lebih akurat. Pendekatan ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan berbasis bukti, mengurangi risiko kegagalan infrastruktur, dan mengoptimalkan biaya operasional.



**Gambar 1.** Alur kerja integrasi *Digital Twin* dan AI dalam siklus hidup infrastruktur untuk pemeliharaan prediktif

**Tabel 1.** Perbandingan Internasional vs Indonesia

| Aspek                   | Internasional                | Indonesia                      | Gap / Tantangan                                   |
|-------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|
| Skala implementasi      | Luas, berbagai infrastruktur | Terbatas, pilot <i>project</i> | Perlu ekspansi ke skala nasional                  |
| Data sensor             | Berlimpah, <i>real-time</i>  | Terbatas, kualitas rendah      | Perlu peningkatan jumlah & kualitas sensor        |
| Data sensor             | Berlimpah, <i>real-time</i>  | Terbatas, kualitas rendah      | Perlu peningkatan jumlah & kualitas sensor        |
| Integrasi AI & DT & SHM | Sudah matang, banyak kasus   | Awal, terbatas                 | Adaptasi algoritma & platform untuk kondisi lokal |
| Efisiensi & Prediksi    | 25–35% peningkatan efisiensi | Masih eksperimental            | Validasi di proyek Indonesia                      |
| Risiko & kondisi lokal  | Umum untuk kondisi normal    | Tropis, rawan bencana          | Penyesuaian model prediksi & mitigasi risiko      |

Analisis menunjukkan tren global lebih maju, sedangkan Indonesia memiliki potensi besar tetapi memerlukan adaptasi teknologi, data, dan strategi implementasi lokal.

## 5. Implikasi Teoritis dan Praktis

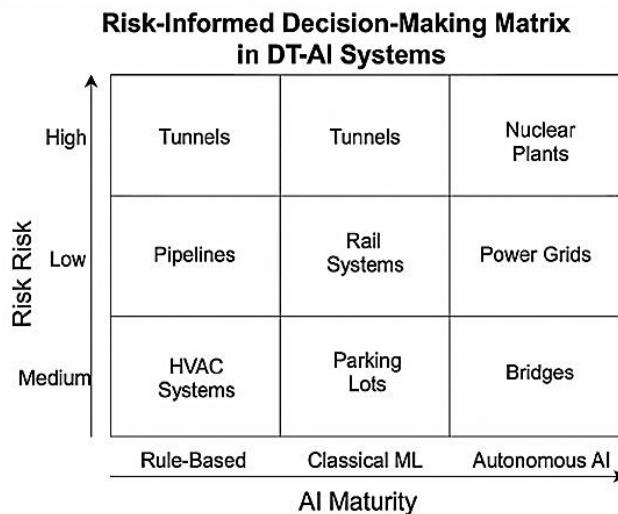
Teoritis: Integrasi AI + DT + SHM memberikan kerangka ilmiah untuk pemeliharaan berbasis data, prediktif, dan adaptif. Model ini menjelaskan hubungan antara data sensor, prediksi kerusakan, dan pengambilan keputusan optimal.

Praktis sistem ini memungkinkan:

- Perawatan preventif dan prediktif lebih efisien;
- Pengurangan biaya operasional dan *downtime*;
- Peningkatan keselamatan dan umur aset;
- Strategi adaptif sesuai kondisi lokal Indonesia: tropis, rawan bencana, dan keterbatasan data.

Gambar 2 menggambarkan alur kerja integrasi Digital Twin (DT) dan Artificial Intelligence (AI) dalam siklus hidup infrastruktur. Dimulai dari pengumpulan data sensor di lapangan, data tersebut diolah oleh model digital untuk mencerminkan kondisi nyata aset secara *real-time*. Selanjutnya, AI digunakan untuk menganalisis pola kerusakan atau degradasi, sehingga sistem dapat menghasilkan prediksi pemeliharaan yang lebih akurat. Pendekatan ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan berbasis bukti,

mengurangi risiko kegagalan infrastruktur, dan mengoptimalkan biaya operasional.



**Gambar 2.** Matriks pengambilan keputusan berbasis risiko pada sistem DT-AI untuk strategi pemeliharaan adaptif

Dengan demikian, literatur menegaskan bahwa integrasi AI, *Digital Twin*, dan SHM adalah pendekatan unggul untuk pemeliharaan infrastruktur masa depan, dengan peluang pengembangan signifikan di Indonesia.

## KESIMPULAN

Berdasarkan kajian literatur dan sintesis temuan penelitian internasional maupun lokal, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama terkait integrasi *Artificial Intelligence* (AI) dan *Digital Twin* (DT) untuk pemeliharaan infrastruktur di Indonesia:

1. *Digital Twin* sebagai fondasi pemeliharaan prediktif  
*Digital Twin* memungkinkan representasi virtual *real-time* dari aset fisik, sehingga memfasilitasi pemantauan kondisi, simulasi skenario “*what-if*”, dan optimasi strategi pemeliharaan. Implementasinya di Indonesia masih terbatas, terutama pada proyek pilot tertentu, akibat keterbatasan data sensor dan infrastruktur integrasi *real-time*.
2. *Artificial Intelligence* meningkatkan akurasi prediksi  
AI, terutama melalui *machine learning* dan *deep learning*, berperan dalam memproses data sensor SHM dan DT untuk mendeteksi kerusakan tersembunyi, memprediksi kegagalan struktural, dan memberikan

rekomendasi pemeliharaan berbasis data real-time. Di Indonesia, penerapannya masih awal dan terbatas oleh kualitas data dan jumlah sensor.

3. *Structural Health Monitoring* sebagai sumber data utama  
SHM berbasis sensor terdistribusi menyediakan informasi kondisi aset secara kontinu dan real-time. Integrasi SHM dengan DT dan AI memungkinkan pengambilan keputusan berbasis kondisi nyata, sehingga pemeliharaan lebih proaktif dan adaptif. Kendala utama di Indonesia meliputi keterbatasan sensor, jaringan data, dan adaptasi terhadap kondisi tropis serta rawan bencana.
4. Integrasi AI + *Digital Twin* + SHM menciptakan sinergi  
Kombinasi ketiga teknologi ini memberikan pendekatan holistik untuk pemeliharaan prediktif yang efisien, adaptif, dan berbasis risiko. Integrasi ini memungkinkan pengurangan downtime, optimasi biaya operasional, peningkatan keselamatan, serta perpanjangan umur aset.
5. Kesenjangan antara praktik internasional dan kondisi lokal  
Tren global menunjukkan penerapan yang luas dan matang, dengan peningkatan efisiensi 25–35%. Sementara itu, di Indonesia masih berskala pilot dan eksperimental, sehingga diperlukan adaptasi algoritma, peningkatan jumlah dan kualitas sensor, serta penyesuaian strategi terhadap kondisi lokal.
6. Implikasi teoritis dan praktis  
Secara teoritis, integrasi AI, DT, dan SHM membangun kerangka ilmiah untuk pemeliharaan prediktif berbasis data. Secara praktis, sistem ini memungkinkan strategi adaptif untuk kondisi tropis, rawan bencana, dan keterbatasan data, serta mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat, tepat, dan efisien.

Dengan demikian, jurnal ini menegaskan bahwa integrasi AI dan *Digital Twin*, didukung oleh SHM, merupakan pendekatan unggul untuk mengembangkan pemeliharaan infrastruktur di Indonesia, sekaligus menjembatani gap antara praktik internasional dan kondisi lokal.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alnaser, A. A., Maxi, M., & Elmousalami, H. (2024). AI-powered digital twins and Internet of Things for smart cities and sustainable building environment. *Applied Sciences*, 14, 12056.

- Bao, Y., Sun, H., Xu, Y., Guan, X., Pan, Q., & Liu, D. (2025). Recent advances in structural health diagnosis: A machine learning perspective. *Bridge Engineering*.
- Cha, Y.-J., Ali, R., Lewis, J., & Büyüköztürk, O. (2024). Deep learning-based structural health monitoring. *Automation in Construction*, 161, 105328.
- Chaparro-Cárdenas, S. L., Ramirez-Bautista, J.-A., Córdova-Esparza, D.-M., Terven, J., Romero-Gonzalez, J.-A., Ramírez-Pedraza, A., & Chavez-Urbiola, E. A. (2025). A technological review of digital twins and artificial intelligence for personalized and predictive healthcare. *Healthcare*, 13, 1763.
- Chen, S., Turanoglu Bekar, E., Bokrantz, J., & Skoogh, A. (2025). AI-enhanced digital twins in maintenance: Systematic review, industrial challenges, and bridging research–practice gaps. *Journal of Manufacturing Systems*, 82, 678–699.
- Diana, D., Putri, & Mukti, A. A. (2025). AI-driven digital twin for predictive maintenance in urban infrastructure: Enhancing structural resilience and sustainability. *Civil Engineering Science and Technology (CEST)*, 1(1).
- Kerkeni, R., Mhalla, A., & Bouzrara, K. (2025). Unsupervised learning and digital twin applied to predictive maintenance for Industry 4.0. *Journal of Electrical and Computer Engineering*
- Mrzyka, P., Kubacki, J., Luttmer, J., Pluhna, R., & Nagarajah, A. (2023). Digital twins for predictive maintenance: A case study for a flexible IT architecture. *Procedia CIRP*, 119, 152–157.
- Nagrani, S., & Narwane, V. S. (2025). Systematic literature review on digital twins in predictive maintenance. *Industrial Engineering Journal*, 18(2),
- Ogunleye, E., Anyaene, K., Oladetan, J. O., Lawal, A. B., Okeke, F. C., Ogunbule, O. O., & Eromosele, E. I. (2025). Digital twins and AI in infrastructure engineering: A global review of risk-informed design, operations, and maintenance. *Scientific Journal of Engineering and Technology (SJET)*, 2(2), 63–70.
- Patandianan, M. A., & Assidiq, F. M. (2022). Penerapan digital twin untuk mengurangi dampak bencana. *SENSISTEK*, 5(2)

- Plevris, V., & Papazafeiropoulos, G. (2024). AI in structural health monitoring for infrastructure maintenance and safety. *Infrastructures*, 9, 225.
- Qing, X., Liao, Y., Wang, Y., Chen, B., Zhang, F., & Wang, Y. (2022). Machine learning based quantitative damage monitoring of composite structure. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 13(2), 167–202.
- Qiu, S., Zaheer, Q., Ali, F., Wajid, S., Chen, H., Ai, C., & Wang, J. (2025). Exploring the impact of digital twin technology in infrastructure management: A comprehensive review. *Unpublished manuscript*, Vilnius Gediminas Technical University.
- Sanitha, O. D., Amiany, & Rahayu, E. S. (2025). Digital twin sebagai konsep integrasi model digital untuk pengelolaan dan efisiensi energi pada bangunan. *ALIBI – Jurnal Arsitektur dan Lingkungan Binaan*, 2(1).
- Sobowale, M., Elghaish, F., & Brooks, T. (2023). *A systematic review of digital twin as a predictive maintenance approach for existing buildings in the UK* [Unpublished manuscript]. Queen's University Belfast.
- Spencer, B. F., Jr., Sim, S.-H., Kim, R. E., & Yoon, H. (2025). Advances in artificial intelligence for structural health monitoring: A comprehensive review. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 29, 100203.
- Sulistyo, W. A., & Beatrix, M. (2024). Analisis faktor pengaruh implementasi digital twins pada proyek konstruksi di Kota Surabaya. *Senadika*.
- Wati, D. L., Ranna, P., & Jin, O. F. (2024). Perkembangan integrasi digital twin dan robotik di industri konstruksi. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 7(2), 611–620.
- Zhong, D., Xia, Z., Zhu, Y., & Duan, J. (2023). Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. *Heliyon*, 9, e14534.