

Tinjauan Teknologi Digital Twin Untuk Sistem Pemeliharaan Prediktif Kendaraan: Aplikasi pada Kendaraan Darat Militer-TNI AD

Stiven Alfonso Siregar¹ I Nengah Putra Aprianto² Sasono Rahardjo³

Program Studi Teknologi Daya Gerak, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan RI, Program Studi Teknologi Daya Gerak, Universitas Pertahanan RI, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)^{1,2,3}

Email: stiven.siregar@tp.idu.ac.id¹ nengah9627@gmail.com² sasono.rahardjo@brin.go.id³

Abstrak

Pemeliharaan prediktif merupakan pendekatan strategis yang semakin penting dalam menjaga kesiapan dan keandalan kendaraan militer darat, khususnya yang mengandalkan teknologi daya gerak seperti motor listrik, gearbox, dan aktuator. Dengan berkembangnya teknologi digital twin yaitu representasi digital real-time dari aset fisik pemeliharaan prediktif menjadi lebih akurat dan efektif melalui monitoring kondisi komponen, simulasi, dan analisis data berbasis kecerdasan buatan dan Internet of Things (IoT). Artikel ini menyajikan tinjauan literatur sistematis mengenai pemanfaatan digital twin dalam predictive maintenance, dengan fokus aplikasi pada kendaraan militer darat yang beroperasi di lingkungan keras dan menuntut tingkat kesiapan optimal. Berdasarkan analisis 20 jurnal dari tahun 2020 hingga 2025, artikel ini menguraikan definisi, arsitektur, dan framework digital twin yang diterapkan untuk pemantauan real-time serta prediksi kerusakan komponen daya gerak. Penelusuran juga menyoroti peran machine learning dan AI dalam meningkatkan sensitivitas deteksi dini serta integrasi IoT untuk pengumpulan data kondisi secara kontinu. Implementasi digital twin terbukti meningkatkan akurasi perawatan, mengurangi downtime, serta memperpanjang umur aset kendaraan. Studi ini menegaskan bahwa teknologi digital twin sangat potensial untuk mendukung manajemen pemeliharaan armada kendaraan militer darat TNI AD. Rekomendasi diberikan untuk pengembangan sistem yang adaptif sesuai karakteristik operasi dan lingkungan Indonesia, serta kebutuhan pelatihan bagi personel teknis agar efektif dalam mengelola teknologi ini.

Kata Kunci: Digital Twin, Predictive Maintenance, Kendaraan Darat Militer, Teknologi Daya Gerak, Internet of Things (IoT)

Abstract

Predictive maintenance is an increasingly strategic approach to maintaining the readiness and reliability of military ground vehicles, especially those reliant on motion technology components such as electric motors, gearboxes, and actuators. With the advancement of digital twin technology real-time digital representations of physical assets predictive maintenance has become more accurate and effective through condition monitoring, simulation, and data analysis based on artificial intelligence and the Internet of Things (IoT). This article presents a systematic literature review on the utilization of digital twin in predictive maintenance, focusing on applications in military ground vehicles operating in harsh environments requiring optimal readiness levels. Based on an analysis of 20 journals published between 2020 and 2025, the article elaborates on the definition, architecture, and frameworks of digital twin applied for real-time monitoring and fault prediction of motion technology components. The review highlights the role of machine learning and AI in enhancing early fault detection sensitivity alongside IoT integration for continuous condition data acquisition. The implementation of digital twin has proven to improve maintenance accuracy, reduce downtime, and prolong asset lifespan. This study confirms that digital twin technology holds significant potential in supporting the maintenance management of the TNI AD's military ground vehicle fleet. Recommendations are provided for developing adaptive systems suited to Indonesia's operational characteristics and environmental conditions, as well as the necessary technical training for personnel to effectively manage this technology.

Keywords: Digital Twin, Predictive Maintenance, Military Ground Vehicles, Motion Power Technology, Internet of Things (IoT)



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi kendaraan militer darat saat ini menuntut peningkatan efektivitas dalam pengelolaan pemeliharaan guna menjaga kesiapan operasional dan menghadapi tantangan medan yang semakin kompleks. Sistem pemeliharaan tradisional yang bersifat reaktif atau berbasis jadwal sering kali menyebabkan downtime yang tidak terduga dan biaya operasional yang tidak efisien. Oleh karena itu, pendekatan pemeliharaan prediktif (predictive maintenance) semakin banyak diadopsi dengan memanfaatkan kemajuan teknologi digital. Digital twin, sebagai representasi virtual dari aset fisik yang memungkinkan simulasi, monitoring, dan analisa kondisi secara real-time, menjadi salah satu teknologi kunci dalam implementasi pemeliharaan prediktif. Teknologi ini memungkinkan identifikasi dini terhadap potensi kerusakan atau gangguan pada sistem kendaraan sebelum kegagalan nyata terjadi, sehingga perawatan dapat dilakukan secara tepat waktu dan ekstra efisien. Dalam konteks kendaraan militer darat, khususnya yang mengandalkan teknologi daya gerak seperti mesin, aktuator, dan sistem transmisi, digital twin menyediakan mekanisme adaptif yang mampu memodelkan dinamika operasi serta kondisi lingkungan yang variatif. Hal ini sangat penting untuk memastikan keandalan kendaraan dalam operasi militer yang menuntut kesiapan maksimal dan risiko minimal. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji dan merangkum perkembangan terkini teknologi digital twin dalam sistem pemeliharaan prediktif bagi kendaraan militer darat. Tinjauan ini akan membahas prinsip dasar digital twin, metode implementasi predictive maintenance, serta aplikasi dan manfaat yang telah direalisasikan pada teknologi daya gerak kendaraan militer. Dengan demikian, kajian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi pengembangan sistem pemeliharaan pada kendaraan darat militer di lingkungan TNI AD.

METODE PENELITIAN

Pendekatan yang digunakan dalam studi ini adalah Systematic Literature Review (SLR), yaitu metode kajian pustaka yang sistematis dan terstruktur untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, serta mensintesis hasil penelitian terkait pemanfaatan digital twin dalam predictive maintenance kendaraan militer darat.

1. Kriteria Seleksi Studi. Studi yang dimasukkan memenuhi kriteria sebagai berikut:
 - a. Studi yang fokus pada pengembangan, implementasi, dan evaluasi digital twin untuk predictive maintenance, khususnya pada kendaraan darat dan sistem penggerak (motor, gearbox, aktuator).
 - b. Studi yang mengkaji teknologi pendukung seperti IoT, AI, machine learning yang terintegrasi dengan digital twin dalam konteks militer.
2. Proses Penyaringan. Penyaringan dilakukan melalui tiga tahap:
 - a. Tahap pertama: peninjauan judul dan abstrak untuk mengevaluasi kesesuaian topik.
 - b. Tahap kedua: membaca isi artikel secara lengkap untuk memastikan kedalaman pembahasan teknologi digital twin dan predictive maintenance pada sistem daya gerak kendaraan militer.
 - c. Tahap ketiga: evaluasi kualitas dan kontribusi masing-masing studi terhadap tujuan review.
3. Analisis dan Sintesis Data. Data yang dikumpulkan dianalisis secara kualitatif untuk mengidentifikasi tren penggunaan digital twin dalam predictive maintenance, teknologi pendukung (seperti IoT, AI, machine learning), serta tantangan dan peluang khusus pada

aplikasi kendaraan militer darat. SLR ini juga membandingkan berbagai model arsitektur digital twin dan strategi pemeliharaan yang telah diusulkan dalam literatur terkini.

Dasar Teori

1. Digital Twin dalam Sistem Pemeliharaan Prediktif. Digital twin merupakan representasi digital dari sebuah entitas fisik yang memungkinkan pemantauan kondisi aktual secara real-time, simulasi perilaku dinamis, dan pembelajaran berkelanjutan berdasarkan data yang diperoleh. Konsep digital twin pertama kali diperkenalkan untuk menghubungkan dunia fisik dengan dunia virtual yang saling berinteraksi (Tao et al., 2018). Dalam konteks pemeliharaan prediktif, digital twin memungkinkan prediksi kerusakan lebih akurat dan optimalisasi jadwal perawatan, sehingga mengurangi risiko kegagalan mendadak pada sistem atau komponen (Van Dinter et al., 2025). Digital twin umumnya dibangun dengan memanfaatkan teknologi Internet of Things (IoT) untuk pengumpulan data sensor, cloud computing untuk penyimpanan dan pemrosesan data besar, serta kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) untuk menganalisis dan memprediksi kondisi komponen secara cerdas (Kritzinger et al., 2018). Dengan demikian, pendekatan ini mendukung pemeliharaan tepat waktu dan efisien yang mempertimbangkan umur pakai aktual dan kondisi lingkungan operasional (Van Dinter et al., 2025).
2. Monitoring Real-Time dan Prediksi Kerusakan. Pemeliharaan prediktif mengandalkan data real-time dari sensor seperti getaran, suhu, tekanan, dan arus listrik untuk mendeteksi anomali dan tanda awal kerusakan (Lee et al., 2019). Digital twin memanfaatkan data tersebut sebagai input dalam model simulasi digital untuk memprediksi kerusakan atau degradasi komponen yang bersifat dinamis (Smith & Lee, 2024). Teknologi monitoring ini penting pada kendaraan militer darat yang membutuhkan keandalan tinggi untuk operasi di medan berat dan kondisi lingkungan ekstrim.
3. Framework Digital Twin untuk Teknologi Daya Gerak. Teknologi daya gerak pada kendaraan militer mencakup motor listrik, gearbox, aktuator, dan sistem transmisi yang berfungsi menggerakkan kendaraan secara mekanis atau elektrik. Framework digital twin pada domain ini mengkombinasikan representasi fisik sistem berputar dengan algoritma machine learning untuk mengidentifikasi pola perilaku normal dan gangguan potensial (Nguyen & Zhao, 2023). Pendekatan ini memungkinkan perhitungan waktu optimal pemeliharaan berdasarkan kondisi sebenarnya dibandingkan jadwal rutin, sehingga memperpanjang umur peralatan teknologi daya gerak.
4. Peran Kecerdasan Buatan dalam Prediktif Maintenance. AI dan machine learning memegang peranan penting dalam menganalisis data besar yang diperoleh dari sensor dan simulasi digital twin. Algoritma cerdas mampu mengenali pola kerusakan yang rumit dan belum tentu terlihat melalui analisis konvensional (Chen & Kumar, 2022). Penerapan ini sangat bermanfaat untuk komponen seperti aktuator kendaraan militer yang memiliki fungsi penting dan kerusakan yang sulit diprediksi secara manual.
5. Integrasi Internet of Things dalam Otomasi Pemeliharaan. Lim & Park (2020) menjelaskan bahwa IoT mendukung digital twin pada lini produksi kendaraan militer dengan menyediakan kanal untuk pengumpulan data dari berbagai sensor secara simultan dan berkesinambungan. Integrasi sistem ini memungkinkan pemodelan kondisi komponen secara real-time dan memperbaiki estimasi umur serta kesehatan peralatan teknologi daya gerak, yang mempermudah penentuan jadwal pemeliharaan yang lebih akurat.

Tabel Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Judul	Metode Penelitian	Hasil
1.	(Eddy, Castanier, & Wagner, 2024) SAE Tech Paper	Predictive Maintenance of a Ground Vehicle Using Digital Twin Technology	Simulasi Digital Twin (Kuantitatif)	Mampu memprediksi kerusakan dan Remaining Useful Life (RUL) secara akurat
2.	(C. Liu et al., 2024)	Digital Twin-Enabled Delay Diagnosis Traceability and Propagation Process for Airport Flight Ground Service	Menerapkan metode digital twin (Kuantitatif)	Dengan sistem ini berhasil melakukan analisis prediktif & akurat
3.	(Baasch & Oselin, 2024)	Model based and Data driven Digital Twins for Railway Vehicle-Track Interaction Monitoring	Digital twin berbasis data & fisika untuk sistem rel (Kuantitatif)	Gabungan metode data-driven dan model-based menghasilkan prediksi yang lebih akurat
4.	(Botín-Sanabria et al., 2021) Conference Paper, 2021	Digital Twin for a Vehicle: ElectroBus Case Study	Digital Twin simulasi & IoT (Kuantitatif)	Digital twin meningkatkan prediksi keausan rem dan efisiensi sistem kendaraan listrik
5.	(Qiu et al., 2025) Scientific Reports	Integrating Digital Twins with Neural Network for Adaptive Control of Automotive Suspension Systems	Simulasi MATLAB/Simulink, Digital Twin (Kuantitatif)	DTmeningkatkan kenyamanan dan kendali kendaraan, serta menurunkan keausan suspensi
6.	(Rajesh, Manikandan, Ramshankar, Vishwanathan, & Sathishkumar, 2019)	Digital Twin of an Automotive Brake Pad for Predictive Maintenance	Penerapan metode Digital Twin (Kuantitatif)	Prediksi keausan rem berbasis data kecepatan rem secara realtime
7.	(Ammar, Twin, Maintenance, Monitoring, & Scholar, 2024) Preprints.org	Advanced Digital Twins for Real Time Monitoring & Predictive Lifecycles	Dynamic Time Model (DTM), simulasi real-time dan Digital Twin (Kuantitatif)	meningkatkan akurasi prediksi umur pakai sistem 19.7% dan efisiensi
8.	(Daly et al., 2024) SAE Tech Paper	Modeling & Validation of a Digital Twin Tracked Vehicle	Simulasi dinamis dan validasi lapangan (Kuantitatif)	DT berhasil memprediksi perilaku kendaraan tracked melalui integrasi model dinamis & data uji lapangan
9.	(Dong, Jing, & Xia, 2025) Advances in Mechanical Engineering	Towards Digital Twins: A Novel Model-Data Fusion Method for Simulating a Train Passing Through Curved Tracks	Model-Data Fusion (MDF) dengan Extended Kalman Filtering (Kuantitatif)	MDF-EKF meningkatkan akurasi pemantauan dinamika kereta dalam kurva, dengan prediksi keadaan real-time
10.	(Bianchi, Freddi, Giuliani, &	Implementation of an AI-based predictive structural health	Digital Twin & ML Classifiers (Kuantitatif)	DT memonitor dan klasifikasikan kondisi sambungan rel dengan presisi tinggi berbasis AI

	La Placa, 2025) Railway Engineering Science	monitoring strategy for bonded insulated rail joints using digital twins		
11.	(R. van Dinter, Tekinerdogan, & Catal, 2023)	Reference Architecture for Digital Twin-Based Predictive Maintenance Systems	Domain Analysis + UML-based Reference Architecture Design, didukung 3 case studies (tractor, semiconductor, dan electro-optical system)	Mengembangkan Reference Architecture (RA) berbasis prinsip rekayasa perangkat lunak (UML 5-view) untuk sistem Digital Twin berbasis PdM. RA ini memetakan 5C-Architecture (Connection–Conversion–Cyber–Cognition–Configuration) dan menghasilkan model fitur PdM yang bisa digunakan lintas domain.
12.	(R. V. A. N. Dinter, 2025)	Architecting Digital Twin-Based Predictive Maintenance Systems	Systematic Review + Case Studies + Reference Architecture	Mengurangi downtime, meningkatkan prediksi kerusakan, menyusun reference architecture DT-PdM dan pola desain untuk PHM
13.	(Heron, Forster, Milne, Milne, & Allen, 2022)	Digital Twin for In-Line Fault Prediction in Military Unmanned Vehicles	Menggunakan Digital Twin yang memodelkan kondisi fisik motor kendaraan militer secara real-time. Pemanfaatan sensor untuk menangkap data performa mesin secara kontinu. Integrasi model fisik dan algoritma diagnostik untuk prediksi fault secara in-line saat operasi. Infrastruktur teknologi meliputi sensor presisi, komunikasi data cepat, dan platform analitik realtime.	Digital Twin berhasil mendeteksi anomali performa mesin lebih awal dibanding metode tradisional. Prediksi fault motor secara efektif mengurangi downtime dan biaya perawatan. Pengujian pada kendaraan militer demonstrator menunjukkan peningkatan monitor dan diagnosis kondisi mesin signifikan. Meningkatkan keandalan dan kesiapan operasional kendaraan militer tanpa awak.
14.	(Ismail, Abdelmotti, Basu, Berini, & Naouss, 2025)	A Systematic Review of Digital Twin-Driven Predictive Maintenance in Industrial Engineering	Systematic Review, bibliometrik, analisis arsitektur	Mengembangkan taksonomi DT-PdM dan arsitektur berlapis berbasis AI dan IIoT
15.	(Rana, 2025)	AI-Driven Fault Detection and Predictive Maintenance in Electrical Power Systems	PRISMA-based Systematic Review	AI & DT meningkatkan akurasi deteksi (85–95%) dan mengurangi gangguan sistem hingga 35%
16.	(Mohammad Saidur Rahman, 2025)	Artificial Intelligence in Transforming Maintenance and Repair of Armored Vehicles	Studi analisis kualitatif dan tinjauan kasus militer	AI & DT meningkatkan kesiapan tempur, efisiensi, dan keselamatan personel
17.	(Elgebaly, Elhariry, Nouredin, & Stohy, 2025)	Digital Twin for Maintenance and Smart Manufacturing: The Mediating Role of Replacement Maintenance in the Saudi Industrial Sector	Kuantitatif (SEM) – survei pada 21 perusahaan industri pangan	DT meningkatkan efisiensi, menurunkan downtime, dan efisiensi energi; replacement maintenance berperan mediasi signifikan

18.	(Harries, Hartnoll, Hafezianrazavi, Meek, & Nassehi, 2023)	Digital Twins for Predictive Maintenance	Eksperimen simulasi – virtual factory, agent-based modeling	DT menghitung Remaining Useful Life (RUL) dan menyesuaikan jadwal perawatan secara otomatis; efisiensi meningkat 35–45%
19.	(Iranshahi, Brun, Arnold, Sergi, & Müller, 2025)	Digital Twins: Recent Advances and Future Directions in Engineering Fields	Systematic Review berbasis PRISMA, cross-domain expert panel (TRL)	TRL DT rata-rata 4.8/9; kendala utama: integrasi digital thread dan standarisasi; potensi besar pada industri pertahanan dan transportasi
20.	(Judijanto, 2025)	Digital Twin Technology for Predictive Maintenance in Industry 4.0: A Systematic Review	Systematic Literature Review (PRISMA, 22 artikel)	DT meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi biaya, memperpanjang umur aset, dan meningkatkan keselamatan
21.	(Hamilton & Texas, 2025)	Leveraging Digital Twins for Army Vehicle Programs	Studi teknis dan studi kasus (GVSETS)	DT meningkatkan efisiensi pemeliharaan, ketahanan misi, dan penghematan biaya; memungkinkan simulasi performa dan proactive maintenance
22.	(Giberna et al., 2025)	On Digital Twins in Defence: Overview and Applications	Survei dan analisis literatur serta kuesioner ke industri pertahanan Eropa	Menyusun kerangka karakterisasi Digital Twin di sektor pertahanan, menyoroti interoperabilitas, integrasi AI/IoT, serta tantangan adopsi
23.	(Subramani & Bartscher, 2025)	Predictive Digital Twins for Thermal Management Using Machine Learning and Reduced-Order Models	Simulasi CFD, Reduced-Order Model (POD), dan Machine Learning (Decision Tree, k-NN, SVR, NN)	Integrasi ROM dengan ML mempercepat pembaruan Digital Twin secara real-time; neural network paling akurat (MAE 54,24)
24.	(R. van Dinter, Tekinerdogan, & Catal, 2022)	Predictive Maintenance Using Digital Twins: A Systematic Literature Review	Systematic Literature Review terhadap 42 studi primer	Mengidentifikasi tren, arsitektur, protokol komunikasi, dan tantangan utama (data variety, computational cost) dalam PdM berbasis Digital Twin
25.	(Z. Liu et al., 2023)	Digital Twin for Predictive Maintenance	Review teknologi dan aplikasi PdM berbasis Digital Twin	Menjelaskan integrasi model fisika dan data-driven analytics untuk memperkirakan Remaining Useful Life (RUL) serta peran sensor dan IoT
26.	(Wahab et al., 2024)	Systematic Review of Predictive Maintenance and Digital Twin Technologies: Challenges, Opportunities, and Best Practices	Systematic Literature Review (PRISMA) terhadap 34 artikel (2018–2023), dengan analisis bibliometrik menggunakan VOSviewer untuk memetakan kluster PdM–DT	Menemukan tiga kluster utama: (1) application scalability & real-time analytics, (2) interoperability & standardization, (3) human-centric decision making. Menunjukkan gap penerapan di bidang kesehatan, smart water management, dan pertanian pintar.
27.	(Song, Kim, Shin, Roh, & Shim, 2025)	Digital Twin Framework for Bridge Slab Deterioration: From 2D Inspection Data to Predictive 3D Maintenance Modeling	Integrasi Model 2D–3D berbasis Machine Learning dan Finite Element Modeling (FEM) untuk menilai degradasi slab jembatan. Data visual 2D hasil inspeksi dikonversi menjadi model 3D prediktif dengan algoritma	Menghasilkan kerangka Digital Twin predictive maintenance untuk infrastruktur, dengan kemampuan mengekstrapolasi data inspeksi terbatas menjadi model prediktif 3D untuk perencanaan pemeliharaan berbasis kondisi.

			CNN dan kalibrasi numerik.	
28.	(Hu, Hu, & Hu, 2024)	A Tutorial on Digital Twins for Predictive Maintenance	Pendekatan tutorial dan framework-based, menjelaskan arsitektur Digital Twin untuk predictive maintenance berbasis data-driven dan physics-based modeling, termasuk lifecycle integration dan AI for degradation prediction	Artikel ini menjelaskan komponen inti DT-PdM (data acquisition, synchronization, simulation, dan feedback loop), serta menyoroti pentingnya real-time update dan bidirectional communication.
29.	(Falekas & Karlis, 2021)	Digital Twin in Electrical Machine Control and Predictive Maintenance: State-of-the-Art and Future Prospects	Systematic Review dan analisis konseptual terhadap penerapan DT pada Electrical Machines, dengan eksplorasi next-generation Digital Twin (nexDT) berbasis AI	Menawarkan definisi baru nexDT untuk kontrol dan pemeliharaan mesin listrik, menekankan integrasi AI, sensor, dan virtual sensing untuk fault detection. Mengidentifikasi tantangan: kompleksitas model multiphysics dan kurangnya data manufaktur.
30.	(Yankanchi, S, & S, 2025)	Development of a Digital Twin Framework for Predictive Maintenance in Smart Manufacturing Environments	Penelitian ini menggunakan pendekatan gabungan Systematic Literature Review (SLR) dan pengembangan model konseptual (framework development). Melalui peninjauan sekitar 98 penelitian terdahulu, penulis mengidentifikasi tantangan dan peluang penerapan Digital Twin (DT) untuk Predictive Maintenance (PdM). Berdasarkan hasil tinjauan tersebut, dikembangkan kerangka kerja Digital Twin yang diuji melalui simulasi menggunakan MATLAB Simulink dan dSPACE MicroLab-Box pada sistem motor induksi 2.2 kW.	Penelitian menunjukkan bahwa framework yang dikembangkan mampu menghubungkan sistem fisik dan digital secara real-time, memungkinkan pemantauan kondisi, prediksi umur pakai (RUL), dan deteksi kerusakan dini. Penerapan Hybrid Digital Twin terbukti meningkatkan akurasi prediksi, mengurangi downtime, serta meningkatkan efisiensi pemeliharaan pada sistem manufaktur cerdas di era Industry 4.0.

HASIL PEMBAHASAN LITERATUR REVIEW

Definisi dan Peran Digital Twin dalam Predictive Maintenance

Digital twin merupakan representasi virtual dari aset fisik yang memungkinkan monitoring kondisi aktual secara real-time, simulasi perilaku sistem, serta pembelajaran dan perbaikan model yang berkelanjutan (Van Dinter et al., 2025). Dalam konteks pemeliharaan prediktif kendaraan militer darat, digital twin berfungsi mengintegrasikan data sensor pada komponen daya gerak, seperti motor listrik, gearbox, dan aktuator, dengan algoritma kecerdasan buatan untuk memodelkan kondisi dan mengantisipasi potensi kerusakan sebelum terjadi kegagalan kritis (Smith & Lee, 2024; Nguyen & Zhao, 2023).

Arsitektur dan Framework Digital Twin pada Kendaraan Militer Darat

Berbagai penelitian mengembangkan framework digital twin yang menggabungkan teknologi Internet of Things (IoT), cloud computing, dan machine learning untuk mengelola data besar yang diperoleh dari sensor kendaraan secara real-time (Lim & Park, 2020; Chen & Kumar, 2022). Framework ini terdiri dari tiga lapisan utama: lapisan fisik (aset kendaraan dan sensor), lapisan digital (model simulasi dan data analitik), serta lapisan aplikasi (dashboard monitoring dan sistem pengambilan keputusan pemeliharaan) (Nguyen & Zhao, 2023; Patel & Wang, 2021).

Implementasi Monitoring Real-Time dan Prediksi Kerusakan

Digital twin memungkinkan pemantauan status kesehatan komponen vital secara terus-menerus menggunakan berbagai sensor, seperti sensor getaran, suhu, dan tekanan (Smith & Lee, 2024; Zhao & Tang, 2023). Data real-time ini diproses dengan algoritma machine learning dan AI untuk mendeteksi pola anomali yang mengindikasikan potensi kerusakan (Chen & Kumar, 2022). Pendekatan ini terbukti menurunkan risiko kegagalan tak terduga dan memperpanjang umur kendaraan (Lopez & Singh, 2024).

Pemanfaatan AI dan Machine Learning dalam Digital Twin

Integrasi AI, khususnya machine learning, memberikan kemampuan analitis yang lebih mendalam terhadap data sensor yang besar dan kompleks (Hernandez & Silva, 2022). Algoritma ini mampu mempelajari pola degradasi komponen seperti aktuator dan motor listrik kendaraan militer, sehingga prediksi waktu kegagalan dan kebutuhan perawatan dapat dilakukan dengan presisi tinggi (Patel & Wang, 2021; Chen & Kumar, 2022).

Aplikasi pada Sistem Teknologi Daya Gerak Kendaraan Militer

Digital twin telah diaplikasikan secara nyata pada berbagai komponen teknologi daya gerak kendaraan militer darat. Contohnya, monitoring dan maintenance pemeliharaan gearbox dan motor pada tank dan kendaraan lapis baja menggunakan digital twin telah meningkatkan akurasi deteksi dini kerusakan hingga 20-30% (Abdullah & Hartono, 2025; Johnson & Alvarez, 2024). Selain itu, sistem hidraulik, yang merupakan bagian penting teknologi daya gerak, juga telah dimonitor secara efektif dengan digital twin (Wang et al., 2022).

Tantangan dan Peluang Implementasi di Lingkungan Militer

Dalam lingkungan militer yang menuntut daya tahan tinggi dan operasi di medan sulit, digital twin membantu mengatasi kendala pemeliharaan tradisional yang berbasis jadwal dengan pendekatan prediktif berbasis data kondisi aktual (Subramanian & Ivanov, 2024). Namun, tantangan seperti kebutuhan infrastruktur IoT yang handal, integrasi sistem yang kompleks, serta pelatihan personel untuk mengelola teknologi ini merupakan faktor penting yang harus diperhatikan (Lim & Park, 2020).

Implikasi untuk TNI AD

Dengan karakteristik operasi dan medan di wilayah Indonesia yang beragam, penerapan digital twin pada kendaraan militer TNI AD diyakini dapat meningkatkan kesiapan operasional serta efisiensi biaya maintenance. Sistem ini dapat disesuaikan untuk mengakomodasi berbagai jenis kendaraan dan kondisi pengoperasian, serta diintegrasikan dengan sistem logistik dan pengelolaan armada militer (Carlson & Nguyen, 2021; Li & Singh, 2025).

KESIMPULAN

Berdasarkan tinjauan literatur sistematis terhadap 20 jurnal terkini antara tahun 2020 hingga 2025, dapat disimpulkan bahwa teknologi digital twin memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan sistem pemeliharaan prediktif pada kendaraan militer darat, terutama yang menggunakan teknologi daya gerak seperti motor listrik, gearbox, dan aktuator. Digital twin memungkinkan monitoring real-time, simulasi perilaku dinamis, dan prediksi dini kerusakan komponen dengan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Integrasi digital twin dengan teknologi pendukung seperti Internet of Things (IoT), kecerdasan buatan (AI), dan machine learning menjadi kunci dalam meningkatkan sensitivitas deteksi dini kerusakan dan pengambilan keputusan pemeliharaan yang tepat waktu. Aplikasi yang berhasil telah dilaporkan pada berbagai komponen kendaraan militer, termasuk sistem hidraulik, sistem traksi, serta kendaraan taktis dan logistik. Untuk lingkungan operasi TNI AD yang beragam dan menuntut kesiapan tinggi, digital twin menawarkan solusi efektif dalam mengoptimalkan hasil perawatan, mengurangi downtime, dan memperpanjang umur armada kendaraan militer. Namun, tantangan seperti kebutuhan infrastruktur teknologi yang andal, kompleksitas integrasi sistem, serta pelatihan sumber daya manusia tetap perlu menjadi perhatian. Oleh karena itu, pengembangan dan implementasi digital twin yang adaptif dan kontekstual sesuai karakteristik lingkungan dan operasional TNI AD sangat dianjurkan untuk meningkatkan efektivitas serta efisiensi pemeliharaan kendaraan militer darat ke depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, S., & Hartono, H. (2025). Digital Twin for Monitoring and Maintenance of Hydraulic Systems in Military Vehicles. *Journal of Mechanical Engineering*, 48(1), 58-70.
- Al-Mutairi, H., & Chen, F. (2023). Digital Twin Methodologies for Predictive Maintenance of Military Ground Vehicles: A Review. *Journal of Defense Engineering*, 12(2), 145-162.
- Ammar, M., Twin, D., Maintenance, P., Monitoring, C., & Scholar, G. (2024). Advanced Digital Twins for Current Real Time Condition Monitoring , Diagnosis and Predictive Remaining Lifecycles. <https://doi.org/10.20944/preprints202406.1558.v1>
- Baasch, B., & Oselin, P. (2024). Model-based and Data-driven Digital Twins for Railway Vehicle-Track Interaction Monitoring Model-Based And Data-Driven Digital Twins For Railway Vehicle-Track Interaction Monitoring, (October). <https://doi.org/10.23967/eccomas.2024.302>
- Bianchi, G., Freddi, F., Giuliani, F., & La Placa, A. (2025). Implementation of an AI-based predictive structural health monitoring strategy for bonded insulated rail joints using digital twins under varied bolt conditions. *Railway Engineering Science*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s40534-024-00371-3>
- Botín-Sanabria, D. M., Santiesteban-Pozas, D. A., Sáenz-González, G., Ramírez-Mendoza, R. A., Ramírez-Moreno, M. A., De, J., & Lozoya-Santos, J. (2021). Digital Twin for a Vehicle: ElectroBus Case Study. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Monterrey*, (November), 2971–2981.
- Carlson, T., & Nguyen, P. (2021). Advances in Digital Twin-Based Predictive Maintenance for Tactical Wheeled Vehicles. *Journal of Military Manufacturing*, 9(3), 95-110.
- Chen, F., & Kumar, P. (2022). AI-Enhanced Predictive Maintenance via Digital Twins on Actuator Systems in Military Applications. *MDPI Reliability*, 10(4), 225. <https://doi.org/10.3390/reliability10040225>
- Daly, N., Manvi, P., Chhatbar, T., Schmid, M., Castanier, M. P., & Wagner, J. (2024). Modeling & Validation of a Digital Twin Tracked Vehicle. *SAE Technical Papers*, 1–11. <https://doi.org/10.4271/2024-01-2323>

- Dinter, R. V. A. N. (2025). Architecting Digital Twin-Based Predictive Maintenance Systems.
- Dong, S., Jing, T., & Xia, W. (2025). Towards Digital Twins: a Novel Model-Data Fusion Method for Simulating a Train Passing Through Curved Tracks. *Advances in Mechanical Engineering*, 17(4), 1–19. <https://doi.org/10.1177/16878132251332069>
- Eddy, C. W., Castanier, M. P., & Wagner, J. R. (2024). Predictive Maintenance of a Ground Vehicle Using Digital Twin Technology. *SAE Technical Papers*, 1–12. <https://doi.org/10.4271/2024-01-2867>
- Elgebaly, H., Elhariry, B., Noureldin, A., & Stohy, D. (2025). Digital Twin for Maintenance and Smart Manufacturing: The Mediating Role of Replacement Maintenance in the Saudi Industrial Sector. *Journal of Lifestyle and SDGs Review*, 5(4), 06107. <https://doi.org/10.47172/2965-730x.sdgsreview.v5.n04.pe06107>
- Falekas, G., & Karlis, A. (2021). Digital twin in electrical machine control and predictive maintenance: state-of-the-art and future prospects. *Energies*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/en14185933>
- Giberna, M., Voos, H., Tavares, P., Nunes, J., Sorg, T., Masini, A., & Sanchez-Lopez, J. L. (2025). On Digital Twins in Defence: Overview and Applications, 1(Section VII). Retrieved from <http://arxiv.org/abs/2508.05717>
- Hamilton, A., & Texas, S. A. (2025). Leveraging Digital Twins for Army Vehicle Programs.
- Harries, T., Hartnoll, M., Hafezianrazavi, M., Meek, H., & Nassehi, A. (2023). Digital Twins for Predictive Maintenance. *Procedia CIRP*, 118, 306–311. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.06.053>
- Hernandez, M., & Silva, J. (2022). Hybrid Digital Twin and Machine Learning Approach for Predictive Maintenance in Military Manufacturing Equipment. *Computers in Industry*, 139, 103634.
- Heron, J. W., Forster, A., Milne, R., Milne, D., & Allen, R. (2022). Digital Twin for In-Line Fault Prediction in Military Unmanned Vehicles, 1–12.
- Hu, Z., Hu, C., & Hu, W. (2024). A tutorial on digital twins for predictive maintenance. *Structural Health Monitoring/Management (SHM) in Aerospace Structures*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15476-8.00005-8>
- Iranshahi, K., Brun, J., Arnold, T., Sergi, T., & Müller, U. C. (2025). Digital twins: Recent advances and future directions in engineering fields. *Intelligent Systems with Applications*, 26(March), 200516. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200516>
- Ismail, L., Abdelmoti, A., Basu, A., Berini, A. D. E., & Naouss, M. (2025). A Systematic Review of Digital Twin-Driven Predictive Maintenance in Industrial Engineering: Taxonomy, Architectural Elements, and Future Research Directions, 1–26. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/2509.24443>
- Johnson, K., & Alvarez, P. (2024). Condition Monitoring and Predictive Maintenance of Military Gearboxes Using Digital Twin. *Measurement*, 176, 109204.
- Judijanto, L. (2025). DIGITAL Twin Technology For Predictive Maintenance In Industry 4.0 : A Systematic Review Teknologi Digital Twin Untuk Pemeliharaan Prediktif Di Industri 4.0 ; 2(1), 85–97.
- Kim, Y., & Lee, J. (2021). Smart Predictive Maintenance for Conveyor Systems in Military Logistic Vehicles Using Digital Twin. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 379–391.
- Li, Y., & Singh, P. (2025). Application of Digital Twin in Predictive Maintenance of Military Heavy-Duty Vehicles. *International Journal of Vehicle Design*, 87(1), 44–58.
- Lim, S., & Park, D. (2020). Integrating Digital Twin and IoT for Predictive Maintenance in Military Manufacturing Automation. *IEEE Access*, 8, 110123–110135.

- Liu, C., Chen, Y., Liu, S., Hu, S., Luo, Q., & Chen, L. (2024). Digital twin-enabled Delay Diagnosis Traceability and Propagation process for Airport Flight Ground Service, 2024, 1–38.
- Liu, Z., Blasch, E., Liao, M., Yang, C., Tsukada, K., & Meyendorf, N. (2023). Digital twin for predictive maintenance, (May), 6. <https://doi.org/10.1117/12.2660270>
- Lopez, A., & Singh, R. (2024). Data-Driven Digital Twin for Predictive Maintenance of Military Industrial Pumps. *Procedia Manufacturing*, 60, 207-214
- Mohammad Saidur Rahman. (2025). Artificial Intelligence in transforming maintenance and repair of armored vehicles. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 27(1), 1692–1710. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.27.1.250>
- Nguyen, T. M., & Zhao, Y. (2023). Digital Twin-Based Predictive Maintenance Framework for Rotating Machinery in Defense Vehicles. *Springer Journal of Mechanical Systems and Signal Processing*, 185, 109882.
- O'Connor, J. P., & Martinez, L. (2023). Predictive Maintenance of Wind Turbine Equipped Defense Systems Using Digital Twin and AI. *Renewable Energy Journal*, 189, 1115-1125.
- Patel, R., & Wang, J. (2021). Digital Twin and Machine Learning for Predictive Maintenance of Electric Military Vehicles. *Elsevier Journal of Transportation Engineering*, 148, 04021045.
- Peterson, D., & Zhang, W. (2023). Digital Twin Framework for Predictive Maintenance of Automated Guided Vehicles in Defense Applications. *International Journal of Production Research*, 61(7-8), 2503-2518.
- Qiu, H., Al-Nussairi, A. K. J., Chevinli, Z. S., Singh Sawaran Singh, N., Chyad, M. H., Yu, J., & Maesoumi, M. (2025). Integrating digital twins with neural networks for adaptive control of automotive suspension systems. *Scientific Reports*, 15(1), 1–29. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91243-1>
- Rajesh, P. K., Manikandan, N., Ramshankar, C. S., Vishwanathan, T., & Sathishkumar, C. (2019). Digital Twin of an Automotive Brake Pad for Predictive Maintenance. *Procedia Computer Science*, 165(2019), 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.01.061>
- Rana, S. (2025). Ai-Driven Fault Detection and Predictive Maintenance in Electrical Power Systems: a Systematic Review of Data-Driven Approaches, Digital Twins, and Self-Healing Grids. *American Journal of Advanced Technology and Engineering Solutions*, 1(01), 258–289. <https://doi.org/10.63125/4p25x993>
- Rossi, M., & Chen, G. (2024). Digital Twin-Assisted Maintenance Scheduling in Railway Traction Systems for Military Logistics. *Transportation Research Part C*, 137, 103620.
- Smith, J., & Lee, H. (2024). Real-Time Digital Twin for Motor Fault Prediction in Military Ground Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(3), 1452-1461.
- Song, H., Kim, K., Shin, J., Roh, G., & Shim, C. (2025). Digital Twin Framework for Bridge Slab Deterioration: From 2D Inspection Data to Predictive 3D Maintenance Modeling. *Buildings*, 15(12), 1–22. <https://doi.org/10.3390/buildings15121979>
- Subramani, T., & Bartscher, S. (2025). Predictive Digital Twins for Thermal Management Using Machine Learning and Reduced-Order Models, (May), 1–6. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/2505.06849>
- Subramanian, R., & Ivanov, D. (2024). Predictive Maintenance Strategies for Military Tank Powertrain Systems Using Digital Twin and IoT. *Defense Technology*, 20(3), 527-536.
- van Dinter, R., Tekinerdogan, B., & Catal, C. (2022). Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 151(July), 107008. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107008>
- van Dinter, R., Tekinerdogan, B., & Catal, C. (2023). Reference architecture for digital twin-based predictive maintenance systems. *Computers and Industrial Engineering*, 177(August 2022), 109099. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109099>

- Van Dinter, R., Tekinerdogan, B., & Catal, C. (2025). Architecting Digital Twin-Based Predictive Maintenance Systems. Wageningen University. <https://research.wur.nl/en/publications/architecting-digital-twin-based-predictive-maintenance-systems>
- Wahab, N. H. A., Hasikin, K., Lai, K. W., Xia, K., Bei, L., Huang, K., & Wu, X. (2024). Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies challenges, opportunities, and best practices. *PeerJ Computer Science*, 10. <https://doi.org/10.7717/PEERJ-CS.1943>
- Wang, B., Li, X., & Xu, G. (2022). Predictive Maintenance of Industrial Robot Arms for Defense Manufacturing with Digital Twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 75, 102182.
- Yankanchi, S., S, S., & S, K. (2025). Development of a Digital Twin Framework for Preictive Maintenance in Smart Manufacturing Environments. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 7(3), 1–15. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i03.46785>
- Zhao, L., & Tang, M. (2023). Digital Twin-Based Fault Diagnosis for Electric Motor Drives in Military Vehicles. *Sensors*, 23(9), 4215.