

Pergeseran Paradigma Pemeliharaan di Era Industri 4.0 : Analisis Implementasi TPM Berbasis AI dan Dampaknya pada Efisiensi Manufaktur

Moh Ayip Fathani^{1*}, Siti Nur Hamidah², Muhamad Noval³, Candra Tubagus Maulana⁴

^{1,2,3,4} Program Study of Industrial Engineering, Universitas Sehati Indonesia, Indonesia

ayip.fathani@usindo.ac.id^{1*}, siti.nurhamidah@usindo.ac.id², noval@usindo.ac.id³,

candratubagusmaulana@gmail.com⁴

Alamat: Jl. Raya Kosambi - Tegalasari Dusun Kawali, Pancawati, Kec. Klari, Kawarang, Jawa Barat 41371

Korespondensi penulis: ayip.fathani@usindo.ac.id

Abstract: Industry 4.0 has driven significant transformation in manufacturing maintenance strategies, particularly in the implementation of Total Productive Maintenance (TPM). This research examines the paradigm shift from conventional TPM methods to Artificial Intelligence (AI)-based approaches, utilizing a qualitative methodology with phenomenological design and participatory observation in manufacturing environments. Results indicate that integrating AI with TPM has transformed maintenance approaches from reactive to predictive, enabling real-time anomaly detection, predictive maintenance, and maintenance schedule optimization that significantly improve Overall Equipment Effectiveness (OEE). Despite providing benefits such as reduced downtime and maintenance costs, AI-based TPM implementation faces challenges including data fragmentation, skilled human resource requirements, and organizational culture resistance. The development of collaboration between industry and academic institutions, as well as investment in edge computing infrastructure, are identified as key to maximizing the potential of AI-based TPM in enhancing operational sustainability in manufacturing.

Keywords: Artificial Intelligence, Industry 4.0, Total Productive Maintenance

Abstrak: Revolusi Industri 4.0 telah mendorong transformasi signifikan dalam strategi pemeliharaan manufaktur, khususnya dalam implementasi Total Productive Maintenance (TPM). Penelitian ini mengkaji pergeseran paradigma dari metode TPM konvensional menuju pendekatan berbasis Kecerdasan Buatan (AI), menggunakan metodologi kualitatif dengan desain fenomenologis dan observasi partisipatif di lingkungan manufaktur. Hasil menunjukkan bahwa integrasi AI dengan TPM telah mengubah pendekatan pemeliharaan dari reaktif menjadi prediktif, memungkinkan deteksi anomali secara real-time, pemeliharaan prediktif, dan optimalisasi jadwal pemeliharaan yang signifikan meningkatkan Overall Equipment Effectiveness (OEE). Meskipun memberikan manfaat seperti pengurangan downtime dan biaya pemeliharaan, implementasi TPM berbasis AI menghadapi tantangan berupa fragmentasi data, kebutuhan SDM terampil, dan resistensi budaya organisasi. Pengembangan kolaborasi antara industri dan institusi akademik serta investasi dalam infrastruktur komputasi edge diidentifikasi sebagai kunci untuk memaksimalkan potensi TPM berbasis AI dalam meningkatkan keberlanjutan operasional manufaktur.

Kata kunci: Kecerdasan Buatan, Industri 4.0, Pemeliharaan Produktif Total

1. PENDAHULUAN

Selama bertahun-tahun, produsen di seluruh dunia secara konsisten mencari cara yang lebih baik untuk meningkatkan proses manufaktur mereka dengan meningkatkan produktivitas dan efisiensi, dan aspek krusialnya adalah pemeliharaan peralatan industri yang tepat. Di masa lalu, kebijakan pemeliharaan selalu bersifat reaksioner, mengganggu, mahal, dan tidak efisien, karena mesin dan peralatan hanya diservis setelah kerusakan atau ketika kesalahan terdeteksi. Namun, munculnya revolusi industri keempat dan penerapan kecerdasan buatan (AI) serta teknologi canggih lainnya telah menghasilkan strategi

pemeliharaan yang lebih baik dan prediktif yang dikenal dengan *Total Productive Maintenance* (TPM).

(Hallioui et al., 2023) mendefinisikan TPM sebagai filosofi pemeliharaan mesin yang melibatkan partisipasi aktif staf perusahaan untuk memastikan peningkatan efektivitas umum pabrik, dengan menghilangkan atau mengurangi pemborosan sumber daya dan waktu melalui penggabungan keterampilan tenaga kerja. Sebagai strategi pemeliharaan yang memerlukan pendekatan modern untuk pemeliharaan peralatan dan pabrik, TPM menonjolkan semua fitur produksi, karena mengintegrasikan pemeliharaan dan servis mesin ke dalam rutinitas harian pabrik, untuk meminimalkan penghentian dan perbaikan yang tidak terencana dan darurat. Menurut (Chikwendu, Chima, & Edith, 2020), TPM adalah proses perbaikan penting yang menekankan pada pendekatan pemeliharaan peralatan, dan dampak positifnya telah membuat banyak perusahaan manufaktur mengadopsinya. untuk meningkatkan daya tanggap organisasi dalam mencapai kepuasan pelanggannya. TPM secara tradisional memainkan peran penting dalam manufaktur, dengan meningkatkan keandalan peralatan, meminimalkan waktu henti, dan mendorong perbaikan berkelanjutan melalui keterlibatan karyawan.

Terlepas dari manfaatnya, kerangka kerja TPM tradisional, yang bergantung pada intervensi manusia dan rutinitas pemeliharaan terjadwal, kesulitan memenuhi tuntutan pabrik pintar yang bergerak cepat dan berbasis data. Namun, seiring dengan memasuki era Industri 4.0, TPM tradisional menghadapi tantangan dalam menangani volume besar dan kompleksitas data yang dihasilkan di lingkungan pabrik pintar. Integrasi TPM dengan teknologi pintar seperti perangkat dan sensor IoT meningkatkan pemeliharaan prediktif dan efektivitas operasional, sehingga meningkatkan kinerja peralatan (Anagnostara et al., 2024).

Data *real-time* yang dihasilkan oleh sistem dan sensor IoT di pabrik-pabrik ini memberikan peluang untuk mengoptimalkan pemeliharaan, namun terlalu rumit untuk metode tradisional (Amangeldy & Bissembayev, 2024). Kecerdasan Buatan (AI) telah muncul sebagai solusi utama yang meningkatkan TPM dengan memproses kumpulan data besar secara *real-time*. Melalui pembelajaran mesin dan analisis prediktif, AI memperkirakan kegagalan peralatan, mengotomatiskan tugas pemeliharaan, dan mengoptimalkan jadwal, yang mewakili perubahan transformatif dalam strategi pemeliharaan.

TPM sendiri yang berasal dari Jepang menekankan pada praktik pemeliharaan proaktif, seperti pemeliharaan otonom, terencana, dan preventif, yang melibatkan seluruh

tenaga kerja untuk memaksimalkan efektivitas peralatan. Teknik tingkat lanjut seperti pembelajaran mesin dan inferensi Bayesian semakin meningkatkan akurasi pemeliharaan prediktif (Qi, Du, Huo, & Huang, 2024). Kebangkitan Industri 4.0 telah mendorong terciptanya pabrik pintar yang terotomatisasi, saling terhubung, dan didukung oleh teknologi IoT, komputasi awan, dan AI. Pabrik-pabrik ini mengandalkan pengumpulan data berkelanjutan dan pemeliharaan prediktif, yang secara signifikan mengurangi waktu henti dengan melakukan intervensi proaktif (Mosleuzzaman, Arif, & Siddiki, 2024).

Meskipun kerangka kerja TPM tradisional bergantung pada inspeksi berkala dan pengambilan keputusan oleh manusia, pendekatan ini menghadapi keterbatasan dalam menghadapi pemrosesan data yang cepat dan real-time yang diperlukan oleh lingkungan pabrik yang cerdas. Hal ini menghambat kemampuan mereka untuk sepenuhnya memanfaatkan manfaat teknologi Industri 4.0. Sebaliknya, AI memberdayakan strategi pemeliharaan melalui analisis data waktu nyata, meningkatkan pemeliharaan prediktif, mengotomatiskan tugas, dan mengoptimalkan alokasi sumber daya, sehingga meningkatkan keandalan dan masa pakai peralatan. Meskipun demikian, tantangan seperti risiko keamanan siber dan kebutuhan adaptasi tenaga kerja tetap penting dalam memanfaatkan potensi AI di bidang manufaktur.

Penelitian ini akan mengkaji Pemeliharaan Produktif Total (Total Productive Maintenance/TPM) berbasis kecerdasan buatan (AI) dengan menyoroti pergeseran paradigma dari metode konvensional menuju penerapan teknologi AI dalam TPM. Fokus utama penelitian mencakup bagaimana AI diintegrasikan ke dalam proses pemeliharaan untuk meningkatkan efisiensi, efektivitas, dan keandalan peralatan produksi. Selain itu, penelitian ini akan membahas manfaat yang diperoleh dari penerapan TPM berbasis AI, seperti peningkatan produktivitas, pengurangan downtime, serta penghematan biaya pemeliharaan. Tantangan-tantangan yang dihadapi dalam implementasi TPM berbasis AI, seperti kebutuhan sumber daya manusia yang terampil, integrasi data, dan keamanan siber, juga akan dianalisis secara mendalam. Akhirnya, penelitian ini akan memberikan gambaran mengenai arah masa depan pengembangan TPM berbasis AI, termasuk potensi inovasi dan transformasi digital di bidang pemeliharaan industri.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain fenomenologis untuk mengeksplorasi implementasi Total Productive Maintenance (TPM) berbasis Kecerdasan Buatan (AI) dalam konteks industri manufaktur. Observasi partisipatif juga

dilakukan untuk memahami integrasi algoritma pembelajaran mesin dengan proses pemeliharaan di rantai produksi. Analisis data menggunakan pendekatan tematik, mengidentifikasi pola terkait pergeseran paradigma, tantangan teknis dan organisasi, serta dampak pada kinerja operasional. Sumber sekunder seperti studi kasus sebelumnya dan laporan industri digunakan untuk memperluas konteks dan validasi temuan

3. PEMBAHASAN

Pemeliharaan Produktif Total Berbasis AI: Pergeseran Paradigma

Kecerdasan Buatan (AI) adalah serangkaian teknologi yang melengkapi komputer untuk mencapai beragam fungsi canggih, yang mencakup kemampuan untuk melihat, memahami, menilai dan menerjemahkan bahasa lisan dan tulisan, menganalisis dan memprediksi data, membuat proposal dan saran, dan banyak lagi (Chikwendu et al., 2020). Integrasi Kecerdasan Buatan (AI) dengan TPM mewakili perubahan transformatif dalam strategi pemeliharaan, terutama di pabrik pintar. (Tripathi et al., 2022) menjelaskan bahwa pendekatan proaktif AI memungkinkan produsen untuk mengatasi masalah secara preemptif, mengurangi waktu henti, dan juga mengoptimalkan alokasi sumber daya, sehingga mengarah pada peningkatan efisiensi secara keseluruhan. Mereka menunjukkan bahwa salah satu bidang utama di mana AI membuat kemajuan luar biasa adalah dalam optimalisasi proses produksi, di mana algoritma pembelajaran mesin diterapkan dalam analisis data produksi historis, identifikasi pola, serta dalam prediksi potensi kemacetan atau inefisiensi.

AI menyempurnakan pilar TPM tradisional dengan memungkinkan proses pemeliharaan yang proaktif, efisien, dan berbasis data. Dalam konteks Industri 4.0, di mana sistem yang saling terhubung menghasilkan data real-time dalam jumlah besar, kemampuan AI untuk menganalisis dan mengoptimalkan tugas pemeliharaan merevolusi keandalan peralatan dan kualitas produksi. Alat pemantauan yang didukung AI memungkinkan deteksi anomali secara real-time dan pemeliharaan prediktif, serta meningkatkan keandalan peralatan dan efisiensi operasional. Dengan menganalisis data sensor, AI mendeteksi ketidakaturan seperti suhu, getaran, dan tekanan, memberikan rekomendasi perawatan tepat waktu untuk mengurangi kegagalan peralatan (Marinagi, Reklitis, Trivellas, & Sakas, 2023). Pembelajaran mesin mengoptimalkan jadwal pemeliharaan, menyeimbangkan tindakan pencegahan dengan penggunaan aktual untuk meminimalkan biaya dan pemborosan sumber daya. AI juga meningkatkan pengendalian kualitas dengan mengidentifikasi faktor penyebab cacat dan memprediksi potensi masalah

kualitas, memastikan standar produksi yang konsisten (Cavalcanti, Kovacs, Ko, & Pocsarovszky, 2024).

Selain itu, *Root Cause Analysis* (RCA) yang digerakkan oleh AI mempercepat penyelesaian masalah dengan secara cepat menunjukkan penyebab kegagalan melalui analisis data yang komprehensif, mendukung perbaikan berkelanjutan dan meningkatkan kinerja pabrik secara keseluruhan (Mosleuzzaman et al., 2024). Dengan memanfaatkan sensor berkemampuan IoT, AI mengumpulkan data real-time mengenai kondisi peralatan, memungkinkan pemeliharaan prediktif yang meminimalkan waktu henti dan penghentian yang tidak direncanakan. Melalui algoritme canggih, AI memproses data ini untuk mendeteksi tanda-tanda awal keausan atau kegagalan, menawarkan wawasan yang tepat waktu dan akurat mengenai kesehatan mesin dan memfasilitasi pengambilan keputusan yang lebih baik.

TPM yang digerakkan oleh AI memperkenalkan kemampuan pengambilan keputusan secara otonom, memungkinkan sistem memprediksi kebutuhan pemeliharaan, merekomendasikan solusi, atau secara otomatis menerapkan tindakan perbaikan. Mengintegrasikan AI dengan *Robotic Process Automation* (RPA) memungkinkan tugas-tugas seperti penggantian suku cadang dan kalibrasi ulang sistem dilakukan secara mandiri, sehingga mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual, meningkatkan efisiensi, dan memastikan respons cepat terhadap masalah (Yin, Niu, He, Li, & Lee, 2020). Otonomi ini sangat berharga dalam lingkungan manufaktur bervolume tinggi, dimana kecepatan dan akurasi sangat penting. Meskipun terdapat keuntungan yang signifikan, tantangan seperti biaya implementasi yang tinggi dan kebutuhan akan personel yang terampil masih menjadi kendala utama bagi produsen (Rahardjo & Yahya, 2010). Secara keseluruhan, TPM yang digerakkan oleh AI menandai perubahan paradigma dalam strategi pemeliharaan, meningkatkan pendekatan tradisional melalui pemantauan real-time, analisis prediktif, dan operasi otonom, yang mengarah pada peningkatan efisiensi, pengurangan biaya, dan peningkatan keandalan operasional.

Penerapan AI dalam Pemeliharaan Produktif Total

AI merevolusi TPM dengan meningkatkan pendekatan pemeliharaan tradisional dan memfasilitasi pengambilan keputusan yang lebih efisien, cerdas, dan berdasarkan data. Integrasi AI ke dalam TPM membantu mengoptimalkan jadwal pemeliharaan, meningkatkan keandalan peralatan, dan mengurangi waktu henti, sehingga memainkan peran penting dalam lingkungan manufaktur modern. Salah satu penerapan AI yang

signifikan dalam TPM adalah pemeliharaan prediktif, yang memprediksi kegagalan peralatan dengan menganalisis data historis dan real-time. Sistem AI menerapkan algoritme canggih untuk mengidentifikasi pola kegagalan dan anomali, sehingga memungkinkan intervensi dini. Dengan menghitung Sisa Masa Manfaat (RUL) komponen penting, AI mendukung penjadwalan pemeliharaan proaktif, mengurangi waktu henti yang tidak direncanakan dan juga meningkatkan efisiensi operasional (Ralahallo, Tubalawony, Watumlawar, & Tabelessy, 2024).

AI juga meningkatkan Pemeliharaan Berbasis Kondisi (CBM), yang terus memantau kesehatan peralatan secara real-time dan memicu tindakan pemeliharaan hanya ketika ambang batas tertentu terlampaui. Pendekatan yang digerakkan oleh AI ini meminimalkan waktu henti dan intervensi yang tidak perlu, memastikan penggunaan sumber daya secara optimal, dan memungkinkan tindakan pemeliharaan yang tepat waktu dan tepat berdasarkan data sensor langsung (Aljarrah et al., 2023).

Teknologi terobosan lainnya adalah *digital twins model* virtual sistem fisik bertenaga AI yang menyimulasikan perilaku peralatan secara real-time. Model-model ini memungkinkan produsen untuk menguji dan mengoptimalkan strategi pemeliharaan secara virtual, memberikan wawasan berharga mengenai kinerja dan manajemen risiko tanpa mengganggu operasional. Kembar digital berkontribusi pada peningkatan pengambilan keputusan dan memperpanjang umur peralatan. AI juga mempercepat Root Cause Analysis (RCA), dengan cepat mengidentifikasi penyebab kegagalan dengan menganalisis kumpulan data ekstensif dari sensor, log pemeliharaan, dan riwayat kinerja. Analisis cepat ini memungkinkan penyelesaian masalah yang berulang secara lebih cepat, mendorong perbaikan berkelanjutan dalam TPM (Singh & Singh, 2024).

Selain itu, TPM yang digerakkan oleh AI meningkatkan Efektivitas Peralatan Secara Keseluruhan (OEE) dengan memberikan wawasan yang dapat ditindaklanjuti mengenai ketersediaan, kinerja, dan kualitas. Ini menganalisis data real-time untuk mengungkap inefisiensi, seperti kemacetan produksi dan waktu henti mesin, dan juga mengidentifikasi potensi masalah kualitas sebelum berdampak pada produk akhir. Optimalisasi ini memaksimalkan waktu kerja peralatan, mengurangi limbah, dan memastikan kualitas produksi yang tinggi. Oleh karena itu, AI mentransformasi TPM dengan meningkatkan kemampuan prediktif, memungkinkan praktik pemeliharaan dinamis, dan meningkatkan efisiensi operasional, menjadikannya sebagai faktor kunci dalam keberhasilan operasi manufaktur modern.

Manfaat Pemeliharaan Produktif Total Berbasis AI

TPM yang digerakkan oleh AI secara signifikan meningkatkan efisiensi dan efektivitas operasi pemeliharaan di pabrik pintar dengan memanfaatkan algoritma canggih, pembelajaran mesin, dan data real-time. Strategi berbasis AI ini mengoptimalkan jadwal pemeliharaan, meningkatkan keandalan peralatan, dan mengurangi waktu henti, sehingga berkontribusi terhadap daya saing dan keberlanjutan sistem manufaktur. Salah satu manfaat utama AI dalam TPM adalah peningkatan akurasi prediksi. AI menggunakan algoritma pembelajaran mesin untuk menganalisis kumpulan data besar dari sensor IoT, mendeteksi pola dan memprediksi kegagalan peralatan sebelum terjadi, sehingga meminimalkan waktu henti yang tidak direncanakan. Teknik seperti Random Forest dan Neural Networks sangat efektif dalam meramalkan kondisi peralatan dengan tepat, memastikan intervensi pemeliharaan tepat waktu dan alokasi sumber daya yang lebih baik (Soori, Arezoo, & Dastres, 2023).

AI juga membantu mengurangi biaya pemeliharaan dengan mengoptimalkan jadwal pemeliharaan berdasarkan prediksi kegagalan peralatan dan intervensi berdasarkan kondisi, bukan berdasarkan interval waktu. Hal ini mengurangi perbaikan yang tidak perlu, biaya pemeliharaan darurat, dan pengeluaran inventaris. Selain itu, pemeliharaan prediktif memperpanjang umur peralatan dan selanjutnya menurunkan belanja modal. TPM yang digerakkan oleh AI meningkatkan waktu kerja peralatan dengan terus memantau kesehatan mesin dan memprediksi tanda-tanda keausan sebelum kerusakan terjadi. Algoritme pembelajaran mesin seperti XGBoost dan Random Forest mendeteksi anomali awal, memastikan pemeliharaan proaktif dan meminimalkan waktu henti, yang pada akhirnya meningkatkan efisiensi produksi dan profitabilitas. Sistem pemantauan real-time dan edge computing berkontribusi terhadap peningkatan ini dengan memungkinkan deteksi anomali secara langsung dan penjadwalan pemeliharaan proaktif, sehingga meningkatkan *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) (Halloui et al., 2023).

Selain itu, AI meningkatkan pengambilan keputusan dengan memberikan wawasan yang dapat ditindaklanjuti berdasarkan analisis data. Tim pemeliharaan memprioritaskan tugas dengan mempertimbangkan kesehatan peralatan, jadwal produksi, dan ketersediaan sumber daya. AI juga membantu mengungkap pola tersembunyi dan akar penyebab kegagalan, memungkinkan pendekatan pemecahan masalah yang lebih efektif dan berbasis akar penyebab. Selain itu, solusi AI di TPM bersifat terukur dan fleksibel, sehingga dapat beradaptasi dengan berbagai jenis peralatan dan lingkungan manufaktur. Baik pabrik yang memiliki sedikit mesin atau jaringan kompleks yang terdiri dari perangkat yang saling

terhubung, AI berintegrasi dengan lancar ke dalam infrastruktur yang ada. Hal ini juga dapat disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan produksi yang terus berkembang, memastikan bahwa strategi TPM tetap efektif dari waktu ke waktu.

Tantangan dalam Menerapkan TPM Berbasis AI

Total Productive Maintenance (TPM) yang digerakkan oleh Kecerdasan Buatan menawarkan potensi signifikan untuk meningkatkan operasi pemeliharaan di pabrik pintar. Namun, penerapannya menghadirkan banyak tantangan yang harus diatasi agar dapat sepenuhnya memanfaatkan manfaatnya, seperti yang digarisbawahi oleh penelitian terbaru. Salah satu tantangan besarnya terletak pada pengintegrasian dan memastikan kualitas data dari berbagai sistem. Pabrik pintar menghasilkan data ekstensif dari sensor, mesin, dan sistem ERP IoT, namun data ini sering kali terfragmentasi, tidak terstruktur, atau tidak akurat. Untuk mencapai data berkualitas tinggi, konsisten, dan real-time memerlukan pra-pemrosesan, pembersihan, dan standarisasi yang substansial tugas-tugas yang memerlukan sumber daya yang signifikan. Usaha Kecil dan Menengah (UKM) menghadapi kesulitan tambahan karena terbatasnya keahlian dan kendala keuangan (Syamsul, 2020).

Meskipun demikian, kerangka kerja berbasis data yang memanfaatkan IoT dan pembelajaran mendalam dapat membantu mengatasi masalah ini. Hambatan utama lainnya adalah besarnya investasi awal yang diperlukan untuk mengadopsi TPM yang digerakkan oleh AI. Biaya-biaya ini termasuk sensor IoT, perangkat lunak AI, penyimpanan data, infrastruktur komputasi, dan pelatihan personel. Bagi UKM dengan anggaran terbatas, pengeluaran seperti itu dapat menghalangi adopsi, ditambah dengan biaya berkelanjutan untuk pemeliharaan sistem, pembaruan perangkat lunak, dan pelatihan berkelanjutan.

Kurangnya personel terampil juga menimbulkan tantangan yang signifikan. Penerapan TPM berbasis AI memerlukan keahlian dalam ilmu data, pembelajaran mesin, analisis tingkat lanjut, dan operasi manufaktur. Kesenjangan keterampilan saat ini memerlukan pelatihan ekstensif, rekrutmen, dan kolaborasi dengan institusi akademis untuk mengembangkan program pendidikan yang relevan. Tanpa profesional yang berkualifikasi, organisasi mungkin kesulitan mengoperasikan sistem AI secara efektif dan menafsirkan keluarannya. Keamanan siber juga menjadi perhatian penting lainnya, karena integrasi AI dan IoT meningkatkan kerentanan akibat peningkatan konektivitas. Pertukaran data secara real-time dapat dieksploitasi, yang menyebabkan kegagalan fungsi peralatan, pelanggaran data, atau gangguan produksi. Untuk mengatasi risiko ini memerlukan

langkah-langkah yang kuat seperti enkripsi, protokol komunikasi yang aman, dan sistem deteksi intrusi, yang menambah kompleksitas dan biaya penerapannya.

Yang terakhir, penolakan organisasi terhadap perubahan masih menjadi hambatan yang signifikan. Karyawan mungkin takut akan perpindahan pekerjaan atau kehilangan kendali atas proses, sementara manajemen mungkin ragu karena kekhawatiran tentang ROI dan kompleksitas sistem. Mengatasi hambatan ini memerlukan komunikasi yang jelas tentang manfaat AI, pelatihan karyawan yang komprehensif, dan integrasi teknologi secara bertahap. Menumbuhkan budaya inovasi dan perbaikan berkelanjutan sangat penting untuk mendorong penerimaan dan memperoleh manfaat dari TPM berbasis AI.

Arah Masa Depan dalam TPM Berbasis AI

Seiring dengan kemajuan TPM yang digerakkan oleh AI, hal ini menawarkan peluang transformatif untuk mendefinisikan kembali strategi pemeliharaan di pabrik pintar sambil mengatasi tantangan utama dan memajukan tujuan keberlanjutan. Studi terbaru menekankan perkembangan signifikan, hambatan, dan arah masa depan TPM berbasis AI. Integrasi AI dengan robotika canggih mengubah proses pemeliharaan, memungkinkan pengoperasian otonom dengan masukan manusia yang minimal. Robot yang dilengkapi dengan algoritma pembelajaran mesin dapat secara efisien menangani tugas-tugas kompleks seperti kalibrasi dan diagnostik peralatan, sehingga secara signifikan mengurangi kesalahan dan meningkatkan presisi. Platform robotik seluler memungkinkan identifikasi masalah operasional dengan cepat, membebaskan personel untuk pengambilan keputusan strategis, dan meningkatkan efektivitas peralatan secara keseluruhan (Halloui et al., 2023). Selain itu, kemajuan dalam pembelajaran mesin memungkinkan robot beradaptasi secara dinamis dan melakukan tugas pemeliharaan tidak terjadwal, sehingga memperkuat peran mereka dalam sistem TPM masa depan.

Komputasi edge muncul sebagai kemajuan penting lainnya dalam TPM berbasis AI dengan memungkinkan pemrosesan data lokal untuk meminimalkan latensi dan memfasilitasi pengambilan keputusan secara real-time. Dengan memproses data sensor IoT pada sumbernya, komputasi tepi memastikan wawasan yang cepat dan tindakan perbaikan, sehingga mengurangi ketergantungan pada server terpusat (Liu, Xu, & Zhang, 2020). Kemampuan ini meningkatkan strategi pemeliharaan prediktif, menjadikan komputasi edge sebagai elemen yang sangat diperlukan dalam pengoperasian pabrik pintar. Model AI kolaboratif yang menggabungkan kemampuan komputasi dengan keahlian manusia membentuk masa depan sistem pemeliharaan adaptif. Kerangka kerja hibrid ini

memungkinkan personel pemeliharaan menilai dan menyempurnakan rekomendasi yang dihasilkan AI menggunakan keahlian domain mereka, sehingga menghasilkan pengambilan keputusan yang lebih tepat dan kontekstual. Sistem seperti ini secara efektif memposisikan AI sebagai alat pendukung keputusan, menjaga keseimbangan antara otomatisasi dan intervensi manusia.

TPM yang digerakkan oleh AI juga memajukan upaya keberlanjutan di bidang manufaktur dengan mengintegrasikan metrik seperti efisiensi energi, optimalisasi sumber daya, dan pengurangan limbah ke dalam praktik pemeliharaan. AI mengoptimalkan konsumsi energi, memprediksi kegagalan peralatan untuk meningkatkan pemanfaatan sumber daya, dan meminimalkan limbah melalui perkiraan penggantian komponen yang tepat (Hosokawa & Miyagi, 2019). Kemajuan ini selaras dengan praktik manufaktur ramah lingkungan, sehingga berkontribusi terhadap target keberlanjutan perusahaan sekaligus meningkatkan efisiensi biaya. Ketika AI mengubah proses manufaktur, mengatasi tantangan tenaga kerja menjadi hal yang penting. Teknologi imersif seperti *Augmented Reality* (AR) dan *Virtual Reality* (VR) memberikan solusi pelatihan inovatif, memungkinkan tim pemeliharaan mempraktikkan tugas kompleks di lingkungan virtual. Alat-alat ini meningkatkan pemahaman, pengambilan keputusan, dan kemampuan pemecahan masalah, membekali teknisi untuk mengelola sistem canggih yang didukung AI secara efektif.

Terlepas dari inovasi-inovasi ini, ada beberapa tantangan yang harus diselesaikan untuk mewujudkan potensi penuh AI dalam TPM. Permasalahan seperti integrasi data, biaya implementasi yang tinggi, kesenjangan keterampilan tenaga kerja, risiko keamanan siber, dan penolakan terhadap perubahan organisasi masih terus terjadi. Untuk mengatasi hambatan-hambatan ini diperlukan pemanfaatan IoT dan teknologi pembelajaran mendalam, mendorong kolaborasi akademis dan industri, menerapkan kerangka kerja keamanan siber yang kuat, dan memupuk budaya organisasi yang didorong oleh inovasi. TPM yang digerakkan oleh AI merevolusi pemeliharaan di pabrik pintar dengan mendorong otomatisasi, memberikan wawasan waktu nyata, mendorong praktik berkelanjutan, dan meningkatkan kemampuan tenaga kerja. Dengan inovasi berkelanjutan dan pemecahan masalah strategis, AI berpotensi mengubah operasi pemeliharaan, dengan meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan di sektor manufaktur.

4. KESIMPULAN

Penelitian mengungkapkan bahwa TPM berbasis AI telah merevolusi strategi pemeliharaan dengan menggeser pendekatan reaktif tradisional menjadi prediktif dan berbasis data, memanfaatkan sensor IoT dan analisis pembelajaran mesin untuk memprediksi kegagalan peralatan. Implementasi ini meningkatkan *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) melalui pengurangan downtime dan optimasi jadwal perawatan, sekaligus mengurangi biaya pemeliharaan darurat. Namun, tantangan seperti fragmentasi data, kebutuhan SDM terampil, dan resistensi budaya organisasi tetap menjadi hambatan utama. Untuk masa depan, kolaborasi antara industri dan institusi akademik dalam pengembangan program pelatihan AI serta investasi dalam infrastruktur komputasi edge diperlukan untuk memaksimalkan potensi TPM berbasis AI dalam meningkatkan keberlanjutan operasional manufaktur.

REFERENSI

- Aljarrah, M. M., Zawaideh, F. H., Magableh, M., Al Wahshat, H., Mohamed, R. R., & V, A. K. (2023). Internet of Thing (IoT) and data analytics with challenges and future applications. In *2023 International Conference on Computer Science and Emerging Technologies (CSET)* (pp. 1–8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSET58993.2023.10346664>
- Amangeldy, I. S., & Bissembayev, A. S. (2024). Enhancing operational efficiency in Industry 4.0: A predictive maintenance approach. *Herald of the Kazakh-British Technical University*, 21(2), 10–18. <https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-10-18>
- Anagnostara, I. M., Sagani, A., Passias, V., Koufokotsios, N., Kourkoumpas, D.-S., & Nikolopoulos, N. (2024). Cost-oriented predictive maintenance using exponential degradation modelling: Application on manufacturing industries. In *2024 IEEE 29th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 01–07). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ETFA61755.2024.10710954>
- Cavalcanti, J. H., Kovacs, T., Ko, A., & Pocsarovszky, K. (2024). Production system efficiency optimization through application of a hybrid artificial intelligence solution. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 37(6), 790–807. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2257661>
- Chikwendu, O. C., Chima, A. S., & Edith, M. C. (2020). The optimization of overall equipment effectiveness factors in a pharmaceutical company. *Heliyon*, 6(4), e03796. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03796>
- Halloui, A., Herrou, B., Katina, P. F., Santos, R. S., Egbue, O., Jasiulewicz-Kaczmarek, M., ... Marques, P. C. (2023). A review of sustainable total productive maintenance (STPM). *Sustainability*, 15(16), 12362. <https://doi.org/10.3390/su151612362>

- Hosokawa, T., & Miyagi, Z. (2019). Quality engineering-based management: A proposal for achieving total optimisation of large systems. *Total Quality Management & Business Excellence*, 30(sup1), S182–S194. <https://doi.org/10.1080/14783363.2019.1665843>
- Liu, Y., Xu, S., & Zhang, B. (2020). Thriving at work: How a paradox mindset influences innovative work behavior. *The Journal of Applied Behavioral Science*, 56(3), 347–366. <https://doi.org/10.1177/0021886319888267>
- Marinagi, C., Reklitis, P., Trivellas, P., & Sakas, D. (2023). The impact of Industry 4.0 technologies on key performance indicators for a resilient supply chain 4.0. *Sustainability*, 15(6), 5185. <https://doi.org/10.3390/su15065185>
- Mosleuzzaman, M., Arif, I., & Siddiki, A. (2024). Design and development of a smart factory using Industry 4.0 technologies. *Academic Journal on Business Administration, Innovation & Sustainability*, 4(04), 89–108. <https://doi.org/10.69593/ajbais.v4i04.131>
- Qi, Z., Du, L., Huo, R., & Huang, T. (2024). Predictive maintenance based on identity resolution and transformers in IIoT. *Future Internet*, 16(9), 310. <https://doi.org/10.3390/fi16090310>
- Rahardjo, J., & Yahya, S. bin. (2010). Advanced manufacturing technology implementation process in SME: Critical success factors. *Jurnal Teknik Industri*, 12(2), 101–108. <https://doi.org/10.9744/jti.12.2.101-108>
- Ralahallo, F. N., Tubalawony, J., Watumlawar, E., & Tabelessy, W. (2024). Implementasi total quality manajemen (TQM) sebagai strategi meningkatkan keunggulan bersaing pada UMKM di Negeri Waai. *Abdimas Indonesian Journal*, 4(1), 187–194. <https://doi.org/10.59525/aij.v4i1.360>
- Singh, H., & Singh, B. (2024). Industry 4.0 technologies integration with lean production tools: A review. *The TQM Journal*, 36(8), 2507–2526. <https://doi.org/10.1108/TQM-02-2022-0065>
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Internet of things for smart factories in Industry 4.0, a review. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 3, 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.006>
- Syamsul, N. I. (2020). Sosialisasi model House of Quality produk eceng gondok dalam perbaikan mutu pada UMKM Rumah Anyamandiri di Kota Makassar. *JURNAL TEPAT: Applied Technology Journal for Community Engagement and Services*, 3(2), 49–55. https://doi.org/10.25042/jurnal_tepat.v3i2.137
- Tripathi, V., Chattopadhyaya, S., Mukhopadhyay, A. K., Saraswat, S., Sharma, S., Li, C., ... Georgise, F. B. (2022). A novel smart production management system for the enhancement of industrial sustainability in Industry 4.0. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 1–24. <https://doi.org/10.1155/2022/6424869>
- Yin, X., Niu, Z., He, Z., Li, Z., & Lee, D. (2020). An integrated computational intelligence technique based operating parameters optimization scheme for quality improvement oriented process-manufacturing system. *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106284. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106284>