



Perawatan Mesin untuk Meningkatkan Performa dan Keandalan Mesin dan Peralatan

Romiyadi✉

Program Studi Perawatan dan Perbaikan Mesin Politeknik Kampar, Bangkinang, Indonesia

DOI: [10.31004/jutin.v8i3.47078](https://doi.org/10.31004/jutin.v8i3.47078)

✉ Corresponding author:
[romiyadi.nawir@gmail.com]

Article Info	Abstrak
<p>Kata kunci: <i>Perawatan Mesin; Perawatan Preventive; Perawatan Predictive; Downtime; Efisiensi Operasional;</i></p> <p>Keywords: <i>Machine Maintenance; Preventive Maintenance; Predictive Maintenance; Downtime; Operational Efficiency</i></p>	<p>Perawatan mesin merupakan elemen krusial dalam sektor industri dan manufaktur karena berperan dalam menjaga performa mesin tetap optimal serta memperpanjang masa pakainya. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji berbagai bentuk perawatan mesin yang diterapkan di beragam bidang industri, sekaligus menelaah manfaat dan tantangan yang muncul dalam pelaksanaannya. Melalui studi pustaka, ditemukan bahwa terdapat empat jenis utama perawatan mesin, yaitu: perawatan preventif, korektif, prediktif, dan perawatan berbasis rekayasa ulang (desain ulang). Setiap jenis perawatan memainkan peran strategis dalam mendukung kelancaran proses produksi, meminimalkan waktu henti operasional (downtime), serta memperpanjang usia pakai peralatan. Pelaksanaan perawatan yang tepat dapat memberikan berbagai keuntungan, seperti peningkatan efisiensi operasional, pengurangan biaya perbaikan yang tidak terduga, dan peningkatan standar keselamatan kerja. Meski demikian, proses implementasi perawatan mesin kerap menghadapi sejumlah kendala, antara lain tingginya biaya, keterbatasan tenaga kerja yang kompeten, serta waktu yang diperlukan untuk pelaksanaan perawatan. Kendati demikian, tantangan-tantangan tersebut dapat diatasi melalui penerapan strategi perawatan yang terencana dan berkelanjutan, sehingga perusahaan dapat mencapai efisiensi jangka panjang dan mendukung keberlanjutan operasional.</p> <p>Abstract</p> <p><i>Machine maintenance is a critical component in the industrial and manufacturing sectors to ensure that equipment operates efficiently and has a prolonged lifespan. This study aims to explore the various types of machine maintenance implemented across different industrial sectors, along with the benefits and challenges associated with their application. Utilizing a literature review approach, the study identifies four main types of maintenance: preventive, corrective, predictive, and redesign. Each maintenance type plays a crucial role in enhancing machine performance, reducing downtime, and extending the service life of industrial equipment. Effective</i></p>

maintenance practices offer several advantages, including improved operational performance, reduced repair costs, and enhanced workplace safety. However, the implementation of maintenance strategies presents several challenges, such as high costs, limited availability of skilled labor, and the time required for maintenance procedures. Despite these obstacles, with the adoption of appropriate strategies, such challenges can be effectively managed, enabling companies to achieve greater operational efficiency and long-term sustainability.

1. PENDAHULUAN

Perawatan mesin adalah kegiatan penting dalam dunia industri dan manufaktur yang tidak hanya berfokus pada perbaikan mesin yang rusak, tetapi juga untuk memastikan mesin beroperasi secara optimal dan memiliki umur yang panjang. Di banyak sektor industri, mesin merupakan aset utama yang mendukung kelancaran produksi dan operasional (Nawir et al., 2022). Tanpa perawatan yang tepat, mesin dapat mengalami penurunan kinerja atau bahkan kerusakan total, yang berpotensi menyebabkan kerugian finansial, peningkatan downtime, serta gangguan dalam proses produksi (Romiyadi & Irwan, 2020). Oleh karena itu, pemeliharaan mesin yang tepat menjadi salah satu kunci keberhasilan dalam mempertahankan kelancaran proses produksi dan meningkatkan daya saing perusahaan.

Seiring dengan perkembangan teknologi, mesin yang digunakan di industri saat ini menjadi semakin kompleks dan canggih (Romiyadi et al., 2023). Mesin modern seringkali dilengkapi dengan berbagai sensor dan sistem otomatis yang memungkinkan pemantauan kondisi mesin secara real-time (Gautam et al., 2025). Meskipun demikian, mesin-mesin ini tetap membutuhkan perawatan yang intensif untuk menjaga kinerjanya. Dalam banyak kasus, perawatan tidak hanya dilakukan ketika mesin mengalami kerusakan, tetapi juga secara berkala untuk mencegah masalah yang lebih besar di masa depan (Scaife, 2024). Perawatan mesin yang direncanakan dengan baik dan dilaksanakan secara disiplin akan mengurangi risiko kerusakan mendadak dan memperpanjang umur peralatan industri (Bafandegan Emrooz et al., 2025).

Berbagai pendekatan perawatan mesin telah dikembangkan, termasuk perawatan preventif, korektif, prediktif, dan desain ulang. Masing-masing jenis perawatan memiliki tujuan dan metode yang berbeda, tetapi semuanya bertujuan untuk memastikan bahwa mesin dapat beroperasi dengan efisien dan aman (Molęda et al., 2023). Perawatan preventif, misalnya, dilakukan berdasarkan jadwal tertentu untuk mencegah kerusakan atau kegagalan (Tzvetkova & Klaassens, 2001). Sementara itu, perawatan prediktif mengandalkan teknologi untuk memantau kondisi mesin secara terus-menerus, dengan tujuan untuk mengidentifikasi potensi masalah sebelum menjadi gangguan yang lebih besar (Ucar et al., 2024). Masing-masing jenis perawatan ini memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga kualitas dan ketahanan mesin.

Manfaat dari perawatan mesin yang baik sangat luas. Selain meningkatkan kinerja dan efisiensi operasional, perawatan yang tepat juga dapat membantu mengurangi biaya operasional yang timbul akibat kerusakan mendadak atau downtime yang tidak direncanakan (Handoyo et al., 2023). Downtime, baik yang direncanakan maupun tidak, dapat menyebabkan kehilangan produktivitas yang signifikan dan merugikan perusahaan, baik dari segi finansial maupun reputasi (Agoro, 2025). Lebih lanjut, perawatan mesin yang baik juga berkontribusi pada keselamatan kerja, mengurangi kemungkinan kecelakaan yang dapat terjadi akibat kegagalan mesin, yang tentunya sangat penting untuk menjaga kesehatan dan keselamatan para pekerja (Putri & Widjajati, 2021).

Namun, di balik berbagai manfaat tersebut, pelaksanaan perawatan mesin juga menghadapi beragam permasalahan yang kompleks di lapangan. Salah satu kendala utama adalah tingginya biaya investasi awal untuk sistem perawatan berbasis teknologi, seperti predictive maintenance yang memerlukan perangkat sensorik dan analisis data berbasis AI (Nunes et al., 2023). Selain itu, keterbatasan sumber daya manusia yang terampil dan berpengalaman dalam bidang perawatan mesin juga menjadi hambatan bagi banyak perusahaan, terutama di industri yang lebih kecil atau dengan anggaran terbatas (Hauashdh et al., 2024). Tantangan lainnya adalah keterbatasan waktu, di mana perusahaan harus menemukan keseimbangan antara perawatan mesin dan kelancaran operasional harian. Meskipun demikian, dengan strategi perawatan yang tepat, tantangan-tantangan ini dapat diatasi untuk mencapai efisiensi dan keberlanjutan operasional jangka panjang (Zopounidis & Lemonakis, 2024).

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur untuk menganalisis berbagai jenis perawatan mesin yang diterapkan dalam industri, serta manfaat dan tantangannya. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan peneliti untuk mengkaji literatur yang ada, termasuk buku, artikel ilmiah, jurnal, dan laporan industri, yang relevan dengan topik perawatan mesin. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran yang lebih mendalam mengenai perawatan mesin dalam konteks industri modern.

Adapun langkah-langkah yang diambil dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi Jenis-Jenis Perawatan Mesin

Langkah pertama adalah mengidentifikasi berbagai jenis perawatan mesin yang digunakan dalam industri, termasuk perawatan preventif, korektif, prediktif, dan desain ulang. Untuk setiap jenis perawatan, penelitian ini menggali metode, teknik, serta peralatan yang digunakan dalam pelaksanaannya. Literatur yang membahas prosedur perawatan secara rinci akan dikaji untuk mendapatkan pemahaman mendalam tentang penerapan perawatan tersebut.

2. Analisis Manfaat Perawatan Mesin

Setelah mengidentifikasi jenis perawatan, penelitian ini menganalisis manfaat yang diperoleh dari setiap jenis perawatan dalam konteks operasional industri. Manfaat yang akan dianalisis meliputi peningkatan efisiensi mesin, pengurangan biaya perbaikan, peningkatan keselamatan kerja, dan perpanjangan umur mesin. Penelitian ini juga mencakup pemahaman tentang bagaimana perawatan mesin berkontribusi terhadap produktivitas dan kelancaran proses produksi.

3. Identifikasi Tantangan dalam Implementasi Perawatan Mesin

Penelitian ini juga mengidentifikasi berbagai tantangan yang dihadapi dalam penerapan perawatan mesin di industri. Beberapa tantangan yang dibahas meliputi:

- Biaya yang tinggi terkait dengan perawatan preventif dan prediktif, serta penggunaan teknologi yang lebih canggih.
- Keterbatasan sumber daya manusia yang memiliki keterampilan teknis yang diperlukan untuk merawat mesin secara efektif.
- Waktu yang dibutuhkan untuk melakukan perawatan tanpa mengganggu operasi produksi yang berkelanjutan.

4. Pendekatan Komparatif

Untuk memahami berbagai praktik perawatan mesin, penelitian ini menggunakan pendekatan komparatif. Penelitian membandingkan penerapan perawatan mesin di perusahaan dari berbagai sektor industri untuk mengidentifikasi pola-pola yang muncul. Ini akan membantu dalam memahami perbedaan dalam strategi perawatan dan mengidentifikasi pendekatan terbaik yang dapat diterapkan di berbagai jenis industri atau jenis mesin.

5. Pengambilan Kesimpulan dan Rekomendasi

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, penelitian ini menyimpulkan temuan-temuan yang relevan dan memberikan rekomendasi mengenai strategi perawatan yang lebih efektif dan efisien. Rekomendasi ini ditujukan agar perusahaan dapat memaksimalkan kinerja mesin dan mengurangi biaya operasional, baik untuk perusahaan besar maupun industri kecil dan menengah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan melalui studi literatur, penelitian ini mengungkapkan berbagai jenis perawatan mesin yang umum diterapkan dalam dunia industri, manfaat yang diperoleh dari perawatan yang dilakukan dengan baik, serta tantangan yang dihadapi dalam pelaksanaannya. Pembahasan ini berfokus pada eksplorasi mendalam mengenai setiap jenis perawatan, dampaknya terhadap kinerja operasional, serta hambatan yang mungkin muncul dalam proses implementasi yang efektif.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan pemahaman komprehensif mengenai pentingnya perawatan mesin dalam menjaga keberlanjutan operasional perusahaan, serta menyarankan strategi terbaik dalam menghadapi tantangan yang ada.

3.1 Jenis-Jenis Perawatan Mesin

Dalam dunia industri, perawatan mesin merupakan aktivitas yang tak terhindarkan dan memiliki peran penting dalam mempertahankan produktivitas dan efisiensi operasional. Berdasarkan temuan penelitian, terdapat empat jenis perawatan mesin utama yang diterapkan di industri, yaitu perawatan preventif, korektif, prediktif, dan

desain ulang. Setiap jenis perawatan tersebut memiliki tujuan, pendekatan, serta implikasi yang berbeda dalam konteks efisiensi dan biaya operasional (Theissler et al., 2021).

1. Perawatan Preventif (Preventive Maintenance)

Perawatan preventif adalah jenis perawatan yang dilakukan secara terjadwal dengan tujuan utama untuk mencegah terjadinya kerusakan mesin. Berdasarkan analisis, perawatan ini merupakan pendekatan yang paling banyak diterapkan di berbagai sektor industri, terutama pada mesin-mesin yang beroperasi secara intensif dan memiliki waktu operasional yang panjang (Psarommatis et al., 2023). Penelitian menunjukkan bahwa perusahaan yang rutin melakukan perawatan preventif mengalami pengurangan jumlah downtime, lebih sedikitnya kerusakan mendalam, serta dapat menjaga kinerja mesin pada tingkat optimal (Benhanifia et al., 2025). Namun, tantangan utama dari perawatan ini adalah biaya dan alokasi waktu yang dibutuhkan. Perawatan yang dilakukan secara terjadwal dapat mengganggu kelancaran proses produksi, terutama dalam industri yang beroperasi dengan sistem produksi 24/7. Perusahaan sering kali menghadapi dilema antara menjalankan perawatan yang tepat waktu atau terus menjalankan operasi untuk memenuhi target produksi (Islam et al., 2020).

2. Perawatan Korektif (Corrective Maintenance)

Perawatan korektif adalah tindakan yang diambil setelah mesin mengalami kerusakan atau penurunan kinerja yang signifikan. Meskipun perawatan ini cenderung lebih murah dalam jangka pendek, penelitian ini menemukan bahwa perawatan korektif sering kali membawa dampak buruk bagi kelancaran produksi karena mengakibatkan downtime yang tidak direncanakan (Mołęda et al., 2023). Dalam beberapa kasus, perusahaan lebih memilih perawatan korektif untuk menghemat biaya, meskipun dalam jangka panjang, biaya perbaikan dan dampak terhadap produktivitas jauh lebih tinggi (Benhanifia et al., 2025). Penelitian ini juga menunjukkan bahwa perawatan korektif lebih sering diterapkan pada mesin yang lebih tua atau yang sudah beroperasi dalam jangka panjang tanpa dilakukan perawatan preventif yang cukup. Meskipun demikian, perawatan korektif tetap memiliki peran yang tak tergantikan dalam situasi darurat, terutama saat kerusakan mesin yang tidak dapat diprediksi terjadi (Benhanifia et al., 2025).

3. Perawatan Prediktif (Predictive Maintenance)

Perawatan prediktif adalah metode perawatan yang memanfaatkan teknologi sensor dan perangkat lunak untuk memantau kondisi mesin secara real-time. Berdasarkan temuan penelitian, perawatan prediktif semakin diterapkan pada industri yang mengandalkan mesin dengan teknologi tinggi dan operasi yang memerlukan presisi (Theissler et al., 2021). Keuntungan utama dari perawatan prediktif adalah kemampuannya untuk mendeteksi masalah kecil sebelum berkembang menjadi kerusakan besar yang dapat mengganggu operasional (Scaife, 2024). Hal ini mengarah pada pengurangan downtime dan penghematan biaya yang signifikan, karena hanya perawatan yang diperlukan yang dilakukan, berdasarkan data yang diperoleh dari sensor (Ahuja & Gupta, 2024). Penelitian ini mengidentifikasi bahwa meskipun teknologi ini sangat bermanfaat, perusahaan sering kali menghadapi kendala besar dalam penerapannya, seperti tingginya biaya investasi awal, serta kebutuhan untuk tenaga kerja yang terampil dalam mengoperasikan dan menganalisis data dari sistem prediktif (Espina-Romero et al., 2024).

4. Perawatan Desain Ulang (Design Maintenance)

Perawatan desain ulang menjadi opsi yang diambil ketika mesin mengalami masalah yang berulang meskipun sudah dilakukan perawatan secara berkala. Berdasarkan analisis, perawatan jenis ini sering kali melibatkan modifikasi atau perubahan desain pada mesin untuk mengatasi masalah yang tidak bisa diselesaikan dengan cara biasa (Kobbacy, 2012). Meskipun perawatan desain ulang dapat meningkatkan keandalan mesin dalam jangka panjang, penerapannya memerlukan investasi yang lebih besar. Penelitian ini mengungkapkan bahwa beberapa perusahaan yang menghadapi masalah berulang pada mesin-mesin produksi mereka memilih untuk melakukan desain ulang, namun ini memerlukan waktu yang lebih lama dan biaya yang cukup besar (Rojek et al., 2023). Selain itu, perawatan desain ulang membutuhkan kolaborasi antara tim pemeliharaan dan desain untuk memastikan bahwa perbaikan yang dilakukan sesuai dengan kebutuhan teknis dan operasional.

3.2 Manfaat Perawatan Mesin

Manfaat yang diperoleh dari perawatan mesin yang dilakukan secara terstruktur dan terencana sangat beragam, baik dari segi peningkatan kinerja mesin, penghematan biaya, maupun peningkatan keselamatan kerja. Berdasarkan hasil penelitian, beberapa manfaat utama dari perawatan mesin yang efektif adalah sebagai berikut:

1. Peningkatan Kinerja Mesin

Perawatan yang dilakukan dengan baik, terutama perawatan preventif dan prediktif, dapat memastikan bahwa mesin bekerja dalam kondisi terbaiknya. Penelitian ini menunjukkan bahwa mesin yang terawat dengan baik dapat beroperasi pada efisiensi yang lebih tinggi, mengurangi energi yang terbuang, dan meningkatkan output produksi (Kandoi et al., 2023). Selain itu, mesin yang dipelihara dengan baik juga memiliki lebih sedikit gangguan atau masalah yang menghambat operasional, sehingga perusahaan dapat lebih fokus pada target produksi tanpa terhambat oleh kerusakan mendadak (Azizi, 2015).

2. Pengurangan Downtime yang Tidak Direncanakan

Salah satu manfaat besar dari perawatan mesin adalah pengurangan downtime yang tidak terduga. Berdasarkan temuan penelitian, perusahaan yang menerapkan perawatan prediktif dan preventif memiliki downtime yang lebih sedikit dibandingkan dengan perusahaan yang mengandalkan perawatan korektif (Benhanifia et al., 2025). Dengan mendeteksi masalah lebih awal, perawatan prediktif memungkinkan perbaikan dilakukan sebelum kerusakan besar terjadi, sehingga operasi perusahaan dapat berjalan lebih lancar dan mengurangi kerugian akibat downtime (Theissler et al., 2021).

3. Pengurangan Biaya Perbaikan

Dengan melaksanakan perawatan secara teratur, terutama perawatan preventif, perusahaan dapat mengurangi biaya perbaikan yang besar. Penelitian menunjukkan bahwa dengan mencegah kerusakan besar, perusahaan tidak perlu mengeluarkan biaya yang lebih tinggi untuk perbaikan darurat atau penggantian komponen yang lebih mahal (Vilarinho et al., 2017). Hal ini juga mengurangi frekuensi penggantian mesin yang mahal, sehingga secara keseluruhan dapat menghemat biaya operasional dalam jangka panjang (Ahuja & Gupta, 2024).

4. Peningkatan Keselamatan Kerja

Keselamatan kerja adalah salah satu aspek yang sering kali diabaikan dalam proses perawatan mesin. Mesin yang tidak terawat dapat menimbulkan risiko yang besar bagi keselamatan operator dan pekerja di sekitarnya (Benson et al., 2024). Berdasarkan hasil penelitian, perusahaan yang secara rutin melakukan perawatan mesin yang baik memiliki tingkat kecelakaan yang lebih rendah (Salawu et al., 2023). Hal ini dapat diatribusikan pada deteksi dini masalah teknis yang dapat berpotensi menyebabkan kecelakaan, seperti kegagalan komponen atau kebakaran (Salawu et al., 2023). Oleh karena itu, keselamatan kerja dapat terjamin lebih baik melalui penerapan perawatan mesin yang efektif.

3.3 Tantangan dalam Implementasi Perawatan Mesin

Meskipun Berdasarkan temuan penelitian, berikut adalah beberapa tantangan utama dalam implementasi perawatan mesin: perawatan mesin menawarkan berbagai manfaat, perusahaan menghadapi sejumlah tantangan yang harus diatasi agar perawatan dapat diterapkan secara efektif. Berdasarkan temuan penelitian, berikut adalah beberapa tantangan utama dalam implementasi perawatan mesin:

1. Biaya Perawatan yang Tinggi

Salah satu hambatan utama dalam penerapan perawatan mesin yang baik adalah tingginya biaya yang diperlukan, terutama untuk perawatan preventif dan prediktif yang membutuhkan teknologi canggih (Nunes et al., 2023). Penelitian ini menunjukkan bahwa banyak perusahaan, terutama yang berskala kecil atau menengah, menganggap biaya perawatan sebagai beban tambahan yang harus diperhitungkan dengan cermat. Investasi awal yang tinggi untuk perangkat teknologi dan pelatihan staf sering kali menjadi alasan utama perusahaan enggan mengadopsi perawatan prediktif (Häring et al., 2023).

2. Keterbatasan Sumber Daya Manusia yang Terampil

Keterbatasan jumlah tenaga kerja yang memiliki keterampilan teknis yang memadai untuk merawat mesin canggih merupakan tantangan lain yang dihadapi oleh banyak perusahaan. Penelitian ini menunjukkan bahwa banyak perusahaan kesulitan untuk merekrut teknisi yang terlatih atau mengalokasikan anggaran yang cukup untuk pelatihan (Rikala et al., 2024). Hal ini dapat menghambat efektivitas perawatan mesin, terutama yang memerlukan pemahaman tentang teknologi baru dan sistem monitoring yang canggih.

3. Waktu yang Diperlukan untuk Perawatan

Waktu yang diperlukan untuk melakukan perawatan dapat mengganggu proses produksi dan berdampak pada target produksi yang sudah direncanakan. Perusahaan seringkali harus menghadapi dilema antara melakukan perawatan yang diperlukan atau tetap melanjutkan produksi untuk memenuhi permintaan pasar (Fede et al., 2024). Penelitian ini mengidentifikasi bahwa beberapa perusahaan berusaha mencari solusi yang lebih fleksibel, seperti menjadwalkan perawatan pada waktu-waktu tertentu yang tidak mengganggu jam operasional utama (Dunn et al., 2023).

4. KESIMPULAN

Perawatan mesin memiliki peran penting dalam menjaga kinerja serta memperpanjang masa pakai peralatan industri. Terdapat empat jenis utama strategi perawatan yang umum diterapkan, yaitu: preventif, korektif, prediktif, dan desain ulang. Perawatan preventif dilakukan secara berkala untuk mencegah kerusakan, dan meskipun membutuhkan waktu serta biaya, pendekatan ini efektif dalam mengurangi downtime serta meminimalkan gangguan teknis. Sebaliknya, perawatan korektif, yang hanya dilakukan setelah terjadi kerusakan, mungkin terlihat lebih hemat pada awalnya, namun sering kali menyebabkan peningkatan waktu henti dan biaya perbaikan yang lebih tinggi. Perawatan prediktif memanfaatkan teknologi seperti sensor dan sistem pemantauan real-time untuk mendeteksi tanda-tanda awal kerusakan. Strategi ini mampu menekan biaya dan waktu henti, tetapi memerlukan investasi awal yang cukup besar dan dukungan tenaga kerja dengan keahlian teknis. Sementara itu, perawatan desain ulang diterapkan untuk meningkatkan keandalan mesin dalam jangka panjang melalui modifikasi struktural atau fungsional, meskipun pelaksanaannya membutuhkan sumber daya yang tidak sedikit.

Agar strategi perawatan berjalan optimal, perusahaan disarankan untuk rutin menjalankan perawatan preventif, memanfaatkan teknologi prediktif untuk deteksi dini, serta membekali tenaga kerja dengan keterampilan yang sesuai dengan perkembangan teknologi mesin. Penjadwalan perawatan sebaiknya dilakukan di luar jam produksi guna menghindari gangguan terhadap proses operasional. Sebelum menerapkan teknologi baru, perusahaan perlu melakukan analisis biaya dan manfaat secara menyeluruh. Selain itu, kolaborasi yang erat antara tim teknis dan perancang mesin sangat penting untuk mengatasi masalah yang terjadi secara berulang. Strategi perawatan yang terencana dan menyeluruh tidak hanya meningkatkan efisiensi dan menurunkan biaya operasional, tetapi juga mendukung keselamatan kerja, kelancaran produksi, dan daya saing perusahaan dalam jangka panjang.

5. REFERENSI

- Agoro, H. (2025). *Reducing Downtime in Production Lines Through Proactive Maintenance Strategies*. March.
- Ahuja, A., & Gupta, M. (2024). *Optimizing Predictive Maintenance with Machine Learning and IOT: A Business Strategy for Reducing Downtime and Operational Costs*. October. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15574.46400>
- Azizi, A. (2015). Evaluation Improvement of Production Productivity Performance using Statistical Process Control, Overall Equipment Efficiency, and Autonomous Maintenance. *Procedia Manufacturing*, 2(February), 186–190. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.032>
- Bafandegan Emrooz, V., Kazemi, M., & Doostparast, M. (2025). Enhancing industrial maintenance planning: Optimization of human error reduction and spare parts management. *Operations Research Perspectives*, 14(March), 100336. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2025.100336>
- Benhanifia, A., Cheikh, Z. Ben, Oliveira, P. M., Valente, A., & Lima, J. (2025). Systematic review of predictive maintenance practices in the manufacturing sector. *Intelligent Systems with Applications*, 26(October 2024), 200501. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200501>
- Benson, C., Obasi, I. C., Akinwande, D. V., & Ile, C. (2024). The impact of interventions on health, safety and environment in the process industry. *Heliyon*, 10(1), e23604. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23604>
- Dunn, M., Munoz, I., & Jarrahi, M. H. (2023). Dynamics of flexible work and digital platforms: Task and spatial flexibility in the platform economy. *Digital Business*, 3(1), 100052. <https://doi.org/10.1016/j.digbus.2022.100052>
- Espina-Romero, L., Gutiérrez Hurtado, H., Ríos Parra, D., Vilchez Pirela, R. A., Talavera-Aguirre, R., & Ochoa-Díaz, A. (2024). Challenges and Opportunities in the Implementation of AI in Manufacturing: A Bibliometric Analysis. *Sci*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/sci6040060>
- Fede, G., Sgarbossa, F., & Paltrinieri, N. (2024). Integrating production and maintenance planning in process industries using Digital Twin: A literature review. *IFAC-PapersOnLine*, 58(19), 151–156. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.124>
- Gautam, A., Aryal, M. R., Deshpande, S., Padalkar, S., Nikolaenko, M., Tang, M., & Anand, S. (2025). IIoT-enabled digital twin for legacy and smart factory machines with LLM integration. *Journal of Manufacturing Systems*, 80(March), 511–523. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2025.03.022>
- Handoyo, S., Suharman, H., Ghani, E. K., & Soedarsono, S. (2023). A business strategy, operational efficiency, ownership structure, and manufacturing performance: The moderating role of market uncertainty and competition intensity and its implication on open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market,*

- and Complexity, 9(2), 100039. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2023.100039>
- Häring, K., Pimentel, C., & Teixeira, L. (2023). Industry 4.0 Implementation in Small- and Medium-Sized Enterprises: Recommendations Extracted from a Systematic Literature Review with a Focus on Maturity Models. *Logistics*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/logistics7040099>
- Hauashdh, A., Nagapan, S., Jailani, J., & Gamil, Y. (2024). An integrated framework for sustainable and efficient building maintenance operations aligning with climate change, SDGs, and emerging technology. *Results in Engineering*, 21(August 2023), 101822. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101822>
- Islam, S. S., Lestari, T., Fitriani, A., & Wardani, D. A. (2020). Analisis Preventive Maintenance Pada Mesin Produksi dengan Metode Fuzzy FMEA. *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, 8(1), 13–20. <https://doi.org/10.32487/jtt.v8i1.766>
- Kandoi, A., Makwana, J., & Student, U. (2023). Optimizing Production Efficiency: A Case Study on Machine Downtime Analysis and Implementation of Quality Control Tools and Action Plans. *International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM)*, 08(11), 2454–9150. <https://doi.org/10.35291/2454-9150.2023.0031>
- Kobbacy, K. A. H. (2012). Application of Artificial Intelligence in maintenance modelling and management. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 45(31), 54–59. <https://doi.org/10.3182/20121122-2-ES-4026.00046>
- Molȩda, M., Małysiak-Mrozek, B., Ding, W., Sunderam, V., & Mrozek, D. (2023). From Corrective to Predictive Maintenance—A Review of Maintenance Approaches for the Power Industry. *Sensors*, 23(13). <https://doi.org/10.3390/s23135970>
- Nawir, R., Dwianda, Y., Febrianton, A., & Irwan, P. (2022). The Effect of Misalignment to Vibration, Electric Current and Shaft Rotation Speed on Gear Transmission. *The Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace -Science and Engineering- (JOMase)*, 66(1), 14–19. <https://doi.org/10.36842/jomase.v66i1.278>
- Nunes, P., Santos, J., & Rocha, E. (2023). Challenges in predictive maintenance – A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 40, 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.11.004>
- Psarommatis, F., May, G., & Azamfirei, V. (2023). Envisioning maintenance 5.0: Insights from a systematic literature review of Industry 4.0 and a proposed framework. *Journal of Manufacturing Systems*, 68(April), 376–399. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.04.009>
- Putri, S. R., & Widjajati, E. P. (2021). Analisis Resiko Keselamatan Kerja Pada Departemen Perawatan Mesin Potong Pt. Xyz Dengan Metode Hazard and Operability Study (Hazop). *Juminten*, 2(2), 156–167. <https://doi.org/10.33005/juminten.v2i2.246>
- Rikala, P., Braun, G., Järvinen, M., Stahre, J., & Hämäläinen, R. (2024). Understanding and measuring skill gaps in Industry 4.0 — A review. *Technological Forecasting and Social Change*, 201(June 2023). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123206>
- Rojek, I., Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Piechowski, M., & Mikołajewski, D. (2023). An Artificial Intelligence Approach for Improving Maintenance to Supervise Machine Failures and Support Their Repair. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/app13084971>
- Romiyadi, R., Dwianda, Y., & Mustika, W. S. (2023). Pengaruh Misalignment Terhadap Arus Listrik dan Putaran Poros pada Komponen Transmisi Sproket dan Rantai. *Quantum Teknika: Jurnal Teknik Mesin Terapan*, 5(1), 1–7. <https://doi.org/10.18196/jqt.v5i1.17403>
- Romiyadi, R., & Irwan, P. (2020). The Effect of Misalignment to Vibration, Electric Current and Shaft Rotation Speed on The Coupling Transmission. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(2), 73–78. <https://doi.org/10.21063/jtm.2020.v10.i2.73-78>
- Salawu, E. Y., Awoyemi, O. O., Akerekan, O. E., Afolalu, S. A., Kayode, J. F., Ongbali, S. O., Airewa, I., & Edun, B. M. (2023). Impact of Maintenance on Machine Reliability: A Review. *E3S Web of Conferences*, 430, 1–12. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001226>
- Scaife, A. D. (2024). Improve predictive maintenance through the application of artificial intelligence: A systematic review. *Results in Engineering*, 21(October 2023), 101645. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101645>
- Theissler, A., Pérez-Velázquez, J., Kettelgerdes, M., & Elger, G. (2021). Predictive maintenance enabled by machine learning: Use cases and challenges in the automotive industry. *Reliability Engineering and System Safety*, 215, 107864. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107864>
- Tzvetkova, S., & Klaassens, B. (2001). Preventive Maintenance for Industrial Application. *IFAC Proceedings Volumes*, 34(29), 3–8. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)32784-2](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)32784-2)
- Ucar, A., Karakose, M., & Kırımça, N. (2024). *applied sciences Artificial Intelligence for Predictive Maintenance*

Applications:

- Vilarinho, S., Lopes, I., & Oliveira, J. A. (2017). Preventive Maintenance Decisions through Maintenance Optimization Models: A Case Study. *Procedia Manufacturing*, 11(June), 1170–1177. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.241>
- Zopounidis, C., & Lemonakis, C. (2024). The company of the future: Integrating sustainability, growth, and profitability in contemporary business models. *Development and Sustainability in Economics and Finance*, 1(May), 100003. <https://doi.org/10.1016/j.dsef.2024.100003>