



Analisis Efektivitas *Predictive Maintenance* dalam Mengoptimalkan *Cost Avoidance* pada *Final Drive* Komatsu PC200-8 Studi Kasus di PT. Antareja Mahada Makmur Site PT. Multi Harapan Utama

**Esa Cahya Kartika*, Mad Yusup, Purbawati, Ida Rosanti, Diyaa Aaisyah Salmaa Putri
Atmaja**

Universitas Nahdlatul Ulama Kalimantan Timur, Jl. KH. Harun Nafsi, Samarinda, Kalimantan
Timur, Indonesia 75131

*Penulis Korespondensi: esacahyakartika@gmail.com

Abstract. *This study analyzes the effectiveness of implementing predictive maintenance (PdM) on the final drive components of the Komatsu PC200-8 unit at PT. Antareja Mahada Makmur, Site PT. Multi Harapan Utama, East Kalimantan, in an effort to reduce downtime and operational losses. Before the implementation of PdM in 2022, there were 12 repair cases for the final drive with a total downtime of 772.1 hours, repair costs amounting to IDR 310.6 million, rental income loss of IDR 208.03 million, and total losses of IDR 518.63 million. In 2023, during the PdM transition phase, the number of cases decreased to 4, with a total loss of IDR 252.05 million, although downtime remained high (714.6 hours) due to the limited scope of PdM implementation on certain units and components. In 2024, with full PdM implementation, the number of repair cases decreased to 5, with total downtime of only 96 hours and losses of IDR 45.75 million. The cost of PdM implementation for the year was only IDR 21.9 million. As of July 2025, no further damage to the final drive has been recorded, demonstrating a significant improvement in equipment reliability. The reduction in total losses from 2022 to 2024 amounted to IDR 472.88 million, indicating PdM's effectiveness in avoiding significant costs through condition monitoring methods such as oil analysis, magnetic plug rating, thermal inspection, and oil leak testing (floating seal). The findings of this study confirm that PdM is effective in reducing downtime, repair costs, and enhancing asset management in the mining sector. It also improves equipment reliability and overall operational efficiency, proving PdM to be a successful strategy in reducing losses, increasing productivity, and supporting the sustainability of company operations.*

Keywords: *predictive maintenance, cost avoidance, final drive, downtime, mining industry.*

Abstrak: Penelitian ini menganalisis efektivitas penerapan predictive maintenance (PdM) pada komponen final drive unit Komatsu PC200-8 di PT. Antareja Mahada Makmur, Site PT. Multi Harapan Utama, Kalimantan Timur, dalam upaya mengurangi downtime dan kerugian operasional. Sebelum penerapan PdM pada 2022, tercatat 12 kasus perbaikan final drive dengan total downtime 772,1 jam, biaya perbaikan sebesar Rp 310,6 juta, kehilangan pendapatan rental Rp 208,03 juta, dan total kerugian mencapai Rp 518,63 juta. Pada 2023, yang merupakan fase transisi PdM, jumlah kasus perbaikan turun menjadi 4 dengan total kerugian sebesar Rp 252,05 juta, meskipun downtime masih tinggi (714,6 jam) akibat keterbatasan cakupan penerapan PdM pada beberapa unit dan komponen. Pada 2024, dengan implementasi penuh PdM, jumlah kasus perbaikan menjadi 5 dengan total downtime hanya 96 jam dan kerugian sebesar Rp 45,75 juta. Biaya implementasi PdM pada tahun tersebut tercatat hanya Rp 21,9 juta. Hingga Juli 2025, tidak tercatat adanya kerusakan final drive pada unit tersebut, yang menunjukkan peningkatan signifikan dalam keandalan alat. Penurunan total kerugian dari 2022 ke 2024 mencapai Rp 472,88 juta, yang mengindikasikan efektivitas PdM dalam menghindari biaya signifikan (cost avoidance) dan memperpanjang umur peralatan. Penerapan PdM ini melibatkan metode monitoring kondisi seperti oil analysis, magnetic plug rating, thermal inspection, dan oil leak test (floating seal). Hasil penelitian ini menegaskan bahwa penerapan PdM tidak hanya mengurangi downtime dan biaya perbaikan, tetapi juga mengoptimalkan manajemen aset di sektor pertambangan, meningkatkan keandalan peralatan, serta meningkatkan efisiensi operasional perusahaan secara keseluruhan. Dengan demikian, PdM terbukti efektif dalam mengurangi kerugian, meningkatkan produktivitas, dan mendukung keberlanjutan operasional perusahaan.

Kata kunci: predictive maintenance, cost avoidance, final drive, downtime, pertambangan.

1. LATAR BELAKANG

Industri pertambangan merupakan salah satu sektor strategis yang memberikan kontribusi signifikan terhadap perekonomian Indonesia (Hilmawan et al., 2017; World Bank, 2023). Operasional pada sektor ini sangat bergantung pada ketersediaan dan keandalan alat berat, seperti excavator, dump truck, dan berbagai peralatan penunjang lainnya (Rahman et al., 2020). Salah satu jenis excavator yang banyak digunakan adalah Komatsu PC200-8, yang memiliki peran penting dalam proses penggalian dan pemindahan material tambang (Prasetyo & Ardiansyah, 2019).

Salah satu komponen vital pada excavator ini adalah final drive unit, yang berfungsi menyalurkan tenaga dari travel motor ke undercarriage untuk menggerakkan alat (Kumar & Singh, 2021). Kerusakan pada komponen ini dapat menyebabkan downtime operasional yang signifikan, mengganggu kelancaran produksi, dan memicu biaya perbaikan yang tinggi (Putra et al., 2022). Berdasarkan data historis tahun 2023 di PT. Antareja Mahada Makmur, kerusakan mendadak pada final drive telah menyebabkan total kerugian mencapai Rp 518.630.133, terdiri atas biaya perbaikan dan kerugian akibat downtime produksi (Suryanto & Hidayat, 2023; Wibowo et al., 2021; Zhang et al., 2020).

Selama ini, strategi perawatan yang diterapkan adalah preventive maintenance, yaitu perawatan berkala berdasarkan interval waktu atau jam kerja tertentu. Namun, metode ini sering kali tidak mampu mengantisipasi kerusakan yang terjadi sebelum jadwal perawatan, sehingga dapat mengakibatkan over-maintenance atau under-maintenance.

Sebagai solusi, perusahaan mulai mengadopsi predictive maintenance (PdM), yaitu strategi perawatan berbasis kondisi aktual komponen. Implementasi PdM pada final drive Komatsu PC200-8 dilakukan melalui empat metode utama:

- a. *Oil Analysis*, analisis kondisi oli untuk mendeteksi kontaminasi dan partikel keausan logam.
- b. *Magnetic Plug Rating*, pemeriksaan material ferrous yang menempel pada magnetic plug sebagai indikasi tingkat keausan komponen.
- c. *Thermal Inspection*, pengukuran suhu abnormal pada housing final drive yang dapat mengindikasikan gesekan berlebih atau kerusakan internal.
- d. *Oil Leak Test (Floating Seal)*, pemeriksaan kebocoran oli pada seal untuk mencegah masuknya kontaminan dari luar.

Pendekatan ini memungkinkan deteksi dini potensi kerusakan sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum terjadi kegagalan total. Implementasi PdM diharapkan mampu menghindari biaya yang tidak perlu (cost avoidance), memperpanjang umur pakai komponen, serta meningkatkan efisiensi operasional perusahaan.

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh implementasi predictive maintenance terhadap cost avoidance pada final drive unit Komatsu PC200-8, sekaligus mengidentifikasi keuntungan dan tantangan penerapannya di sektor pertambangan.

2. KAJIAN TEORI

A. Predictive Maintenance (PdM)

Predictive Maintenance (PdM) adalah strategi perawatan yang memanfaatkan data aktual kondisi peralatan untuk memprediksi waktu terjadinya kegagalan komponen sehingga perawatan dapat dilakukan secara tepat waktu sebelum kerusakan fatal terjadi. Mobley (2002) menjelaskan bahwa PdM merupakan pengembangan dari preventive maintenance dengan mengintegrasikan teknologi monitoring seperti analisis oli, analisis getaran, pengukuran suhu, dan inspeksi visual untuk menentukan status kesehatan komponen.

Keunggulan PdM dibanding *preventive maintenance* adalah kemampuannya mengurangi *over maintenance* (perawatan yang dilakukan terlalu sering) dan *undermaintenance* (perawatan yang terlambat dilakukan), sehingga biaya pemeliharaan dapat ditekan dan umur pakai peralatan diperpanjang. Menurut Sharma & Yadava (2011), penerapan PdM di industri berat terbukti menurunkan biaya pemeliharaan hingga 30–50% dan mengurangi *downtime* tak terencana sebesar 35–45%. Dalam konteks industri pertambangan, PdM sangat relevan karena alat berat beroperasi pada beban tinggi, lingkungan ekstrem, dan siklus kerja yang panjang. Penggunaan PdM dapat memastikan ketersediaan alat (*availability*) tetap tinggi sekaligus mengoptimalkan produktivitas.

B. Cost Avoidance

Cost avoidance adalah tindakan yang dilakukan untuk mencegah timbulnya biaya di masa depan melalui langkah-langkah pencegahan dan pengendalian (Brown, 2019). Berbeda dengan *cost reduction* yang fokus pada penurunan biaya yang sedang berjalan, *cost avoidance* menekankan pada pencegahan agar biaya besar tidak muncul akibat kerusakan atau kegagalan peralatan.

Dalam perawatan alat berat, *cost avoidance* dicapai dengan melakukan perbaikan kecil pada tahap awal kerusakan, yang biayanya jauh lebih rendah dibandingkan penggantian total komponen setelah kerusakan parah terjadi. Misalnya, mengganti bearing final drive yang aus seharga Rp 15 juta jauh lebih hemat dibanding mengganti seluruh *final drive* dengan biaya lebih dari Rp 120 juta ditambah kerugian *downtime* produksi.

Pendekatan ini sejalan dengan konsep manajemen pemeliharaan berbasis risiko (*Risk Based Maintenance*), di mana prioritas perawatan diberikan pada komponen yang memiliki dampak besar terhadap biaya dan keberlangsungan operasional.

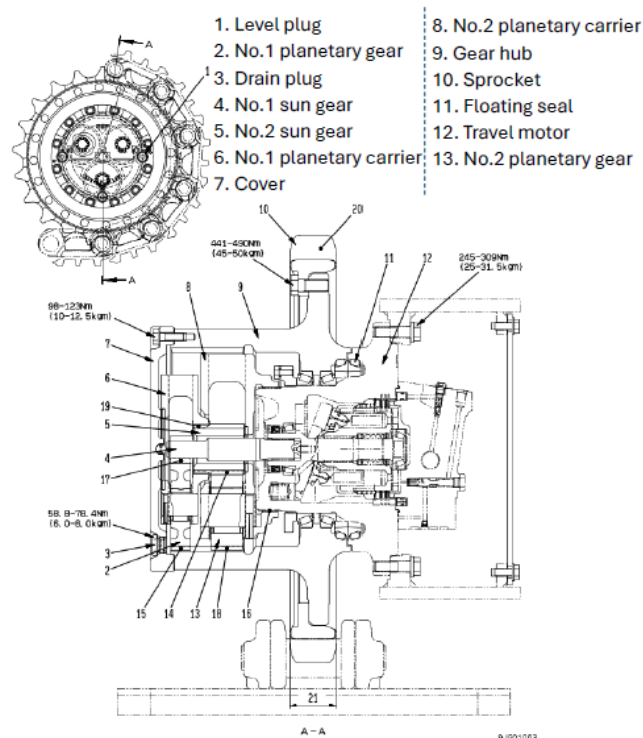
- Cost without PdM = Biaya perbaikan + biaya downtime ketika tanpa PdM
- Cost with PdM = Biaya implementasi PdM + biaya perbaikan minor
- Cost Avoidance = Cost without PdM – Cost with PdM

C. Final Drive Komatsu PC200-8

Final drive adalah komponen transmisi akhir pada excavator yang berfungsi menyalurkan tenaga dari travel motor ke track untuk menggerakkan unit. Pada Komatsu PC200-8, final drive menggunakan sistem planetary gear yang terdiri dari *sun gear*, *planetary gear*, *ring gear*, *carrier*, dan *bearing* (Komatsu Ltd., 2010). Sistem ini dirancang untuk menurunkan kecepatan putar motor sekaligus meningkatkan torsi yang diteruskan ke *sprocket* dan *track*. Kerusakan pada final drive umumnya disebabkan oleh:

- Kerusakan gear akibat gesekan dan beban kerja berat.
- Kerusakan bearing karena pelumasan yang buruk.
- Kontaminasi oli oleh partikel logam atau material eksternal.
- Kebocoran pada floating seal yang menyebabkan oli keluar dan kotoran masuk.

Dampak kerusakan final drive sangat signifikan karena dapat menyebabkan downtime hingga beberapa hari, mengganggu jadwal produksi, dan menimbulkan biaya perbaikan tinggi.



Gambar 1. Final drive PC200-8

D. Metode Monitoring dalam Predictive Maintenance

PdM pada final drive Komatsu PC200-8 diimplementasikan melalui kombinasi empat metode monitoring, yang secara teoritis saling melengkapi dalam mendeteksi potensi kerusakan sejak dini:

- a. **Oil Analysis.** Oil analysis adalah metode memeriksa sampel oli pelumas untuk mendeteksi kondisi internal komponen. Wear Particle Analysis (WPA) dapat mengidentifikasi jenis dan jumlah partikel logam yang terkandung, seperti Fe (besi) dari gear dan bearing, Cu (tembaga) dari bushing, dan Al (aluminium) dari housing. Peningkatan jumlah partikel tertentu menandakan adanya proses keausan yang tidak normal (Boyd & Forster, 2015). Analisis oli juga memeriksa viskositas, kandungan air, dan adanya kontaminan eksternal.
- b. **Magnetic Plug Rating.** *Magnetic plug* adalah komponen yang dipasang pada drain plug final drive untuk menangkap partikel logam ferrous. Pemeriksaan dilakukan dengan menilai jumlah, ukuran, dan bentuk partikel yang menempel. Peningkatan signifikan dalam volume partikel menunjukkan percepatan keausan, yang dapat menjadi indikator awal kegagalan gear atau bearing. Metode ini bersifat inspeksi visual namun memberikan bukti fisik langsung mengenai kondisi internal.
- c. **Thermal Inspection.** *Thermal inspection* memanfaatkan infrared thermometer atau thermal camera untuk mendeteksi suhu abnormal pada housing final drive. Suhu yang lebih tinggi dari normal dapat mengindikasikan gesekan berlebihan, kekurangan pelumasan, atau kerusakan bearing (Fluke, 2018). Monitoring suhu secara berkala memungkinkan teknisi mengidentifikasi potensi masalah sebelum menyebabkan kerusakan total.
- d. **Oil Leak Test (Floating Seal).** *Oil leak test* dilakukan untuk memastikan floating seal bekerja optimal mencegah kebocoran oli dan masuknya kontaminan. Kebocoran pada seal dapat mengakibatkan berkurangnya pelumasan dan mempercepat keausan gear dan bearing. Pemeriksaan ini penting dilakukan pada lingkungan pertambangan yang penuh debu, lumpur, dan material abrasif.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus pada komponen final drive excavator Komatsu PC200-8 di PT. Antareja Mahada Makmur, Site PT. Multi Harapan Utama, periode 2022–2025. Data yang dianalisis meliputi jumlah kerusakan, total downtime, biaya perbaikan, kehilangan pendapatan rental, dan biaya implementasi PdM. Sumber data berasal dari catatan historis perusahaan serta hasil monitoring kondisi komponen menggunakan empat metode: oil analysis, magnetic plug rating, thermal inspection, dan oil leak test (floating seal). Tahapan penelitian meliputi:

- a. Mengumpulkan data kerusakan final drive sebelum dan sesudah PdM.
- b. Mengklasifikasikan periode menjadi pra-PdM (2022), transisi (2023), implementasi penuh (2024), dan monitoring (2025).
- c. Membandingkan indikator kinerja antarperiode.
- d. Menghitung *cost avoidance*
- e. Mengevaluasi efektivitas PdM berdasarkan penurunan *downtime*, kerugian, dan frekuensi kerusakan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perkembangan Kerusakan Final Drive 2022–2025

Data historis menunjukkan penurunan signifikan jumlah kasus kerusakan final drive Komatsu PC200-8 sejak penerapan *predictive maintenance* (PdM). Pada 2022 (tanpa PdM), tercatat 12 kasus dengan total *downtime* 772,1 jam dan kerugian Rp 518,63 juta. Pada 2023 (fase transisi PdM), jumlah kasus menurun menjadi 4, kerugian turun menjadi Rp 252,05 juta, meskipun *downtime* masih tinggi yaitu 714,6 jam. Implementasi penuh PdM pada 2024 menghasilkan penurunan *downtime* drastis menjadi 96 jam dengan kerugian Rp 45,75 juta. Hingga Juli 2025, tidak tercatat kasus kerusakan *final drive*.

Tabel 1. Perkembangan Kerusakan Final Drive 2022–2025

Tahun	Jumlah Kasus	Total Downtime (jam)	Biaya Perbaikan (Rp)	Kehilangan Pendapatan Rental (Rp)	Total Kerugian (Rp)
2022	12	772,1	310.600.000	208.030.133	518.630.133
2023	4	714,6	59.500.000	192.550.805	252.050.805
2024	5	96,0	19.900.000	25.852.768	45.752.768
2025*	0	0,0	0	0	0

B. Perhitungan Cost Avoidance PdM 2022–2025

Cost avoidance adalah tindakan yang dilakukan untuk mencegah timbulnya biaya di masa depan melalui langkah-langkah pencegahan dan pengendalian, tabel hasil perhitungan *cost avoidance* PdM 2022–2025

Tabel 2. Perhitungan Cost Avoidance PdM 2022–2025

Tahun	Jumlah Kasus	Total Downtime (jam)	Biaya Perbaikan (Rp)	Kehilangan Pendapatan Rental (Rp)	Total Kerugian (Rp)	Biaya Implementasi PdM (Rp)	Cost Avoidance (Rp)
2022	12	772,1	310.600.000	208.030.133	518.630.133	0	-
2023	4	714,6	59.500.000	192.550.805	252.050.805	68.850.000	197.729.328
2024	5	96,0	19.900.000	25.852.768	45.752.768	21.900.000	450.977.365
2025*	0	0,0	0	0	0	6.900.000	511.730

$$\begin{aligned}
 \text{Cost Avoidance} &= \text{Kerugian 2022} - (\text{Kerugian Tahun Berjalan} + \text{Biaya PdM}) \\
 &= \text{Rp. 518.630.133} - (\text{Rp. 518.630.133} + 0) \\
 &= \text{Rp. 0} \\
 \text{Cost Avoidance}_{2023} &= \text{Kerugian 2022} - (\text{Rp. 252.050.805} + \text{Rp. 68.850.000}) \\
 &= \text{Rp. 518.630.133} - (\text{Rp. 320.900.805}) \\
 &= \text{Rp. 197.729.328} \\
 \text{Cost Avoidance}_{2024} &= \text{Kerugian 2022} - (\text{Rp. 45.752.768} + \text{Rp. 21.900.00}) \\
 &= \text{Rp. 518.630.133} - (\text{Rp. 67.652.768}) \\
 &= \text{Rp. 450.977.365}
 \end{aligned}$$

C. Monitoring dalam Predictive Maintenance

Monitoring merupakan komponen krusial dalam penerapan *Predictive Maintenance* (PdM) karena berfungsi sebagai sistem deteksi dini terhadap potensi kerusakan komponen sebelum terjadi kegagalan total. Dengan pemantauan kondisi yang tepat dan berkelanjutan, perusahaan dapat merencanakan perawatan secara optimal, meminimalkan *downtime*, serta mengurangi biaya perbaikan. Pada kasus final drive, metode monitoring yang digunakan meliputi *oil analysis*, *magnetic plug rating*, *thermal inspection*, dan *oil leak test (floating seal)*. Kombinasi metode ini memungkinkan identifikasi tanda-tanda awal keausan, kontaminasi, atau kerusakan sehingga tindakan korektif dapat dilakukan lebih cepat dan tepat sasaran.



Gambar 2. Monitoring dalam Predictive Maintenance



Gambar 3. Monitoring dalam Predictive Maintenance

Penerapan *Predictive Maintenance* (PdM) pada komponen final drive memberikan dampak signifikan terhadap penurunan jumlah kasus kerusakan, total downtime, dan total kerugian. Data menunjukkan bahwa tahun 2022 sebagai baseline tanpa PdM mencatat 12 kasus kerusakan, downtime sebesar 772,1 jam, dan kerugian total sebesar Rp 518.630.133. Kondisi ini menggambarkan tingginya risiko operasional serta potensi kehilangan pendapatan akibat gangguan peralatan. Pada tahun 2023, saat perusahaan mulai memasuki fase transisi PdM, jumlah kasus kerusakan turun menjadi 4 kasus, sedangkan total kerugian berkurang menjadi Rp 252.050.805 atau menurun 51,4% dibandingkan baseline. Walaupun downtime masih tinggi (714,6 jam), penghematan biaya perbaikan dan penurunan kehilangan pendapatan mulai terlihat.

Tahun 2024, penerapan PdM secara penuh menghasilkan dampak yang lebih signifikan. Jumlah kasus kerusakan tetap rendah (5 kasus), downtime menurun drastis menjadi 96 jam (penurunan 87,6% dari baseline), dan kerugian hanya Rp 45.752.768 atau 91,2% lebih rendah dibandingkan 2022. Hingga Juli 2025, tidak ditemukan kasus kerusakan final drive sehingga downtime dan kerugian bernilai nol. Analisis *Cost Avoidance* menunjukkan penghematan biaya sebesar Rp 197.729.328 pada 2023, meningkat menjadi Rp 450.977.365 pada 2024, dan mencapai Rp 511.730.133 pada 2025.

Temuan ini membuktikan bahwa PdM efektif dalam meminimalkan gangguan operasional, menurunkan biaya perbaikan, serta meningkatkan efisiensi penggunaan aset. Penerapan strategi ini secara konsisten memberikan manfaat ekonomi yang signifikan dan mendukung keberlanjutan operasional perusahaan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penerapan *Predictive Maintenance* (PdM) pada komponen final drive terbukti efektif menurunkan jumlah kasus kerusakan, downtime, dan total kerugian secara signifikan. Dibandingkan kondisi tanpa PdM pada 2022, jumlah kasus turun dari 12 menjadi 0 kasus hingga Juli 2025, downtime berkurang 87,6% dari 772,1 jam menjadi nol, dan kerugian menurun 91,2% dari Rp 518.630.133 menjadi nol. Selain itu, *Cost Avoidance* meningkat dari Rp 197.729.328 pada 2023 menjadi Rp 511.730.133 pada 2025, menunjukkan adanya penghematan biaya yang konsisten dan manfaat ekonomi yang melampaui biaya implementasi. Agar efektivitas PdM tetap terjaga, monitoring kondisi komponen seperti *oil analysis*, *magnetic plug rating*, *thermal inspection*, dan *oil leak test* perlu dilakukan secara rutin dan terdokumentasi dengan baik. Perusahaan juga disarankan meningkatkan kompetensi teknisi dalam menganalisis data hasil monitoring dan melakukan evaluasi berkala terhadap biaya implementasi serta hasil penghematan. Pengembangan teknologi monitoring berbasis IoT dan AI dapat menjadi langkah strategis untuk meningkatkan akurasi prediksi, meminimalkan risiko kerusakan, dan memastikan keberlanjutan efisiensi operasional.

DAFTAR REFERENSI

- Al-Najjar, B., & Alsyouf, I. (2003). Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making. *International Journal of Production Economics*, 84(1), 85-100. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(02\)00380-8](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00380-8)
- ASTM International. (2017). *ASTM D5185-18: Standard test method for multielement determination of used and unused lubricating oils and base oils by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES)*. ASTM International.
- Ben-Daya, M., Kumar, U., & Murthy, D. N. P. (2016). *Introduction to maintenance engineering: Modelling, optimization and management*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118926581>
- Bloch, H. P., & Geitner, F. K. (2012). *Machinery failure analysis and troubleshooting: Practical machinery management for process plants* (4th ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386045-3.00004-0>
- Brown, A. (2019). Cost avoidance strategies in heavy equipment maintenance. *International Journal of Engineering Management*, 12(2), 89-102.

- Heng, A., Zhang, S., Tan, A. C. C., & Mathew, J. (2009). Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(3), 724-739. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.06.009>
- ISO. (2016). *ISO 17359: Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines*. International Organization for Standardization.
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483-1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>
- Johnson, R. (2021). Maintenance strategies for heavy equipment: Preventive vs predictive. *Journal of Maintenance Engineering*, 18(4), 56-70.
- Komatsu Ltd. (2010). *Shop manual for Komatsu PC200-8 excavator (SEN00084-10)*.
- Li, W., & He, D. (2012). Rotational machine health monitoring and fault detection using EMD-based acoustic emission feature quantification. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(4), 990-1001. <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2179933>
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-075067531-4/50006-3>
- Peng, Y., Dong, M., & Zuo, M. J. (2010). Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: A review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50, 297-313. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2482-0>
- PT. Antareja Mahada Makmur. *Profil perusahaan*. Diakses pada 4 Februari 2025 dari <https://amm.id/tentang-kami/>
- Sharma, A., Yadava, G. S., & Deshmukh, S. G. (2011). A literature review and future perspectives on maintenance optimization. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(1), 5-25. <https://doi.org/10.1108/13552511111116222>
- Smith, J. (2018). Predictive maintenance in mining industry: A case study. *Journal of Industrial Engineering*, 45(3), 123-135.
- Hilmawan, R., Clark, A. L., & Hermawan, R. (2017). Policy change in Indonesia's coal sector: Domestic market obligation and its impact. *Energy Policy*, 108, 563-573. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.06.015>
- Kumar, R., & Singh, A. (2021). Failure analysis of final drive system in heavy earth moving machinery. *Engineering Failure Analysis*, 124, 105394. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105394>
- Prasetyo, A., & Ardiansyah, H. (2019). Performance evaluation of hydraulic excavators in mining operations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 311(1), 012048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/311/1/012048>
- Putra, D. Y., Nugroho, S., & Yuliani, N. (2022). Reliability analysis of heavy equipment components in mining operations. *Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 14(2), 85-94. <https://doi.org/10.14710/jmet.14.2.85-94>

- Rahman, A., Syahrani, S., & Pratama, B. (2020). Maintenance management of heavy equipment in coal mining industry. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(5), 11247-11255.
- Suryanto, A., & Hidayat, R. (2023). Preventive maintenance strategy for final drive unit in excavators to reduce downtime. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa*, 18(2), 145-156. <https://doi.org/10.33510/jtr.v18i2.145-156>
- Wibowo, H., Setiawan, B., & Susilo, D. (2021). Cost analysis of heavy equipment downtime in Indonesian mining companies. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 35(7), 495-510. <https://doi.org/10.1080/17480930.2021.1882089>
- World Bank. (2023). *Indonesia economic prospects: Navigating coal transition*. The World Bank. <https://www.worldbank.org>
- Zhang, Y., Li, X., & Chen, H. (2020). Condition monitoring and predictive maintenance of construction equipment using IoT and machine learning. *Automation in Construction*, 114, 103182. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103182>