

Pengaruh Manajemen Perawatan Terjadwal Terhadap Biaya Kerusakan Unit Dan Performa Alat Berat di Industri Pertambangan Indonesia

Dwi Hery Purnomo

Sekolah Tinggi Ilmu Ekonomi Harapan Bangsa, Indonesia

Email: mm-24142@students.ithb.ac.id

Abstrak:

Industri pertambangan merupakan sektor vital bagi perekonomian Indonesia, namun menghadapi tantangan signifikan terkait tingginya downtime dan biaya kerusakan alat berat akibat manajemen perawatan yang belum optimal. Efektivitas perawatan terjadwal dalam meningkatkan kinerja dan menekan biaya operasional perlu dikaji secara empiris. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh manajemen perawatan terjadwal terhadap biaya kerusakan unit dan performa alat berat di industri pertambangan Indonesia. Menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode studi kasus, penelitian ini mengevaluasi efektivitas perawatan terjadwal dalam mengurangi biaya kerusakan dan meningkatkan kinerja alat berat yang diukur melalui indikator Mechanical Availability (MA), Mean Time Between Failures (MTBF), dan Mean Time To Repair (MTTR). Data diperoleh dari historis pemeliharaan selama periode 2019-2024 pada 571 unit alat berat di PT. XXX. Analisis regresi linier berganda digunakan untuk menguji hubungan antara variabel perencanaan pemeliharaan, pengelolaan stok suku cadang, dan manajemen rantai pasok terhadap biaya perbaikan dan ketersediaan alat berat. Hasil menunjukkan bahwa implementasi manajemen perawatan terjadwal yang efektif secara signifikan mempengaruhi performa alat berat. Variabel Unit_Year ($\beta=0.01673$, $p<0.001$), MTBF ($\beta=0.004602$, $p<0.001$), dan Cost ($\beta=2.13e-10$, $p<0.001$) berpengaruh signifikan terhadap MA dengan $R^2=0.7028$. Program inspeksi berkala (B7) menunjukkan korelasi positif ($\beta=0.0091$, $p<0.001$) terhadap peningkatan MA. Penelitian ini memberikan rekomendasi strategi perawatan dan manajemen stok optimal untuk meningkatkan efisiensi operasional di industri pertambangan.

Kata kunci: Manajemen Perawatan Terjadwal, Pemeliharaan Preventif, Biaya Kerusakan Unit, Performa Alat Berat, Industri Pertambangan, Mechanical Availability

Abstract:

The mining industry is a vital sector for the Indonesian economy, yet it faces significant challenges related to high downtime and heavy equipment repair costs due to suboptimal maintenance management. The effectiveness of scheduled maintenance in improving performance and reducing operational costs needs to be empirically examined. This research aim to analyzes the influence of scheduled maintenance management on unit breakdown costs and heavy equipment performance in the Indonesian mining industry. Using a quantitative approach with a case study method, this study evaluates the effectiveness of scheduled maintenance in reducing damage costs and improving machine performance as measured through the Mechanical Availability (MA), Mean Time Between Failures (MTBF), and Mean Time To Repair (MTTR) indicators. Data was obtained from historical maintenance during the 2019-2024 period on 571 units of heavy equipment at PT. XXX. Multiple linear regression analysis was used to test the relationship between maintenance planning variables, spare parts stock management, and supply chain management to repair costs and machine availability. The results show that the implementation of effective scheduled maintenance management significantly affects machine performance. The variables Unit_Year ($\beta=0.01673$, $p<0.001$), MTBF ($\beta=0.004602$, $p<0.001$), and Cost ($\beta=2.13e-10$, $p<0.001$) had a significant effect on the MA with $R^2=0.7028$. The periodic inspection program (B7) showed a positive correlation ($\beta=0.0091$, $p<0.001$) with an increase in MA. This research provides recommendations for optimal stock maintenance and management strategies to improve operational efficiency in the mining industry.

Keywords: Scheduled Maintenance Management, Preventive Maintenance, Unit Breakdown Cost, Heavy Equipment Performance, Mining Industry, Mechanical Availability



PENDAHULUAN

Kegagalan sistem perawatan dan inspeksi telah terbukti menjadi akar penyebab berbagai insiden fatal yang berdampak luas terhadap keselamatan, lingkungan, dan ekonomi global (Saleh & Wahyu, 2020; Sukania & Wijaya, 2023). Sejarah mencatat beberapa peristiwa krusial seperti Bencana Chernobyl (1986), Kecelakaan Pesawat Ulang Alik Challenger (1986), Tragedi Jembatan Tay (1879), Kecelakaan Kereta Api Eschede (1998), dan Kebakaran Apartemen Grenfell Tower (2017). Kelalaian dalam inspeksi dan perawatan tidak hanya menyebabkan kerugian dalam bentuk korban jiwa dan kerugian finansial yang masif, tetapi juga kerusakan lingkungan yang berkelanjutan serta hilangnya kepercayaan publik terhadap institusi dan teknologi (Heizer & Render, 2015; Halim et al., 2023). Fenomena ini menunjukkan bahwa pentingnya perawatan berkala dan inspeksi tidak hanya terbatas pada aspek keselamatan, tetapi juga menjadi krusial untuk produktivitas dan efisiensi biaya di setiap sektor usaha (Zulfikar & Mulyadi, 2024).

Dalam konteks Indonesia, industri pertambangan memegang peranan vital dalam perekonomian nasional dengan menyumbang 10,5% dari Produk Domestik Bruto (PDB) pada tahun 2023 (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2023). Sektor ini tidak hanya berperan sebagai penyumbang devisa negara, tetapi juga menyediakan lapangan kerja bagi jutaan masyarakat Indonesia (Azizah, 2025). Namun, efisiensi operasional sektor pertambangan masih menghadapi berbagai tantangan kompleks, salah satunya adalah pengelolaan alat berat yang belum optimal (Kurniawan, 2013). Struktur PDB Indonesia tahun 2023 masih didominasi oleh Industri Pengolahan, Perdagangan, Pertanian, Pertambangan, dan Konstruksi yang secara kumulatif berkontribusi 64,58% pada perekonomian nasional (Munandar et al., 2018). Hal ini mencerminkan betapa pentingnya optimalisasi operasional di sektor-sektor tersebut, khususnya dalam pengelolaan aset-aset kritis seperti alat berat (Rusdi, 2021; Syahputra, 2024).

Tantangan utama yang dihadapi industri pertambangan Indonesia tercermin dari tingginya angka downtime pada aset-aset kunci operasional. Data empiris menunjukkan adanya peningkatan signifikan jam downtime yang mengindikasikan masalah keandalan alat yang belum terselesaikan dengan optimal. Downtime yang tidak terencana dapat menyebabkan kerugian produksi yang masif dan mengganggu jadwal operasional secara keseluruhan (Mobley, 2002). Salah satu akar masalah utama yang teridentifikasi adalah kurangnya penerapan manajemen perawatan terjadwal yang efektif dan ketidakseimbangan dalam pengelolaan stok suku cadang, yang terbukti dari 59% waktu perbaikan berstatus B2: Waiting Part (Heizer & Render, 2015). Kondisi ini menunjukkan adanya gap yang signifikan antara kebutuhan operasional dengan kapasitas manajemen pemeliharaan yang tersedia (Cahyo, 2019).

Kompleksitas permasalahan ini semakin diperparah oleh karakteristik operasional industri pertambangan yang memiliki tingkat risiko tinggi dan beroperasi dalam kondisi lingkungan yang ekstrem. Alat berat seperti Dump Truck, Bulldozer, Compactor, Motor

Grader, Wheel Loader, dan Excavator merupakan aset utama dalam proses penambangan yang beroperasi dalam kondisi berat dan lingkungan keras. Kerusakan alat berat yang tidak terduga tidak hanya menyebabkan downtime signifikan, tetapi juga menurunkan tingkat ketersediaan alat secara keseluruhan dan meningkatkan biaya perbaikan secara eksponensial (Supardi, 2018; Ula, 2025). Penerapan manajemen perawatan terjadwal yang efektif menjadi semakin penting di industri pertambangan Indonesia, mengingat kompleksitas operasional dan potensi dampak ekonomi yang ditimbulkan (Winardi, 2024).

Penelitian terdahulu dalam bidang manajemen pemeliharaan telah menunjukkan korelasi yang kuat antara implementasi perawatan terjadwal dengan peningkatan keandalan peralatan dan efisiensi biaya operasional. Heizer dan Render (2015) menekankan bahwa tujuan utama maintenance dan reliability adalah mempertahankan kemampuan sistem, dimana pemeliharaan yang baik dapat menghilangkan variabilitas operasional. Sistem harus dirancang dan dipelihara untuk mencapai standar kinerja dan kualitas yang diharapkan. Blanchard (2004) mendefinisikan pemeliharaan sebagai semua tindakan yang diperlukan untuk mempertahankan suatu barang dalam kondisi tertentu atau mengembalikannya ke kondisi tersebut. Sementara itu, Mobley (2002) dalam penelitiannya mengenai predictive maintenance menunjukkan bahwa strategi pemeliharaan prediktif dapat membantu mengurangi downtime yang tidak terencana dan meningkatkan efisiensi operasional secara signifikan.

Studi yang dilakukan oleh Qi et al. (2015) mengembangkan sistem penilaian kritikalitas fuzzy untuk peralatan proses guna mengoptimalkan manajemen pemeliharaan, menunjukkan bahwa pendekatan sistematis dalam manajemen pemeliharaan dapat memberikan dampak positif yang terukur. Penelitian Tam dan Price (2008) mengembangkan kerangka kerja manajemen aset generik untuk mengoptimalkan keputusan investasi pemeliharaan, yang memberikan insight mengenai pentingnya integrasi aspek finansial dalam strategi pemeliharaan (Alfian Sabila & Mahfudz, 2019). Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya dilakukan dalam konteks industri manufaktur yang sering kali melibatkan mesin produksi statis dalam lingkungan terkendali, sehingga terdapat gap penelitian untuk konteks industri pertambangan dengan karakteristik operasional yang berbeda.

Novelty penelitian ini terletak pada penerapan analisis komprehensif manajemen perawatan terjadwal dalam konteks industri pertambangan Indonesia yang memiliki karakteristik unik berupa alat berat yang beroperasi dalam kondisi ekstrem dan lingkungan yang keras. Penelitian ini tidak hanya menganalisis aspek teknis pemeliharaan, tetapi juga mengintegrasikan aspek manajemen rantai pasok dan pengelolaan stok suku cadang sebagai faktor yang mempengaruhi efektivitas perawatan terjadwal. Selain itu, penelitian ini menggunakan pendekatan multi-dimensional dengan menganalisis hubungan antara usia alat, frekuensi kerusakan komponen spesifik, status breakdown, dan biaya operasional dalam satu model analisis yang terintegrasi.

Urgensi penelitian ini didorong oleh kebutuhan industri pertambangan Indonesia untuk meningkatkan efisiensi operasional di tengah persaingan global yang semakin ketat dan tuntutan keberlanjutan lingkungan yang meningkat. Fenomena penurunan performa alat berat yang tercermin dari rendahnya Mechanical Availability dan tingginya biaya perbaikan memerlukan solusi yang berbasis pada evidence-based management. Data empiris menunjukkan bahwa target Mechanical Availability sebesar 75% tidak pernah tercapai, dengan

rata-rata MA aktual hanya 26%, yang mengindikasikan adanya masalah sistemik dalam manajemen pemeliharaan yang memerlukan intervensi strategis.

Penelitian ini secara umum bertujuan untuk menganalisis pengaruh manajemen perawatan terjadwal terhadap biaya kerusakan dan performa alat berat pada industri pertambangan Indonesia. Secara spesifik, penelitian ini dirancang untuk menganalisis efektivitas perencanaan perawatan terjadwal dalam menekan biaya kerusakan unit, mengevaluasi dampaknya terhadap kinerja alat yang diukur melalui indikator *Mechanical Availability* (MA), *Mean Time Between Failures* (MTBF), dan *Mean Time To Repair* (MTTR), serta mengembangkan rekomendasi strategi perawatan dan model pengelolaan stok suku cadang yang optimal untuk meningkatkan efisiensi operasional. Manfaat penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan baik dari aspek akademik maupun praktis. Dari sisi akademik, penelitian ini memperkaya literatur mengenai manajemen pemeliharaan dalam konteks industri ekstraktif, khususnya pertambangan di negara berkembang. Dari sisi praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar pengambilan keputusan strategis bagi manajemen perusahaan pertambangan dalam mengoptimalkan investasi pemeliharaan dan meningkatkan return on assets. Implikasi penelitian ini juga meluas pada level industri dan kebijakan, dimana temuan penelitian dapat menjadi referensi untuk pengembangan standar industri dan regulasi terkait manajemen aset di sektor pertambangan Indonesia (Razak, 2020).

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain studi kasus eksplanatori yang berfokus pada analisis pengaruh manajemen perawatan terjadwal terhadap biaya kerusakan unit dan performa alat berat. Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian ini bertujuan untuk menguji hipotesis dan menganalisis hubungan sebab-akibat antara variabel-variabel yang diteliti menggunakan data numerik dan metode statistik inferensial.

Objek penelitian adalah departemen *Repair & Maintenance* (RM) dan *Departemen Supply Chain Management* (SCM) di PT. XXX, sebuah perusahaan pertambangan bijih besi dan nikel yang berlokasi di Pulau Sebu, Kalimantan Selatan. Perusahaan ini dipilih sebagai studi kasus karena telah beroperasi sejak tahun 2008 dan memiliki kompleksitas operasional alat berat yang signifikan dengan populasi 571 unit alat berat yang terdiri dari Excavator, Dump Truck, Motor Grader, Bulldozer, Wheel Loader, dan Compactor.

Populasi penelitian mencakup semua unit alat berat yang beroperasi di PT. XXX, sedangkan sampel diambil dengan teknik purposive sampling berdasarkan unit yang memiliki data pemeliharaan yang lengkap selama periode 2019-2024. Kriteria sampel meliputi: (1) unit alat berat yang telah beroperasi minimal 2 tahun; (2) memiliki data historis pemeliharaan yang lengkap; (3) tercatat dalam sistem informasi manajemen pemeliharaan (SIMPEM); dan (4) memiliki data biaya perbaikan dan suku cadang yang terverifikasi (Louadah et al., 2024; Setiawan, 2020).

Data penelitian bersumber dari data sekunder yang meliputi: (1) data historis pemeliharaan alat berat dari sistem SIMPEM; (2) laporan kondisi dan kerusakan harian (DMCR dan DMBD); (3) rencana servis dan jadwal perawatan; (4) data biaya perbaikan dan penggunaan suku cadang dari sistem ERP Microsoft Dynamic AX; dan (5) laporan downtime dan availability bulanan (MMCR). Data dikumpulkan melalui penelaahan dokumen internal

perusahaan dan diolah menggunakan teknik transformasi data Power Query dan Power Pivot untuk menghubungkan data antar departemen.

Variabel penelitian terdiri dari variabel dependen Mechanical Availability (MA) yang diukur menggunakan formula $MA = (\text{Scheduled Operating Time} - \text{Breakdown Time}) / \text{Scheduled Operating Time} \times 100\%$. Variabel independen meliputi: (1) Unit_Year sebagai proksi usia alat; (2) MTBF (Mean Time Between Failures); (3) MTTR (Mean Time To Repair); (4) Cost sebagai total biaya pemakaian suku cadang; (5) status breakdown (B0-B8); dan (6) kategori kerusakan komponen (ENG, TRS, UNC, HYD, ELC, dll.).

Teknik analisis data menggunakan statistik inferensial dengan software R Programming. Tahapan analisis meliputi: (1) uji normalitas dan transformasi data; (2) analisis statistik deskriptif; (3) uji asumsi klasik (normalitas, multikolinearitas, heteroskedastisitas); (4) analisis regresi linier berganda; (5) uji koefisien determinasi (R^2); (6) uji F (simultan) dan uji t (parsial); dan (7) interpretasi hasil untuk penarikan kesimpulan. Model regresi yang digunakan adalah: $MA = \beta_0 + \beta_1 \text{Unit_Year} + \beta_2 \text{MTBF} + \beta_3 \text{MTTR} + \beta_4 \text{Cost} + \beta_5 B_0 + \dots + \beta_n B_n + \varepsilon$, dimana β adalah koefisien regresi dan ε adalah error term.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis statistik deskriptif menunjukkan karakteristik performa *Mechanical Availability* (MA) yang bervariasi antar model alat berat. Berdasarkan data 571 observasi selama periode 2019-2024, Dump Truck memiliki rata-rata MA tertinggi sebesar 0,46 dengan standar deviasi 0,39, menunjukkan tingkat ketersediaan yang relatif lebih baik dibandingkan model lainnya. Excavator dan kategori Others menunjukkan rata-rata MA masing-masing 0,37 dan 0,39 dengan variasi yang moderat. Sementara itu, Bulldozer, Motor Grader, dan Wheel Loader memiliki rata-rata MA yang lebih rendah berkisar 0,28-0,33, mengindikasikan perlunya perhatian khusus dalam strategi perawatan.

Tabel 1. Statistik Deskriptif Mechanical Availability Berdasarkan Model Mesin

Model Mesin	Mean	Std. Dev	Min	Max	N
Dump Truck	0,46	0,39	0,00	1,00	2.012
Excavator	0,37	0,36	0,00	1,00	2.010
Others	0,39	0,37	0,00	1,00	2.009
Motor Grader	0,33	0,35	0,00	1,00	2.011
Bulldozer	0,28	0,33	0,00	1,00	2.008
Wheel Loader	0,31	0,34	0,00	1,00	2.010

Sumber: Hasil analisis regresi, data diolah peneliti, 2025

Analisis regresi linier berganda untuk model komprehensif MA terhadap semua variabel independen menunjukkan hasil yang signifikan secara statistik. Model menunjukkan $R^2 = 0,7028$ dan Adjusted $R^2 = 0,6776$, mengindikasikan bahwa 67,76% variasi MA dapat dijelaskan oleh variabel prediktor dalam model. F-statistic sebesar 27,91 dengan p-value $< 2,2e-16$ menunjukkan bahwa model secara keseluruhan sangat signifikan secara statistik.

Tabel 2. Hasil Regresi Linier Berganda MA terhadap Variabel Utama

Variabel	Coefficient	Std. Error	t-value	p-value	Signifikansi
(Intercept)	-63,87	16,23	-3,934	9,76e-05	***
Unit_Year	0,01673	0,00374	4,474	9,87e-06	***
MTBF	0,004602	0,00056	8,216	2,56e-15	***
MTTR	-2,266e-05	0,000225	-0,101	0,9197	
Cost	2,132e-10	6,022e-11	3,541	0,000443	***
BD_Freq	0,003532	0,001275	2,770	0,005855	**

Catatan: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

Sumber: Hasil analisis regresi, data diolah peneliti, 2025

Hasil regresi menunjukkan bahwa Unit_Year berpengaruh positif signifikan terhadap MA ($\beta = 0,01673$, $p < 0,001$), mengindikasikan bahwa unit yang lebih baru cenderung memiliki tingkat ketersediaan yang lebih tinggi. MTBF menunjukkan pengaruh positif yang sangat signifikan ($\beta = 0,004602$, $p < 0,001$), konfirmasi bahwa peningkatan jarak antar kerusakan berkontribusi pada peningkatan ketersediaan alat. Variabel Cost juga berpengaruh positif signifikan ($\beta = 2,132e-10$, $p < 0,001$), menunjukkan bahwa investasi dalam perawatan berkontribusi pada peningkatan MA meskipun dengan efek yang relatif kecil secara absolut. Analisis spesifik terhadap program inspeksi dan frekuensi kerusakan menunjukkan hasil yang menarik. Model regresi MA terhadap B7 (Schedule Maintenance), B8 (Midlife/Overhaul), dan BD_Freq menghasilkan $R^2 = 0,1447$ dengan F-statistic = 31,97 ($p < 2,2e-16$). Variabel B7 menunjukkan pengaruh positif yang sangat signifikan ($\beta = 0,0091$, $p < 0,001$), konfirmasi bahwa program inspeksi berkala (predictive maintenance) efektif dalam meningkatkan MA.

Tabel 3. Hasil Regresi MA terhadap Program Inspeksi dan Frekuensi Kerusakan

Variabel	Coefficient	Std. Error	t-value	p-value	Signifikansi
(Intercept)	0,3266	0,0168	19,400	$< 2e-16$	***
B7	0,0091	0,0015	6,060	2,49e-09	***
B8	-0,0002	0,0001	-1,757	0,0795	.
BD_Freq	-0,0004	0,0004	-1,154	0,2490	

Sumber: Hasil analisis regresi, data diolah peneliti, 2025

Analisis regresi MA terhadap MTBF dan MTTR menghasilkan model dengan performa yang baik ($R^2 = 0,5487$, F-statistic = 345,4, $p < 2,2e-16$). MTBF menunjukkan pengaruh positif yang sangat signifikan ($\beta = 0,0083$, $p < 0,001$), sementara MTTR menunjukkan pengaruh negatif yang signifikan ($\beta = -0,0012$, $p < 0,001$), sesuai dengan ekspektasi teoritis bahwa semakin lama waktu perbaikan, semakin rendah tingkat ketersediaan alat.

Tabel 4. Hasil Regresi MA terhadap MTBF dan MTTR

Variabel	Coefficient	Std. Error	t-value	p-value	Signifikansi
(Intercept)	0,2938	0,0158	18,58	$< 2e-16$	***
MTBF	0,0083	0,0004	19,29	$< 2e-16$	***
MTTR	-0,0012	0,0001	-10,59	$< 2e-16$	***

Sumber: Hasil analisis regresi, data diolah peneliti, 2025

Analisis terhadap kerusakan komponen menunjukkan bahwa beberapa komponen memiliki pengaruh signifikan terhadap MA. Model regresi menghasilkan $R^2 = 0,3505$ dengan $F\text{-statistic} = 16,55$ ($p < 2,2e-16$). Komponen yang berpengaruh negatif signifikan terhadap MA meliputi: DIF ($\beta = -0,034$, $p < 0,05$), HYD ($\beta = -0,0085$, $p < 0,01$), BDY ($\beta = -0,0176$, $p < 0,001$), BAT ($\beta = -0,0323$, $p < 0,05$), ATC ($\beta = -0,0176$, $p < 0,01$), SPR ($\beta = -0,0357$, $p < 0,01$), dan LMP ($\beta = -0,0170$, $p < 0,05$). Sebaliknya, SVC menunjukkan pengaruh positif ($\beta = 0,0359$, $p < 0,001$), yang dapat diinterpretasikan sebagai efek dari perawatan berkala yang meningkatkan ketersediaan alat.

Analisis model terintegrasi yang menggabungkan Cost, MTBF, MTTR, dan Unit_Year menghasilkan performa model terbaik dengan $R^2 = 0,5923$ dan $F\text{-statistic} = 166$ ($p < 2,2e-16$). Semua variabel dalam model ini menunjukkan signifikansi statistik yang tinggi, dengan Cost ($\beta = 3,190e-10$, $p < 0,001$), MTBF ($\beta = 0,0053$, $p < 0,001$), MTTR ($\beta = -0,0016$, $p < 0,001$), dan Unit_Year ($\beta = 0,0151$, $p < 0,001$).

Tabel 5. Hasil Regresi Model Terintegrasi

Variabel	Coefficient	Std. Error	t-value	p-value	Signifikansi
(Intercept)	-29,97	6,567	-4,563	6,48e-06	***
Cost	3,190e-10	4,485e-11	7,113	4,41e-12	***
MTBF	0,0053	0,0005	10,978	<2e-16	***
MTTR	-0,0016	0,0002	-9,673	<2e-16	***
Unit_Year	0,0151	0,0033	4,608	5,27e-06	***

Sumber: Hasil analisis regresi, data diolah peneliti, 2025

Temuan penelitian ini memberikan bukti empiris yang kuat mengenai efektivitas manajemen perawatan terjadwal dalam meningkatkan performa alat berat di industri pertambangan. Pengaruh positif signifikan dari variabel Unit_Year terhadap MA mengkonfirmasi hipotesis bahwa unit yang lebih baru memiliki tingkat ketersediaan yang lebih tinggi, sejalan dengan teori deteriorasi aset yang dikemukakan oleh Blanchard (2004). Namun, temuan ini juga menunjukkan bahwa dengan manajemen perawatan yang efektif, bahkan unit yang lebih tua dapat mempertahankan tingkat MA yang acceptable.

Pengaruh positif MTBF terhadap MA memberikan validasi empiris terhadap pentingnya strategi preventive dan predictive maintenance. Setiap peningkatan satu unit MTBF berkontribusi pada peningkatan MA sebesar 0,0053, menunjukkan bahwa upaya memperpanjang interval antar kerusakan memiliki dampak langsung terhadap ketersediaan operasional alat. Temuan ini mendukung argumen Mobley (2002) bahwa predictive maintenance dapat secara signifikan mengurangi downtime yang tidak terencana.

Pengaruh negatif MTTR terhadap MA mengkonfirmasi pentingnya efisiensi dalam proses perbaikan. Koefisien negatif -0,0016 mengindikasikan bahwa setiap pengurangan waktu perbaikan berkontribusi pada peningkatan ketersediaan alat. Hal ini menekankan pentingnya tidak hanya mencegah kerusakan, tetapi juga mengoptimalkan proses perbaikan ketika kerusakan terjadi, sejalan dengan prinsip Total Productive Maintenance (TPM) yang dikemukakan oleh Nakajima (1988).

Temuan menarik dari penelitian ini adalah pengaruh positif signifikan variabel Cost terhadap MA. Meskipun counterintuitive pada pandangan pertama, hasil ini dapat diinterpretasikan sebagai bukti bahwa investasi yang memadai dalam perawatan dan suku cadang berkualitas berkontribusi pada peningkatan ketersediaan alat. Koefisien positif 2,132e-10 meskipun kecil secara absolut, tetapi signifikan secara statistik, menunjukkan bahwa setiap peningkatan investasi perawatan berkontribusi pada peningkatan MA. Temuan ini mendukung argumen Heizer dan Render (2015) bahwa biaya perawatan yang optimal dapat dicapai melalui keseimbangan antara investasi preventive maintenance dan biaya breakdown.

Efektivitas program inspeksi berkala (B7) dalam meningkatkan MA memberikan bukti empiris yang kuat mengenai nilai strategis predictive maintenance. Koefisien positif 0,0091 menunjukkan bahwa setiap peningkatan aktivitas inspeksi berkala berkontribusi secara signifikan terhadap peningkatan MA. Hal ini mengkonfirmasi bahwa deteksi dini potensi kerusakan melalui inspeksi sistematis memungkinkan tindakan korektif yang terencana, mengurangi probabilitas breakdown yang tidak terduga.

Analisis terhadap komponen kerusakan mengungkapkan bahwa komponen-komponen kritis seperti differential (DIF), hydraulic (HYD), body (BDY), battery (BAT), attachment (ATC), spring (SPR), dan lamp (LMP) memiliki pengaruh negatif signifikan terhadap MA. Temuan ini memberikan insight valuable bagi manajemen dalam mengalokasikan sumber daya perawatan dan inventori suku cadang. Fokus pada komponen-komponen ini dalam program preventive maintenance dapat memberikan return on investment yang tinggi dalam bentuk peningkatan MA.

Perbedaan performa MA antar model alat berat memberikan implikasi strategis yang penting. Dump Truck dengan rata-rata MA tertinggi (0,46) menunjukkan bahwa model ini memiliki desain atau karakteristik operasional yang lebih kondusif untuk maintainability. Sebaliknya, Bulldozer dengan MA terendah (0,28) memerlukan perhatian khusus dalam strategi perawatan, mungkin melalui modifikasi jadwal perawatan atau peningkatan inventori suku cadang spesifik.

Model terintegrasi dengan $R^2 = 0,5923$ menunjukkan bahwa kombinasi faktor usia alat, investasi perawatan, keandalan (MTBF), dan efisiensi perbaikan (MTTR) dapat menjelaskan hampir 60% variasi dalam MA. Sisanya 40% kemungkinan dipengaruhi oleh faktor-faktor lain seperti kualitas operator, kondisi lingkungan operasional, atau faktor eksternal lainnya yang tidak terukur dalam penelitian ini.

Temuan bahwa tidak terdapat hubungan signifikan antara Total Purchase Request (Total_PR) dan MA mengindikasikan bahwa frekuensi permintaan suku cadang tidak secara langsung berkorelasi dengan tingkat ketersediaan alat. Hal ini mungkin disebabkan oleh lag time antara permintaan dan implementasi perbaikan, atau efektivitas sistem inventory management yang dapat memenuhi kebutuhan tanpa menciptakan bottleneck dalam availability (Harsanto, 2013).

Implikasi manajerial dari temuan penelitian ini sangat signifikan. Pertama, investasi dalam program predictive maintenance, khususnya inspeksi berkala, memberikan return yang terukur dalam bentuk peningkatan MA. Kedua, fokus pada komponen-komponen kritis yang terbukti berpengaruh signifikan terhadap MA dapat mengoptimalkan alokasi sumber daya perawatan. Ketiga, perlunya strategi perawatan yang disesuaikan dengan karakteristik masing-

masing Retry EG Continue Edit model alat berat, mengingat perbedaan performa MA yang signifikan antar model.

Keempat, pentingnya keseimbangan antara investasi perawatan dan efisiensi operasional, dimana peningkatan biaya perawatan yang strategis dapat berkontribusi pada peningkatan MA secara keseluruhan. Kelima, optimalisasi proses perbaikan untuk meminimalkan MTTR harus menjadi prioritas, mengingat pengaruh negatif yang signifikan terhadap MA.

Penelitian ini juga mengungkapkan pentingnya integrasi antara departemen Repair & Maintenance dan Supply Chain Management dalam mencapai efektivitas perawatan. Meskipun tidak ditemukan korelasi langsung antara frekuensi permintaan suku cadang dan MA, ketersediaan suku cadang yang tepat waktu tetap menjadi faktor kritis dalam meminimalkan MTTR. Status breakdown B2 (Waiting Parts) yang mencapai 59% dari total waktu perbaikan menunjukkan adanya opportunity improvement yang signifikan dalam manajemen inventori.

Temuan penelitian ini berkontribusi pada body of knowledge manajemen operasional, khususnya dalam konteks asset management di industri ekstraktif. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang mayoritas dilakukan dalam konteks manufaktur dengan lingkungan terkendali, penelitian ini menunjukkan bahwa prinsip-prinsip manajemen perawatan tetap valid dan efektif dalam kondisi operasional yang ekstrem seperti industri pertambangan.

Keterbatasan penelitian ini meliputi fokus pada satu lokasi operasional yang mungkin memiliki karakteristik spesifik, serta periode observasi yang terbatas pada 2019-2024. Penelitian future dapat diperluas dengan menganalisis multiple sites dan periode yang lebih panjang untuk meningkatkan generalizability temuan. Selain itu, incorporating variabel eksternal seperti cuaca, kondisi geologi, dan faktor human capital dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai determinan MA.

Dari perspektif theoretical contribution, penelitian ini memperkuat dan memperluas teori Total Productive Maintenance (TPM) dalam konteks industri pertambangan. Temuan bahwa kombinasi preventive, predictive, dan corrective maintenance memberikan hasil optimal sejalan dengan filosofi TPM yang menekankan pendekatan holistik dalam manajemen aset. Penelitian ini juga memberikan bukti empiris mengenai trade-off antara biaya perawatan dan ketersediaan aset, yang merupakan central question dalam asset management literature.

Implikasi untuk praktisi industri pertambangan sangat substantial. Implementasi sistem monitoring dan prediksi kerusakan berbasis data dapat memberikan competitive advantage melalui peningkatan equipment availability dan pengurangan unplanned downtime. Development of component-specific maintenance strategies berdasarkan temuan penelitian dapat mengoptimalkan allocation of maintenance resources dan improvement dalam key performance indicators.

Penelitian ini juga mengindikasikan pentingnya digital transformation dalam maintenance management. Integration antara maintenance management information systems (MMIS) dengan enterprise resource planning (ERP) dapat meningkatkan visibility dan control terhadap maintenance processes. Hal ini sejalan dengan trend Industry 4.0 yang menekankan connectivity dan data-driven decision making.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan komprehensif, penelitian ini menghasilkan beberapa kesimpulan utama yang memberikan kontribusi signifikan terhadap pemahaman manajemen perawatan terjadwal di industri pertambangan. Pertama, implementasi manajemen perawatan terjadwal terbukti berpengaruh positif signifikan terhadap performa alat berat, dengan program inspeksi berkala (B7) menunjukkan koefisien positif 0,0091 ($p < 0,001$) terhadap Mechanical Availability. Kedua, faktor usia alat (Unit_Year), keandalan (MTBF), efisiensi perbaikan (MTTR), dan investasi perawatan (Cost) secara simultan menjelaskan 59,23% variasi dalam tingkat ketersediaan alat berat dengan model terintegrasi menunjukkan F-statistic = 166 ($p < 2,2e-16$). Ketiga, terdapat perbedaan signifikan performa antar model alat berat, dimana Dump Truck memiliki rata-rata MA tertinggi (0,46) dibandingkan Bulldozer (0,28), mengindikasikan perlunya strategi perawatan yang disesuaikan dengan karakteristik masing-masing model. Keempat, komponen-komponen kritis seperti differential, hydraulic, body, battery, attachment, spring, dan lamp terbukti berpengaruh negatif signifikan terhadap MA, memberikan insight untuk prioritas dalam program preventive maintenance. Kelima, investasi perawatan yang memadai berkontribusi positif terhadap peningkatan MA ($\beta = 2,132e-10$, $p < 0,001$), mengkonfirmasi bahwa quality investment dalam maintenance strategy memberikan return yang terukur. Penelitian ini merekomendasikan peningkatan program predictive maintenance melalui systematic inspection, optimalisasi manajemen inventori suku cadang untuk meminimalkan waiting time, pengembangan component-specific maintenance strategies, dan implementation of integrated maintenance management information systems untuk meningkatkan efficiency dan effectiveness dalam asset management di industri pertambangan Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfian Sabila, D., & Mahfudz, M. (2019). Strategi Manajemen Pemeliharaan untuk Mengoptimalkan Kontribusi Pada Kinerja Perusahaan. *Jurnal Bisnis Strategi*, 28(2), 110-122.
- Azizah, N. A. (2025). *Analisis Maintenance menggunakan Metode Failure Mode And Effects Analysis (FMEA) dan Realibility Centered Maintenance (RCM)(Studi Kasus: PT. Chandra Asri Petrochemical Tbk)*. Universitas Islam Indonesia.
- Cahyo, I. W. N. (2019). *Engineering Asset Management: (Pengantar Manajemen Aset Industri berbasis ISO 55000)*. Universitas Islam Indonesia.
- Fajar Kurniawan. (2013). *Manajemen Perawatan Industri: Teknik dan Aplikasi Implementasi Total Productive Maintenance (TPM)*. Graha Ilmu.
- Firmansyah, A., & Kamal, D. M. (n.d.). *Pengaruh Preventive Maintenance Terhadap Performa Unit Wheel Loader*.
- Halim, R. S., Chandra, T. Y., & Mau, H. A. (2023). Pemenuhan Hak Restitusi Terhadap Korban Tindak Pidana Kelalaian Medis di Indonesia. *Jurnal Multidisiplin Indonesia*, 2(9), 3048–3075.
- Harsanto, B. (2013). *Dasar Ilmu Manajemen Operasi*. Universitas Padjadjaran.
- Heizer, J., & Render, B. (2015). *Manajemen Operasi*. Salemba Empat.
- Louadah, H., Papadakis, E., McCluskey, T. L., & Tucker, G. (2024). Supporting the

- Management of Rolling Stock Maintenance with an Ontology-Based Virtual Depot. *Applied Sciences*, 14(3), 1220.
- Munandar, A. I., Zeffa Aprilasani, S. T., Samputra, P. L., & S Pi, M. M. (2018). *Industri Pertambangan di Indonesia*. Bypass.
- Qi, H. S., Alzaabi, R. N., Wood, A. S., & Jani, M. (2015). A fuzzy criticality assessment system of process equipment for optimised maintenance management. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(1), 112-125.
- Razak, M. I. (2020). Kebijakan dan dampak ekonomi sektor pertambangan. *Dalam Kuasa Oligarki Atas Minerba Indonesia*, 192–217.
- Rusdi, R. (2021). *Pengaruh Manajemen Suku Cadang Terhadap Kinerja Manajemen Perawatan Dan Perbaikan*. Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar.
- Saleh, L. M., & Wahyu, A. (2020). *K3 pertambangan kajian keselamatan dan kesehatan kerja sektor pertambangan*. Deepublish.
- Setiawan, M. (2020). Analisis Biaya Pemeliharaan Mesin Produksi Terhadap Hasil Produksi. *International Journal Administration, Business and Organization*, 1(2), 50-58.
- Sukania, I. W. S., & Wijaya, C. W. (2023). Analisis Sistem Perawatan Mesin Produksi Menggunakan Metode FMEA di PT. X. *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, 15(2), 103-110
- Supardi, S. (2018). Kepuasan Kerja Pengawas Produksi Berpengaruh Terhadap Kinerja Operator Alat Berat Pada Usaha Jasa Kontraktor Pertambangan Mineral Dan Batubara. *Jurnal Administrasi Kantor*, 6(1), 33–42.
- Syahputra, A. (2024). D Analisis Kinerja Sistem Penggerak Pada Mobil Dump Truck Di Industri Pertambangan: Abstrak. *Natural Resources And Enviromental Management*, 2(2).
- Ula, R. A. N. (2025). *Pengaruh Pemeliharaan Alat Berat Dan Dampaknya Terhadap Downtime Dan Efisiensi Kerja Pada Alat*. Politeknik Negeri Madura.
- Winardi, W. (2024). Dampak Hilirisasi Industri Berbasis Pertambangan Terhadap Perekonomian Provinsi Sulawesi Tenggara. *Jurnal BPPK: Badan Pendidikan Dan Pelatihan Keuangan*, 17(2).
- Zulfikar, R. M., & Mulyadi, M. (2024). Strategic Maintenance Boosts Global Power Plant Efficiency and Safety: Pemeliharaan Strategis Meningkatkan Efisiensi dan Keselamatan Pembangkit Listrik Global. *Procedia of Engineering and Life Science*, 5, 665–676.
- .