

Integrasi Analisis Reliability dan Availability dalam Penentuan Interval Perawatan Optimal Excavator: Studi Kasus Unit PC200 pada Tambang Batu Bara

Faisal Rahman^{1*}, Firda Herlina², Ice Trianiza³, Saifullah Arief⁴

^{1*,2,3,4}Universitas Islam Kalimantan Muhammad Arsyad Al Banjari, Banjarmasin, Indonesia

*Email: faisalrahmantp@gmail.com

Abstract

Maintenance is a critical factor in ensuring equipment reliability and availability, particularly for heavy equipment operating under intensive conditions. This study aims to optimize the maintenance interval of an excavator unit by integrating time-dependent reliability analysis with operational availability to balance failure risk reduction and availability maximization. Historical time between failures (TBF) and time to repair (TTR) data were collected from a PC200 excavator operating in a coal mine from January 2024 to June 2025. The analysis began with a Pareto diagram to identify critical systems, followed by failure mode and effects analysis (FMEA) to prioritize maintenance actions. TBF and TTR data were modeled using Normal, Lognormal, Weibull, and Exponential distributions and evaluated using the Anderson–Darling goodness-of-fit test, which indicated that both datasets follow a Lognormal distribution. The selected distribution parameters were used to estimate mean time between failures (MTBF), mean time to repair (MTTR), the reliability function $R(t)$, and availability. The results show an increase in availability from 96.15% to 96.59% and a reduction in MTTR from 11.21 hours to 9.92 hours. Further analysis yields an optimal maintenance interval of 230–245 hours, with reliability above 90% and availability approximately 96%. The novelty of this study lies in integrating probabilistic reliability modeling with availability analysis to quantitatively optimize maintenance intervals.

Keywords: Availability, reliability, optimal maintenance interval, lognormal distribution, excavator

Abstrak

Pemeliharaan merupakan faktor penting dalam memastikan keandalan dan ketersediaan peralatan, khususnya untuk peralatan berat yang beroperasi dalam kondisi intensif. Studi ini bertujuan untuk mengoptimalkan interval pemeliharaan unit excavator dengan mengintegrasikan analisis keandalan yang bergantung pada waktu dengan ketersediaan operasional untuk menyeimbangkan pengurangan risiko kegagalan dan maksimalisasi ketersediaan. Data historis *time between failures* (TBF) dan *time to repair* (TTR) dikumpulkan dari excavator PC200 yang beroperasi di tambang batubara dari Januari 2024 hingga Juni 2025. Analisis dimulai dengan diagram Pareto untuk mengidentifikasi sistem kritis, diikuti oleh *failure mode and effects analysis* (FMEA) untuk memprioritaskan tindakan pemeliharaan. Data TBF dan TTR dimodelkan menggunakan distribusi Normal, Lognormal, Weibull, dan Ekspensial dan dievaluasi menggunakan uji kecocokan Anderson–Darling, yang menunjukkan bahwa kedua dataset mengikuti distribusi Lognormal. Parameter distribusi yang dipilih digunakan untuk memperkirakan *mean time between failures* (MTBF), *mean time to repair* (MTTR), fungsi keandalan $R(t)$, dan ketersediaan. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan ketersediaan dari 96,15% menjadi 96,59% dan penurunan MTTR dari 11,21 jam menjadi 9,92 jam. Analisis lebih lanjut menghasilkan interval perawatan optimal sebesar 230–245 jam, di mana keandalan tetap di atas 90% dan ketersediaan sekitar 96%. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengintegrasian pemodelan keandalan probabilistik dengan analisis ketersediaan untuk mengoptimalkan interval perawatan secara kuantitatif.

Kata kunci: Availability, reliability, optimal maintenance interval, lognormal distribution, excavator

1. Pendahuluan

Perawatan mesin yang efektif merupakan faktor krusial dalam menjaga keandalan, ketersediaan, dan kemudahan perawatan peralatan produksi [1], [2]. Kegagalan mesin tidak hanya mengurangi produktivitas tetapi juga berpotensi meningkatkan biaya operasional, memperpanjang waktu henti, dan menimbulkan risiko keselamatan [3]. Oleh karena itu, berbagai pendekatan manajemen perawatan telah dikembangkan, salah satunya adalah *reliability-centred maintenance* (RCM) [4], yang bertujuan untuk mengidentifikasi mode kegagalan kritis, menganalisis dampaknya, dan merancang strategi perawatan yang tepat untuk meminimalkan risiko dan kerugian [5], [6].

Beberapa penelitian di berbagai sektor industri telah menerapkan metode RCM dan turunannya. Fayad dkk. (2024) mempelajari mesin *punch hydraulic* [7] dan merekomendasikan strategi *condition directed* (CD) dan *failure finding* (FF) untuk mengurangi waktu henti. Azhari dkk. (2024) menganalisis sistem permesinan kapal dan mengklasifikasikan komponen kapal ke dalam kategori *time directed* (TD), CD, dan FF, tetapi tidak menguraikan perhitungan *risk priority number* (RPN) [8].

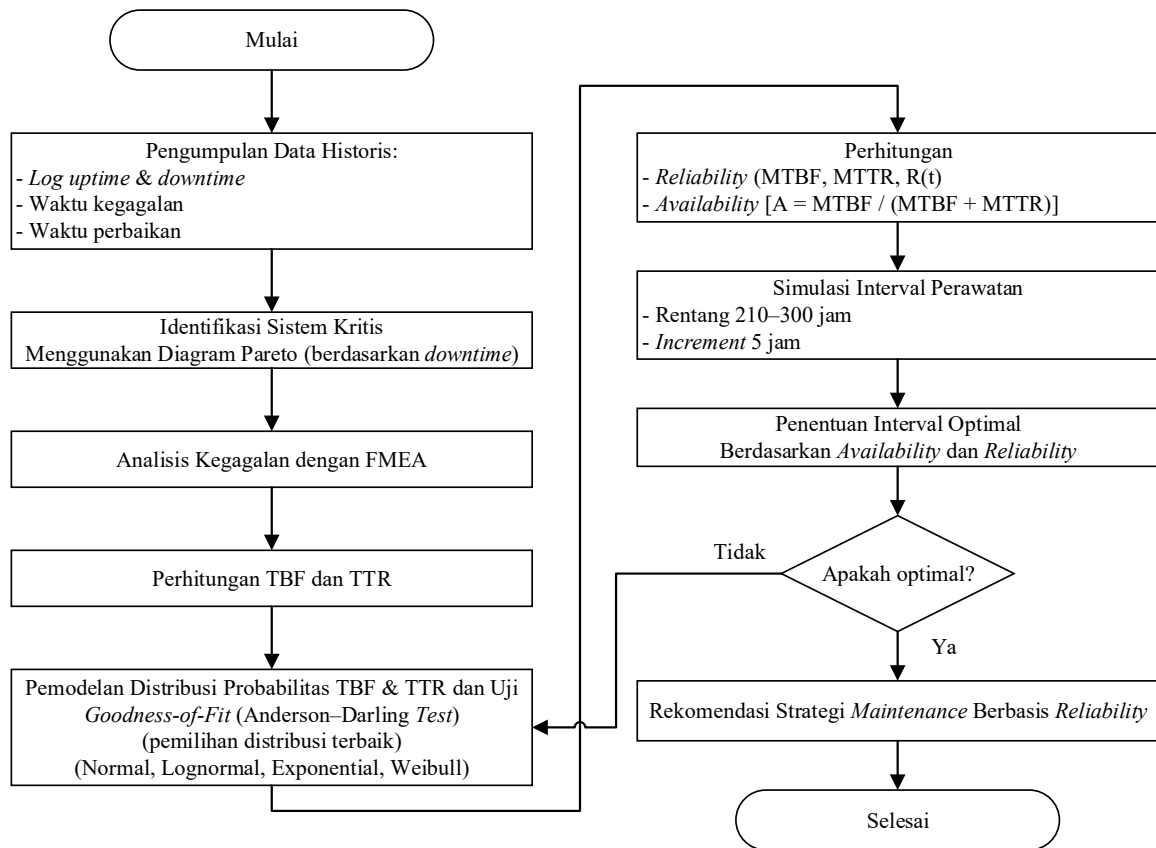
Di sektor pengolahan minyak sawit, Siagian dkk. (2024) memfokuskan studi pada mesin press ulir, yang memiliki tingkat kegagalan tertinggi (39,07% dari total kegagalan) dan menyarankan strategi perawatan preventif untuk meningkatkan keandalan [9]. Saputra dkk. (2024) menggabungkan RCM dengan penggantian spesifik usia pada komponen mesin bubut dan menentukan interval penggantian optimal berdasarkan *mean time between failures* (MTBF) dan *mean time to repair* (MTTR) [10]. Metode *failure mode, effect, and criticality analysis* (FMECA) juga digunakan oleh Prayoga & Yazirin (2024), penerapannya pada mesin cetak flekso, dan merekomendasikan perbaikan pada program perawatan preventif [11]. Haerudin dkk. (2025) menerapkan RCM pada mesin airjet loom, mengidentifikasi 16 mode kegagalan, dengan komponen Kamran sebagai titik kritis [12].

Tinjauan beberapa penelitian di atas mengungkapkan bahwa metode RCM, FMEA, dan FMECA telah banyak digunakan di berbagai industri dan terbukti efektif dalam identifikasi kegagalan serta klasifikasi strategi pemeliharaan. Namun penelitian-penelitian di atas belum secara mendalam mengaitkan hasil analisis keandalan dengan prediksi peningkatan *availability* menggunakan pemodelan distribusi probabilitas. Padahal, pemilihan model distribusi *time between failure* (TBF) dan *time to repair* (TTR) yang tepat sangat memengaruhi akurasi estimasi *mean time between failures* (MTBF), *mean time to repair* (MTTR) dan akhirnya nilai *availability*.

Berdasarkan celah penelitian tersebut, studi ini bertujuan untuk menganalisis dan mengoptimalkan *availability* unit excavator yang memiliki intensitas kerja tinggi dan merupakan *critical asset* di area kerja tambang batu bara dengan mempertimbangkan aspek *reliability* menggunakan distribusi probabilitas terpilih yaitu Normal, Lognormal, Weibull, dan Eksponensial pada data historis TBF dan TTR. Analisis ini akan mencakup pemilihan distribusi terbaik melalui *goodness-of-fit test* (Anderson–Darling) dan perhitungan parameter *reliability*, estimasi MTBF dan MTTR, serta simulasi skenario interval pemeliharaan yang mampu memaksimalkan *availability* excavator. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi praktis dalam perencanaan perawatan berbasis *reliability* untuk meningkatkan kinerja operasional alat berat di lapangan.

2. Metoda Penelitian

Penelitian ini merupakan studi kuantitatif dengan pendekatan *reliability engineering* untuk mengoptimalkan *availability* unit excavator melalui pemodelan *reliability* berbasis distribusi probabilitas. Penelitian dilakukan pada unit excavator di area pertambangan batu bara Kalimantan Selatan, Indonesia, dengan asumsi kondisi operasi stabil, lingkungan tambang terbuka, dan pola kerja hanya satu *shift* (*day shift*). Berikut alur penelitian dalam bentuk *flowchart* pada Gambar 1:



Gambar 1. Flowchart penelitian

Berdasarkan *flowchart* data yang dianalisis terdiri dari 24 *failure events* yang diperoleh dari catatan historis perawatan. Sistem kritis diidentifikasi menggunakan diagram Pareto berdasarkan kontribusi downtime dan dianalisis lebih lanjut menggunakan metode FMEA. Data TBF dihitung sebagai selang waktu operasi antar dua kejadian kegagalan berturut-turut, sedangkan TTR dihitung sebagai durasi perbaikan sejak kegagalan terjadi hingga unit kembali beroperasi normal. Pemodelan distribusi probabilitas TBF dan TTR dilakukan menggunakan Minitab 18 [13] dengan kandidat distribusi Normal, Lognormal, Weibull, dan Eksponensial, serta pemilihan distribusi terbaik berdasarkan uji *goodness-of-fit* Anderson–Darling karena lebih sensitif terhadap penyimpangan pada ekor distribusi dibandingkan Kolmogorov–Smirnov. Berdasarkan data TBF dan TTR, nilai MTBF dan MTTR dihitung sebagai nilai rata-rata, yaitu total waktu TBF dan total waktu TTR masing-masing dibagi dengan jumlah kejadian kegagalan. Parameter distribusi terpilih selanjutnya digunakan untuk menghitung fungsi *reliability* $R(t)$ serta mensimulasikan interval

perawatan menggunakan *Microsoft Excel*, pada rentang 210–300 jam dengan *increment* 5 jam untuk memperoleh interval perawatan optimal. Hasil akhir penelitian berupa rekomendasi strategi perawatan berbasis *reliability* untuk mencari nilai optimal *availability* excavator, yang dapat diterapkan langsung dalam program manajemen perawatan. Studi ini terbatas pada analisis *reliability* dan *availability* dan tidak mencakup optimasi biaya pemeliharaan.

3. Hasil Dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan hasil analisis data, termasuk identifikasi sistem kritis, pemodelan TBF dan TTR. Perhitungan parameter keandalan, dan evaluasi *availability* sebelum dan sesudah optimasi interval perawatan. Hasil analisis kemudian dibahas secara komprehensif, menghubungkannya dengan teori *reliability engineering* dan temuan penelitian sebelumnya, sehingga memberikan gambaran yang jelas tentang upaya perbaikan kinerja operasional unit excavator.

3.1. Data Penelitian

Berikut adalah hasil pengambilan dan pengolahan data TBF dan TTR untuk unit excavator PC 200 tahun pabrikan 2015 pada salah satu perusahaan pertambangan batu bara di

Kalimantan Selatan, berdasarkan data bahwa excavator beroperasi 12 jam/hari (06.00–18.00) tanpa hari libur, pengambilan data historikal yaitu periode Jan 2024–Jun 2025 (18 bulan).

Tabel 1. Data TBF & TTR

No	Jenis Kerusakan	TBF (jam)	TTR (jam)	Keterangan	Sistem
1	Kebocoran silinder hidrolik <i>bucket</i>	290	12	Gasket rusak, penggantian <i>spare part</i>	<i>Hydraulic</i>
2	<i>Track shoe</i> aus	257	18	Penggantian 4 <i>track shoe</i>	<i>Undercarriage</i>
3	Radiator pada bagian termostat tidak terbuka / macet	298	6	Perbaikan termostat radiator	<i>Engine</i>
4	Pompa <i>hydraulic</i> bermasalah	237	34	<i>Troubleshooting</i> pompa hidrolik	<i>Hydraulic</i>
5	Sensor tekanan oli rusak	249	6	Kalibrasi sensor	<i>Hydraulic</i>
...
20	<i>Swing gearbox</i> berisik	278	7	Pelumasan / <i>greasing</i> ulang	<i>Swing</i>
21	<i>Hydraulic hose main pump burst</i>	265	6	Penggantian <i>hose</i>	<i>Hydraulic</i>
22	Monitor panel <i>error</i>	340	8	<i>Reset</i> sistem	<i>Electrical</i>
23	<i>Engine vibration abnormal</i>	285	8	<i>Balancing injector</i>	<i>Engine</i>
24	<i>Track motor leak</i>	279	36	Penggantian <i>seal</i>	<i>Undercarriage</i>
	<i>Total</i>	6723	269		
	<i>Mean</i>	280,13	11,21		
	<i>Std.</i>	28,24	9,20		

Sumber: Data penelitian yang diolah

Berdasarkan data tabel 1 terjadi 24 kegagalan dalam 18 bulan, dengan variasi kerusakan umum pada sistem excavator yaitu seperti pada kategori sistem antara lain: *undercarriage*, *hydraulic*, *engine*, *electrical*, *swing* dan *upper structure*. Setiap baris data merepresentasikan satu kejadian kegagalan (*single failure event*). Kerusakan yang muncul lebih dari satu kali, seperti kebocoran silinder *hydraulic* atau *engine* tidak bisa *start*, diperlakukan sebagai kejadian terpisah karena terjadi pada waktu yang berbeda dan memiliki nilai TBF serta TTR yang berbeda. Dengan demikian, data tidak bersifat *double-count*, melainkan mencerminkan pola kegagalan aktual selama periode pengamatan. Adapun untuk *reliability* $R(t)$ adalah probabilitas sistem berfungsi pada waktu (t) , e adalah basis logaritma natural (sekitar 2.718), λ adalah laju kegagalan, dan t

adalah waktu operasi. Hasil perhitungan kondisi awal MTBF, MTTR dan *availability* (A) menggunakan formula dasar persamaan eksponensial yaitu [14]:

$$R(t) = e^{(-\lambda t)} \tag{1}$$

$$\lambda = 1/MTBF \tag{2}$$

$$MTBF = \Sigma TBF / \Sigma failure = 6723/24 = 280,13 \text{ jam} \tag{3}$$

$$MTTR = \Sigma TTR / \Sigma failure = 269/24 = 11,21 \text{ jam} \tag{4}$$

$$A = MTBF / (MTBF + MTTR) = 280,13 / (280,13 + 11,12) = 96,15\% \tag{5}$$

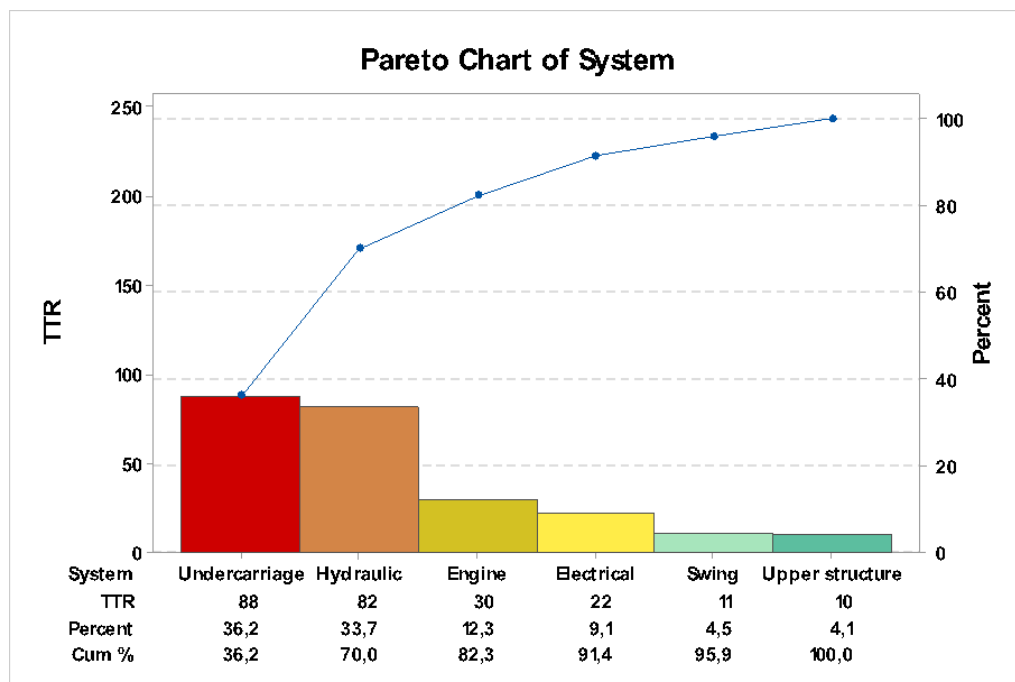
Hasil perhitungan kondisi awal nilai *availability* sebesar 96,15%. Nilai *availability* saat ini cukup tinggi namun perlu dikaji kembali terhadap bahwa *availability* yang tinggi apakah merupakan nilai yang optimal. Selain itu perlu juga

dilakukan analisa *reliability* agar diketahui dengan jelas *reliability* sistem unit excavator. Selanjutnya akan dilakukan analisa dengan diagram Pareto.

3.2. Diagram Pareto

Diagram Pareto digunakan untuk menganalisis kontribusi TTR berdasarkan sistem dengan mengacu pada prinsip Pareto (80/20), yang menyatakan bahwa sebagian besar waktu perbaikan umumnya disebabkan oleh sejumlah kecil faktor dominan [15], [16]. Diagram ini menyajikan total TTR setiap sistem dalam bentuk

diagram batang dan persentase kumulatif dalam bentuk kurva, sehingga memudahkan identifikasi sistem kritis yang memberikan kontribusi terbesar terhadap *downtime*. Sistem diklasifikasikan dan diurutkan berdasarkan besarnya kontribusi TTR, yaitu *undercarriage*, *hydraulic*, *engine*, *electrical*, *swing*, dan *upper structure*. Hasil analisis diagram Pareto digunakan sebagai dasar penentuan sistem prioritas yang selanjutnya dianalisis lebih lanjut, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Pareto sistem excavator

Berdasarkan diagram Pareto, sistem *undercarriage* dan *hydraulic* merupakan faktor dominan yang menyumbang sekitar 70% dari total TTR, sehingga menjadi prioritas utama dalam upaya pengurangan *downtime*. Sistem *engine* dan *electrical* memberikan kontribusi tambahan sebesar 21,4%, sehingga keempat sistem tersebut secara kumulatif mencakup lebih dari 90% total TTR. Sementara itu, sistem *swing* dan *upper structure* memiliki kontribusi relatif kecil terhadap waktu perbaikan. Oleh karena itu, analisis lanjutan difokuskan pada sistem dengan kontribusi TTR tertinggi, yang selanjutnya dianalisis menggunakan metode FMEA.

3.3. Analisis FMEA

Analisis FMEA dilakukan untuk mengidentifikasi risiko kegagalan paling kritis pada sistem utama unit excavator berdasarkan kontribusinya terhadap *downtime* [17]. Penilaian difokuskan pada aspek waktu henti, sehingga parameter *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) ditentukan secara kuantitatif dengan mengacu pada data historis TBF dan TTR [18]. Untuk meningkatkan objektivitas, kriteria penilaian S, O, dan D dirangkum dalam bentuk tabel skala 1–10 berdasarkan durasi *downtime* [19], [20], frekuensi kegagalan, dan tingkat kemudahan deteksi kerusakan [21], [22].

Jenis kerusakan yang sama dalam satu sistem digabungkan sehingga analisis merepresentasikan total risiko *downtime* per sistem. Nilai *S* ditentukan berdasarkan rata-rata durasi *downtime*, *O* berdasarkan rata-rata TBF, dan *D* berdasarkan ketersediaan indikasi awal dan kemudahan

diagnosis di lapangan. Selanjutnya, nilai RPN dihitung menggunakan formula [23] dan kriteria penilaian seperti pada Tabel 2:

$$RPN = S \times O \times D \tag{6}$$

Tabel 2. Kriteria Penilaian *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*

Parameter	Skala	Kriteria Objektif
<i>Severity</i> (S)	1-2	<i>Downtime</i> < 2 jam
	3-4	<i>Downtime</i> 2-5 jam
	5-6	<i>Downtime</i> 5-12 jam
	7-8	<i>Downtime</i> 12-24 jam
	9-10	<i>Downtime</i> > 24 jam
<i>Occurrence</i> (O)	1-2	TBF > 350 jam
	3-4	TBF 300-350 jam
	5-6	TBF 250-299 jam
	7-8	TBF 200-249 jam
	9-10	TBF < 200 jam
<i>Detection</i> (D)	1-2	Mudah dideteksi, sensor optimal
	3-4	Indikasi jelas, inspeksi ringan
	5-6	Terdeteksi saat inspeksi rutin
	7-8	Sulit dideteksi
	9-10	Tidak terdeteksi sebelum gagal

Sumber: Data penelitian yang diolah

Dalam penelitian ini, tingkat risiko ditentukan berdasarkan nilai RPN sebagai berikut: $RPN \geq 300$ dikategorikan sebagai risiko tinggi, $150 \leq RPN < 300$ sebagai risiko menengah, dan $RPN < 150$

sebagai risiko rendah. Adapun hasil analisa FMEA berdasarkan sistem ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil FMEA Berdasarkan Sistem

Sistem	MTBF	Total <i>Downtime</i>	S	O	D	RPN	<i>Justification</i>
<i>Hydraulic</i>	277,2	76	8	6	7	336	<i>Downtime</i> tinggi, kegagalan sering, deteksi sulit
<i>Undercarriage</i>	264	88	8	6	6	288	Durasi perbaikan lama, akses sulit
<i>Engine</i>	280	32	7	5	5	175	Kegagalan langsung menghentikan operasi
<i>Upper Structure</i>	274,3	29	6	6	5	180	Frekuensi sedang, <i>downtime</i> moderat
<i>Swing</i>	299	11	5	4	4	80	Kegagalan jarang, dampak kecil
<i>Electrical</i>	295,8	27	6	4	5	120	Gangguan kontrol, <i>downtime</i> relatif rendah

Sumber: Data penelitian yang diolah

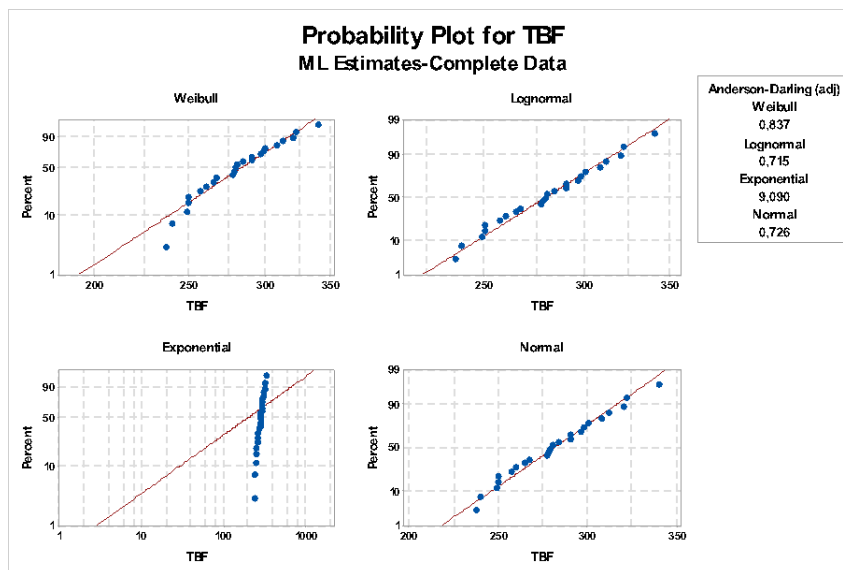
Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem *hydraulic* memiliki RPN tertinggi (336), diikuti oleh *undercarriage* (288), yang diklasifikasikan sebagai risiko tinggi terhadap *downtime*. Sistem *engine* dan *upper structure* termasuk kategori risiko menengah, sedangkan *electrical* dan *swing*

memiliki risiko relatif rendah. Berdasarkan hasil ini, prioritas perbaikan difokuskan pada sistem *hydraulic* dan *undercarriage* melalui peningkatan inspeksi, kesiapan *spare part* dan peningkatan kompetensi teknisi.

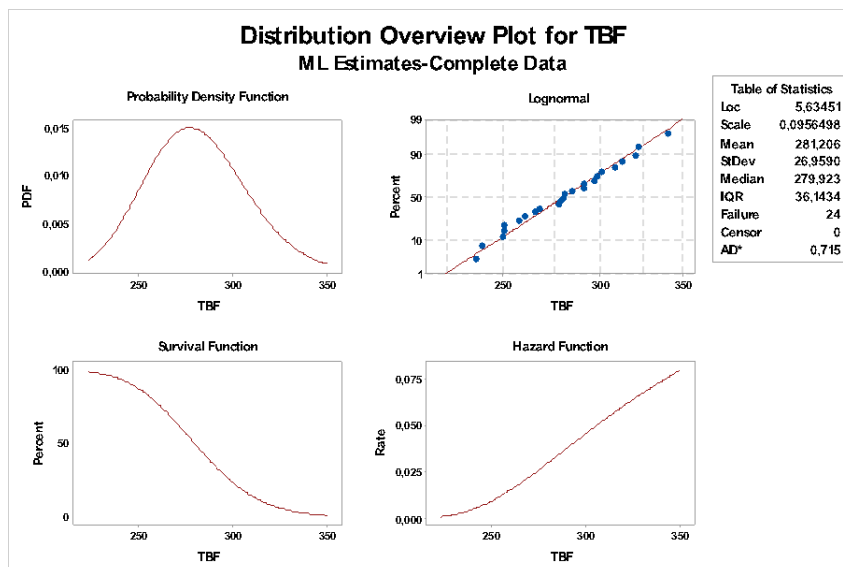
3.4. Pemodelan Distribusi TBF dan TTR

Pemodelan TBF dan TTR pada unit excavator diperlukan untuk memahami pola *reliability* dan kemampuan perbaikan peralatan secara kuantitatif [24]. Dalam studi ini, distribusi probabilitas Normal, Lognormal, Weibull, dan Eksponensial digunakan sebagai kandidat model karena masing-masing mampu merepresentasikan karakteristik data yang berbeda: Normal untuk variabilitas simetris, Lognormal untuk data berdomain positif dengan sebaran miring ke kanan, Weibull untuk fleksibilitas bentuk laju kegagalan (menurun, konstan, atau meningkat), serta

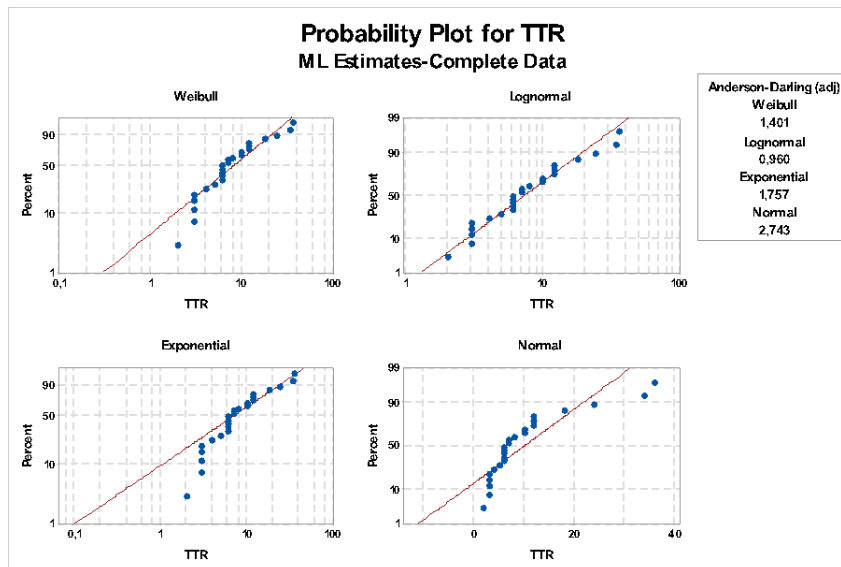
Eksponensial untuk asumsi laju kegagalan konstan [25], [26], [27]. Parameter setiap distribusi diestimasi dari data TBF dan TTR historis, kemudian dievaluasi menggunakan uji kesesuaian dan kriteria pemilihan model (Anderson–Darling) [28], sehingga diperoleh model paling representatif sebagai dasar perhitungan *reliability* dan optimasi *availability* alat. Hasil analisa distribusi dan penilaian parameter seperti di tunjukan pada Gambar 3 dan Gambar 4 untuk data TBF dan Gambar 5 dan Gambar 6 untuk data TTR.



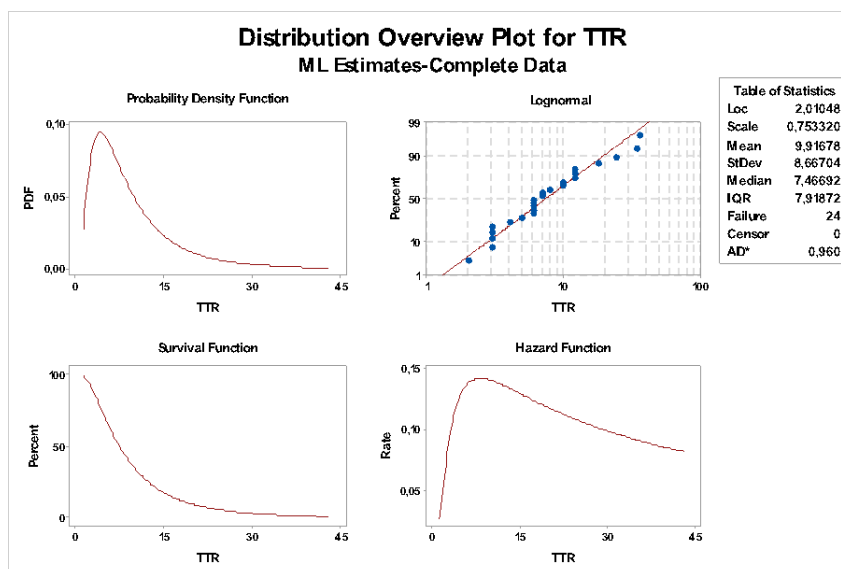
Gambar 3. Analisa data TBF dengan Anderson Darling



Gambar 4. Penilaian parameter terpilih yaitu Lognormal



Gambar 5. Analisa data TTR dengan Anderson Darling



Gambar 6. Penilaian parameter terpilih yaitu Lognormal

Hasil analisa data TBF dan TTR, diketahui kedua data terdistribusi Lognormal karena memiliki nilai Anderson Darling terkecil dibandingkan distribusi kandidat lainnya. Nilai Anderson–Darling untuk data TBF sebesar 0,715, sedangkan untuk data TTR sebesar 0,690, yang keduanya berada di bawah nilai kritis pada tingkat signifikansi 5%, sehingga distribusi Lognormal dinyatakan layak digunakan. Distribusi Lognormal menunjukkan bahwa waktu kegagalan dan perbaikan memiliki variasi yang tidak seragam dan memiliki dua parameter yaitu parameter skala (α) dan $tmed$. Parameter α

merepresentasikan tingkat penyebaran data. Nilai α yang kecil menandakan kerusakan relatif stabil, sedangkan nilai α yang besar menunjukkan variasi kerusakan dan ketidakpastian waktu perbaikan yang tinggi. Selanjutnya, parameter $tmed$ digunakan untuk merepresentasikan waktu median kegagalan. Data TBF memiliki parameter $tmed$ 279,923 dan α 0,0956, yang menunjukkan pola kegagalan yang relatif stabil. Sebaliknya, data TTR memiliki parameter $tmed$ 7,4669 dan α 0,7533, yang mengindikasikan variasi waktu perbaikan yang cukup tinggi akibat perbedaan tingkat kerusakan dan kompleksitas perbaikan.

Selanjutnya perhitungan MTBF, MTTR, fungsi $R(t)$ dan A berbagai skenario interval perawatan untuk mendapatkan nilai yang optimal. Adapun formula untuk distribusi Lognormal sebagai berikut [29]:

$$R(t) = 1 - \Phi((1/\alpha) \times \ln(t/t_{med})) \tag{7}$$

$$MTBF = MTTR = t_{med} \times e^{((\alpha^2/2))} \tag{8}$$

$$MTBF = t_{med} \times e^{((\alpha^2/2))} \\ = 279,923 \times e^{((0,0956^2/2))} = 281,21 \text{ jam}$$

$$MTTR = t_{med} \times e^{((\alpha^2/2))} \\ = 7,4669 \times e^{((0,7533^2/2))} \\ = 9,92 \text{ jam}$$

$$A = MTBF / (MTBF + MTTR) \\ = 281,21 / (281,21 + 9,92) \\ = 96,59\%$$

Dari hasil perhitungan diketahui bahwa nilai A awal sebesar 96,15% (MTBF 280,13 jam dan MTTR 11,21 jam). Sedangkan A dengan menerapkan distribusi probabilitas Lognormal sebesar 96,59% (MTBF 281,21 jam dan MTTR 9,92 jam). Penurunan MTTR dari 11,21 jam menjadi 9,92 jam terjadi karena perbedaan metode estimasi, di mana nilai awal dihitung dengan rata-rata aritmatika (rata-rata TTR), sedangkan pemodelan Lognormal menggunakan parameter distribusi (t_{med} dan α) yang mempertimbangkan penyebaran dan skewness data sehingga lebih representatif terhadap kondisi operasional. Hasil analisa dengan distribusi probabilitas Lognormal menunjukkan peningkatan kinerja *availability*. Nilai *availability* sekitar 96% masih realistis untuk operasi tambang batu bara dengan kondisi operasi stabil dan sistem perawatan terjadwal [30].

Tabel 4. Perbandingan *Availability* Awal dan *Availability* (Lognormal)

Parameter	<i>Availability</i> Awal	<i>Availability</i> (Lognormal)
MTBF (jam)	280,13	281,21
MTTR (jam)	11,21	9,92
<i>Availability</i> (%)	96,15	96,59

Namun, analisis *availability* ini belum sepenuhnya menggambarkan kinerja keandalan peralatan, sehingga evaluasi lanjutan menggunakan fungsi *reliability* $R(t)$ diperlukan untuk menilai probabilitas kegagalan pada interval waktu operasi tertentu. Berikut adalah contoh perhitungan $R(t)$ pada $t = 100, 200$ dan 300 jam.

$$R(100) = 1 - \Phi((1/0,0956) \times \ln(100/279,923)) \\ = 100\%$$

$$R(200) = 1 - \Phi((1/0,0956) \times \ln(200/279,923)) \\ = 99,98\%$$

$$R(300) = 1 - \Phi((1/0,0956) \times \ln(300/279,923)) \\ = 23,45\%$$

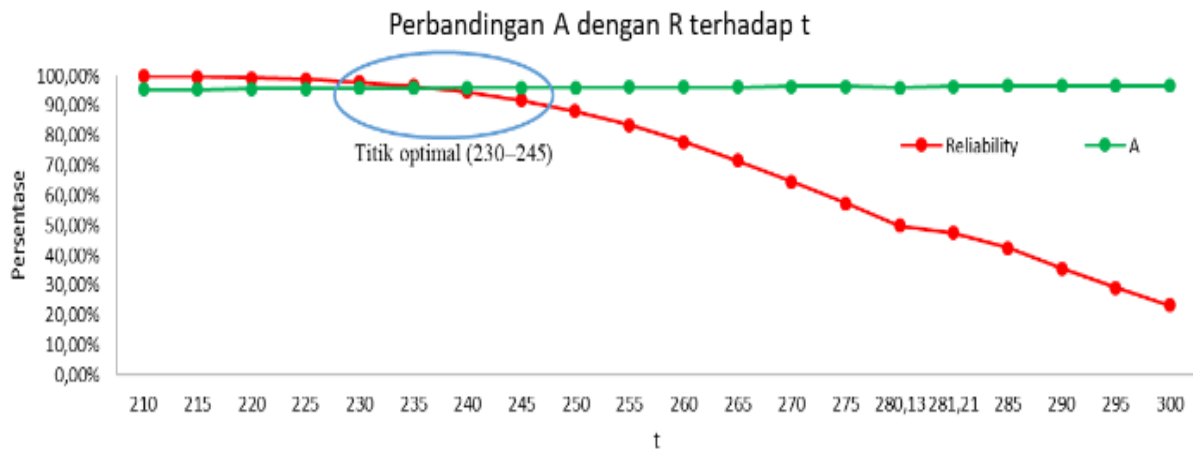
3.5. Optimasi Interval Perawatan

Mengoptimalkan interval perawatan merupakan langkah strategis untuk menjaga keseimbangan antara *availability* dan *reliability* peralatan. Interval perawatan ditentukan dengan menganalisis perubahan *reliability* terhadap waktu operasi t , sehingga risiko kegagalan mendadak dapat ditekan tanpa menurunkan kesiapan operasional [31]. *Availability* sebagai fungsi interval perawatan dihitung menggunakan persamaan [32]:

$$A = t / (t + MTTR (\text{lognormal})) \tag{9}$$

dengan t sebagai interval perawatan dan MTTR lognormal sebagai nilai MTTR hasil pemodelan Lognormal.

Hasil analisis pada Gambar 7 menunjukkan bahwa *reliability* menurun signifikan seiring bertambahnya waktu operasi, sedangkan *availability* relatif stabil di kisaran 96%. Oleh karena itu, penentuan interval perawatan optimal didasarkan pada titik kompromi, yaitu saat *reliability* masih berada di atas ambang batas yang dapat diterima (>90%) dan *availability* tetap tinggi. Berdasarkan simulasi, interval 230–245 jam memenuhi kriteria tersebut.



Gambar 7. Analisa perbandingan A dengan R terhadap t

Analisis sensitivitas dilakukan dengan memvariasikan interval perawatan setiap 5 jam, yang menunjukkan bahwa interval di bawah 230 jam meningkatkan *reliability* tetapi tidak memberikan peningkatan signifikan pada *availability*, sedangkan interval di atas 245 jam menyebabkan penurunan *reliability* yang tajam. Perlu diketahui bahwa optimasi interval perawatan pada penelitian ini belum mempertimbangkan aspek biaya, sehingga hasil yang diperoleh murni berbasis kinerja *reliability* dan *availability*.

3.6. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi analisis Pareto, FMEA-RCM, dan pemodelan distribusi probabilitas Lognormal memberikan pendekatan yang lebih komprehensif dalam perencanaan pemeliharaan unit excavator. Analisis Pareto

mengidentifikasi sistem *undercarriage* dan *hydraulic* sebagai penyumbang utama *downtime*, dengan kontribusi kumulatif sekitar ±70% dari total TTR. Temuan ini menetapkan prioritas teknis yang jelas bagi program pemeliharaan.

Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya berhenti pada identifikasi komponen kritis atau rekomendasi strategi perawatan, penelitian ini mengintegrasikan FMEA sebagai dasar evaluasi risiko kegagalan, RCM sebagai kerangka penentuan strategi perawatan dan pemodelan Lognormal untuk menganalisis karakteristik statistik TBF dan TTR. Pendekatan probabilistik ini memungkinkan evaluasi *reliability* dan *availability* sebagai fungsi waktu operasi, bukan sekadar nilai rata-rata deterministik. Berikut perbedaan penelitian ini dengan penelitian terdahulu.

Tabel 5. Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Ini

Peneliti (Tahun)	Objek Penelitian	Metode Utama	Fokus & Hasil Utama	Keterbatasan / Gap
Fayad et al. (2024)	Mesin <i>punch hydraulic</i>	RCM	Identifikasi komponen kritis dan rekomendasi strategi CD dan FF untuk mengurangi <i>downtime</i>	Tidak memodelkan <i>reliability</i> terhadap waktu
Azhari et al. (2024)	Sistem permesinan kapal	RCM	Klasifikasi strategi perawatan (TD, CD, FF) pada komponen kapal	Tidak menghitung RPN dan MTBF-MTTR

Siagian et al. (2024)	Mesin press ulir (PKS)	RCM	Identifikasi mesin kritis dan rekomendasi <i>preventive maintenance</i>	Tidak dilakukan optimasi interval perawatan
Saputra et al. (2024)	Mesin bubut	RCM + <i>Age Replacement</i>	Penentuan interval penggantian optimal berbasis MTBF dan MTTR	Pendekatan deterministik, tanpa distribusi probabilitas
Prayoga & Yazirin (2024)	Mesin cetak fleksografi	FMECA	Identifikasi mode kegagalan dominan dan perbaikan program <i>preventif</i>	Tidak dianalisis hubungan <i>reliability-availability</i>
Haerudin et al. (2025)	Mesin air jet loom	RCM	Identifikasi 16 mode kegagalan dan komponen paling kritis	Tidak dilakukan simulasi interval perawatan
Penelitian ini	Excavator PC 200	Pareto–FMEA–RCM–Lognormal	Optimasi interval perawatan berbasis <i>reliability</i> dan <i>availability</i> terhadap waktu	Belum mempertimbangkan aspek biaya

Pemodelan Lognormal menghasilkan estimasi MTTR yang lebih representatif terhadap kondisi aktual lapangan, tercermin dari penurunan MTTR dari 11,21 jam menjadi 9,92 jam serta peningkatan *availability* dari 96,15% menjadi 96,59%. Analisis *reliability* terhadap waktu menunjukkan bahwa meskipun *availability* relatif stabil, *reliability* mengalami penurunan signifikan setelah mendekati 300 jam operasi. Oleh karena itu, interval perawatan optimal ditetapkan pada kisaran 230–245 jam, saat *reliability* masih berada di atas 90% dan *availability* tetap optimal.

Dari sisi implikasi manajerial, hasil ini memberikan panduan praktis bagi *planner* dan teknisi untuk menetapkan interval perawatan berbasis risiko dan keandalan, memfokuskan sumber daya pada sistem kritis, serta menghindari strategi perawatan berbasis kalender semata. Pendekatan ini mendukung pengurangan *downtime* tidak terencana, peningkatan kesiapan alat, dan efisiensi perencanaan pemeliharaan pada operasi pertambangan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan terintegrasi analisis Pareto, FMEA, dan pemodelan *reliability* probabilistik menggunakan

distribusi Lognormal memberikan kerangka kerja yang kuat untuk optimasi pemeliharaan unit excavator. Hasil analisis mengidentifikasi sistem *undercarriage* dan *hydraulic* sebagai kontributor utama *downtime*, dengan kontribusi sekitar 70% terhadap total TTR, sehingga layak diprioritaskan dalam perencanaan pemeliharaan. Evaluasi *reliability* dan *availability* terhadap waktu menunjukkan bahwa interval perawatan optimal berada pada kisaran 230–245 jam operasi, yang mana *availability* tetap stabil sekitar 96% dan *reliability* dapat dipertahankan di atas 90%.

Kontribusi ilmiah utama penelitian ini terletak pada integrasi pemodelan *reliability* probabilistik (TBF–TTR Lognormal) dengan optimasi interval perawatan, yang memungkinkan evaluasi *reliability* dan *availability* secara berbasis waktu. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya berfokus pada identifikasi kegagalan atau strategi pemeliharaan kualitatif, penelitian ini menawarkan pendekatan kuantitatif berbasis data untuk menentukan interval perawatan berdasarkan kompromi antara degradasi *reliability* dan stabilitas *availability*. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa *availability* yang tinggi tidak selalu merepresentasikan *reliability* yang tinggi, sehingga keduanya perlu dianalisis secara simultan.

5. Saran

Dari perspektif praktis, kerangka kerja yang diusulkan dapat mendukung teknisi dan perencana pemeliharaan dalam menetapkan jadwal pemeliharaan preventif yang lebih efektif untuk mengurangi *downtime* tidak terencana dan meningkatkan kesiapan operasional. Rekomendasi implementatif meliputi penguatan inspeksi rutin, penyediaan suku cadang kritis pada sistem berisiko tinggi, serta penyesuaian interval perawatan berdasarkan tren *reliability*. Meskipun studi kasus terbatas pada satu unit excavator, metodologi ini **dapat digeneralisasi** untuk peralatan berat lain seperti bulldozer, wheel loader, dan haul truck, dengan syarat tersedianya data historis kegagalan yang memadai. Penelitian lanjutan disarankan untuk memasukkan aspek ekonomi dan variabilitas operasi guna meningkatkan kualitas pengambilan keputusan pemeliharaan.

6. Daftar Pustaka

- [1] S. Singh, J. S. Khamba, and D. Singh, "Analysis and directions of OEE and its integration with different strategic tools," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng.*, vol. 235, no. 2, pp. 594–605, 2020, doi: 10.1177/0954408920952624.
- [2] Z. Yang, J. Li, C. Chen, J. He, H. Tian, and L. Yu, "A study on overall line efficiency (OLE) centered production line maintenance prioritization considering equipment operational reliability," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 124, no. 11–12, pp. 3783–3794, 2023, doi: 10.1007/s00170-021-07547-9.
- [3] O. Golbasi and M. O. Turan, "A discrete-event simulation algorithm for the optimization of multi-scenario maintenance policies," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 145, no. May, p. 106514, 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106514.
- [4] R. Jafarishah, M. Karbasian, and M. Asadpour, "A hybrid reliability-centered maintenance approach for mining transportation machines: a real case in Esfahan," *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 3, no. 7, pp. 1550–1575, 2021, doi: <https://doi.org/10.1108/IJQRM-09-2020-0309>.
- [5] J. Geisbush and S. T. Ariaratnam, "Reliability centered maintenance (RCM): literature review of current industry state of practice," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 29, no. 2, pp. 313–337, 2023, doi: <https://doi.org/10.1108/JQME-02-2021-0018>.
- [6] X. Yang, Y. He, D. Zhou, and X. Zheng, "Mission reliability-centered maintenance approach based on quality stochastic flow network for multistate manufacturing systems," *Eksplorat. i Niezawodn.*, vol. 24, no. 3, pp. 455–467, 2022, doi: 10.17531/ein.2022.3.7.
- [7] M. W. Al Fayad, W. Nugraha, A. dani Prayoga, R. Mickola, and Y. Prastyo, "Analisis Perawatan Mesin dengan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) terhadap Mesin Punch Hidrolik pada Perusahaan accecoris part untuk Tower Jaringan," *Glob. J. Lentera BITEP*, vol. 2, no. 06, pp. 226–232, 2024, doi: 10.59422/global.v2i06.667.
- [8] H. Azhari, J. G. Ganap, and F. A. Nisah, "Analisis Perawatan Mesin Kapal dengan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) di PT Jasa Armada Indonesia Tbk," *INDUSTRIKA*, vol. 8, no. 2, pp. 407–417, 2024, doi: 10.37090/indstrk.v8i2.1261.
- [9] I. I. Siagian, P. J. Ginting, and A. C. Sembiring, "Analisis Perawatan Mesin Kritis Menggunakan Metode Reliability Centered Maintenance di Manufaktur Kelapa Sawit," *JURITI PRIMA (Junal Ilm. Tek. Ind. Prima)*, vol. 7, no. 2, pp. 44–52, 2024, doi: <https://doi.org/10.34012/juritiprima.v7i2.5554>.
- [10] Y. Saputra, M. Widyantoro, and R. I. Rosihan, "Perencanaan Perawatan Mesin dengan Metode Reliability Centered Maintenance dan Age Replacement," *J. Mekanova Mek. Inov. dan Teknol.*, vol. 10, no. 2, pp. 390–400, 2024, doi: <https://doi.org/10.35308/jmkn.v10i2.10429>.
- [11] F. A. Prayoga and C. Yazirin, "Analisis Penyebab Turunnya Roll Impression dengan Metode FMECA Pada Mesin Flexo di PT. X, Tbk," *J. Ind. Eng. Technol. Innov.*, vol. 02, no. 02, pp. 78–89, 2024, doi: <https://doi.org/10.61105/jieti.v2i2.192>.
- [12] Y. H. Haerudin, W. Jamaludin, S. Suhartini, and Jaenudin, "Analisis Perawatan Mesin Dengan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) Terhadap Mesin Air Jet

- Loom (AJL),” *J. Teknol.*, vol. 15, no. 1, pp. 727–739, 2025, [Online]. Available: <https://doi.org/10.51132/teknologika.v15i1.459>
- [13] I. Minitab, “MINITAB [Internet].” Accessed: Jan. 26, 2022. [Online]. Available: <http://www.minitab.com/en-US/products/minitab/>
- [14] M. Bulut and E. Özcan, “A new approach to determine maintenance periods of the most critical hydroelectric power plant equipment,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 205, no. September 2020, p. 107238, 2021, doi: 10.1016/j.res.2020.107238.
- [15] P. Marinho, D. Pimentel, R. Casais, F. J. G. Silva, J. C. Sá, and L. P. Ferreira, “Selecting the best tools and framework to evaluate equipment malfunctions and improve the OEE in the cork industry,” *Int. J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 12, no. 4, pp. 286–298, 2021, doi: 10.24867/IJEM-2021-4-295.
- [16] A. Rozak, C. Jaqin, and H. Hasbullah, “Increasing overall equipment effectiveness in automotive company using DMAIC and FMEA method,” *J. Eur. des Syst. Autom.*, vol. 53, no. 1, pp. 55–60, 2020, doi: 10.18280/jesa.530107.
- [17] F. Li, L. Zhang, S. Dong, L. Xu, H. Zhang, and L. Chen, “Risk assessment of bolt-gasket-flange connection (BGFC) failures at hydrogen transfer stations based on improved FMEA,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 50, no. A, pp. 700–716, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.191.
- [18] T. Dedimas and S. G. Gebeyehu, “Application of failure mode effect analysis (FMEA) for efficient and cost-effective manufacturing: A case study at Bahir Dar textile share company, Ethiopia,” *J. Optim. Ind. Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 23–29, 2019, doi: 10.22094/joie.2018.556677.1533.
- [19] K. Siregar, F. Ariani, R. M. Sari, I. Rizkya, and L. S. Simanjuntak, “Analysis of Production Obstacles in Assembling G Line Process Using FMEA Method (Failure Mode and Effect Analysis),” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 851, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/851/1/012007.
- [20] B. O. Ceylan, D. A. Akyar, and M. S. Celik, “A novel FMEA approach for risk assessment of air pollution from ships,” *Mar. Policy*, vol. 150, no. 105536, 2023, doi: 10.1016/j.marpol.2023.105536.
- [21] C. Park, C. Kontovas, Z. Yang, and C.-H. Chang, “A BN driven FMEA approach to assess maritime cybersecurity risks,” *Ocean Coast. Manag.*, vol. 235, no. 106480, 2023, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106480.
- [22] B. Salah, O. Janeh, T. Bruckmann, and B. Noche, “Improving the Performance of a New Storage and Retrieval Machine Based on a Parallel Manipulator Using FMEA Analysis,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 1658–1663, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.324>.
- [23] M. Baghbani, S. Iranzadeh, and M. Bagherzadeh khajeh, “Investigating the relationship between RPN parameters in fuzzy PFMEA and OEE in a sugar factory,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 60, no. April, pp. 221–232, 2019, doi: 10.1016/j.jlp.2019.05.003.
- [24] D. Choudhary, M. Tripathi, and R. Shankar, “Reliability, availability and maintainability analysis of a cement plant: a case study,” *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 36, no. 3, pp. 298–313, 2019, doi: 10.1108/IJQRM-10-2017-0215.
- [25] C. E. Ebeling, *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. McGraw-Hill Science, 1997.
- [26] K.-H. Grote and E. K. Antonsson, *Springer Handbook of Mechanical Engineering*. 2008.
- [27] B. S. Dhillon, *Engineering maintenance: A modern approach*. 2002.
- [28] “Anderson–Darling Test BT - The Concise Encyclopedia of Statistics,” New York, NY: Springer New York, 2008, pp. 12–14. doi: 10.1007/978-0-387-32833-1_11.
- [29] H. P. Jagtap, A. K. Bewoor, R. Kumar, M. H. Ahmadi, M. El Haj Assad, and M. Sharifpur, “RAM analysis and availability optimization of thermal power plant water circulation system using PSO,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 1133–1153, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2020.12.025.
- [30] A. Nuryono, “Analisis Efektifitas Kinerja Excavator Pada Aktifitas OB Removal Penambangan Batubara Menggunakan Metode OEE,” *J. Ind. Manuf.*, vol. 3, no. 2, pp. 79–88, 2018, doi: 10.31000/jim.v3i2.855.
- [31] P. Tsarouhas, “Reliability, availability and maintainability analysis of a bag production industry based on the six sigma DMAIC approach,” *Int. J. Lean Six Sigma*, vol. 12, no. 2, pp. 237–263, 2021, doi: 10.1108/IJLSS-09-

2019-0101.
[32] P. Tsarouhas, "Reliability, availability and maintainability (RAM) analysis for wine packaging production line," *Int. J. Qual.*

Reliab. Manag., vol. 35, no. 3, pp. 821–842, 2018, doi: 10.1108/IJQRM-02-2017-0026.