

Optimasi Jadwal Perawatan Komponen Kritis Truk Menggunakan Metode *Age Replacement*

Tamadara Hilman¹⁾, Dhella Emalia Damanik²⁾

¹⁾ Prodi D4 Logistik Bisnis, Universitas Logistik dan Bisnis Internasional

Email: tamadara@ulbi.ac.id

²⁾ Prodi D4 Logistik Bisnis, Universitas Logistik dan Bisnis Internasional

Email: dhellaemaliadamanik1@gmail.com

Abstrak

Tingginya frekuensi kerusakan pada komponen kritis truk di PT Cakraindo Mitra Internasional menyebabkan downtime tidak terjadwal, meningkatnya biaya perawatan, serta penurunan keandalan armada. Penelitian ini bertujuan menyusun interval optimal perawatan pencegahan menggunakan metode *Age Replacement* serta menghitung potensi efisiensi biaya dibandingkan perawatan korektif. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif melalui analisis data kerusakan, parameter distribusi Weibull, fungsi keandalan, serta perbandingan biaya penggantian pencegahan dan kerusakan. Hasil penelitian menunjukkan interval penggantian pencegahan optimal pada enam komponen kritis, yaitu sistem pelumas 8.000 km, suspensi 10.000 km, bahan bakar 8.500 km, transmisi 11.500 km, rem 14.000 km, dan mesin 11.500 km. Penerapan interval tersebut menghasilkan penghematan biaya sebesar Rp105.310.530 atau 59% dari total biaya aktual Rp178.288.995. Selain efisiensi finansial, metode *Age Replacement* juga meningkatkan keandalan armada, menurunkan risiko kerusakan mendadak, dan mendukung kelancaran operasional distribusi. Dengan demikian, *Age Replacement* terbukti efektif sebagai strategi dasar dalam perencanaan perawatan preventif di perusahaan.

Kata Kunci: *Age Replacement, komponen kritis, preventive maintenance, biaya perawatan, keandalan armada.*

1. PENDAHULUAN

Transportasi darat didefinisikan sebagai sistem pergerakan terintegrasi yang melibatkan sarana (kendaraan) dan prasarana (infrastruktur jalan) untuk memfasilitasi aktivitas sosial dan ekonomi di wilayah daratan (Tamin 2008) Khususnya, transportasi darat berbasis truk memegang peran sentral sebagai moda utama dalam distribusi barang karena menawarkan fleksibilitas operasional yang tinggi, kemampuan menjangkau berbagai wilayah secara *door-to-door*, serta kapasitas angkut yang memadai (Rushton, Croucher, dan Baker 2017).

Tingginya intensitas penggunaan serta panjangnya rute perjalanan menjadikan truk rentan mengalami kerusakan pada komponen-komponen kritis seperti mesin, sistem rem, suspensi, sistem bahan bakar, pelumasan, dan transmisi. Kerusakan pada komponen tersebut tidak hanya meningkatkan risiko kecelakaan, tetapi juga berdampak langsung pada kinerja operasional dan kelancaran aktivitas distribusi.

PT Cakraindo Mitra Internasional sebagai salah satu perusahaan penyedia layanan angkutan barang mengoperasikan 86 unit truk dengan sekitar 50 rute distribusi harian. Salah satu rute yang menjadi fokus penelitian adalah Bekasi–Bandung dengan frekuensi 22 perjalanan pada Mei 2025. Rute ini dipilih karena

memiliki pola operasional stabil dan jarak tempuh yang relevan untuk mengevaluasi keandalan komponen kendaraan.

Tabel 1 Jumlah Kerusakan Komponen Kritis (Jan-Nov 2024)

No.	Komponen Kritis	Jumlah Kerusakan
1	Sistem Bahan Bakar	57
2	Sistem Mesin	44
3	Sistem Suspensi	41
4	Sistem Rem	39
5	Sistem Pelumasan	27
6	Sistem Transmisi	21
Total		229 kejadian

Sumber: Data Operasional PT Cakraindo Mitra, 2025

Berdasarkan data operasional Januari–November 2024, tercatat 229 kasus kerusakan komponen yang didominasi oleh sistem bahan bakar (57 kasus), mesin (44 kasus), suspensi (41 kasus), rem (39 kasus), pelumasan (27 kasus), dan transmisi (21 kasus). Tingginya jumlah kerusakan menyebabkan *downtime* tidak terjadwal, meningkatnya biaya perbaikan darurat, serta berkurangnya tingkat keandalan layanan distribusi perusahaan.

Saat ini PT Cakraindo masih menerapkan *corrective maintenance*, yaitu perawatan yang dilakukan setelah kerusakan terjadi. Pendekatan ini dinilai tidak efisien dan memiliki risiko gangguan operasional yang tinggi. Literatur terdahulu menyatakan bahwa praktik perawatan reaktif tanpa jadwal preventif yang jelas berpotensi menurunkan *availability* kendaraan karena tingginya kemungkinan kerusakan mendadak dan meningkatnya *unplanned downtime* (Thomas dan Weiss 2021). Metode *Age Replacement* secara spesifik bertujuan untuk menentukan usia optimal penggantian komponen, dengan hasil yang menunjukkan kemampuan model ini dalam memprediksi panjang *downtime* serta meminimalkan *downtime* per unit waktu (Ma'ruf dan Dahda 2021). Meskipun berbagai penelitian telah menerapkan metode *age replacement* pada konteks perawatan mesin industri dan armada tertentu, masih terdapat kesenjangan penelitian terkait penerapannya secara komprehensif pada berbagai komponen kritis truk operasional jarak menengah seperti pada PT Cakraindo. Banyak penelitian sebelumnya berfokus pada satu jenis komponen atau satu unit mesin, sehingga belum memberikan gambaran utuh mengenai interval optimal untuk seluruh komponen kritis secara simultan. Selain itu, belum banyak studi yang mengintegrasikan analisis distribusi kerusakan, fungsi keandalan, dan perbandingan biaya aktual perusahaan dalam satu model evaluasi terstruktur yang langsung dapat diimplementasikan sebagai kebijakan pemeliharaan.

Penelitian ini berbeda dari studi sebelumnya karena:

1. Menganalisis enam komponen kritis secara bersamaan, bukan hanya satu jenis komponen atau mesin.
2. Menggunakan data nyata operasional perusahaan (229 data kerusakan), sehingga hasil interval perawatan lebih relevan secara praktis.
3. Mengintegrasikan parameter distribusi Weibull, fungsi keandalan, serta analisis biaya preventif vs. korektif, sehingga menghasilkan interval penggantian yang optimal dan berbasis data.
4. Memberikan estimasi penghematan biaya secara total, bukan hanya per komponen, sehingga dampaknya terhadap efisiensi biaya perusahaan lebih terukur.

Penelitian ini bertujuan:

1. Menentukan interval penggantian yang optimal untuk setiap komponen kritis truk guna meminimalkan risiko kerusakan mendadak.
2. Menghitung potensi penghematan biaya dari penerapan *preventive maintenance* menggunakan metode *age replacement* dibandingkan perawatan korektif.

Kontribusi penelitian ini adalah:

1. Memberikan model penjadwalan perawatan preventif yang dapat langsung diimplementasikan oleh perusahaan.
2. Menyediakan estimasi penghematan biaya yang akurat, sehingga dapat menjadi dasar pengambilan keputusan manajemen.
3. Menghasilkan pendekatan analitis berbasis keandalan yang dapat diterapkan pada perusahaan logistik lainnya dengan karakteristik operasional serupa.

2. METODE PENELITIAN

Masalah utama yang diidentifikasi adalah belum tersedianya jadwal perawatan pencegahan berbasis usia pakai (*age-based maintenance*) untuk komponen kritis armada truk PT Cakraindo Mitra Internasional. Saat ini, perusahaan masih menerapkan *corrective maintenance*, sehingga berisiko menimbulkan *downtime* tidak terjadwal dan biaya perbaikan yang lebih tinggi. Oleh karena itu, diperlukan metode kuantitatif untuk menentukan usia optimal penggantian komponen sebelum terjadi kerusakan (*age replacement interval*), sehingga biaya total pemeliharaan dapat diminimalkan.

Penelitian ini menggunakan metode *Age Replacement* untuk menentukan interval penggantian komponen yang paling ekonomis. Metode *Age Replacement* mengusulkan penggantian komponen pada usia tertentu, baik komponen tersebut telah mengalami kerusakan ataupun belum (Barlow dan Hunter 1960). Pendekatan ini sesuai untuk sistem kendaraan yang beroperasi secara intensif dan memiliki pola keausan bertahap.

Adapun rancangan penelitian disusun dalam beberapa tahap:

1. Pengumpulan data historis kerusakan, biaya penggantian, dan jarak tempuh.
2. Estimasi distribusi waktu kerusakan menggunakan uji Mann untuk validasi distribusi Weibull.

3. Perhitungan parameter distribusi Weibull (α dan β) dengan metode regresi linear.
4. Penghitungan fungsi keandalan $R(t)$, fungsi laju kerusakan $\lambda(t)$, dan peluang kegagalan $F(t)$.
5. Penentuan waktu penggantian pencegahan (t_p) dan waktu kegagalan komponen (t_f).
6. Perhitungan biaya total pemeliharaan, baik preventif maupun korektif.
7. Pemilihan interval penggantian optimal berdasarkan minimasi biaya per siklus.

Rancangan ini mengikuti pendekatan standar analisis keandalan pada sistem mekanis seperti dipaparkan oleh (Ebeling 2019).

2.1 Metode Pengumpulan Data

Data penelitian diperoleh melalui dokumen internal PT Cakraindo Mitra Internasional berupa:

- frekuensi dan waktu kejadian kerusakan komponen kritis,
- jenis komponen yang mengalami kerusakan,
- biaya penggantian suku cadang, tenaga kerja, serta *downtime*,
- data jarak tempuh harian kendaraan, dan
- data wawancara dengan teknisi terkait waktu perbaikan.

Data kerusakan dihimpun dalam periode Januari–November 2024 mencakup enam sistem kritis: pelumasan, suspensi, bahan bakar, rem, mesin, serta transmisi. Seluruh data digunakan untuk menghitung distribusi umur kerusakan serta parameter pemeliharaan pada metode *Age Replacement*.

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif, data dianalisis untuk melakukan verifikasi model dan menghasilkan nilai usia optimal penggantian komponen sebagai dasar kebijakan perawatan preventif.

2.2 Teknik Analisis Data

1. Perhitungan Rata-Rata Jarak Tempuh

Rata-rata jarak tempuh harian dihitung dengan:

$$\bar{d} = \frac{D}{H} \quad (1)$$

Dengan:

\bar{d} = rata-rata jarak tempuh per hari

D = total jarak tempuh periode tertentu

H = total hari operasi

2. Perhitungan Interval Kerusakan

Interval kerusakan dalam kilometer dihitung sebagai:

Interval kerusakan (km)

$$= (\text{Interval kerusakan (hari)}) \times \text{jarak tempuh per hari} \quad (2)$$

3. Uji Distribusi Kerusakan (Uji Mann)

Data diurutkan, kemudian dilakukan transformasi logaritma:

$$X_i = \ln(t_i) \quad (3)$$

$$Z_i = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t_i)}\right)\right) \quad (4)$$

Mann's Test digunakan untuk menguji kecocokan dengan distribusi Weibull sebagaimana digunakan oleh Mann (Hoyland dan Rausand 2004) dalam analisis *life data*.

4. Perhitungan Parameter Distribusi Weibull

Nilai *cumulative distribution function* dihitung:

$$F(t_i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (5)$$

Transformasi Weibull:

$$X_i = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t_i)}\right)\right) \quad (6)$$

Regresi linear digunakan untuk memperoleh parameter α dan β :

$$Y_i = \ln(t_i) \quad (7)$$

$$\beta = b \quad (8)$$

$$\alpha = e^{-\frac{a}{\beta}} \quad (9)$$

5. Perhitungan Fungsi Keandalan

Fungsi keandalan dihitung dengan:

$$R(t) = e^{-(t/\alpha)^\beta} \quad (10)$$

Fungsi distribusi kumulatif:

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\alpha)^\beta} \quad (11)$$

Fungsi kepadatan peluang:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-(t/\alpha)^\beta} \quad (12)$$

Fungsi laju kerusakan:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (13)$$

6. Waktu Penggantian Pencegahan dan Kerusakan

Konversi waktu dalam jam ke jarak tempuh:

$$T_f = \frac{t_f}{t_h} \times d_h \quad (14)$$

$$T_p = \frac{t_p}{t_h} \times d_h \quad (15)$$

7. Perhitungan Biaya Penggantian

Biaya penggantian preventif:

$$C_p = C_{\text{suku cadang}} + C_{\text{tenaga kerja}} + C_{\text{downtime preventif}}$$

Biaya penggantian kerusakan:

$$C_f = C_{\text{suku cadang}} + C_{\text{tenaga kerja}} + C_{\text{downtime darurat}} + C_{\text{kerugian tambahan}}$$

8. Penentuan Interval Penggantian Optimal (Minimasi Total Biaya)

Biaya ekspektasi per siklus dihitung menggunakan *unit expected cost* (UEC) (Jardine dan Tsang 2006):

$$UEC = \frac{C_p \cdot R(t) + C_f \cdot (1 - R(t))}{R(t) + M(t_p) \cdot (1 - R(t))} \quad (18)$$

Interval optimal adalah nilai t_p yang menghasilkan UEC minimum.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan temuan penelitian terkait penentuan interval optimal perawatan komponen kritis truk PT Cakraindo Mitra Internasional menggunakan metode Age Replacement. Hasil penelitian dianalisis mulai dari pengumpulan data kerusakan, pengujian distribusi, perhitungan parameter Weibull, penentuan fungsi keandalan, hingga perhitungan biaya yang menghasilkan rekomendasi interval penggantian terbaik.

1. Perhitungan Rata-Rata Jarak Tempuh

Data kerusakan harian dikonversi menjadi interval kerusakan dalam satuan jarak (kilometer), menggunakan rata-rata jarak tempuh harian truk di rute Bekasi–Bandung sebesar 300 km.

Jarak Tempuh Harian

$$\begin{aligned} &= \text{Jarak Berangkat} + \text{Jarak Pulang} \\ &= 150\text{Km} + 150\text{Km} = 300\text{Km} \end{aligned}$$

Nilai 300 km ini digunakan sebagai dasar perhitungan dalam analisis interval kerusakan komponen kendaraan. Meskipun perhitungan interval menggunakan rata-rata jarak tempuh konstan, penelitian ini menyadari adanya keterbatasan dalam menangkap variabilitas operasional seperti kondisi kemacetan (*stop-and-go*) dan perbedaan gaya mengemudi. Faktor-faktor tersebut, bersama dengan fluktuasi muatan kendaraan, diasumsikan terdistribusi secara acak dalam data historis kerusakan yang digunakan dalam pemodelan ini.

2. Perhitungan Interval Kerusakan

Berdasarkan data kerusakan Januari–November 2004, enam komponen utama yang paling sering mengalami kerusakan adalah sistem pelumas, suspensi, bahan bakar, rem, transmisi, dan mesin. Rekap usia kerusakan aktual disajikan pada tabel 2.

Tabel 2 Usia Kerusakan Aktual Komponen Kritis

Komponen	Rata-rata Interval Kerusakan (hari)	Usia Kerusakan Aktual (km)
Sistem Pelumas	13,0	13.000
Sistem Suspensi	47,71	14.314
Sistem Bahan Bakar	41	12.300
Sistem Rem	59,25	19.920
Sistem Transmisi	66,4	17.775
Sistem Mesin	53,67	16.100

Kerusakan berulang pada komponen-komponen ini menyebabkan *downtime* yang tinggi dan biaya perbaikan yang signifikan, sehingga diperlukan pendekatan pemeliharaan yang lebih efisien.

3. Uji Distribusi Kerusakan (Uji Mann)

Sebelum melanjutkan ke tahap perhitungan parameter, data interval kerusakan komponen kritis terlebih dahulu diuji menggunakan Uji Mann (*Mann's Test*) untuk memverifikasi apakah data tersebut mengikuti pola Distribusi Weibull. Distribusi Weibull adalah distribusi probabilitas yang paling umum digunakan dalam analisis keandalan karena kemampuannya memodelkan pola kerusakan akibat keausan (*wear-out*), yang relevan untuk komponen truk.

Pengujian ini dilakukan dengan menetapkan hipotesis pada taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$):

- H_0 (Hipotesis Nol): Data interval kerusakan mengikuti Distribusi Weibull.
- H_1 (Hipotesis Alternatif): Data interval kerusakan tidak mengikuti Distribusi Weibull.

Kriteria pengambilan keputusan adalah: H_0 diterima jika Nilai Statistik Hitung $M > F$ tabel.

Tabel 3 Hasil Rekap Uji Mann Untuk Distribusi Kerusakan

No.	Komponen Sistem	Nilai Statistik Hitung (M)	Nilai Ftabel (a=0,05)	Kesimpulan
1	Sistem Pelumas	0,39445	4,20665	H₀ Diterima
2	Sistem Suspensi	0,71605	3,72572	H₀ Diterima
3	Sistem Bahan Bakar	0,49014	4,20665	H₀ Diterima
4	Sistem Transmisi	0,27872	6,25605	H₀ Diterima
5	Sistem Rem	3,77867	4,95028	H₀ Diterima
6	Sistem Mesin	1,35261	4,87587	H₀ Diterima

Nilai Statistik Hitung (M) untuk semua komponen kritis (Sistem Pelumas, Suspensi, Bahan Bakar, Transmisi, Rem, dan Mesin) terbukti lebih kecil

daripada Nilai Ftabel yang bersesuaian. Dengan terpenuhinya kriteria $M < Ftabel$, maka Hipotesis Nol (H_0) diterima untuk semua sistem. Hal ini secara statistik membuktikan bahwa data interval kerusakan pada keenam komponen kritis truk memenuhi asumsi dan sesuai dengan Distribusi Weibull. Oleh karena itu, langkah analisis selanjutnya, yaitu perhitungan parameter distribusi dan penentuan jadwal *Age Replacement*, dapat dilakukan dengan valid.

4. Perhitungan Parameter Distribusi Weibull

Setelah data interval kerusakan terbukti sesuai dengan Distribusi Weibull melalui Uji Mann, langkah selanjutnya adalah menghitung parameter Distribusi Weibull, yaitu parameter bentuk (β) dan parameter skala (α). Perhitungan dilakukan menggunakan metode Regresi Linear terhadap data kerusakan yang telah ditransformasi logaritma natural (sesuai persamaan 4 dan 5). Hasil dari perhitungan Regresi Linear menghasilkan nilai konstanta (a) dan koefisien regresi (b), yang kemudian digunakan untuk menghitung α dan β .

Tabel 4 Hasil Perhitungan Parameter Distribusi Weibull pada Komponen Kritis

No.	Komponen	Parameter b (Slope)	Parameter a (Intercept)	Parameter α (Skala)	Parameter β (Bentuk)
1	Sistem Pelumas	0,2119	9,55207	14.073,92	4,71911
2	Sistem Suspensi	0,19799	9,64875	15.502,55	5,05054
3	Sistem Bahan Bakar	0,17839	9,48794	13.199,70	5,60548
4	Sistem Transmisi	0,20003	9,86487	19.242,41	4,99901
5	Sistem Rem	0,1707	9,96946	21.364,13	5,85797
6	Sistem Mesin	0,1491	9,75049	17.162,68	6,70652

Perlu diperhatikan bahwa meskipun hasil uji Mann menunjukkan seluruh komponen mengikuti distribusi Weibull, terdapat variasi jumlah data antar komponen. Untuk sistem seperti transmisi dengan jumlah 21 kejadian, hasil parameter β dan α memiliki tingkat kepercayaan yang lebih sensitif dibandingkan komponen dengan populasi data lebih besar, sehingga pemantauan teknis manual tetap disarankan sebagai pendamping hasil model ini.

Tabel 4 menunjukkan hasil estimasi parameter distribusi Weibull pada setiap komponen truk. Parameter-parameter ini sangat penting dalam analisis keandalan:

1. Parameter Bentuk (β): Parameter ini menggambarkan pola kerusakan komponen. Untuk semua komponen kritis truk, nilai β yang dihasilkan lebih besar dari 1 (misalnya, Sistem Mesin $\beta = 6,70652$; Sistem Suspensi $\beta = 5,05054$). Nilai $\beta > 1$ secara teoretis mengindikasikan bahwa laju kerusakan komponen meningkat seiring bertambahnya usia pakai (*Increasing Failure Rate / Wear-out Failure*). Pola kerusakan akibat keausan ini secara logis membenarkan dan mendukung penggunaan Metode *Age Replacement* untuk menentukan interval penggantian pencegahan, karena komponen

- harus diganti sebelum mencapai usia di mana kerusakan mendadak mulai sering terjadi.
2. Parameter Skala (α): Parameter ini memiliki satuan yang sama dengan waktu atau jarak tempuh (kilometer) dan merupakan karakteristik umur keandalan komponen. Nilai α yang tinggi menunjukkan usia keandalan rata-rata yang lebih lama. Nilai α dan β inilah yang selanjutnya digunakan untuk menghitung fungsi keandalan dan fungsi laju kerusakan.

5. Perhitungan Fungsi Keandalan

Setelah mendapatkan parameter α dan β dari Distribusi Weibull, langkah selanjutnya adalah menghitung fungsi-fungsi keandalan utama yang digunakan dalam penentuan jadwal *Age Replacement*: Fungsi Keandalan ($R(t)$), Fungsi Distribusi Kumulatif Kegagalan ($F(t)$), Fungsi Kepadatan Peluang ($f(t)$), dan Fungsi Laju Kerusakan ($\lambda(t)$). Perhitungan ini menggunakan asumsi waktu (t) yang sama dengan rata-rata interval kerusakan aktual komponen (misalnya, $t=13.000$ km untuk Sistem Pelumas).

Tabel 5 Hasil Perhitungan Fungsi Keandalan Komponen Kritis Truk

No.	Komponen	Keandalan ($R(t)$)	Peluang Kegagalan ($1-R(t)$ atau $F(t)$)	Laju Kerusakan ($\lambda(t)$)	Kepadatan Peluang ($f(t)$)
1	Sistem Pelumas	0,81926	0,18074	0,000094074	0,000077072
2	Sistem Suspensi	0,99999	0,00001	0,000055169	0,000055169
3	Sistem Bahan Bakar	0,80981	0,19019	0,000118247	0,000095758
4	Sistem Transmisi	0,96278	0,03722	0,000189612	0,00018255
5	Sistem Rem	0,98835	0,01165	0,00006862	0,00006782
6	Sistem Mesin	0,99999	0,00001	0,00017916	0,00017443

Analisis Fungsi Laju Kerusakan ($\lambda(t)$) memberikan wawasan krusial mengenai risiko kegagalan seiring bertambahnya usia pakai komponen. Nilai $\lambda(t)$ yang dihitung pada usia rata-rata kerusakan aktual menunjukkan bahwa laju kegagalan per kilometer berbeda-beda untuk setiap sistem, dengan Sistem Transmisi mencatat laju kerusakan tertinggi (0,000189612) dan Sistem Suspensi mencatat laju kerusakan terendah (0,000055169). Nilai $\lambda(t)$ ini, yang dikombinasikan dengan nilai β (parameter bentuk) yang lebih besar dari satu untuk semua sistem, menegaskan bahwa semua komponen kritis truk berada dalam fase *wear-out* (keausan), di mana laju kegagalan terus meningkat seiring bertambahnya jarak tempuh. Laju kerusakan yang meningkat ini mengimplikasikan bahwa menunggu kerusakan terjadi (*corrective maintenance*) akan menyebabkan risiko kegagalan mendadak yang semakin tinggi, terutama pada sistem dengan $\lambda(t)$ tinggi seperti

Transmisi. Oleh karena itu, data $\lambda(t)$ menjadi pendorong utama dalam perhitungan optimasi biaya, menunjukkan urgensi untuk melakukan tindakan pencegahan pada usia yang lebih muda demi menghindari *downtime* tak terencana dan meminimalkan biaya perawatan total per kilometer di masa mendatang.

6. Waktu Penggantian Pencegahan dan Kerusakan

Tahap ini bertujuan untuk menentukan interval jarak tempuh (T_p dan T_f) yang dibutuhkan untuk kegiatan penggantian, baik yang bersifat pencegahan (*preventive*) maupun perbaikan akibat kerusakan (*corrective*). Interval ini dikonversi ke dalam satuan kilometer (Km) agar sesuai dengan satuan waktu kegagalan komponen truk yang diukur berdasarkan jarak tempuh.

Tabel 6 Perhitungan Interval Jarak Penggantian Pencegahan (Tp) dan Kerusakan (Tf)

No.	Komponen Sistem	Interval Kerusakan (Tf) (Km)	Interval Pencegahan (Tp) (Km)	Selisih/Margin (Km)
1	Sistem Pelumas	18.750	12.500	6.250
2	Sistem Suspensi	50.000	25.000	25.000
3	Sistem Bahan Bakar	18.750	12.500	6.250
4	Sistem Transmisi	62.500	37.500	25.000
5	Sistem Rem	50.000	25.000	25.000
6	Sistem Mesin	31.250	18.750	12.500

Hasil perhitungan interval jarak tempuh untuk penggantian pencegahan (Tp) dan kerusakan (Tf) menggarisbawahi secara kuantitatif perbedaan mendasar antara kedua jenis perawatan. Secara konsisten, Interval Penggantian Pencegahan (Tp) selalu lebih kecil dibandingkan dengan Interval Penggantian Kerusakan (Tf) pada seluruh sistem komponen kritis. Interval Tf (misalnya 62.500 km pada Sistem Transmisi) mewakili jarak tempuh yang diperlukan untuk melakukan penggantian yang telah dijadwalkan, menghasilkan *downtime* yang jauh lebih singkat dan biaya tenaga kerja serta logistik yang lebih rendah. Nilai Tp yang lebih pendek ini berfungsi sebagai margin keamanan yang kritis. Data ini

kemudian menjadi landasan utama untuk model optimasi *Age Replacement* karena memungkinkan peneliti membandingkan biaya *downtime* yang mahal (Tf) dengan biaya penggantian pencegahan yang relatif murah (Tp), yang pada akhirnya mengarahkan pada penentuan interval penggantian optimal yang meminimalkan total biaya per kilometer.

7. Biaya Penggantian Pencegahan dan Kerusakan

Perhitungan ini bertujuan untuk menetapkan biaya aktual yang terjadi pada perusahaan untuk setiap tindakan penggantian, baik yang direncanakan (Cp) maupun yang tidak terencana (Cf). Biaya ini mencakup harga suku cadang, biaya tenaga kerja, dan biaya *downtime* yang disebabkan oleh perbaikan. Biaya *downtime* dimasukkan karena kerugian kesempatan memperoleh keuntungan adalah komponen signifikan dari biaya kerusakan.

Tabel 7 Biaya Penggantian Pencegahan dan Kerusakan Komponen

No.	Komponen Sistem	Biaya Penggantian Preventif (Cp) (Rp)	Biaya Penggantian Kerusakan (Cf) (Rp)	Selisih Biaya (Cf-Cp) (Rp)
1	Sistem Pelumas	1.431.115	3.520.108	2.088.993
2	Sistem Suspensi	3.693.300	8.875.000	5.181.700
3	Sistem Bahan Bakar	1.151.750	3.250.000	2.098.250
4	Sistem Transmisi	6.702.775	16.500.000	9.797.225
5	Sistem Rem	2.508.850	6.175.000	3.666.150
6	Sistem Mesin	3.004.700	7.950.000	4.945.300

Analisis perhitungan Biaya Penggantian Preventif (C_p) dan Biaya Penggantian Kerusakan (C_f) menjadi pilar utama yang menjustifikasi penerapan Metode *Age Replacement*. Hasil ini menunjukkan adanya kontras biaya yang sangat signifikan di mana Biaya Penggantian Kerusakan (C_f) jauh lebih mahal daripada Biaya Penggantian Preventif (C_p) pada semua komponen kritis.

Sebagai contoh, selisih biaya terbesar ditemukan pada Sistem Transmisi, di mana biaya C_f mencapai Rp16.500.000, atau hampir Rp10 juta lebih mahal daripada biaya C_f yang hanya Rp6.702.775 per unit penggantian. Kesenjangan biaya ini tidak hanya mencakup biaya suku cadang, yang diperoleh berdasarkan hasil survei harga pasar melalui platform *e-commerce* dan toko suku cadang, serta biaya tenaga kerja perbaikan. Namun, komponen biaya terpenting dan terbesar dalam C_f adalah biaya *downtime* yang diakibatkan oleh kerusakan mendadak. Kerugian pendapatan akibat truk tidak beroperasi selama perbaikan korektif (biaya *downtime*) secara eksponensial meningkatkan biaya C_f melebihi C_p.

Dengan adanya perbedaan biaya yang masif ini, model optimasi *Age Replacement* secara logis

diarahkan untuk mencari interval penggantian yang lebih konservatif (*preventive*) agar perusahaan dapat mengeluarkan biaya yang lebih rendah (C_p) secara terencana, sehingga secara efektif meminimalkan risiko pengeluaran biaya yang tinggi dan tidak terduga (C_f) di kemudian hari. Data biaya ini menjadi variabel input krusial dalam langkah terakhir, yaitu penentuan interval penggantian yang paling ekonomis.

8. Penentuan Interval Penggantian Optimal (Minimasi Total Biaya)

Penentuan Interval Penggantian Optimal (tp*) dilakukan dengan mengaplikasikan Metode *Age Replacement*. Model ini menghitung Ekspektasi Total Biaya Penggantian per Kilometer (C(t)) pada berbagai usia komponen (t). Interval optimal adalah titik usia (tp*) yang menghasilkan nilai C(t) paling rendah, karena pada titik ini, biaya perawatan pencegahan (C_p) dan biaya risiko kerusakan (C_f) mencapai keseimbangan paling ekonomis.

Tabel 8 Rangkuman Interval Penggantian Optimal dan Ekspektasi Biaya Minimal

No.	Komponen Sistem	Rata-rata Kerusakan Aktual (Km)	Interval Penggantian Optimal (tp*) (Km)	Ekspektasi Biaya Minimal (C(tp*)) (Rp/Km)
1	Sistem Pelumas	13.000	8.000	Rp46,77
2	Sistem Suspensi	14.314	10.000	Rp147,45
3	Sistem Bahan Bakar	12.300	8.500	Rp43,41
4	Sistem Transmisi	17.775	11.500	Rp198,14
5	Sistem Rem	19.920	14.000	Rp115,46
6	Sistem Mesin	16.100	11.500	Rp115,24

Secara logistik, interval optimal yang bervariasi (8.000 km hingga 14.000 km) dapat menimbulkan frekuensi *downtime* yang tinggi jika diterapkan secara kaku. Untuk meningkatkan efisiensi operasional, perusahaan dapat menerapkan strategi '*Maintenance Clustering*'. Sebagai contoh, komponen dengan

interval berdekatan seperti sistem pelumas (8.000 km) dan bahan bakar (8.500 km) dapat dijadwalkan bersamaan pada batas bawah terkecil untuk meminimalkan frekuensi masuk bengkel, meskipun hal ini sedikit mengurangi sisa umur manfaat komponen demi kelancaran rotasi armada.

Tabel 9 Usulan Pengelompokan Jadwal Perawatan (*Maintenance Clustering*)

Kelompok	Komponen Terkait	Interval Optimal	Usulan Jadwal	Alasan Logistik

		Individu (Km)	Kelompok (Km)	
Grup A	Sistem Pelumas & Bahan Bakar	8.000 & 8.500	8.000	Sinkronisasi komponen dengan interval terpendek untuk efisiensi <i>downtime</i> .
Grup B	Sistem Suspensi, Mesin, & Transmisi	10.000 & 11.500	10.000	Penggabungan perawatan berat untuk mengurangi frekuensi unit masuk bengkel.
Grup C	Sistem Rem	14.000	14.000	Komponen dengan daya tahan terpanjang, dilakukan mandiri atau digabung dengan siklus Grup A berikutnya.

Penentuan Interval Penggantian Optimal (tp^*) merupakan konklusi dari seluruh analisis keandalan dan biaya yang telah dilakukan, di mana Metode *Age Replacement* digunakan untuk mengidentifikasi usia komponen yang paling ekonomis untuk diganti. Hasil yang disajikan dalam Tabel 8 secara jelas menunjukkan bahwa jadwal perawatan pencegahan yang optimal bagi PT Cakraindo Mitra Internasional adalah interval jarak tempuh yang lebih pendek (lebih konservatif) dibandingkan rata-rata usia kerusakan aktual komponen.

Penentuan Interval Penggantian Optimal (tp^*) merupakan konklusi dari seluruh analisis keandalan dan biaya yang telah dilakukan, di mana Metode *Age Replacement* digunakan untuk mengidentifikasi usia komponen yang paling ekonomis untuk diganti. Hasil yang disajikan dalam Tabel 8 secara jelas menunjukkan bahwa jadwal perawatan pencegahan yang optimal bagi PT Cakraindo Mitra Internasional adalah interval jarak tempuh yang lebih pendek (lebih konservatif) dibandingkan rata-rata usia kerusakan aktual komponen. Analisis ini secara konsisten menyimpulkan bahwa titik paling ekonomis bagi perusahaan adalah mengganti komponen jauh sebelum komponen tersebut mencapai usia rata-rata kegagalan. Sebagai contoh, Sistem Transmisi memiliki rata-rata kerusakan aktual pada 17.775 km, namun interval optimalnya ditemukan pada 11.500 km. Interval yang lebih konservatif ini sangat penting karena bertujuan untuk menghindari biaya C_f (biaya kerusakan) yang jauh lebih tinggi akibat *downtime* yang tidak terencana. Dengan mengikuti (tp^*) yang diusulkan, perusahaan dapat mengubah pengeluaran biaya yang tidak terduga menjadi biaya yang

terencana C_p , di mana Ekspektasi Biaya per Kilometer (Rp/Km) berada pada titik minimal. Variasi biaya minimal per kilometer, meskipun Sistem Transmisi mencatat nilai tertinggi (Rp198,14/Km), mengindikasikan prioritas investasi perawatan. Investasi pada jadwal optimal sistem ini menghasilkan dampak penghematan finansial total yang paling besar, menegaskan bahwa Metode *Age Replacement* terbukti efektif dalam meminimalkan biaya perawatan total dan memaksimalkan efisiensi operasional armada truk.

9. Analisis Efisiensi Biaya dan Implikasi Finansial

Analisis efisiensi biaya dilakukan dengan membandingkan Biaya Total Perawatan yang Dikeluarkan Perusahaan pada Kondisi Aktual (*Corrective Maintenance*) dengan Ekspektasi Biaya Total Tahunan jika menggunakan Interval Penggantian Optimal Metode *Age Replacement*.

Selain biaya langsung, transisi menuju perawatan preventif ini juga menuntut kesiapan manajemen dalam hal biaya penyimpanan suku cadang (*inventory cost*). Peningkatan frekuensi penggantian yang terjadwal mengharuskan ketersediaan stok penyanga yang lebih stabil dibandingkan pola korektif. Analisis sensitivitas sederhana menunjukkan bahwa penghematan tetap signifikan bahkan jika terjadi fluktuasi harga suku cadang, karena komponen biaya *downtime* darurat (C_f) tetap menjadi faktor pengurang efisiensi terbesar dalam kebijakan aktual saat ini.

Tabel 10 Perbandingan Biaya Perawatan Tahunan Aktual vs. Usulan Optimal

No.	Komponen Sistem	Total Biaya Aktual (Rp/Tahun)	Ekspektasi Biaya Usulan Optimal (Rp/Tahun)	Selisih Penghematan (Rp)	Persentase Penghematan (%)
1	Sistem Pelumas	13.914.165	5.121.315	8.792.850	63%
2	Sistem Suspensi	35.230.530	16.145.775	19.084.755	54%
3	Sistem Bahan Bakar	11.225.940	4.753.395	6.472.545	58%
4	Sistem Transmisi	59.062.110	21.696.330	37.365.780	63%
5	Sistem Rem	28.930.995	12.642.870	16.288.125	56%
6	Sistem Mesin	29.925.225	12.618.780	17.306.445	58%
Total Keseluruhan		178.288.995	72.618.780	105.310.530	59%

Pembahasan hasil penelitian ini menguatkan relevansi dan efektivitas Metode *Age Replacement* dalam konteks manajemen armada transportasi darat. Analisis Efisiensi Biaya dan Implikasi Finansial menunjukkan bahwa penerapan jadwal perawatan pencegahan optimal menghasilkan penghematan biaya total yang signifikan, yaitu sebesar Rp105.310.530 atau 59% per tahun dibandingkan dengan kebijakan *corrective maintenance* yang diterapkan sebelumnya. Penghematan ini, yang tertinggi dicapai pada Sistem Transmisi dan Sistem Pelumas (63%), secara kuat menjustifikasi bahwa biaya yang dikeluarkan perusahaan selama ini adalah *cost of unreliability* yang tinggi, didorong oleh mahalnya Biaya Penggantian Kerusakan (Cf) akibat *downtime* yang tidak terencana. Dengan mengadopsi jadwal optimal tp*, perusahaan berhasil mengubah biaya variabel yang tidak terduga menjadi biaya tetap yang terencana, sehingga meningkatkan stabilitas anggaran dan efisiensi operasional.

Untuk menguji ketahanan (*robustness*) dari model efisiensi biaya yang diusulkan terhadap fluktuasi ekonomi, dilakukan analisis sensitivitas terhadap harga suku cadang. Analisis ini sangat krusial mengingat adanya ketidakpastian harga komponen di pasar serta potensi kesalahan estimasi biaya *downtime* di lapangan. Dengan mensimulasikan kenaikan harga suku cadang dari skala moderat hingga pesimis (10% hingga 50%), penelitian ini mengevaluasi apakah peralihan ke kebijakan *preventive maintenance* masih memberikan keuntungan finansial dibandingkan metode korektif saat ini. Hasil simulasi pada Tabel 11 menunjukkan bahwa meskipun terjadi lonjakan harga suku cadang yang signifikan, penghematan biaya total tetap berada pada level yang menguntungkan, membuktikan bahwa biaya kegagalan mendadak (*emergency breakdown*) merupakan variabel yang jauh lebih mahal untuk ditanggung oleh Perusahaan.

Tabel 11 Analisis Sensitivitas Penghematan Biaya Terhadap Kenaikan Harga Suku Cadang

Skenario	Kenaikan Harga Suku Cadang	Ekspektasi Total Biaya Usulan (Rp/Tahun)	Potensi Penghematan (%)	Status Kelayakan
Baseline	0% (Harga Saat Ini)	Rp72.618.780	59%	Sangat Layak
Moderat	10%	Rp79.880.658	55%	Layak
Optimis	20%	Rp87.142.536	51%	Layak
Pesimis	50%	Rp108.928.170	39%	Tetap Lebih Efisien dari Aktual

Hal ini menegaskan bahwa strategi *Age Replacement* tidak hanya memberikan efisiensi dalam kondisi ideal, tetapi juga berfungsi sebagai lindung nilai (*hedging*) terhadap risiko pembengkakan biaya operasional akibat kerusakan mesin yang tidak terduga.

Temuan ini menunjukkan keterkaitan yang kuat dengan struktur pengetahuan dan penelitian terdahulu. Konsistensi hasil uji Weibull ($\beta > 1$) untuk semua sistem, mengindikasikan *wear-out failure* memvalidasi penggunaan *Age Replacement* sesuai teori dasar yang diuraikan oleh Barlow & Hunter (1960) dan buku teks keandalan seperti Ebeling (2019) dan Jardine & Tsang (2006). Selain itu, hasil penghematan biaya yang terukur mengkonfirmasi bahwa *age replacement* efektif sebagai strategi minimasi *downtime* dan biaya pada armada kendaraan.

Secara implikasi teoritis dan manfaat non-finansial, penelitian ini memperkuat adaptasi Metode *Age Replacement* di mana usia komponen diukur menggunakan satuan jarak tempuh (kilometer), yang lebih relevan untuk sistem dinamis seperti truk. Lebih dari sekadar penghematan biaya, manfaat terpenting yang muncul adalah peningkatan pada Keandalan (*Reliability*) dan Ketersediaan (*Availability*) armada. Dengan berkurangnya *downtime* yang tidak terencana, truk dapat beroperasi dengan lebih stabil, yang pada akhirnya meningkatkan kualitas layanan, mematuhi jadwal logistik, dan memperkuat citra perusahaan di mata pelanggan, sebuah capaian operasional yang melampaui metrik keuangan semata.

5. KESIMPULAN

Implementasi jadwal ini juga harus mempertimbangkan faktor muatan ekstrim (*overload*) yang secara teknis dapat memperpendek umur pakai komponen suspensi dan rem lebih cepat dari proyeksi jarak tempuh murni. Oleh karena itu, interval optimal ini sebaiknya digunakan sebagai batas maksimal penggantian dalam sistem manajemen perawatan perusahaan.

Penelitian ini berhasil menentukan interval perawatan pencegahan optimal (tp^*) untuk enam komponen kritis truk PT Cakraindo Mitra Internasional menggunakan Metode *Age Replacement* (ARM), di mana pola kerusakan terbukti mengikuti Distribusi Weibull (*wear-out failure*). Hasil utamanya menunjukkan bahwa interval penggantian yang

paling ekonomis adalah secara signifikan lebih pendek (lebih konservatif) dibandingkan usia kerusakan aktual komponen (misalnya, Sistem Transmisi optimal pada 11.500 km berbanding 17.775 km aktual). Dengan mengimplementasikan jadwal optimal ini, perusahaan berpotensi mencapai penghematan biaya perawatan tahunan sebesar 59% (senilai Rp105.310.530). Implikasi manajerial terpenting dari temuan ini adalah validasi finansial untuk beralih dari *corrective maintenance* yang mahal dan tidak terencana ke *preventive maintenance* yang proaktif, yang secara langsung meningkatkan keandalan dan ketersediaan armada. Namun, perlu diperhatikan bahwa hasil optimal ini sangat spesifik pada kondisi operasional dan rute perusahaan saat penelitian dilakukan, sehingga generalisasi harus dilakukan dengan hati-hati.

Berdasarkan hasil temuan, disarankan agar PT Cakraindo Mitra Internasional segera mengimplementasikan jadwal perawatan optimal tp^* ini ke dalam sistem manajemen perawatan mereka untuk merealisasikan penghematan biaya. Untuk penelitian di masa depan, disarankan agar dilakukan peningkatan kualitas pencatatan data dengan mendokumentasikan faktor-faktor operasional yang lebih rinci (seperti muatan spesifik, kondisi jalan, atau jam operasi) guna mengembangkan model perawatan yang lebih kompleks, misalnya mengintegrasikan faktor usia dan kondisi (*Age-Condition Replacement*).

6. REFERENSI

- Barlow, Richard E., and Larry C. Hunter. 1960. "Optimum Preventive Maintenance Policies." *Operations Research* 8(1):90–100.
- Ebeling, Charles E. 2019. *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. Long Grove, Illinois: Waveland Press.
- Hoyleland, Arnijot, and Marvin Rausand. 2004. *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*. New York: Wiley.
- Jardine, Andrew K. S., and Albert H. C. Tsang. 2006. *Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Ma'ruf Fakhrudin, Said Salim Dahda. 2021. "Determination of Lathe Component Replacement Interval Using Age Replacement Method." *Jurnal Teknovasi* 08:1–12.

Rushton, Alan, Phil Croucher, and Peter Baker. 2017. *The Handbook of Logistics and Distribution Management*. London: Kogan Page.

Tamin, Ofyar Z. 2008. *Perencanaan Dan Pemodelan Transportasi*. Bandung: ITB (Institut Teknologi Bandung).

Thomas, Douglas, and Brian Weiss. 2021. "Maintenance Costs and Advanced Maintenance Techniques in Manufacturing Machinery: Survey and Analysis." *International Journal of Prognostics and Health Management* 12(1):1–13. doi:10.36001/IJPHM.2021.V12I1.2883.