

## OPTIMASI MAINTENANCE TRAKSIMOTOR PADA LOKOMOTIF SERI CC206 1502, CC206 1319 DAN CC206 1342 BERBASIS MODEL KEGAGALAN DAN METODE POWER LAW PROCESS

Fifit Pramudita Aprilia<sup>1</sup>, Anda Iviana Juniani<sup>1\*</sup>, Pranowo Sidi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Desain dan Manufaktur, Jurusan Teknik Pemесinan Kapal,  
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

\*Email: [andaiviana@ppns.ac.id](mailto:andaiviana@ppns.ac.id)

### Abstrak

Kereta api memiliki kapasitas angkut massal, waktu tempuh yang lebih pasti atau tepat waktu, hemat bahan bakar, serta tujuan pemberhentian yang bisa menjangkau pusat-pusat perekonomian. Kereta api memerlukan keandalan lokomotif untuk menjaga ketepatan waktu dan efisiensi perjalanan. Salah satu komponen krusial adalah traksimotor sebagai penggerak utama, yang sering mengalami kerusakan, seperti pada lokomotif seri CC206 1502, CC206 1319, dan CC206 1342 di Dipo Sidotopo. Gangguan yang terjadi meliputi *ground* pada traksimotor, roda selip, dan kehilangan tenaga, yang berdampak pada penurunan kinerja lokomotif dan meningkatnya biaya perawatan. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan pemeliharaan traksimotor dengan metode *Power Law Process* (PLP) untuk menganalisis pola kegagalan berdasarkan data historis aktual. Analisis data *lifetime* menggunakan *Laplace Test* untuk menentukan pola kegagalan. Hasil menunjukkan hanya lokomotif CC206 1342 yang mengikuti pola *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP), sehingga dilanjutkan estimasi parameter dengan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE). Diperoleh nilai parameter  $\beta = 0.3251$  dan  $\lambda = 18.0573$ , di mana  $\beta < 1$  menunjukkan kegagalan lebih sering di awal pemakaian dan menurun seiring waktu, sedangkan  $\lambda$  menunjukkan laju kegagalan rata-rata. *Cramer-Von Mises test* mengonfirmasi kesesuaian model. Optimasi interval perawatan dilakukan dengan pendekatan ekspektasi biaya dan *Goal Programming*, menghasilkan jadwal perawatan yang meminimalkan biaya tanpa mengorbankan keandalan. Hasil penelitian ini dapat menjadi rekomendasi bagi Dipo Sidotopo dalam menyusun jadwal perawatan traksimotor yang efisien dan meningkatkan keandalan operasional lokomotif secara berkelanjutan.

**Kata kunci:** lokomotif CC206, *non-homogeneous poisson process*, *power law process*, traksimotor

### Abstract

Trains have mass transport capacity, more predictable or punctual travel times, fuel efficiency, and destinations that can reach economic centers. Trains require reliable locomotives to maintain punctuality and travel efficiency. One of the critical components is the traction motor as the primary drive, which often experiences failures, such as in the CC206 1502, CC206 1319, and CC206 1342 locomotives at the Sidotopo Depot. The issues include grounding in the traction motor, wheel slippage, and loss of power, which impact locomotive performance and increase maintenance costs. This study aims to optimize traction motor maintenance using the *Power Law Process* (PLP) method to analyze failure patterns based on actual historical data. Lifetime data analysis uses the *Laplace Test* to determine failure patterns. The results show that only the CC206 1342 locomotive follows the *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) pattern, so parameter estimation is continued using *Maximum Likelihood Estimation* (MLE). The parameter values obtained were  $\beta = 0.3251$  and  $\lambda = 18.0573$ , where  $\beta < 1$  indicates that failures occur more frequently at the beginning of use and decrease over time, while  $\lambda$  indicates the average failure rate. The *Cramer-Von Mises test* confirmed the model's suitability. Maintenance interval optimization was performed using the expected cost approach and *Goal Programming*, resulting in a maintenance schedule that minimizes costs without

*compromising reliability. The results of this study can serve as recommendations for Dipo Sidotopo in developing an efficient maintenance schedule for traction motors and improving the operational reliability of locomotives in a sustainable manner.*

**Keywords:** locomotive CC206, non-homogeneous poisson process, power law process, traximotor

## PENDAHULUAN

Kereta api berperan penting dalam mobilitas masyarakat dan distribusi logistik nasional, terutama untuk mengurangi kemacetan dan mendukung ekonomi. Contohnya, Kereta Cepat Jakarta–Bandung mampu memangkas waktu perjalanan hingga 80% (Fitrianingrum, 2022). Selain itu, kereta api juga mendorong pariwisata serta mempercepat distribusi produk (Ramadhan, 2023).

Lokomotif sebagai penggerak utama memerlukan pemeliharaan terstruktur, terutama pada komponen penting seperti traksimotor yang rentan rusak akibat beban tinggi, panas, dan keausan. Di Dipo Lokomotif Sidotopo, kerusakan berulang pada traksimotor seri CC206 1502, CC206 1319, dan CC206 1342 menurunkan keandalan dan meningkatkan biaya operasional.

Sebagai upaya mengatasinya, digunakan metode *Power Law Process* (PLP), yaitu pendekatan statistik berbasis *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) yang menganalisis perubahan laju kegagalan komponen seiring waktu. Dengan metode ini, strategi pemeliharaan dapat dirancang lebih tepat, efektif, dan sesuai kondisi aktual komponen.

## TINJAUAN PUSTAKA

### (A) *Poisson Process*

*Poisson* proses yaitu kondisi ketika terjadi kejadian acak dalam waktu tertentu sehingga kondisi sebelumnya mengalami kondisi stasioneritas (rata-rata kejadian tetap konstan), kenaikan independen (jumlah kejadian dalam satu interval waktu tidak bergantung pada kejadian di interval lainnya), dan keteraturan. Nilai  $N$  adalah jumlah kejadian yang muncul dari sebuah kegagalan pada interval waktu  $(0, t)$ , banyaknya kerusakan yang memiliki distribusi *poisson* dapat dituliskan dalam Persamaan 1 berikut (Ghahramani, 2016).

$$P(N(t) = n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Di mana:

$P(N(t) = n)$ : peluang peristiwa  $n$  terjadi dalam waktu  $t$

$\lambda$  : rata-rata laju kejadian

$t$  : waktu kejadian

$n!$  : faktorial, hasil perkalian semua bilangan bulat dari 1 hingga  $n$

$e$  : bilangan *euler* ( $e \approx 2.718$ ), basis logaritma natural

### (B) *Homogeneous Poisson Processes* (HPP)

*Homogeneous Poisson Processes* (HPP) adalah proses *poisson* dengan fungsi intensitas konstan dan tidak berubah seiring waktu, dimana waktu kedatangan bersifat independen dan berdistribusi eksponensial dengan parameter yang sama yaitu  $\lambda$  untuk *failure rate*. Oleh karena itu, HPP tidak dapat digunakan untuk memodelkan proses

dimana laju kejadian berubah seiring waktu (Rausand & Hoyland, 2004). Probabilitas jumlah kegagalan oleh waktu ke-T akan sama dengan Persamaan 2 berikut.

$$P(N(t) = r) = \frac{(\lambda t)^r e^{-\lambda t}}{r!} \dots\dots\dots (2)$$

Di mana:

$P(N(t) = r)$	: peluang peristiwa $r$ terjadi dalam waktu $t$
$\lambda$	: rata-rata laju kejadian
$t$	: waktu kejadian
$r$	: jumlah kejadian (bilangan bulat non-negatif)
$e$	: bilangan <i>euler</i> ( $e \approx 2.718$ ), basis logaritma natural

### (C) *Non-Homogeneous Poisson Processes (NHPP).*

*Non-Homogeneous Poisson Processes (NHPP)* merupakan proses *poisson* yang menggunakan fungsi intensitas tidak konstan. NHPP sering digunakan untuk memodelkan sistem yang dapat diperbaiki (*repairable*). NHPP adalah model yang sesuai jika diaplikasikan pada sistem dengan laju kerusakan yang menurun atau meningkat dengan menggunakan metode statistika yang relevan dan mudah untuk diaplikasikan (Rausand & Hoyland, 2004). Namun, dalam *Power Law Process (PLP)* yang merupakan bentuk khusus dari *Non-Homogeneous Poisson Process (NHPP)*, hanya dua parameter ( $\lambda$  dan  $\beta$ ) yang digunakan, tanpa menyertakan parameter lokasi ( $\gamma$ ) (Krisdiyantoro et al., 2019).

### (D) *Power Law Process*

*Power Law Proses* atau *Proses Weibull* merupakan salah satu model yang digunakan untuk data yang mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Processes (NHPP)*. *Power Law Process* menggunakan dua parameter utama yaitu  $\lambda$  (skala) dan  $\beta$  (bentuk). Model ini memiliki beberapa alasan untuk digunakan, salah satunya adalah model ini memiliki dasar yang praktis dalam hal perbaikan minimal (*minimal repair*). Distribusi *Weibull* membahas kegagalan pertama dan model *Power Law* membahas setiap kegagalan berikutnya untuk sistem yang dapat diperbaiki (Crow & Crow Reliability Resources, 2008).

NHPP biasa disebut dengan *Weibull Process*, karena *Rate of Occurrence of Failure (ROCOF)* memiliki fungsi *failure rate* yang sama dengan distribusi *Weibull*. ROCOF adalah estimasi nilai laju kerusakan dari suatu komponen, jika suatu komponen *repairable* telah diobservasi pada interval waktu  $(0, t)$  dengan  $t$  dapat ditentukan *interval time truncated case* atau *failure truncated case*, maka ROCOF dapat diaplikasikan dengan melihat beberapa kali kerusakan yang terjadi (Pangastuti, 2016).

### (E) *Failure Truncated Data dan Time Truncated Data*

*Failure Truncated Data* terjadi ketika pengamatan pada sistem yang dapat diperbaiki (*reparable system*) dihentikan setelah mencapai jumlah kegagalan tertentu, yang dinotasikan dengan  $N_k$  sebagai variabel tetap.  $T_k$  adalah waktu kegagalan dengan variabel acak.

*Time Truncated Data* terjadi ketika pengamatan dihentikan setelah mencapai waktu yang telah ditentukan (waktu ke-T), dengan  $N_k$  menjadi variabel acak yang

menunjukkan jumlah kegagalan dalam periode waktu  $(0, T_k)$  dan waktu kegagalan  $T_1 < T_2 < \dots < T$  adalah variabel tetap (Leung & Cheng dalam Tyas, 2016).

#### (F) Pengujian *Trend* dalam *Failure Rate*

Dalam konteks statistik, untuk menguji apakah terdapat tren dalam laju kegagalan komponen, salah satu metode yang dapat digunakan adalah uji MIL-HDBK 189. Uji ini dirancang untuk menentukan apakah ada perubahan signifikan dalam laju kegagalan seiring berjalannya waktu. Dalam pengujian ini, hipotesis yang digunakan akan berfokus pada analisis data kegagalan untuk mengidentifikasi pola yang mungkin menunjukkan peningkatan atau penurunan dalam keandalan komponen seiring waktu (Ridgon dalam Pangastuti, 2016). Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut.

$H_0$  : waktu kegagalan mengikuti *Homogeneous Poisson Process* (HPP) atau tidak ada *trend*

$H_1$  : waktu kegagalan mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP)

Statistik uji untuk *failure truncated* data dapat dinyatakan dengan Persamaan 3 sebagai berikut:

$$L = \frac{\left( \frac{\sum_{i=1}^{N-1} T_i}{N-1} - \frac{T_N}{2} \right)}{\frac{T_N}{\sqrt{12(N-1)}}} \dots\dots\dots(3)$$

Statistik uji untuk *time truncated* data dapat dinyatakan dengan Persamaan 4 sebagai berikut:

$$L = \frac{\left( \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N} - \frac{T}{2} \right)}{\frac{T}{\sqrt{12N}}} \dots\dots\dots(4)$$

Statistik uji L digunakan untuk menentukan pola kegagalan pada data *time truncated* maupun *failure truncated* dengan asumsi distribusi normal standar (rata-rata 0 dan deviasi standar 1) pada tingkat signifikansi 5%. Hipotesis nol ( $H_0$ ) menyatakan bahwa waktu kegagalan mengikuti *Homogeneous Poisson Process* (HPP). Jika nilai L berada di luar batas kritis, maka  $H_0$  ditolak dan data dianggap mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP). Nilai L yang tinggi menunjukkan kegagalan meningkat seiring waktu (sistem memburuk), sedangkan nilai L yang rendah menunjukkan keandalan meningkat sehingga kegagalan cenderung acak dengan laju konstan (HPP) (Ridgon dalam Pangastuti, 2016).

#### (G) Estimasi Parameter

##### (1) *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk *Failure Truncated*

*Maximum Likelihood Estimation* (MLE) berfungsi untuk menemukan nilai parameter yang memaksimalkan fungsi *likelihood* berdasarkan data yang diamati. Perhitungan parameter  $\lambda$  dan  $\beta$  untuk *failure truncated* dinyatakan dalam Persamaan 5 dan 6 berikut (Ridgon & Basu dalam Pangastuti, 2016).

$$\lambda = \frac{T_N}{N \frac{1}{\beta}} \dots\dots\dots(5)$$

$$\beta = \frac{N}{\sum_{i=1}^{N-1} \ln \left( \frac{T_N}{T_i} \right)} \dots\dots\dots(6)$$

(2) *Maximum Likelihood Estimation (MLE) untuk Time Truncated*

Diberikan nilai waktu kegagalan sebesar  $T_1 < T_2 < \dots < T_N < T$  pengamatan waktu kegagalan berhenti setelah ditetapkannya waktu ke-T, sehingga kegagalan ke-N merupakan variabel random. *Maximum Likelihood Estimation (MLE)* untuk parameter  $\lambda$  dan  $\beta$  yang dinyatakan dalam Persamaan 7 dan 8 berikut (Ridgon & Basu dalam Pangastuti, 2016).

$$\lambda = \frac{T}{N^{\frac{1}{\beta}}} \dots \dots \dots (7)$$

$$\beta = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \ln \left( \frac{T_N}{T_i} \right)} \dots \dots \dots (8)$$

(3) *Goodness of Fit Test*

Pengujian *Goodness of Fit* digunakan untuk mengevaluasi sesuai atau tidaknya suatu model sebagai *Power Law Process (PLP)*. Pengujian ini menggunakan uji *Cramer-Von Mises* untuk menguji apakah waktu kegagalan sistem yang dapat diperbaiki mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process (NHPP)* (Crowder dalam Tyas, 2016).

Statistik uji untuk metode *Cramer-Von Mises* dinyatakan dalam persamaan di bawah ini.

$$C_R^2 = \frac{1}{12M} + \sum_{j=1}^M \left( R_i - \frac{2i-2}{2M} \right)^2 \dots \dots \dots (9)$$

Di mana:

$$\hat{R}_i = \left( \frac{T_i}{T} \right)^{\beta} \dots \dots \dots (10)$$

Nilai *unbiased estimator* untuk  $\beta$  sebagai berikut:

$$\tilde{\beta} = \frac{M}{N} \tilde{\beta} \dots \dots \dots (11)$$

Hipotesis nol ditolak jika  $C_R^2$  lebih besar dari nilai kritis untuk *Goodness of Fit Test Cramer-Von Mises* pada level signifikansi sebesar 5%. Jika nilai  $C_R^2$  lebih kecil dari nilai kritis, maka hipotesis nol diterima, yang berarti waktu kegagalan mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process (NHPP)* dengan model *Power Law Process (PLP)*, dan *Rate of Occurrence of Failure (ROCOF)* memiliki parameter bentuk  $\beta \neq 1$  (Tyas, 2016).

(4) *Model Optimasi*

Kebijakan penggantian optimal bertujuan untuk menentukan waktu penggantian atau perbaikan komponen yang meminimalkan biaya jangka panjang sambil memastikan keandalan sistem. Fungsi nilai laju kerusakan terhadap waktu untuk *Power Law Process (PLP)* dinyatakan dalam persamaan berikut ini (Nagakawa dalam Pangastuti, 2016).

$$W(t) = \int_0^t w(t) dt = \left( \frac{t}{\lambda} \right)^{\beta} \dots \dots \dots (12)$$

(5) *Traksimotor Roda Lokomotif*

Pada lokomotif diesel-elektrik, traksimotor menerima energi listrik dari generator utama yang digerakkan oleh mesin diesel. Generator ini menghasilkan arus listrik, baik dalam bentuk arus searah (DC) maupun arus bolak-balik (AC), yang kemudian diubah oleh motor traksi menjadi torsi mekanik untuk memutar roda lokomotif. Biasanya, traksimotor yang digunakan pada lokomotif diesel-elektrik adalah motor DC seri, yang memiliki karakteristik torsi tinggi dan cocok untuk penggerakan berat seperti pada kereta api (Fitria & Pamuji, 2015). Secara umum

traksimotor terdiri atas beberapa komponen seperti stator, rotor, komutator dan sikat arang (Citra Teknologi Anisa film, 2015).

## METODE

Penelitian ini menggunakan metode *Power Law Process* (PLP) untuk menganalisis data historis kerusakan traksimotor pada lokomotif CC206 1502, CC206 1319, dan CC206 1342 di Dipo Sidotopo. Gangguan yang sering muncul meliputi *grounding*, alarm menyala terus, roda selip, dan hilangnya tenaga sehingga berdampak pada performa lokomotif, meningkatkan biaya perawatan, serta menurunkan efisiensi pemeliharaan. Data yang digunakan berupa *time truncated* selama 530 hari dengan tiga kali kegagalan (*failure truncated*). Analisis dilakukan melalui uji tren menggunakan *Laplace Test* untuk mengetahui pola kegagalan, dilanjutkan dengan estimasi parameter bentuk ( $\beta$ ) dan skala ( $\lambda$ ) melalui *Maximum Likelihood Estimation* (MLE), serta uji kesesuaian model menggunakan *Cramer-Von Mises Test*. Tahap akhir berupa perhitungan perbandingan biaya perawatan *preventif* dengan biaya kerusakan untuk menentukan interval perawatan optimal. Hasil penelitian memberikan rekomendasi waktu perawatan yang efisien sehingga mampu menekan biaya dan mengurangi *downtime* lokomotif.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penerapan metode *Power Law Process* (PLP) dalam penentuan waktu perawatan optimal traksimotor pada lokomotif seri CC206 1502, CC206 1319, dan CC206 1342 menunjukkan efektivitas metode ini dalam mengoptimalkan jadwal perawatan preventif serta menekan biaya operasional. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *failure truncated data* dengan jumlah kerusakan sebanyak 3 dan *time truncated data* dengan yang ditetapkan adalah sebesar 530 hari.

**Tabel 1.** Statistika Deskriptif *Lifetime* (Hari) Komponen Traksimotor

NO SERI LOKOMOTIF	Jarak Kejadian Kerusakan (Hari)		
	1	2	3
CC206 1502	334	9	53
CC206 1319	134	221	111
CC206 1342	3	46	106

Langkah pertama dalam menganalisis data dari *repaireable system* adalah mengetahui apakah terdapat *trend* pada waktu antara kegagalan dari komponen traksimotor lokomotif kereta api seri CC menggunakan *Laplace Test* untuk *time truncated data* dan *failure truncated data* terhadap nilai *critical value*  $Z\alpha/2 = 1.96$  dengan nilai  $\alpha = 0.05$ .

**Tabel 2.** Hasil Pengujian *Laplace Test* untuk *Failure Truncated Data*

NO SERI LOKOMOTIF	L	Keputusan
CC206 1502	-1.5057	Terima $H_0$
CC206 1319	-1.2415	Terima $H_0$
CC206 1342	-2.4151	Tolak $H_0$

**Tabel 3.** Hasil Pengujian *Laplace Test* untuk *Time Truncated Data*

NO SERI LOKOMOTIF	L	Keputusan
CC206 1502	-1.5057	Terima $H_0$
CC206 1319	-1.2415	Terima $H_0$
CC206 1342	-2.4151	Tolak $H_0$

Hasil uji statistik menunjukkan bahwa traksimotor lokomotif CC206 1342 memiliki nilai lebih besar dari -1,96 sehingga hipotesis nol ditolak. Dengan demikian, data *lifetime* komponen ini mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) dan layak dianalisis lebih lanjut. Setelah pola kegagalan ditentukan, dilakukan estimasi parameter *Power Law Process* (PLP) menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk memperoleh nilai parameter bentuk ( $\beta$ ) dan skala ( $\lambda$ ) sebagai dasar perhitungan berikutnya.

**Tabel 4.** Hasil Estimasi Parameter *Failure Truncated*

Traksimotor Lokomotif CC206 1342	Estimasi Parameter	
	$\beta$	$\lambda$
CC206 1342	0.6819	21.1635

**Tabel 5.** Hasil Estimasi Parameter *Time Truncated*

Traksimotor Lokomotif CC206 1342	Estimasi Parameter	
	$\beta$	$\lambda$
CC206 1342	0.3251	18.0573

Nilai  $\beta < 1$  menunjukkan bahwa laju kegagalan traksimotor menurun seiring waktu, sehingga pemeliharaan preventif dapat dijadwalkan untuk mengurangi risiko kerusakan mendadak dan biaya perawatan. Selanjutnya dilakukan *Goodness of Fit Test* untuk memastikan kesesuaian metode *Power Law Process* (PLP) dengan data *lifetime* yang dianalisis.

**Tabel 6.** Hasil Pengujian *Goodness of Fit Test*

Traksimotor Lokomotif CC206 1342	Nilai $C_R^2$	
	<i>Failure Truncated</i>	<i>Time Truncated</i>
CC206 1342	0.0472	0.1182

Pengujian *Goodness of Fit Test* menunjukkan bahwa baik data *time truncated* maupun *failure truncated* cocok dimodelkan dengan *Power Law Process* (PLP) karena nilai uji *Cramér-Von Mises* berada di bawah nilai kritis pada taraf signifikansi 5%. Untuk analisis lanjutan dipilih data *time truncated* karena melibatkan pengamatan selama periode waktu yang sudah ditentukan, sehingga waktu pengamatan bersifat tetap, sementara jumlah kegagalan yang terjadi selama periode tersebut bersifat variabel. Oleh karena itu, analisis lanjutan seperti perhitungan *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) disajikan berdasarkan parameter dari data *time truncated* untuk memastikan akurasi dan relevansi estimasi laju kegagalan komponen traksimotor lokomotif.

**Tabel 7.** Nilai *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF)

t (Hari)	ROCOF w(t) (Kegagalan/Hari)
100	0.005671
200	0.003489
300	0.002666
400	0.002203
500	0.001909

Dapat dilihat pada Tabel 7 bahwa nilai ROCOF mengalami penurunan mulai dari  $t = 100$  hari hingga  $t = 500$  hari. Pola ini menggambarkan kecenderungan menurun (*trend* turun) yang menandakan bahwa intensitas kerusakan tidak konstan dan cenderung semakin jarang seiring berjalannya waktu. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa komponen traksimotor mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) dengan pendekatan *Power Law Process* (PLP), di mana ROCOF yang menurun sejalan dengan hasil estimasi  $\beta < 1$ .

Dalam penelitian ini diperhitungkan dua jenis biaya utama, yaitu biaya preventif ( $C_p$ ) dan biaya kegagalan ( $C_f$ ). Biaya preventif ( $C_p$ ) merupakan biaya rata-rata perawatan terencana sebelum terjadi kerusakan dengan nilai sebesar Rp800.000,- setiap kali tindakan. Sementara itu, biaya kegagalan ( $C_f$ ) adalah biaya rata-rata yang timbul akibat kerusakan mendadak pada traksimotor, baik berupa penggantian komponen maupun perbaikan besar yang tidak terencana, dengan nilai sebesar Rp2.000.000,-. Estimasi kedua jenis biaya ini dihitung berdasarkan data pengamatan *time truncated* pada lokomotif CC206 1342, kemudian dianalisis menggunakan persamaan  $C(T;n)$ . Hasil perhitungan tersebut menggambarkan besarnya pengeluaran dari kerusakan pertama hingga kerusakan ke-T, sehingga dapat menjadi dasar dalam menentukan strategi perawatan yang paling efisien antara melakukan tindakan preventif atau menanggung risiko biaya akibat kegagalan.

**Tabel 8.** Ekspetasi Biaya Per Hari (Rupiah) untuk Perbaikan Komponen Traksimotor

Waktu (Hari)	Kerusakan Ke-N			
	1	2	3	4
100	Rp86.273	Rp56.059	Rp47.365	Rp44.341
200	Rp60.883	Rp37.291	Rp30.178	Rp27.456
300	Rp50.757	Rp29.930	Rp23.536	Rp20.983
400	Rp45.101	Rp25.851	Rp19.887	Rp17.446
500	Rp41.425	Rp23.212	Rp17.539	Rp15.179
600	Rp38.818	Rp21.344	Rp15.884	Rp13.587
700	Rp36.861	Rp19.943	Rp14.645	Rp12.399
800	Rp35.331	Rp18.848	Rp13.679	Rp11.474
900	Rp34.100	Rp17.966	Rp12.902	Rp10.730
1000	Rp33.085	Rp17.238	Rp12.261	Rp10.118
1100	Rp32.233	Rp16.626	Rp11.722	Rp9.604
1200	Rp31.507	Rp16.103	Rp11.262	Rp9.166
1300	Rp30.881	Rp15.651	Rp10.864	Rp8.787



1400	Rp30.335	Rp15.257	Rp10.516	Rp8.456
1500	Rp29.854	Rp14.909	Rp10.209	Rp8.163

Berdasarkan hasil perhitungan ekspektasi biaya per hari dari model optimasi fungsi  $C(T;n)$  untuk komponen traksimotor lokomotif CC2061342, nilai biaya minimum secara matematis diperoleh pada kombinasi  $T = 1500$  hari dan  $N = 4$ , yaitu sebesar Rp8.163 per hari. Namun, hasil tersebut tidak dipilih sebagai solusi optimal karena tidak sesuai dengan pola kerusakan aktual. Data aktual menunjukkan bahwa kerusakan komponen terjadi sebanyak tiga kali hanya dalam 106 hari. Oleh karena itu, pendekatan yang lebih relevan dan realistis adalah memilih  $T = 600$  hari dan  $N = 3$ , yang menghasilkan ekspektasi biaya sebesar Rp15.884 per hari. Kombinasi ini mempertimbangkan kondisi riil dan tetap memberikan efisiensi biaya yang cukup baik.

Meskipun secara historis kerusakan terjadi pada hari ke-3, 46, dan 106, hasil estimasi parameter dari model *Power Law Process* menunjukkan bahwa nilai  $\beta = 0,3251 < 1$ , yang berarti laju kegagalan menurun seiring waktu. Ini menandakan bahwa kerusakan yang terjadi merupakan bagian dari *early failure* dan setelah itu komponen memasuki fase yang lebih stabil. Oleh karena itu, waktu optimal preventif pada 600 hari masih dapat diterima sebagai keputusan yang efisien, karena mempertimbangkan risiko, biaya jangka panjang, dan tren penurunan laju kerusakan.

Dengan demikian, waktu optimal untuk perbaikan preventif komponen traksimotor lokomotif CC2061342 disarankan pada saat mencapai 3 kali kerusakan atau setelah beroperasi selama 600 hari, tergantung mana yang tercapai lebih dulu.

## KESIMPULAN

Penelitian ini mengoptimasi waktu perawatan preventif traksimotor pada lokomotif seri CC206 1342 menggunakan metode *Power Law Process* (PLP) berbasis *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP). Hasil analisis menunjukkan nilai parameter bentuk ( $\beta$ )  $< 1$ , yang berarti laju kegagalan komponen traksimotor menurun seiring waktu pemakaian, sehingga pemeliharaan preventif dapat dijadwalkan secara efisien untuk mengurangi risiko kerusakan mendadak. Dari perhitungan ekspektasi biaya perawatan, diperoleh waktu optimal perbaikan preventif pada 600 hari atau setelah 3 kali kerusakan, dengan biaya harian Rp15.884, sehingga dapat meminimalkan biaya perawatan dan *downtime* sambil menjaga keandalan operasional lokomotif. Dengan demikian, metode PLP efektif dalam penentuan kebijakan perawatan preventif komponen traksimotor pada lokomotif untuk mendukung efisiensi biaya dan keandalan transportasi kereta api.

## REFERENSI

- Andraningtyas, W. N. (2017). *Penentuan Waktu Optimum Perbaikan Mesin Separator SDC di PT. Ajinomoto Indonesia, Mojokerto Menggunakan Metode Power Law Process*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Citra Teknologi Anisa film. (2015). *Pemeliharaan Traksimotor*. Diakses 18 Januari 2025, <https://citra-teknologi.blogspot.com/2015/01/pemeliharaan-traksi-motor.html>
- Crow, L. H., & Crow Reliability Resources. (2008). *Practical Methods for Analyzing the Reliability of Repairable Systems*.

- Eny Hidayati. (2017). *Optimasi Penentuan Waktu Penggantian Komponen Impeler pada Mesin Hanger Shot Blast di PT. Barata Indonesia (Persero) Menggunakan Metode Power Law Process (PLP)*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Fitria, D., & Pamuji, M. (2015). Sistem Transmisi Elektrik pada Lokomotif CC201 di Lubuk Linggau. *Jurnal Desiminasi Teknologi*. 3, 1.
- Fitrianingrum, L. (2022). *Urgensi Kereta Api Cepat Jakarta Bandung (KCJB) bagi Jawa Barat*. Diakses pada 18 Januari 2025, <https://kumparan.com/liatejo/urgensi-kereta-api-cepat-jakarta-bandung-kcjb-bagi-jawa-barat-1zLO9l5FmPD/2>
- Ghahramani, S. (2016). *Fundamentals of Probability, with Stochastic Processes Third Edition* (Third Edition). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Kementrian Perhubungan Republik Indonesia Direktorat Jenderal Perkeretaapian. (2019). *Moda Transportasi Kereta Api, Moda Angkutan Umum Massal Pilihan di Perkotaan*. Diakses pada 18 Januari 2025, <https://djka.dephub.go.id/moda-transportasi-kereta-api-moda-angkutan-umum-massal-pilihan-di-perkotaan-1>
- Krisdiyantoro, A., Wibawati, & Haryono. (2019). *Analisis Reliabilitas pada Hydraulic Spreader System Container Crane di PT. Terminal Petikemas Surabaya*.
- Miftahul Innahyatul Hakima. (2018). *Menentukan Waktu Penggantian Komponen Dalam Mesin Bottomer di PT. Industri Kemasan Semen Gresik (IKSG) Menggunakan Power Law Process (PLP)*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- MIL-HDBK-00189A. (2009). *MIL-HDBK-00189A Reliability Growth Management*, 172.
- Pangastuti, S. S. (2016). *Optimasi Waktu Penggantian Komponen Roda Lokomotif Seri CC di Dipo Lokomotif Sidotopo PT. Kereta Api Indonesia (Persero) Menggunakan Metode Power Law Process*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Pratiwiningtyas, N. D. (2008). *Perancangan Model Reliabilitas pada Repairable System untuk Menentukan Waktu Optimum Overhaul Engine Dump Truck (Studi Kasus : Reliability Analysis pada Dump Truck Tambang Batubara Pama)*. Universitas Indonesia.
- Ramadhan, B. A. (2023). *Mendorong Pertumbuhan Ekonomi PT KAI Melalui Inovasi dan Pengembangan Infrastruktur*. Diakses pada 18 Januari 2025, <https://www.kompasiana.com/bintangawalramadhan/64a404994addee5b3e3ab122/mendorong-pertumbuhan-ekonomi-pt-kai-melalui-inovasi-dan-pengembangan-infrastruktur>
- Rausand, M., & Hoyland, A. (2004). *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications* (Second Edition).
- StatPoint Technologies. (2009). *Repairable systems (times)*. StatPoint Technologies.
- Tyas, N. A. (2016). *Penentuan Kebijakan Waktu Optimum Perbaikan Komponen Heat Exchanger (HE) Pesawat Boeing 737-800 Menggunakan Metode Power Law Process di PT. Garuda Maintenance Facility (GMF) Aeroasia*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.