

PENENTUAN TINGKAT KEGAGALAN KOMPONEN SISTEM TOILET KERETA API PROYEK 612 PT INKA PERSERO MENGGUNAKAN DISTRIBUSI WEIBULL

Wilda Kusumaningtyas

S1 Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

e-mail: wildakusumaningtyas.21007@mhs.unesa.ac.id*

Abstrak

Kereta api merupakan salah satu transportasi yang menjadi alternatif masyarakat dalam melakukan perjalanan darat. Kenyamanan fasilitas terutama sistem toilet kereta api menjadi perhatian produsen dan operator kereta api, karena memengaruhi kenyamanan penumpang selama perjalanan. Dalam artikel ini bertujuan untuk menentukan tingkat kegagalan yang terjadi pada komponen kereta api pada proyek 612 New Generation PT INKA dengan memanfaatkan distribusi Weibull sebagai bentuk evaluasi terhadap proses perbaikan dan pemeliharaan. Estimasi parameter distribusi Weibull yang digunakan yaitu memanfaatkan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE). Hasil estimasi parameter distribusi Weibull menunjukkan bahwa metode MLE secara manual lebih sensitif dalam mendeteksi perubahan pola kegagalan dalam data. Selain itu, nilai MTBF yang diperoleh melalui metode MLE baik yang dihitung secara manual maupun dengan pemrosesan data memiliki nilai yang sama pada beberapa komponen, namun terdapat selisih yang terlampau jauh seperti pada komponen F, G, J, K, L, M, S, V, X, dan AC. Sedangkan penentuan tingkat kegagalan dengan menggunakan metode yang dihitung dengan bantuan pemrosesan data lebih akurat dan presisi untuk menentukan parameter distribusi Weibull sehingga didapatkan tingkat kegagalan terendah yaitu pada komponen AF sebesar 0.00022 dan tingkat kegagalan tertinggi yaitu pada komponen D sebesar 0.00116.

Kata Kunci: Tingkat Kegagalan; Distribusi Weibull; Maximum Likelihood Estimation; Sistem Toilet; Kereta Api.

Abstract

The railway system is one of the alternative modes of transportation commonly used by the public for land travel. The comfort of facilities, particularly the train toilet system, has become a key focus for manufacturers and operators as it significantly affects passenger comfort during the journey. This article aims to determine the failure rate of train components in the 612 New Generation project by PT INKA using the Weibull distribution as an evaluation tool for the repair and maintenance process. The estimation of Weibull distribution parameters is performed using the Maximum Likelihood Estimation (MLE) method. The results of the Weibull distribution parameter estimation indicate that the manually applied MLE method is more sensitive in detecting changes in failure patterns within the data. Furthermore, the Mean Time Between Failures (MTBF) values obtained through the MLE method, whether calculated manually or through data processing, show identical results for several components. However, significant discrepancies are observed in components such as F, G, J, K, L, M, S, V, X, and AC. The determination of failure rates using data processing methods proves to be more accurate and precise in defining Weibull distribution parameters. As a result, the lowest failure rate is found in component AF at 0.00022, while the highest failure rate is observed in component D at 0.00116.

Keywords: Failure Rate; Weibull Distribution; Maximum Likelihood Estimation; Toilet System; Train.

PENDAHULUAN

Kereta api merupakan salah satu transportasi darat yang memiliki kelebihan terutama dapat terhindar dari kemacetan (Hermawan et al., 2020). Oleh karena itu, fasilitas di dalam kereta api menjadi hal penting untuk diperhatikan demi kenyamanan

penumpang. Salah satu fasilitas yang paling esensial yaitu sistem toilet.

Di dalam kereta api, toilet bukan hanya sekedar sebagai sarana sanitasi, namun juga berkontribusi langsung pada kebersihan, kesehatan, dan kenyamanan penumpang selama perjalanan. Sistem toilet di kereta api sering menghadapi permasalahan

berupa kegagalan operasional, kebocoran, penyumbatan, hingga cacat fungsi. Dari beberapa kerusakan yang dihadapi, maka dapat direpresentasikan dalam bentuk tingkat kegagalan. Tingkat kegagalan yang tinggi pada sistem toilet dapat mengurangi kenyamanan penumpang, memicu keluhan, bahkan berdampak pada citra layanan kereta api secara keseluruhan.

Dalam menentukan tingkat kegagalan suatu komponen dapat memanfaatkan distribusi Weibull. Distribusi Weibull adalah distribusi yang mempunyai peranan penting perihal keandalan (*reliability*) dan analisis rawatan (*maintainability*) (Ota, 2016). Dalam menentukan tingkat kegagalan komponen kereta api digunakan data berupa waktu kegagalan (*Time to Failure*). Namun, data ini memiliki ketidakaturan sehingga tidak dapat dipecahkan hanya dengan menggunakan distribusi normal. Menurut Ota (2016), jika menggunakan distribusi normal untuk data waktu kegagalan menghasilkan tingkat kegagalan yang kurang presisi disebabkan oleh ketidaknormalan data. Jika menggunakan distribusi normal maka *error* yang dihasilkan akan cukup besar.

Dalam evaluasi keandalan, parameter-parameter yang digunakan adalah parameter dari distribusi peluang. Nilai dari parameter-parameter tersebut sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti waktu kegagalan, waktu perawatan, jeda antar kegagalan, dan berbagai variabel terkait lainnya (Cristian Napitupulu & M L Tobing, 2013).

Weibull memiliki parameter skala dan bentuk. Parameter tersebut harus diketahui agar dapat dikaji lebih lanjut sifat dan karakteristik data yang terdistribusi Weibull. Parameter distribusi peluang adalah parameter yang digunakan untuk mengukur tingkat kegagalan distribusi Weibull. Karena kegagalan suatu komponen dalam sebuah sistem tidak terjadi pada waktu yang sama dan tidak diperbaiki pada waktu yang sama, *Time to Failure* (TTF) suatu komponen berbeda dari yang lainnya. Perbedaan nilai *Time to Failure* (TTF) ini mempengaruhi sebaran data kegagalan yang diwakili oleh *Time to Failure* (TTF). Waktu kegagalan dan perawatan sangat penting untuk mendapatkan nilai parameter (Ali et al., 2019).

Parameter distribusi Weibull yang digunakan dapat diestimasi menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE). Menurut Teimouri, 2013

(Teimouri et al., 2013) setelah membandingkan beberapa metode estimasi parameter distribusi Weibull, diperoleh bahwa estimasi terbaik salah satunya diperoleh melalui metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE). Secara umum, maksimum likelihood suatu fungsi bersifat nonlinier sehingga tidak dapat diselesaikan secara analitik. Oleh karena itu, untuk menyelesaikannya digunakan metode numerik, seperti metode Newton-Raphson (Paeto et al., 2022). Selain itu, metode iterasi dapat dilakukan dengan metode Brute Force Search merupakan metode yang langsung dan sederhana untuk menyelesaikan suatu masalah, biasanya berdasarkan pada pernyataan masalah dan definisi konsep yang terlibat (Sinaga, 2021).

Berdasarkan diskusi di atas, tujuan penelitian ini adalah (1) menentukan parameter Weibull dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) yang diiterasi dengan metode Newton-Raphson (manual) dan metode Brute Force Search (pemrosesan data), (2) menentukan nilai *Mean Time Between Failure* (MTBF) masing-masing komponen, (3) menentukan Tingkat kegagalan masing-masing komponen dan membandingkan antara perhitungan manual dan melalui pemrosesan data.

KAJIAN TEORI

A. Distribusi Weibull

Distribusi Weibull memiliki karakteristik yaitu 2 parameter antara lain parameter skala (α) dan parameter bentuk (β) (Bhattacharya & Bhattacharjee, 2010). Secara umum, berikut fungsi dari densitas distribusi Weibull (Lai et al., 2011).

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right) \quad (1)$$

Bentuk fungsi kerapatan bergantung pada parameter model, dengan hasil sebagai berikut:

- Untuk $\beta \leq 1$, fungsi kerapatan bersifat monoton menurun.
- Untuk $\beta > 1$, fungsi kerapatan memiliki bentuk unimodal dengan modus pada $t_m = \alpha \left\{\frac{\beta-1}{\beta}\right\}^{\frac{1}{\beta}}$

Fungsi laju risiko diberikan oleh:

$$h(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \quad (2)$$

Sama seperti fungsi kerapatan, bentuk fungsi laju risiko hanya bergantung pada parameter bentuk (β), sedangkan parameter skala (α) tidak memiliki pengaruh. Tiga kemungkinan bentuk fungsi tersebut adalah sebagai berikut:

- Untuk $\beta < 1$, fungsi laju risiko bersifat menurun.
- Untuk $\beta = 1$, fungsi laju risiko bersifat konstan.
- Untuk $\beta > 1$, fungsi laju risiko bersifat meningkat.

Untuk mendapatkan nilai parameter α dan β memanfaatkan metode *Maximum Likelihood Estimation* berikut ini (Salsinha, 2019).

$$L = L(\alpha, \beta) = \prod_{i=1}^n \alpha \beta x_i^{\beta-1} e^{-\alpha x_i^\beta}$$

$$L = (\alpha \beta)^n \prod_{i=1}^n x_i^{\beta-1} e^{-\sum_{i=1}^n \alpha x_i^\beta} \quad (3)$$

Estimasi parameter distribusi weibull juga dapat dicari dengan menggunakan metode Brute Force Search yang penyelesaiannya berdasarkan pada pernyataan masalah dan definisi konsep yang terlibat. Algoritma brute force menyelesaikan masalah dengan cara yang sangat mudah dan jelas. Dalam konteks pencocokan string, terdapat dua istilah penting: teks dan pola. Teks adalah kata yang dicari dan dibandingkan dengan pola tersebut. Algoritma Brute Force digunakan untuk memeriksa setiap posisi string dalam teks, mulai dari karakter pertama hingga karakter terakhir (Sinaga, 2021).

B. Tingkat Kegagalan (*Failure Rate*)

Tingkat kegagalan bergantung pada keandalan komponen dan memengaruhi frekuensi pemeliharaan serta biaya siklus hidup. Analisis Weibull dapat memperkirakan tingkat kegagalan komponen yang tidak konstan. Kegagalan terjadi saat tegangan melebihi kekuatan komponen, sehingga memprediksi keandalan berarti memperkirakan probabilitas kondisi tersebut (Hidayaturrohmah et al., 2021).

Salah satu strategi pemeliharaan yang memungkinkan adalah strategi *age replacement* (penggantian berdasarkan usia); yaitu, sistem selalu dan segera diganti atau dikembalikan ke kondisi seperti baru setelah kegagalan atau setelah waktu yang dijadwalkan T , mana saja yang terjadi lebih dahulu. Selanjutnya, waktu operasi rata-rata hingga kegagalan yang bergantung pada T dapat diperoleh dari persamaan berikut.

$$MTTF(T) = \frac{\int_0^T R(t) dt}{F(T)} \quad (10)$$

Jika $F(t)$ mengikuti distribusi eksponensial dengan tingkat kegagalan konstan λ (yaitu, tanpa penuaan), maka, sebagai akibatnya, $MTTF(T) = \frac{1}{\lambda}$ dan tidak ada pengaruh dari T (Mahboob & Zio, 2018). Dalam konteks distribusi Weibull, MTTF dapat dihitung menggunakan rumus:

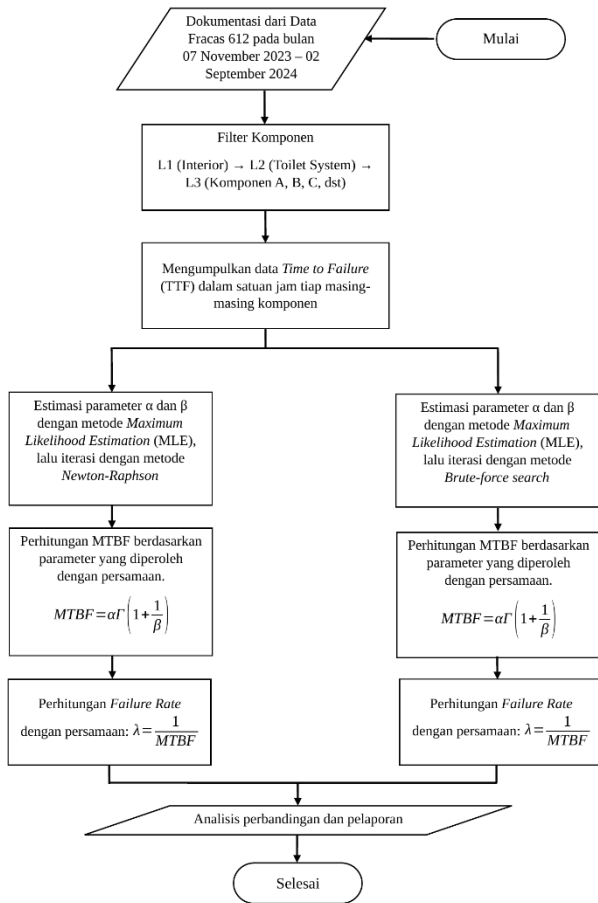
$$MTTF = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (11)$$

Di mana α adalah parameter skala dan β adalah parameter bentuk dari distribusi Weibull. Fungsi gamma, $\Gamma(x)$, merupakan fungsi matematis yang sering digunakan dalam statistik dan probabilitas untuk menghitung nilai ekspektasi dari distribusi yang tidak selalu berbentuk normal. Nilai $\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$ dapat ditemukan dalam tabel fungsi gamma, yang menyediakan nilai-nilai untuk berbagai input x (Sari Sukarna & Herrhyanto dan Fitriani Agustina, 2020). Dengan menggunakan rumus ini, MTTF memberikan estimasi yang lebih akurat tentang umur operasional komponen berdasarkan karakteristik distribusi kegagalannya, sehingga membantu dalam perencanaan pemeliharaan dan pengelolaan risiko operasional (Hakim et al., 2021).

METODE

Teknik pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain metode dokumentasi yang diperoleh melalui dokumen atau catatan mengenai peristiwa yang telah terjadi (Rachman et al., 2024). Dalam hal penelitian ini, data diambil dalam bentuk data sekunder berdasarkan dokumen FRACAS 612 terhitung dari tanggal 07 November 2023 hingga 02 September 2024 untuk komponen *Toilet System*. Data disaring dengan mengabaikan komponen yang hanya memiliki 1 waktu kegagalan (*Time to Failure*) dan komponen dengan waktu kegagalan memiliki variasi yang sama.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan perhitungan tingkat kegagalan komponen *toilet system* yang dihitung secara manual dengan perhitungan berdasarkan pemrosesan data. Rancangan penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 1** yang berupa diagram alir berikut ini.



Gambar 1 Alur penentuan nilai estimasi parameter Weibull dan perhitungan *failure rate* dan MTBF komponen sistem toilet kereta api proyek 612 New Generation

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut ini data komponen-komponen Toilet System kereta api untuk proyek 612 yang tercantum pada tabel 4.1. Data yang diambil dari dokumentasi FRACAS 612 PT INKA dari tanggal 07 November 2023 – 02 September 2024 mencakup nama komponen dan nilai *Time to Failure* (TTF) dalam satuan jam.

Tabel 4.1 Data Komponen dan *Time to Failure* Sistem Toilet Kereta Api Proyek 612 PT INKA. Sumber data: PT INKA (Persero) tanggal 07 November 2023 hingga 02 September 2024.

Klasifikasi Komponen (L1)	Klasifikasi System/Subsystem (L2)	Komponen (L3)	Rata - Rata Time to Failures (jam)
Interior	Toilet System	A	861.43
		B	2530.00
		C	1860.00
		D	865.00
		E	3323.64
		F	2631.72
		G	3742.73
		H	4497.50
		I	2375.00
		J	1843.22
		K	2380.62
		L	2646.29
		M	1576.02
		N	1835.00
		O	3103.33
		P	3712.38
		Q	1802.35
		R	1935.00
		S	2791.37
		T	1900.00
		U	2917.50
		V	2636.80
		W	2023.53
		X	2504.65
		Y	3717.33
		Z	915.00
		AA	3203.91
		AB	1628.57
		AC	3060.74
		AD	3918.95
		AE	2584.21
		AF	4595.00
		AG	1270.00
		AH	2888.89

1) Estimasi Parameter

Perhitungan Manual dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) dihitung dengan menggunakan persamaan fungsi log-likelihood berikut ini.

$$L = \ln \beta - \beta \ln \alpha + (\beta - 1) \ln t - \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta$$

Fungsi diatas digunakan untuk menghitung nilai log-likelihood pada setiap nilai TTF yang diketahui pada masing-masing komponen *Toilet System*. Untuk nilai parameter skala dan bentuk digunakan tebakan awal untuk mengitung log-likelihood. Dalam hal ini untuk parameter bentuk (β) sebesar 1.5 dan untuk parameter skala (α) menggunakan angka rata-rata nilai TTF setiap komponen. Kemudian keseluruhan nilai log-likelihood yang telah didapatkan dijumlahkan untuk setiap komponen. Sebagai contoh perhitungan untuk komponen *toilet system* pada sistem komponen A yang diketahui nilai rata-rata *time to failure* sebesar 861.43 jam sebagai parameter skala dan nilai 300 jam untuk nilai waktu kegagalan (t).

$$\begin{aligned} L &= \ln \beta - \beta \ln \alpha + (\beta - 1) \ln t - \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \\ L &= \ln(1.5) - 1.5 \ln 861.43 + (1.5 - 1) \ln(300) - \\ &\quad \left(\frac{300}{861.43}\right)^{1.5} \\ L &= -10.872 \end{aligned}$$

Dengan total waktu kegagalan TTF sebanyak 14 dengan rentang waktu yang berbeda maka untuk jumlah dari log-likelihood keseluruhan komponen A yaitu -107.3292645. Dari total log-likelihood tersebut, selanjutnya iterasi yang dilakukan dengan bantuan Excel pada bagian *Solver* maka didapatkan nilai parameter skala (α) sebesar 955.520 dan nilai parameter bentuk (β) sebesar 1.422.

Perhitungan dengan menggunakan *software* pemrosesan data "M" dilakukan dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) lalu diiterasi dengan menggunakan metode *Brute Force Search*. Kode yang digunakan memanfaatkan pendekatan iterasi *Brute Force Search*, yaitu dengan mencoba sejumlah nilai kandidat parameter bentuk (β) dalam rentang tertentu untuk memaksimalkan fungsi log-likelihood.

Langkah yang dilakukan yaitu mempersiapkan data dengan mengimpor data waktu kegagalan (TTF) dari file Excel dan dikonversi menjadi array numerik kemudian diurutkan secara *ascending* untuk

memfasilitasi estimasi parameter. Lalu data tersebut diuji apakah mengikuti distribusi Weibull menggunakan transformasi Mann Testing dengan menghitung nilai Z :

$$Z_i = \log \left(-\log \left(1 - \frac{i - 0.5}{r + 2.5} \right) \right)$$

Lalu, proses iterasi dengan menggunakan *Brute Force Search* dengan nilai kandidat parameter bentuk (β) dari 0.01 hingga 10 dengan langkah 0.001. Fungsi log-likelihood dihitung pada setiap iterasi dengan syarat sebagai berikut.

$$\frac{1}{\beta} - \frac{\sum_{i=1}^r (x_i^\beta \log x_i)}{\sum_{i=1}^r (x_i^\beta)} + \frac{\sum_{i=1}^r (\log x_i)}{r} \approx 0$$

Jika nilai selisih mendekati 0.0001, maka iterasi berhenti dan nilai β optimal diperoleh. Setelah parameter bentuk diperoleh, maka parameter skala dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\alpha = \left(\frac{\sum_{i=1}^r (x_i^\beta)}{r} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

Dengan demikian, maka hasil parameter skala dan bentuk yang diperoleh melalui metode MLE secara manual dan dengan bantuan pemrosesan data "M", tertera pada **Tabel 4.2**.

Berdasarkan hasil pada **Tabel 4.2** dengan estimasi parameter distribusi Weibull dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* yang dihitung secara manual dengan iterasi Newton - Raphson dan dengan menggunakan pemrosesan data dengan iterasi *Brute - Force Search*, diperoleh hasil parameter yang sama untuk beberapa komponen dan terdapat perbedaan signifikan pada parameter bentuk (β) dan skala (α) yang dihasilkan. Parameter bentuk β yang diperoleh melalui metode MLE secara manual cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan hasil dari MLE melalui pemrosesan data. Hal ini menunjukkan bahwa MLE secara manual lebih sensitif dalam mendeteksi perubahan pola kegagalan dalam data. Sebagai contoh, pada komponen G, metode MLE Pemrosesan data menghasilkan $\beta = 4.694$, sedangkan metode MLE manual memberikan nilai $\beta = 16.813$. Perbedaan ini dapat mempengaruhi interpretasi pola kegagalan sistem, di mana nilai $\beta > 1$ menegaskan adanya pola kegagalan akibat keausan (*wear-out failure*).

Tabel 4.2 Hasil Estimasi Parameter Skala dan Bentuk Distribusi Weibull secara Manual maupun melalui Pemrosesan Data.

Komponen (L3)	Parameter Bentuk (β) Manual	Parameter Skala (α) Manual	Parameter Bentuk (β) Pemrosesan Data	Parameter Skala (α) Pemrosesan Data	Error Parameter Bentuk (β)	Error Parameter Skala (α)
A	1.422	955.520	1.422	955.505	0.00%	0.00%
B	2.211	2854.982	2.211	2855.100	0.00%	0.00%
C	2.849	2101.628	2.849	2101.600	0.00%	0.00%
D	1.425	949.825	1.426	949.919	0.07%	0.01%
E	2.862	3733.682	2.862	3733.600	0.00%	0.00%
F	5.939	1041.087	1.979	2982.000	200.10%	65.09%
G	16.813	2576.440	4.694	4092.100	258.18%	37.04%
H	7.093	4824.670	7.089	4824.600	0.06%	0.00%
I	1.178	2509.699	1.178	2509.800	0.00%	0.00%
J	0.990	249.547	1.281	1973.200	22.72%	87.35%
K	1.902	412.481	1.494	2620.200	27.31%	84.26%
L	1.711	350.953	1.691	2938.800	1.18%	88.06%
M	3.806	342.844	1.485	1754.500	156.30%	80.46%
N	1.709	2075.489	1.709	2075.500	0.00%	0.00%
O	3.147	2964.944	2.860	3402.600	10.03%	12.86%
P	2.696	3966.664	2.675	4109.800	0.79%	3.48%
Q	1.083	1853.763	1.084	1854.100	0.09%	0.02%
R	0.922	1854.081	0.923	1854.800	0.11%	0.04%
S	2.094	921.904	2.005	3123.300	4.44%	70.48%
T	1.280	2052.958	1.280	2053.000	0.00%	0.00%
U	2.453	3255.546	2.453	3255.500	0.00%	0.00%
V	2.008	1649.942	2.495	2901.900	19.52%	43.14%
W	1.222	2174.949	1.222	2175.000	0.00%	0.00%
X	1.963	469.641	1.629	2784.800	20.50%	83.14%
Y	4.844	4067.448	4.843	4067.400	0.02%	0.00%
Z	2.624	1026.113	2.624	1026.100	0.00%	0.00%
AA	2.170	3734.606	3.026	3564.600	28.29%	4.77%
AB	0.766	1134.919	0.764	1418.300	0.26%	19.98%
AC	1.560	1762.461	2.166	3385.100	27.98%	47.93%
AD	4.236	4323.073	4.235	4323.000	0.02%	0.00%
AE	1.922	2832.696	1.922	2832.700	0.00%	0.00%
AF	8.367	4918.082	8.361	4918.000	0.07%	0.00%
AG	1.310	1388.442	1.310	1388.500	0.00%	0.00%
AH	3.513	3209.129	3.512	3209.100	0.03%	0.00%

Sementara itu, untuk parameter skala (α), metode MLE manual cenderung memberikan nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan MLE melalui pemrosesan data. Contohnya, pada komponen G, metode MLE melalui pemrosesan data menghasilkan $\alpha = 4092.100$, sedangkan metode MLE secara manual memberikan nilai $\alpha = 2576.440$. Perbedaan hasil estimasi parameter skala (α) antara metode MLE manual dan MLE melalui pemrosesan data dapat dijelaskan dari beberapa sudut pandang. Metode MLE manual biasanya menggunakan pendekatan yang lebih sederhana dengan sejumlah asumsi untuk mempermudah perhitungan. Hal ini sering kali menyebabkan hasil estimasi tidak sepenuhnya mencerminkan pola data secara akurat. Sebaliknya, metode MLE yang menggunakan pemrosesan data memanfaatkan algoritme komputasi yang lebih canggih, sehingga mampu menganalisis data dengan lebih tepat. Dalam contoh yang diberikan, estimasi α melalui pemrosesan data menghasilkan nilai yang lebih besar ($\alpha = 4092.100$) dibandingkan dengan estimasi manual ($\alpha = 2576.440$), yang mengindikasikan bahwa metode berbasis komputasi lebih mampu merepresentasikan skala distribusi data. Oleh karena itu, untuk analisis data yang lebih rumit atau dengan ukuran besar, penggunaan MLE berbasis pemrosesan data lebih disarankan agar hasil estimasi lebih sesuai dengan karakteristik data sebenarnya.

2) Hasil Tingkat Kegagalan

Failure rate menggambarkan frekuensi kegagalan yang terjadi dalam satuan waktu, umumnya dinyatakan sebagai fungsi distribusi reliabilitas, seperti Weibull. Parameter ini sangat bergantung pada usia perangkat atau kondisi operasional, di mana *failure rate* sering meningkat seiring dengan waktu akibat keausan atau degradasi material.

Di sisi lain, MTBF (*Mean Time Between Failure*) adalah ukuran rata-rata waktu antara kegagalan yang berturut-turut dalam suatu sistem. MTBF memberikan indikasi seberapa andal suatu perangkat dalam operasi jangka panjang. MTBF dihitung berdasarkan parameter Weibull melalui pendekatan ekspektasi waktu hingga kegagalan. MTBF yang tinggi mencerminkan sistem yang lebih andal dan jarang mengalami kegagalan. Sebelum

mengetahui tingkat kegagalan, langkah awal yang perlu diketahui yaitu nilai MTBF (*Mean Time Between Failure*) yang memanfaatkan fungsi gamma dan parameter Weibull yang telah diperoleh. Berikut ini fungsi gamma untuk menghitung nilai MTBF sebagai berikut.

$$MTBF = \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

Berdasarkan persamaan gamma tersebut maka didapatkan nilai MTBF untuk masing-masing metode yang tertera pada **Tabel 4.2**. Berdasarkan hasil dari perhitungan MTBF pada **Tabel 4.2** dengan memanfaatkan distribusi Weibull dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* yang dihitung secara manual maupun dengan menggunakan bantuan pemrosesan data, dapat diketahui bahwa nilai MTBF yang diperoleh melalui metode MLE baik yang dihitung secara manual maupun dengan pemrosesan data memiliki nilai yang sama pada beberapa komponen, namun terdapat selisih yang terlampau jauh seperti pada komponen F, G, J, K, L, M, S, V, X, dan AC. Selisih nilai MTBF yang paling signifikan terjadi pada komponen L dengan perbedaan sebesar 2310.088. Hal ini menunjukkan bahwa pemrosesan data memproses data dengan cara yang lebih kompleks, mungkin memperhitungkan aspek tambahan seperti distribusi data atau estimasi parameter yang lebih akurat. Selain itu, perhitungan MTBF secara manual memiliki keterbatasan dalam perhitungan iteratif atau toleransi terhadap kompleksitas data, sedangkan dengan pemrosesan data dapat menangani perhitungan lebih efisien dan presisi.

Untuk mendapatkan nilai dari tingkat kegagalan (*failure rate*) didapatkan dengan menggunakan persamaan $\lambda = \frac{1}{MTBF}$. Maka untuk hasil dari *failure rate* dapat dilihat dari **Tabel 4.2**.

Berdasarkan data pada **Tabel 4.2**, untuk komponen seperti G, nilai MTBF dengan metode pemrosesan data jauh lebih tinggi, yaitu 3743.507, dibandingkan dengan nilai metode manual 2496.541, menunjukkan bahwa metode pemrosesan data lebih akurat dalam menggambarkan keandalan komponen. Akibatnya, tingkat kegagalan untuk komponen ini dengan metode pemrosesan data lebih rendah, yaitu 0.00027, dibandingkan dengan tingkat kegagalan metode manual 0.00040, dengan tingkat kegagalan *error* 49.947722%.

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan MTBF dan *Failure Rate* Distribusi Weibull secara Manual maupun melalui Pemrosesan Data.

Komponen (L3)	MTBF Metode MLE Manual	MTBF Metode MLE Software Pemrosesan Data	Failure Rate Metode MLE Manual	Failure Rate Metode MLE Software Pemrosesan Data	Error Failure Rate
A	868.806	868.798	0.00115	0.00115	0.000911%
B	2528.486	2528.593	0.00040	0.00040	0.004212%
C	1872.656	1872.631	0.00053	0.00053	0.001312%
D	863.321	863.361	0.00116	0.00116	0.004573%
E	3327.522	3327.429	0.00030	0.00030	0.002790%
F	965.293	2643.275	0.00104	0.00038	173.831419%
G	2496.541	3743.507	0.00040	0.00027	49.947722%
H	4516.251	4516.069	0.00022	0.00022	0.004022%
I	2372.453	2372.455	0.00042	0.00042	0.000069%
J	250.594	1827.948	0.00399	0.00055	629.445736%
K	366.007	2366.532	0.00273	0.00042	546.580987%
L	313.003	2623.091	0.00319	0.00038	738.039588%
M	309.886	1585.836	0.00323	0.00063	411.748832%
N	1851.198	1851.196	0.00054	0.00054	0.000106%
O	2653.450	3032.353	0.00038	0.00033	14.279629%
P	3527.317	3653.632	0.00028	0.00027	3.581071%
Q	1797.897	1797.876	0.00056	0.00056	0.001194%
R	1925.606	1925.630	0.00052	0.00052	0.001227%
S	816.542	2767.829	0.00122	0.00036	238.969590%
T	1902.190	1902.188	0.00053	0.00053	0.000085%
U	2887.259	2887.216	0.00035	0.00035	0.001521%
V	1462.126	2574.625	0.00068	0.00039	76.087787%
W	2036.623	2036.621	0.00049	0.00049	0.000071%
X	416.371	2492.822	0.00240	0.00040	498.702249%
Y	3727.746	3727.667	0.00027	0.00027	0.002135%
Z	911.658	911.646	0.00110	0.00110	0.001289%
AA	3307.380	3184.333	0.00030	0.00031	3.720365%
AB	1327.883	1663.644	0.00075	0.00060	25.285463%
AC	1584.077	2997.855	0.00063	0.00033	89.249330%
AD	3931.332	3931.217	0.00025	0.00025	0.002937%
AE	2512.742	2512.755	0.00040	0.00040	0.000505%
AF	4641.548	4641.306	0.00022	0.00022	0.005213%
AG	1280.400	1280.431	0.00078	0.00078	0.002445%
AH	2887.960	2887.903	0.00035	0.00035	0.001957%

Komponen lain yang menunjukkan perbedaan signifikan adalah J, di mana metode manual memberikan nilai MTBF sebesar 250.594, jauh lebih rendah dari nilai pemrosesan data sebesar 1827.948. Akibatnya, tingkat kegagalan metode pemrosesan data hanya 0.00055, jauh lebih rendah dari tingkat kegagalan metode manual sebesar 0.00399, dengan tingkat kegagalan metode manual sebesar 629.445736%.

Sebaliknya, pada komponen A, nilai MTBF dan tingkat kegagalan kedua metode sangat mirip, masing-masing 868.806 dan 868.798 untuk MTBF, dengan tingkat kegagalan 0.00115 untuk keduanya. Untuk komponen ini, tingkat kegagalan error hanya 0.000911%, menunjukkan bahwa perhitungan manual cukup akurat untuk komponen dengan data yang stabil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih untuk Divisi Pengelolaan Kualitas dan Proses Bisnis PT INKA Persero yang telah memberikan ilmu untuk penulis sehingga dapat menuangkannya dalam artikel ini.

PENUTUP

SIMPULAN

Berdasarkan hasil dari perhitungan *failure rate* yang dilakukan dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* baik secara manual maupun melalui pemrosesan data untuk estimasi parameter bentuk (β) dan parameter skala (α), didapatkan bahwa dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* yang dihitung dengan bantuan pemrosesan data lebih akurat dan presisi untuk menentukan parameter distribusi Weibull sehingga didapatkan tingkat kegagalan terendah yaitu pada komponen AF sebesar 0.00022 dan tingkat kegagalan tertinggi yaitu pada komponen D sebesar 0.00116. Sedangkan untuk perhitungan dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* secara manual dianggap kurang valid untuk beberapa komponen dikarenakan keterbatasan iterasi untuk beberapa data waktu kegagalan yang memiliki banyak variasi.

SARAN

Saran untuk komponen dengan tingkat kegagalan tinggi yaitu menerapkan strategi perawatan harus lebih efektif dengan menerapkan *predictive maintenance*, yaitu pemantauan kondisi komponen secara *real-time*. Lalu, frekuensi perawatan berkala perlu ditingkatkan, dan penggantian komponen harus dilakukan secara proaktif sebelum mencapai batas usia pakainya. Terakhir, penggunaan teknologi pemantauan seperti *condition monitoring* dapat mendeteksi tanda-tanda awal kerusakan, seperti penurunan performa, sehingga tindakan preventif dapat segera dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A., Setiawan, D., & Situmeang, U. (2019). ANALISIS KEANDALAN TRANSFORMATOR DAYA 60 MVA MENGGUNAKAN METODE DISTRIBUSI WEIBULL. In *Seminar Nasional Cendekiawan ke* (Vol. 5).
- Bhattacharya, P., & Bhattacharjee, R. (2010). A Study on Weibull Distribution for Estimating The Parameters. *Journal of Applied Quantitative Methods*, 5(2), 234–241.
- Chau, M., & Reith, R. (2020). IDC - Smartphone Market Share - Vendor. Smartphone Market Share. <https://www.idc.com/promo/smartphone-market-share/vendor>
- Cristian Napitupulu, J., & M L Tobing, P. S. (2013). ANALISIS KEANDALAN TRANSFORMATOR DAYA MENGGUNAKAN METODE DISTRIBUSI WEIBULL (STUDI KASUS TRANSFORMATOR DAYA GI. TITI KUNING PT. PLN PERSERO). *SINGUDA ENSIKOM*, 03(03), 112–117.
- Hakim, L., Studi Teknik Mesin, P., Teknik, F., Muhammadiyah Riau Jalan Tuanku Tambusai Ujung, U., Tampan, K., & Delima, K. (2021). Implementasi RCM pada mesin diesel Deutz 20 kVA. *TURBO*, Vol. 10.
- Hermawan, A., Dadi, S., & Jayadi, A. (2020). SISTEM KENDALI OTOMATIS PADA PINTU PERLINTASAN KERETA API. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Kendali Dan Listrik*, 1(02). <https://doi.org/10.33365/jimel.v1i1>
- Hidayaturohman, N., Studi, P., Mesin, T., Tunggal, G., Zohari, A., Eng, M., & Masykur, K. (2021). ANALISIS KEANDALAN KOMPONEN KRITIS PADA MESIN AUTO TRIMMING DAT-18 DI DEPARTEMEN INSPECTION PT A. 1(1).
- Lai, C. D., Murthy, D. N. P., & Xie, M. (2011). Weibull distributions. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 3(3), 282–287. <https://doi.org/10.1002/wics.157>

- Mahboob, Q., & Zio, E. (2018). *Handbook of RAMS in Railway Systems Theory and Practice*. <http://taylorandfrancis.com>
- Masitoh, S. (2018). Blended Learning Berwawasan Literasi Digital Suatu Upaya Meningkatkan Kualitas Pembelajaran dan Membangun Generasi Emas 2045. *Proceedings of the ICECRS*, 1(3), 13–34. <https://doi.org/10.21070/picecrs.v1i3.1377>
- Otaya, L. G. (2016). Distribusi Probabilitas Weibull Dan Aplikasinya (Pada Persoalan Keandalan (Reliability) Dan Analisis Rawatan (Maintainability). *TADBIR: Jurnal Manajemen Pendidikan Islam*, 4(2), 44–66.
- Paeto, C., Somayasa, W., Kabil Djafar, M., Budiman, H., & Rahmaliah Sahupala. (2022). *ESTIMASI PARAMETER DARI DISTRIBUSI WEIBULL BERDASARKAN SAMPEL TERSENSOR TIPE II DAN TIPE I*. <http://ojs.uho.ac.id/index.php/JMKS>
- Rachman, A., Yochanan, E., Samanlangi, A. I., & Purnomo, H. (2024). *METODE PENELITIAN KUANTITATIF, KUALITATIF, DAN R&D* (Cetakan Pertama). CV Saba Jaya Publisher.
- Salsinha, C. N. (2019). Estimasi Parameter Distribusi Weibull dan Aplikasinya Pada Pengendalian Mutu Dengan Memanfaatkan Kuantil. *Jurnal UJMC*, 5(1), 9–15.
- Sari Sukarna, W., & Herrhyanto dan Fitriani Agustina, N. (2020). Distribusi Weibull-Normal{Log-Logistik} dan Aplikasinya (Studi Kasus Data Waktu Bertahan Hidup Pasien Penderita Jantung Koroner yang Diberikan Treatment Bypass). *EurekaMatika*, 8(1), 100–112. <https://ejournal.upi.edu/index.php/JEM>
- Sinaga, A. (2021). *Aditya Sinaga 1, Nuraisana nuraisana 2 [Sistem Pendukung Keputusan Pemilihan Karyawan Tetap pada Trinity Teknologi Nusantara Dengan Metode Moora*. 4(1), 6–15.
- Teimouri, M., Hoseini, S. M., & Nadarajah, S. (2013). Comparison of estimation methods for the Weibull distribution. *Statistics*, 47(1), 93–109. <https://doi.org/10.1080/02331888.2011.559657>