



Jurnal Material Manufaktur Energi Berkelanjutan (JMMEB)

<http://ejournal.uki.ac.id/index.php/jmmeb>

ISSN : xxxx-xxxx e-ISSN : xxxx-xxxx
Vol. 1 No. 2 (Desember 2024) Hal. 117-125

ANALISIS UMUR PAKAI GARNITURE TAPE SQP 90 PADA MESIN HAUNI KDF 4

Leo Agung Novan Eka Prasetyo, Aryantono Marto Widjoyo

Universitas Kristen Indonesia,

Email penulis : Novanprasetyo7@gmail.com

Diterima : 13 September 2024 Disetujui:27 November 2024 Diterbitkan:30 Desember 2024

ABSTRAK

Efisiensi proses produksi sangat bergantung pada keandalan komponen mesin. Pada mesin Hauni KDF 4, garniture tape SQP 90 adalah komponen vital yang kegagalannya dapat menyebabkan downtime dan inefisiensi biaya. Praktik penggantian yang tidak didasarkan pada data dapat menimbulkan pemborosan akibat penggantian terlalu dini (*over-maintenance*) atau kerugian produksi akibat penggantian terlambat (*under-maintenance*). Penelitian ini menganalisis umur pakai fungsional garniture tape menggunakan data kegagalan periode September-Desember 2022 untuk menentukan jadwal penggantian yang optimal. Dengan menerapkan analisis distribusi Weibull menggunakan metode Maximum Likelihood Estimation (MLE), Weibull Probability Plot, dan Method of Moments (MoM), penelitian ini mengidentifikasi karakteristik keandalan komponen. Hasil analisis menunjukkan pola kegagalan komponen berada dalam fase keausan (*wear-out*) dengan shape parameter (β) = 4,65. Nilai Mean Time To Failure (MTTF) terestimasi sebesar 7.144.345 batang filter, namun nilai ini tidak direkomendasikan sebagai interval penggantian karena memiliki risiko kegagalan hampir 48%. Sebagai gantinya, penelitian ini merekomendasikan interval penggantian preventif pada umur pakai $4,8 \pm 0,5$ juta (CI 4,3 – 5,4 juta) batang filter. Interval ini didasarkan pada target reliabilitas 90%, yang menyeimbangkan antara efisiensi dan risiko operasional. Penerapan interval ini berpotensi memberikan efisiensi biaya pembelian komponen sekitar 66,7% dibandingkan praktik historis, sekaligus meningkatkan prediktabilitas dan keandalan produksi

Kata Kunci: Garniture Tape, Weibull Distribution, MTTF (Mean Time To Failure), Keandalan (Reliability), Mesin Hauni KDF 4, Efisiensi Produksi, Analisis Umur Pakai.

1. Pendahuluan

Efisiensi operasional dalam industri manufaktur sangat dipengaruhi oleh keandalan komponen mesin produksi. Salah satu komponen kritis pada lini produksi filter rokok adalah *garniture tape* tipe SQP 90 yang digunakan pada mesin Hauni KDF 4. Ketidaktepatan dalam interval penggantian dapat berdampak langsung terhadap biaya operasional dan waktu henti produksi (*downtime*).

Data historis menunjukkan adanya variasi signifikan dalam pola penggantian tape. Sebagai ilustrasi, pada bulan Januari 2022, tercatat penggunaan sebanyak 75 tape untuk menghasilkan 86,9 juta batang filter. Sebaliknya, pada bulan September 2022, hanya digunakan 11 tape untuk produksi sebesar 80,1 juta batang. Selisih penggunaan yang tidak proporsional ini mengindikasikan adanya potensi inefisiensi dan ketidakkonsistenan dalam kebijakan penggantian tape.

Fenomena ini menimbulkan kebutuhan untuk mengevaluasi kebijakan penggantian tape secara kuantitatif melalui pendekatan *reliability engineering*. Tanpa acuan berbasis data keandalan, penggantian dapat terjadi terlalu cepat (*over-maintenance*), yang meningkatkan biaya, atau terlalu lambat (*under-maintenance*), yang memicu kegagalan mendadak dan menghentikan produksi. Oleh karena itu, dibutuhkan model statistik yang mampu mengestimasi umur pakai komponen secara akurat dan memberikan dasar pengambilan keputusan interval penggantian optimal.

Distribusi Weibull merupakan metode umum dalam analisis keandalan komponen teknis. Penelitian ini memanfaatkan distribusi Weibull untuk mengestimasi dua parameter utama—bentuk (β) dan skala (η)—dari data kegagalan garniture tape. Dengan pendekatan ini, dapat dihitung estimasi *Mean Time To Failure* (MTTF) dan fungsi keandalan $R(t)$, sebagai dasar dalam menentukan waktu penggantian preventif yang optimal.

Studi serupa telah dilakukan oleh Arifin (2024), yang menerapkan distribusi Weibull pada analisis keandalan *ripper tip* pada bulldozer Caterpillar D10T. Hasilnya menunjukkan pola kegagalan akibat keausan ($\beta > 1$) dan menghasilkan rekomendasi interval perawatan berbasis MTTF. Studi ini menjadi salah satu referensi relevan dalam pendekatan analitik berbasis reliabilitas untuk komponen mekanis.

Tujuan Penelitian:

1. Menentukan parameter keandalan garniture tape SQP 90 berdasarkan distribusi Weibull (β dan η).
2. Menentukan umur pakai efektif garniture tape berbasis hasil analisis keandalan, baik melalui MTTF maupun fungsi keandalan $R(t)$ dengan tingkat probabilitas tertentu.
3. Mengevaluasi potensi efisiensi penggunaan garniture tape melalui pengurangan frekuensi penggantian atau penghematan biaya pembelian tape berdasarkan hasil analisis keandalan.

Batasan Penelitian:

1. Tidak membahas kualitas bahan baku dan variasi produsen.
2. Tidak mencakup faktor internal seperti suhu gesekan atau sistem sensor.
3. Penelitian ini secara khusus menganalisis kegagalan garniture tape SQP 90 akibat cacat produk. Pergantian tape yang terjadi karena jadwal preventif, pembersihan rutin, atau gangguan eksternal berada di luar ruang lingkup studi dan diperlakukan sebagai data tersensor.

Manfaat Penelitian:

1. Memberikan dasar kuantitatif bagi perusahaan dalam menyusun jadwal penggantian tape yang efisien.
2. Menjadi referensi penerapan distribusi Weibull dalam pengelolaan keandalan komponen mesin manufaktur.
3. Menyediakan studi kasus teknis untuk pengembangan riset analisis keandalan di lingkungan akademik.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif, dengan fokus pada analisis data kegagalan garniture tape dari PT. PLX selama periode September hingga Desember 2022. Distribusi Weibull dipilih karena fleksibel dalam merepresentasikan berbagai pola kegagalan komponen. Distribusi ini ditentukan oleh dua parameter utama:

- β (shape parameter) menunjukkan bentuk pola kegagalan:
 - $\beta < 1$ → kegagalan dini (*infant mortality*),
 - $\beta = 1$ → kegagalan acak (*random failure*),
 - $\beta > 1$ → kegagalan akibat keausan (*wear-out failure*).
- η (scale parameter) mewakili *characteristic life*, yaitu umur pakai saat 63,2% unit diperkirakan telah gagal.

Distribusi Weibull dipilih karena sesuai dengan karakteristik keausan pada komponen mekanik seperti garniture tape.

Pengumpulan Data

Pemilihan data difokuskan pada periode September-Desember 2022, karena selama periode ini, data kegagalan dapat ditelusuri secara rinci hingga satuan tape dan jumlah produksi masing-masing, berdasarkan catatan observasi lapangan. Data tersebut dianggap valid dan representatif untuk dianalisis menggunakan pendekatan keandalan (*reliability*). Sebaliknya, data Januari-Agustus 2022 (lampiran A) hanya tersedia secara agregat dan tidak memungkinkan penelusuran per tape, sehingga dikecualikan dari analisis utama dan hanya digunakan sebagai latar belakang inefisiensi historis.

Data primer dikumpulkan melalui observasi langsung terhadap proses produksi dan catatan penggantian tape oleh operator. Data sekunder diperoleh dari dokumen internal perusahaan, seperti laporan Quality Control (QC), log penghentian mesin (*machine-stop detector*), dan standar mutu produksi. Setiap kejadian kegagalan diverifikasi silang antara log operator, QC, dan sensor mesin untuk memastikan validitas data. Garniture tape dikategorikan gagal jika:

1. Terjadi kerusakan fisik (sobek, retak, deformasi) yang menyebabkan *machine stop*, atau
2. Tingkat *reject* $\geq 5\%$ selama 10 menit operasi.

Penggantian karena pembersihan, kehabisan bahan, atau jadwal preventif tidak termasuk kegagalan dan dicatat sebagai *right-censored*. Total diperoleh 48 observasi kegagalan murni dengan umur pakai antara 3,02-7,86 juta batang.

Asumsi dan Validasi Data

Seluruh observasi dianggap memenuhi asumsi independen dan identik distribusinya (IID), karena seluruh data diambil dari mesin, material, dan SOP yang sama dalam rentang waktu pendek. Untuk menguji kehomogenan varian tanpa pengelompokan, dilakukan bootstrap resampling 1.000 kali. Hasilnya menunjukkan variasi parameter Weibull yang kecil (simpangan baku $\beta = 0,44$; $\eta = 0,53$ juta batang), serta visualisasi mean-variance plot yang tidak menunjukkan pola heteroskedastis. Dengan demikian, data dinilai homogen dan layak dianalisis sebagai satu populasi Weibull.

Estimasi Parameter Weibull

Tiga metode digunakan untuk mengestimasi parameter β dan η :

1. Metode Grafik (Weibull Probability Plot)
Data waktu kegagalan diurutkan, dihitung median-rank (dengan pendekatan Bernard), lalu diplot dalam skala log-log. Pola mendekati garis lurus menunjukkan kecocokan Weibull. Kemiringan garis mewakili β , dan intercept logaritmik mewakili $\ln(\eta)$. Nilai $R^2 \geq 0,9$ dianggap sebagai indikator kuat bahwa model sesuai.
2. Metode Maximum Likelihood Estimation (MLE)
Parameter diestimasi dengan memaksimalkan peluang (likelihood) data yang teramati. MLE dipilih karena akurat secara statistik, mampu menangani data *right-censored*, dan dapat diolah dengan numerik menggunakan MATLAB.
3. Metode Moment (MoM)
Menggunakan nilai rata-rata dan variansi data untuk memperkirakan parameter. Meskipun kurang akurat dibanding MLE, MoM digunakan sebagai pembanding dalam validasi silang.

Validasi Model

Kecocokan distribusi Weibull diuji dengan dua uji formal:

- Kolmogorov-Smirnov (K-S): $D = 0,123$; $p\text{-value} = 0,423$
- Anderson-Darling (A-D): $A^2 = 0,43$; $p\text{-value} = 0,38$

Kedua uji menunjukkan bahwa tidak ada penolakan terhadap hipotesis bahwa data mengikuti distribusi Weibull, sehingga model dapat diterima secara statistik. Penggunaan dua pendekatan ini juga memberikan keyakinan terhadap hasil, dibanding hanya mengandalkan R^2 sebagai satu-satunya tolok ukur.

Analisis Keandalan.

Setelah parameter ditentukan, dilakukan perhitungan keandalan sebagai berikut:

- Mean Time To Failure (MTTF):

$$MTTF = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

- Fungsi Keandalan:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$$

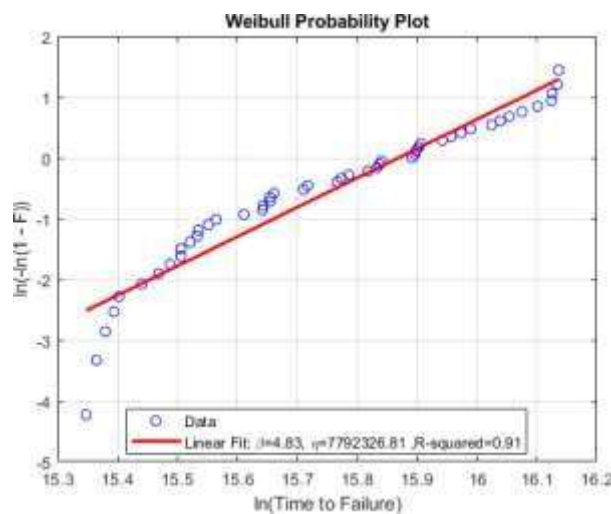
Seluruh analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak **MATLAB R2023**, termasuk pemodelan, estimasi, validasi, dan perhitungan keandala.

3. Hasil Pembahasan

Data pada penelitian ini, yaitu observasi langsung dengan melihat keadaan yang terjadi pada perusahaan dan studi pustaka berupa arsip dokumen dari PT. PLX. Data yang dianalisis merupakan data sekunder yang diperoleh dari catatan pemeliharaan periode september 2022 hingga desember 2022 (4 bulan) pada mesin KDF 4 (lampiran B). Data-data tersebut merupakan data waktu kegagalan yang digunakan untuk menganalisis weibull dengan fungsi MTTF dan fungsi Reability $R(t)$ pada penelitian ini. Selanjutnya hasil dari analisisnya:

1. perhitungan Weibull Probability Plot (Grafik) menggunakan aplikasi MATLAB didapatkan:

- a. grafik



- b. Hasil estimasi distribusi Weibull menunjukkan nilai *shape parameter* (β) sebesar 4,82 dan *scale parameter* (η) sebesar 7.794.179,83 batang, dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,91$. Nilai R^2 ini mengindikasikan kecocokan visual yang baik dengan model Weibull, namun tidak digunakan sebagai tolok ukur utama validitas model, untuk memastikan kesesuaian model secara statistik, dilakukan uji Kolmogorov-Smirnov (K-S) dan Anderson-Darling (A-D). Hasil K-S menunjukkan $D = 0,123$ dengan $p = 0,423$, dan A-D menghasilkan $A^2 = 0,43$ dengan $p = 0,38$. Kedua nilai $p > 0,05$ menandakan bahwa distribusi empiris tidak berbeda signifikan dari distribusi Weibull, sehingga model diterima secara statistik.

Estimasi ketidakpastian dilakukan menggunakan teknik bootstrap non-parametrik sebanyak 1.000 replikasi. Hasilnya menunjukkan rentang *confidence interval (CI)* 95% untuk β adalah 4,11 – 5,56 dan η adalah 7,29 – 8,29 $\times 10^6$ batang. Kurva reliabilitas R(t) dari seluruh hasil bootstrap menghasilkan interval keandalan 90% (t_{90}) pada rentang 4,32 – 5,38 juta batang. Sebagai uji sensitivitas, dilakukan analisis Trim-10% dengan membuang 10% data ekstrem (5 nilai terendah dan 5 tertinggi). Nilai estimasi t_{90} bergeser ke 5,20 juta batang, namun tetap berada dalam batas CI 95%, menandakan model cukup stabil terhadap outlier. Dari keseluruhan hasil, dapat disimpulkan bahwa distribusi Weibull memadai untuk mewakili pola kegagalan garniture tape. Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan penggantian preventif pada kisaran 4,8 \pm 0,5 juta batang, yaitu antara 4,3 – 5,4 juta batang, guna menjaga reliabilitas minimal 90% dan menghindari lonjakan risiko kegagalan akibat wear-out ($\beta > 1$).

2. Dari perhitungan Maximum Likelihood Estimation (MLE) menggunakan aplikasi MATLAB didapatkan nilai Shape Parameter (β) = 4.65 dan Scale Parameter (η)= 7813895.72

3. Dari perhitungan Metode Moment (MOM) menggunakan aplikasi MATLAB didapatkan nilai Shape Parameter (β) = 4.76 dan Scale Parameter (η)= 7797255.92.

Tabel 1. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Weibull

Metode	Shape Parameter (β)	Scale Parameter (η)
Grafik	4,82	7794179,83
MLE	4,65	7813895,72
MOM	4,76	7797255,92

Peneliti memilih Metode Maximum Likelihood Estimation (MLE) sebagai metode utama untuk mengestimasi parameter β dan η . Berikut alasan pemilihan MLE adalah:

- a. Data yang tersedia relatif terbatas karena hanya beberapa kejadian penggantian dalam beberapa bulan sehingga setiap informasi sangat berharga, dengan metode MLE memanfaatkan informasi kuantitatif setiap data poin secara optimal.
- b. MLE mampu menangani data yang tidak lengkap (*right-censored*) dan jika dikemudian hari terdapat data yang tersensor metode ini siap mengakomodasi.
- c. Hasil MLE dapat diolah dengan mudah menggunakan perangkat lunak, dalam penelitian ini digunakan MATLAB untuk menghitung estimasi parameter secara numerik.

Penelitian ini menggunakan tiga metode untuk mengestimasi parameter Weibull, yaitu Metode Grafik (Weibull Probability Plot), Maximum Likelihood Estimation (MLE), dan Method of Moments (MoM). Penggunaan ketiga metode ini bertujuan untuk validasi silang guna memastikan bahwa hasil estimasi parameter β dan η bersifat konsisten dan dapat diandalkan.

Estimasi Umur Pakai Berdasarkan MTTF

Dalam penelitian ini, estimasi umur pakai garniture tape dianalisis menggunakan distribusi Weibull dua-parameter, dengan hasil estimasi parameter dari metode Maximum Likelihood Estimation (MLE) yaitu:

- Shape parameter $\beta=4,65$
- Scale parameter $\eta=7.813.895,72$ batang filter

Dengan parameter tersebut, rata-rata waktu kegagalan atau *Mean Time To Failure* (MTTF) dihitung menggunakan persamaan:

$$MTTF = \eta \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

Perhitungan menggunakan MATLAB menghasilkan nilai MTTF sebesar 7.144.345 batang filter. Nilai ini berada sedikit di bawah nilai karakteristik umur (η), yang konsisten dengan teori distribusi Weibull untuk $\beta > 1$. Interpretasi praktis dari MTTF adalah secara rata-rata, satu tape dapat menghasilkan sekitar 7,14 juta batang filter sebelum mengalami kegagalan. Namun, penggunaan MTTF sebagai dasar penggantian preventif tidak disarankan, karena hanya bersifat rata-rata. Berdasarkan distribusi probabilitistik, sekitar 48% tape akan gagal sebelum mencapai titik ini, sehingga penggunaan MTTF berpotensi menyebabkan downtime tak terencana dan merugikan secara operasional.

Estimasi Umur Pakai Berdasarkan Fungsi Keandalan R(t)

Untuk menghindari risiko kegagalan mendadak, strategi penggantian tape perlu mengacu pada fungsi keandalan R(t), yaitu probabilitas bahwa sebuah tape masih berfungsi baik hingga waktu ttt. Dengan target keandalan sebesar 90%, waktu penggantian preventif dihitung menggunakan formula:

$$t_{0,90} = \eta \cdot (-\ln(R(t)))^{1/\beta}$$

$$t_{0,90} = 7.813.895,72 \cdot (-\ln(0,90))^{1/4,65}$$

$$t_{0,90} \approx 4.794.226 \text{ batang}$$

Artinya, tape sebaiknya diganti setelah mencapai sekitar 4,8 juta batang filter untuk memastikan bahwa probabilitas kegagalan sebelum titik tersebut tetap <10%. Titik ini menjadi rekomendasi utama interval ganti preventif, karena seimbang antara keandalan teknis dan efisiensi biaya.

Untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis risiko, Tabel 2 berikut menyajikan skenario interval penggantian berdasarkan berbagai target keandalan:

Tabel 2. Skenario Interval Penggantian dan Keandalannya

Interval Penggantian (juta batang filter)	Estimasi Reliabilitas R(t)	Risiko Gagal
~4,09	95%	5%
~4,8	90%	10%
~5,66	80%	20%
~7,14 (MTTF)	52%	48%
~7,81 (Scale η)	37%	63%

Dari tabel di atas, terlihat bahwa semakin panjang tape digunakan, risiko kegagalan meningkat secara signifikan, terutama setelah melampaui titik MTTF. Oleh karena itu, rekomendasi interval ganti pada 4,8 juta batang filter secara statistik memastikan bahwa sebagian besar tape masih berada dalam kondisi andal ($\geq 90\%$) sebelum diganti.

Efisiensi Anggaran Pemakaian Garniture Tape

Salah satu tujuan utama penelitian ini adalah meningkatkan efisiensi biaya penggunaan garniture tape melalui penetapan interval penggantian berbasis keandalan. Praktik historis menunjukkan bahwa garniture tape rata-rata diganti setiap 1,57 juta batang filter, sebuah kebiasaan yang konservatif namun cenderung boros. Berdasarkan hasil analisis Weibull, interval penggantian yang optimal direkomendasikan pada $4,8 \pm 0,5$ juta (CI 4,3 – 5,4 juta), setara dengan tingkat reliabilitas 90% ($R(t) = 0,9$).

Dengan kecepatan produksi mesin sebesar 5.555 batang filter/menit dan estimasi waktu downtime 7-10 menit untuk satu kali penggantian tape, kerugian produksi akibat downtime dapat dihitung rata-rata sebesar:

- 47.200 batang filter per pergantian
- Jika harga jual per batang filter adalah Rp300, maka kerugian ekonomi per pergantian adalah $47.200 \times Rp300 = Rp14.160.000$

Tabel 3. estimasi total biaya operasional berdasarkan dua skenario

Interval ganti (juta batang filter)	Jumlah tape (buah)	Biaya tape (Rp)	Downtime loss (Rp)	Total biaya (Rp)
1,6	30	8.400.000	424.800.000	433.200.000
4,8	10	2.800.000	141.600.000	144.400.000

Dari tabel di atas, terlihat bahwa penerapan interval baru menghasilkan penghematan biaya sebesar Rp288,8 juta, atau sekitar 66,7% lebih efisien dibandingkan praktik sebelumnya. Efisiensi ini dicapai tanpa mengorbankan keandalan sistem, karena titik 4,8 juta batang telah divalidasi secara statistik melalui estimasi parameter Weibull dan fungsi reliabilitas $R(t)$.

Perbandingan Interval Penggantian: Sebelum dan Sesudah

Interval penggantian garniture tape yang direkomendasikan dalam penelitian ini, yaitu $4,8 \pm 0,5$ juta batang, hampir tiga kali lebih lama dibandingkan praktik sebelumnya sebesar 1,6 juta batang. Jika produksi bulanan mencapai 80 juta batang filter, maka:

- Dengan metode lama: dibutuhkan sekitar 50 kali penggantian per bulan
- Dengan pendekatan baru: hanya sekitar 17 kali penggantian

Ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis analisis keandalan tidak hanya mengurangi frekuensi downtime secara signifikan, tetapi juga mendukung efisiensi operasional dan kelangsungan produksi.

Pembahasan

Hasil analisis menunjukkan bahwa pendekatan berbasis distribusi Weibull memberikan dasar statistik yang kuat untuk menentukan interval penggantian garniture tape secara lebih efisien. Dengan menggunakan estimasi parameter $\beta = 4,82$ dan $\eta = 7,79 \times 10^6$, diperoleh interval penggantian preventif $4,8 \pm 0,5$ juta (CI 4,3 – 5,4 juta) batang filter dengan tingkat reliabilitas minimum 90%. Ini berarti bahwa penggantian dilakukan sebelum risiko kegagalan meningkat tajam akibat keausan komponen, sesuai dengan karakteristik $\beta > 1$ yang mengindikasikan wear-out failure.

Dalam praktik sebelumnya, garniture tape diganti rata-rata setiap 1,6 juta batang, yang cenderung terlalu dini dan tidak efisien secara biaya. Penerapan interval baru memungkinkan penurunan jumlah pergantian tape hingga sepertiganya, serta penghematan biaya operasional sebesar 66,7%, sebagaimana ditunjukkan oleh selisih total biaya antara skenario lama dan baru (Rp433,2 juta vs Rp144,4 juta). Ini mencerminkan bahwa pengambilan keputusan berbasis reliabilitas tidak hanya menjaga keandalan operasional, tetapi juga memberikan dampak finansial yang signifikan.

Selain itu, analisis reliabilitas $R(t)$ menunjukkan bahwa titik 4,8 juta batang merupakan momen yang optimal untuk penggantian tape karena menjaga tingkat keandalan $\geq 90\%$ sambil mempertimbangkan ketidakpastian estimasi parameter. Rentang ketidakpastian (CI 95%) dari hasil bootstrap menunjukkan bahwa penggantian tape dapat dilakukan antara 4,3 hingga 5,4 juta batang tanpa peningkatan risiko signifikan terhadap kegagalan produksi.

Dari sisi teknis, tidak ditemukannya kegagalan mendadak selama periode observasi memperkuat kesimpulan bahwa sebagian besar kegagalan bersifat progresif dan dapat diprediksi. Oleh karena itu, strategi pemeliharaan berbasis data historis dan model keandalan sangat relevan untuk mendukung perbaikan sistem perawatan dan pengendalian biaya produksi di lingkungan industri seperti PT. PLX.

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan dan disesuaikan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Model Weibull dengan parameter $\beta = 4,65$ dan $\eta = 7.813.895,72$ batang terbukti cocok untuk menganalisis keandalan garniture tape. Nilai $\beta > 1$ menunjukkan kegagalan akibat keausan.
2. Nilai MTTF sebesar 7,14 juta batang mewakili umur rata-rata tape, namun kurang tepat sebagai acuan penggantian karena hampir 48% tape gagal sebelum titik ini.
3. Interval penggantian optimal disarankan pada $4,8 \pm 0,5$ juta (CI 4,3 - 5,4 juta) batang filter berdasarkan target keandalan 90%, hampir 3× lebih efisien dari praktik lama (1,6 juta batang).
4. Potensi efisiensi biaya mencapai 66,7% dengan tetap menjaga risiko kegagalan pada level yang terkendali.
5. Tiga metode analisis (Grafik, MLE, dan MoM) menghasilkan estimasi parameter yang konsisten, memperkuat validitas hasil.

Saran:

1. Terapkan penggantian preventif di pada $4,8 \pm 0,5$ juta (CI 4,3 - 5,4 juta) batang filter untuk menjaga keandalan operasional.
2. Kembangkan sistem monitoring kondisi tape secara real-time guna mendeteksi keausan lebih dini.
3. Perluas pengumpulan data kegagalan dan pertimbangkan penerapan metode statistik lanjutan untuk peningkatan akurasi.

Kontribusi Penelitian:

1. Memberikan strategi efisiensi biaya pemakaian tape berbasis keandalan.
2. Meningkatkan keandalan produksi dengan interval penggantian optimal.
3. Menawarkan kerangka analisis Weibull yang aplikatif bagi industri manufaktur.

Ucapan Terimakasih

Penulisan ini dapat terselesaikan karena adanya banyak bantuan, dukungan, dan doa dari beberapa rekan. Oleh sebab itu, dengan rendah hati, peneliti ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Aryantono Marto Widjoyo, Ph.D. dan Bapak Fx. Suryadi, Dpl. Ing., FH. Sc. selaku dosen pembimbing atas bimbingan dan masukan yang sangat berharga dalam penulisan skripsi ini.
2. Seluruh karyawan PT. PLX atas bantuan dan kesempatan yang diberikan selama proses penelitian.
3. Para dosen, keluarga dan teman-teman yang telah membekali penulis dengan ilmu dan wawasan selama masa studi.

Daftar Pustaka

Jurnal

- [1] F. Arifin, B. Prihadianto, S. Sugiyanto, dan I. Bahiuddin, "Penerapan Metode Weibull pada Penentuan Umur dan Keandalan Ripper Tip Bulldozer Caterpillar Tipe D10T," *Jurnal Teknologi Terpadu*, vol. 12, no. 1, pp. 1-8, 2024.
- [2] F. Ferdinand, G. Haryadi, dan N. Iskandar, "Analisis Keandalan Komponen Kritis Menggunakan

- Metode Weibull dan Fault Tree Analysis Pada Hydraulic Axial Pump Berkapasitas 350 LPS,|| *Jurnal Teknik Mesin Universitas Diponegoro*, 2023. [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm>
- [3] J. Dico dan F. Arif, "Usulan Strategi Perawatan Dengan Menggunakan Metode Decision Making Grid (DMG) dan Analisis Weibull Pada Mesin Produksi di PT. XYZ,|| Institut Teknologi Nasional Bandung, 2024. [Online]. Available: <https://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/fti>
- [4] K. Rahardian, R. Riastuti, dan A. Zakiyuddin, "Prediksi Sisa Umur Layan dan Analisa Resiko pada Power Transformer Menggunakan Pendekatan Distribusi Weibull dan Risk Priority Number,|| *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, vol. 4, pp. 308-316, 2024. [Online]. Available: <https://journal.irpi.or.id/index.php/malcom>
- [5] F. B. Susetyo, R. Sukarno, dan Khulaifayah, "Analisis Perawatan Pada Komponen Mesin Degreaser di PT X,|| *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur*, vol. 7, no. 1, pp. 17-26, 2021. [Online]. Available: <http://journal.unj.ac.id/unj/index.php/jkem>
- [6] U. Unaijah dan S. Darwis, "Prediksi Sisa Umur Bearing Menggunakan Distribusi Weibull,|| *Jurnal Riset Statistik*, vol. 2, no. 1, pp. 75-84, 2022. [Online]. Available: <https://journals.unisba.ac.id/index.php/JRS>
- [7] W. Weibull, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability,|| *Journal of Applied Mechanics*, vol. 18, no. 3, pp. 293-297, 1951.
- [8] J. W. Evans, R. A. Johnson, dan D. W. Green, "Two- and Three-Parameter Weibull Goodness-of-Fit Tests,|| *Research Paper FPL-RP-493*, USDA Forest Products Laboratory, 1989. [Online]. Available: <https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplrp/fplrp493.pdf>
- [9] C. Zaiontz, "Real Statistics Using Excel,|| 2023. [Online]. Available: <https://real-statistics.com>
- [10] Körber Technologies GmbH, "Cigarette Filters Production Line - HAUNI KDF Series,|| [Online]. Available: <https://www.directindustry.com/prod/koerber-technologies-gmbh/product-116079-1976019.html>

Buku

- [11] B. S. Blanchard, *System Engineering and Analysis*, 5th ed. Pearson Education, 2010.
- [12] B. S. Blanchard, *Logistics Engineering and Management*, 6th ed. Pearson Education, 2010.
- [13] C. E. Ebeling, *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, 2nd ed. McGraw-Hill, 1997.
- [14] J. F. Lawless, *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*, 2nd ed. Wiley-Interscience, 2003.
- [15] W. Q. Meeker dan L. A. Escobar, *Statistical Methods for Reliability Data*. John Wiley & Sons, 1998.
- [16] W. Nelson, *Applied Life Data Analysis*. John Wiley & Sons, 1982.
- [17] P. D. T. O'Connor dan A. Kleyner, *Practical Reliability Engineering*, 5th ed. Wiley, 2012.
- [18] N. L. Johnson dan S. Kotz, *Continuous Univariate Distributions*, vol. 1. Wiley-Interscience, 1970.
- [19] R. Smith dan B. Hawkins, *Lean Maintenance*. Elsevier, 2004.
- [20] Sugiyono, *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Alfabeta, 2017.