

Analisis Estimasi Keandalan (*Reliability*) dan *Mean Time to Failure* (MTTF) pada Komponen Seal Silinder Hidrolik Mesin Hot Press

Reliability Estimation Analysis and Mean Time to Failure (MTTF) of Hydraulic Cylinder Seal Components in Hot Press Machines

Oki Ferdiansah^{1*}, Rosidi², Budi Yuwono³, Nugroho Eko Setijogiarto⁴

^{1,2,3} Program D3 Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Depok – Jawa Barat – Indonesia

*Corresponding author: oki.ferdiansah.tm23@stu.pnj.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik distribusi data kegagalan pada komponen seal hidrolik, menganalisis tingkat keandalan (*reliability*) komponen untuk mengetahui probabilitas komponen dapat berfungsi dengan baik dalam interval waktu tertentu, serta menentukan nilai Mean Time to Failure (MTTF) sebagai dasar dalam memberikan rekomendasi jadwal penggantian komponen secara proaktif bagi departemen maintenance PT XYZ. Penelitian ini menggunakan metode mixed methods dengan pendekatan studi kasus pada komponen seal silinder hidrolik mesin hotpress di Departemen Pad and Shoe PT XYZ. Analisis kualitatif menggunakan metode 5 Why untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan, sedangkan analisis kuantitatif menggunakan *reliability engineering* dengan distribusi Weibull untuk menganalisis keandalan dan menentukan nilai Mean Time to Failure (MTTF). Data diperoleh melalui observasi, wawancara, studi dokumentasi, dan studi pustaka, dengan menggunakan data historis kegagalan komponen seal periode Februari–April. Hasil analisis digunakan sebagai dasar penyusunan rekomendasi *Corrective Action* and *Preventive Action* (CAPA) yang mengacu pada ISO 9001:2015 Klausul 10.2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola distribusi kegagalan bersifat deterministik-progresif (*wear-out*) dengan laju kegagalan $\lambda = 0,00625$ kegagalan/jam, serta parameter Weibull $\beta = 1,21$ dan $\eta = 170$ jam. Nilai keandalan komponen menurun seiring waktu operasi, yaitu 79,66% pada jam ke-50, 59,09% pada jam ke-100, dan 39,48% pada MTTF 160 jam. Nilai MTTF sebesar 160 jam menjadi acuan rekomendasi penggantian preventif pada 128 jam atau interval 37–59 jam untuk mencapai target keandalan $R(t) \geq 70\text{--}80\%$. Analisis 5 Why menunjukkan bahwa akar penyebab utama kegagalan adalah ketidaksesuaian spesifikasi material seal NBR dengan kondisi operasi mesin 150°C, yang diperparah oleh belum adanya sistem perawatan preventif berbasis data keandalan. Penyebab kegagalan meliputi degradasi termal material NBR (35,7%), pressure spike (25,0%), kontaminasi fluida hidrolik (17,9%), mis pemasangan seal (14,3%), dan pengoperasian melampaui interval penggantian optimal (7,1%).

Kata Kunci: Seal Hidrolik, Analisis Keandalan Distribusi Weibull, Mean Time to Failure (MTTF), Pemeliharaan Preventif

ABSTRACT

This study aims to identify the failure data distribution characteristics of hydraulic seal components, evaluate component reliability by determining the probability of the components operating properly within a specified time interval, and determine the Mean Time to Failure (MTTF) as a basis for developing proactive component replacement schedules for the maintenance department of PT XYZ. The study employed a mixed-methods approach with a case study focusing on the hydraulic cylinder seals of a hot press machine in the Pad and Shoe Department of PT XYZ. Qualitative analysis was conducted using the 5 Why method to identify the root causes of failure, while quantitative analysis applied reliability engineering and Weibull distribution to evaluate component reliability and determine the Mean Time to Failure (MTTF). Data were collected through observation, interviews, document analysis, and literature review, using historical failure data of seal components from February to April. The analytical results were used as the basis for developing *Corrective Action* and *Preventive Action* (CAPA) recommendations in accordance with Clause 10.2 of ISO 9001:2015. The results showed that the failure distribution pattern was deterministic-progressive (*wear-out*), with a failure rate of $\lambda = 0.00625$ failures/hour and Weibull parameters of $\beta = 1.21$ and $\eta = 170$ hours. Component reliability decreased with operating time, reaching 79.66% at 50 operating hours, 59.09% at 100 hours, and 39.48% at the MTTF of 160 hours. The MTTF value of 160 hours was used as the basis for recommending preventive replacement at 128 hours or within an interval of 37–59 hours to achieve a reliability target of $R(t) \geq 70\text{--}80\%$. The 5 Why analysis identified the primary root cause of failure as the incompatibility between the NBR seal material specifications and the machine operating temperature of 150°C, further exacerbated by the absence of a reliability data-based preventive maintenance system. The identified failure causes included thermal degradation of NBR material (35.7%), pressure spikes (25.0%), hydraulic fluid contamination (17.9%), improper seal installation (14.3%), and operation beyond the optimal replacement interval (7.1%).

Keywords: Hydraulic Seal, Reliability Analysis, Weibull Distribution, Mean Time to Failure (MTTF), Preventive Maintenance

ARTICLE IDENTIFIERS

ORIGINAL ARTICLE

Vol. 9 No. 9, September 2026

Pages 4487-4500

DOI: 10.56338/jks.v9i9.11942

ARTICLE HISTORY

Received: 30 July 2026

Revised: 29 August, 2026

Accepted: 11 September, 2026

Publish: 30 September, 2026

PENDAHULUAN

Industri manufaktur otomotif saat ini dituntut untuk memiliki efisiensi produksi yang tinggi guna memenuhi permintaan pasar yang dinamis. PT XYZ, sebagai salah satu pemain utama dalam produksi komponen sistem pengereman (brake system) dan pengecoran aluminium (casting), sangat bergantung pada kesiapan mesin-mesin produksinya. Salah satu unit krusial dalam proses produksi tersebut adalah mesin Hot Press. Mesin Hot Press adalah mesin yang digunakan untuk proses pengepresan material dengan memanfaatkan tekanan hidrolik dan temperatur tertentu. Mesin hot digunakan untuk menekan (press) material dengan tekanan tinggi sambil diberikan panas (temperature) agar material tersebut menyatu, berubah bentuk, atau mengalami proses bonding (Widyanto et al., 2023).

Mesin Hot Press bekerja dengan mengintegrasikan sistem panas dan tekanan hidrolik tinggi untuk membentuk atau menyatukan material komponen otomotif. Dalam sistem ini, seal hidrolik merupakan komponen vital yang berfungsi menjaga tekanan fluida dan mencegah kebocoran. Namun, lingkungan kerja di PT XYZ yang melibatkan suhu panas tinggi dari plat press serta tekanan kerja yang kontinu menyebabkan seal hidrolik rentan mengalami degradasi material, seperti pengerasan (hardening) atau keretakan. Kegagalan seal umumnya ditandai oleh kebocoran fluida, penurunan tekanan sistem, dan penurunan gaya tekan yang dihasilkan (Parker Hannifin Corporation, 2018 & Kumar et al., 2024).

Kegagalan pada seal hidrolik sering kali terjadi secara mendadak (breakdown), yang berdampak pada terhentinya aliran produksi (downtime). Hal ini tidak hanya merugikan dari segi waktu, tetapi juga meningkatkan biaya perbaikan reaktif dan risiko kecacatan produk akibat tekanan yang tidak stabil. Se jauh ini, penggantian komponen seal di lapangan cenderung dilakukan setelah terjadi kerusakan atau berdasarkan jadwal periodik yang belum tentu akurat secara statistik.

Oleh karena itu, diperlukan sebuah pendekatan ilmiah menggunakan teori keandalan (Reliability Engineering). Dengan menghitung nilai Reliability dan Mean Time To Failure (MTTF), perusahaan dapat memprediksi masa pakai optimal komponen. Penelitian ini akan mengolah data historis kerusakan seal di PT XYZ untuk menentukan kapan waktu terbaik melakukan penggantian sebelum kegagalan terjadi, sehingga efisiensi mesin Hot Press dapat ditingkatkan secara signifikan. Tujuan dari penelitian ini untuk mengidentifikasi karakteristik distribusi data kegagalan pada komponen seal hidrolik, menganalisis tingkat keandalan (reliability) komponen untuk mengetahui probabilitas komponen dapat berfungsi dengan baik dalam interval waktu tertentu, serta menentukan nilai Mean Time to Failure (MTTF) sebagai dasar dalam memberikan rekomendasi jadwal penggantian komponen secara proaktif bagi departemen maintenance PT XYZ.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode mixed methods dengan pendekatan studi kasus (case study) yang berfokus pada analisis kegagalan komponen seal silinder hidrolik pada mesin hotpress di Departemen Pad and Shoe PT XYZ. Analisis dilakukan dengan menggabungkan pendekatan kualitatif dan kuantitatif. Pendekatan kualitatif menggunakan metode 5 Why untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan, sedangkan pendekatan kuantitatif menggunakan teori reliability engineering dengan distribusi Weibull untuk menganalisis tingkat keandalan (reliability) dan menentukan nilai Mean Time to Failure (MTTF). Hasil kedua analisis tersebut digunakan sebagai dasar penyusunan rekomendasi tindakan Corrective Action and Preventive Action (CAPA). Metodologi CAPA mengacu pada persyaratan standar ISO 9001:2015 Klausul 10.2 tentang Nonconformity and Corrective Action.

Penelitian ini dilaksanakan selama kegiatan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT XYZ, Departemen Pad and Shoe. Objek penelitian adalah komponen seal silinder hidrolik pada mesin hotpress, yang meliputi piston seal, rod seal, dan wiper seal. Data yang digunakan berupa data historis kegagalan komponen seal yang diperoleh dari catatan maintenance perusahaan pada periode Februari–April. Analisis difokuskan pada mode kegagalan berupa kebocoran internal dan eksternal akibat keausan material seal, dengan kondisi operasi mesin, meliputi tekanan kerja, temperatur, dan jenis fluida hidrolik, dianggap konstan selama periode pengamatan.

Pengumpulan data dilakukan secara kombinatif melalui observasi lapangan, wawancara, studi dokumentasi, dan studi pustaka. Observasi lapangan dilakukan secara langsung di area produksi PT XYZ untuk mengamati kondisi fisik seal silinder hidrolik, proses penggantian seal, prosedur perawatan yang sedang berjalan, serta kondisi lingkungan operasi mesin. Wawancara dilakukan dengan metode semi-terstruktur kepada teknisi maintenance, supervisor maintenance, dan operator mesin untuk memperoleh informasi mengenai pola dan jenis kegagalan seal, penyebab kegagalan, prosedur penanganan, frekuensi dan interval penggantian, serta kendala dalam kegiatan perawatan. Studi dokumentasi digunakan untuk memperoleh data historis Time Between Failure (TBF), Time to Repair (TTR), riwayat penggantian komponen seal, dan machine operation log. Studi pustaka dilakukan untuk memperoleh landasan teori dan referensi terkait reliability engineering, distribusi Weibull, Mean Time to Failure (MTTF), metode 5 Why, CAPA, dan ISO 14224. Variabel penelitian terdiri atas variabel bebas (independent variable), variabel terikat (dependent variable), dan variabel kontrol. Variabel bebas meliputi waktu operasi (t) dan frekuensi kegagalan (λ). Variabel terikat meliputi keandalan (reliability) $R(t)$, Mean Time to Failure (MTTF), dan laju kegagalan $h(t)$ (hazard rate atau failure rate). Variabel kontrol berupa kondisi operasi mesin yang meliputi tekanan hidrolik, suhu operasi, dan jenis seal yang digunakan, yang diasumsikan konstan selama periode pengamatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi data utama dari catatan lapangan.

Tabel 1. Data Operasi Mesin

Kode Mesin	Jam Operasi	TTR	Rata - rata TBF
HP - 01	480	4 jam	160 jam
HP - 02	480	4 jam	160 jam
HP - 03	480	4 jam	160 jam
HP - 04	480	4 jam	160 jam
HP - 05	480	4 jam	160 jam

Data historis yang digunakan berasal dari catatan maintenance perusahaan selama periode Februari hingga April, yang meliputi data waktu antar kerusakan (Time Between Failure/TBF), frekuensi penggantian seal, waktu perbaikan (Time to Repair/TTR), serta kondisi operasi mesin. Selain itu, dilakukan observasi terhadap kondisi fisik seal, prosedur penggantian komponen, dan parameter operasi mesin berupa tekanan hidrolik serta temperatur kerja untuk mendukung proses analisis. $(i - 0,3)/(n + 0,4)$.

Estimasi Parameter Bentuk (β) Distribusi Weibull

Memperoleh nilai β

$(i-0,3)$, dengan $n = 3$ perhitungan menggunakan tabel berikut ini :

$(n+0,4)$

Tabel 2. Perhitungan Nilai β

Urutan (i)	t (jam)	MR (i)	X = ln(t)	y = $\frac{1}{\ln[\ln(\frac{1}{1-MR})]}$
1	12	0,2059	2,4849	-1,4673
2	16	0,5000	2,7726	-0,3665
3	48	0,7941	3,8712	0,4580

Data ditransformasikan ke dalam bentuk linier Weibull, dengan sumbu-x sebagai $\ln(t)$ dan sumbu-y sebagai $\ln[\ln(1/(1-MR))]$, sehingga hubungan antara kedua variabel dapat didekati melalui persamaan garis lurus $y = a + bx$.

Selisih tiap titik terhadap rata-rata (deviasi)

Tabel 3. Deviasi

i	$xi - \bar{x}$	$yi - \bar{y}$	$(xi - \bar{x})(yi - \bar{y})$	$(xi - \bar{x})^2$
1	-0,5580	-1,0091	0,5631	0,3114
2	-0,2703	0,0923	-0,0249	0,0731
3	0,8283	0,9169	0,7595	0,6861

Jumlah kolom deviasi

$$S_{xx} = \sum (xi - \bar{x})^2 = 0,3114 + 0,0731 + 0,6861 = 1,0705$$

$$S_{xx} = \sum (xi - \bar{x})^2 = 0,3114 + 0,0731 + 0,6861 = 1,0705$$

Sehingga β dapat dihitung menjadi ;

$$b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} = \frac{1,2975}{1,0705} = 1,212$$

$$S_{xy} = 1,2975$$

Identifikasi Tema Utama dari Catatan Lapangan

Berdasarkan catatan lapangan yang diperoleh selama observasi di Departemen Pad and Shoe PT XYZ, terdapat empat tema utama yang berhasil diidentifikasi. Keempat tema ini saling berkaitan dan membentuk satu pola kegagalan sistemik yang akan dibahas secara mendalam pada subbab berikutnya.

Tabel 4. Tema Utama Hasil Identifikasi Catatan Lapangan

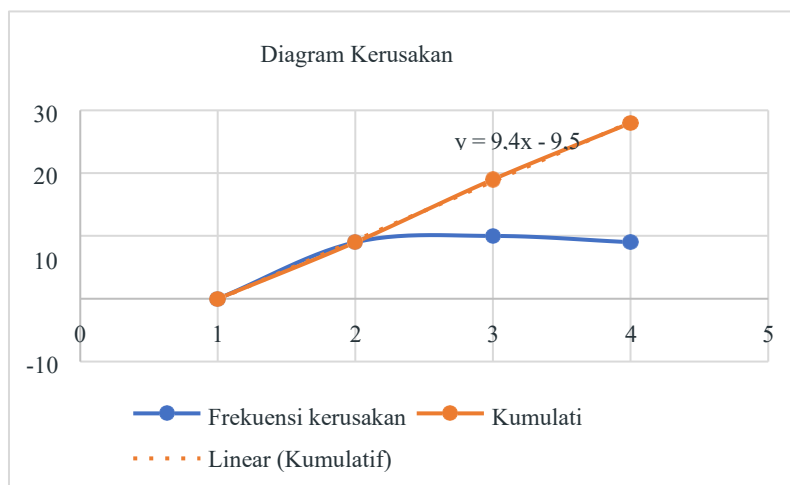
NO	Tema Utama	Indikator dari catatan lapangan
1	Kondisi Operasi Ekstrem	Suhu Operasional 150°C dan tekanan hidrolik 150 bar
2	Tingginya frekuensi kegagalan	3 kali pergantian seal perbulan permesin (480 jam operasi)
3	Ketidak sesuaian spesifikasi komponen	Material seal NBR (maksimal, 120°C digunakan pada suhu 150°C)
4	Absennya sistem perawatan berbasis keandalan	Pergantian bersifat reaktif, belum terdapat jadwal preventif berbasis data keandalan

Data kerusakan dan analisis penyebab seal hidrolik

Identifikasi Penyebab Kerusakan (Root Cause Analysis)

Tabel 5. Identifikasi Penyebab Kerusakan

No	Penyebab Kerusakan	Keterangan / Detail	Frek.	%
1	Material seal (NBR) melebihi batas suhu operasi	Seal material NBR memiliki batas suhu 120°C, sedangkan mesin Hot Press beroperasi pada suhu 150 °C. Akibatnya terjadi degradasi elastisitas seal secara akselerasi, sehingga seal kehilangan kemampuan sealing.	10×	35,7%
2	Tekanan hidrolik berlebihan (pressure spike)	Tekanan operasi 150 bar menyebabkan lip seal mengalami over-compression saat terjadi lonjakan tekanan, mengakibatkan seal bocor dan aus sebelum waktunya.	7×	25,0%
3	Kontaminasi fluida hidrolik	Partikel abrasif dan kotoran dalam oli hidrolik merusak permukaan lip seal dan groove secara bertahap, mempercepat keausan seal.	5×	17,9%
4	Pemasangan seal tidak presisi (mis-alignment)	Seal terpasang miring atau tidak tepat pada posisi groove, menyebabkan tekanan tidak merata dan kebocoran terjadi sejak awal operasi.	4×	14,3%
	Usia pakai melampaui interval penggantian	Tidak tersedia jadwal preventive maintenance; penggantian dilakukan hanya saat kebocoran terjadi (corrective), sehingga seal beroperasi melampaui MTTF ~167 jam.	2×	7,1%
	TOTAL KERUSAKAN		28×	100%

**Gambar 1.** Diagram Kerusakan Seal Hidrolik

Analisis Kondisi Operasi terhadap Spesifikasi Komponen Seal

Tekanan Operasi 150 Bar

Tekanan hidrolik yang terukur di lapangan sebesar 150 bar (15 MPa) termasuk dalam kategori tekanan tinggi (high-pressure hydraulic system). Duan et al. (2023) menyatakan bahwa seal silinder hidrolik pada sistem bertekanan di atas 100 bar mengalami gaya eksentrik dan defleksi material yang signifikan, sehingga mempercepat laju keausan permukaan seal secara eksponensial. Pada tekanan 150 bar, tekanan kontak antara seal dan permukaan silinder dapat mencapai 2–3 kali tekanan sistem, yang berarti seal menerima beban efektif antara 300–450 bar pada titik kontak sealing-nya.

Parker Hannifin (2018) dalam O-Ring Handbook-nya menyatakan bahwa seal hidrolik standar berbahan NBR (Nitrile Butadiene Rubber) memiliki batas tekanan kerja maksimum sekitar 100–120 bar dalam kondisi statis dan 80–100 bar dalam kondisi dinamis. Dengan demikian, tekanan operasional mesin hotpress sebesar 150 bar telah melampaui batas desain material seal standar sebesar 25–50%, yang secara langsung berkontribusi terhadap tingginya frekuensi kegagalan (Parker Hannifin Corporation, 2018).

Suhu Operasional 150°C untuk menentukan bahan seal hidrolik

Tabel 6. Perbandingan Material Seal terhadap Suhu Operasi Aktual

Material Seal	Batas Suhu Maks. (°C)	Kondisi Aktual	Selisih / Status
NBR (Nitrile)	120	150–180	+30 s.d. +60°C Melampaui batas
Polyurethane (PU)		150–180	+50 s.d. +100°C Jauh melampaui
	80–100		
EPDM	150	150–180	0 s.d. +30°C Mendekati/melampaui
FKM (Viton)		150–180	Dalam batas
	200–220		
PTFE	260	150–180	Dalam batas

Paparan suhu yang melebihi batas desain material menyebabkan fenomena thermal degradation pada seal, meliputi: (a) hilangnya elastisitas polimer secara permanen (compression set), (b) pengerasan dan retakan mikro pada permukaan seal (thermal cracking), dan (c) oksidasi material yang menyebabkan kerapuhan (embrittlement). Ebeling (2010) menjelaskan bahwa degradasi termal merupakan salah satu mekanisme kegagalan dominan pada komponen karet dan polimer dalam aplikasi suhu tinggi, dengan laju degradasi yang mengikuti hukum Arrhenius setiap kenaikan 10°C mempercepat laju degradasi material polimer hingga dua kali lipat. Dengan suhu operasional 150°C dan batas termal NBR 120°C, seal beroperasi pada kondisi 30–60°C di atas batas materialnya, yang secara teoritis mempercepat laju degradasi sebesar 8–64 kali dibandingkan kondisi normal (Ebeling, 2010).

Interaksi Tekanan dan Suhu (Combined Loading) proses produksi

O'Connor & Kleyner (2012) menegaskan bahwa pada komponen seal yang terpapar kombinasi tekanan tinggi dan suhu ekstrem secara simultan, efek degradasi tidak bersifat aditif melainkan multiplikatif (synergistic degradation). Artinya, dampak kombinasi 150 bar + 150°C terhadap umur pakai seal jauh lebih besar daripada penjumlahan masing-masing faktor. Hal ini menjelaskan mengapa seal mengalami kegagalan 3 kali per bulan, sementara mesin hidrolik konvensional pada kondisi normal umumnya hanya memerlukan penggantian seal setiap 3–6 bulan sekali (O'Connor & Kleyner, 2012).

Analisis Frekuensi dan Pola Kegagalan Seal

Perhitungan Time Between Failure (TBF)

$$\begin{aligned} \text{TBF rata-rata} &= \frac{\text{Total Jam Operasi}}{\text{Jumlah Kegagalan}} \\ &= \frac{480 \text{ jam}}{3} = 160 \text{ jam} \end{aligned}$$

Gambar 2. Perhitungan Time Between Failure

Nilai TBF rata-rata komponen seal silinder hidrolik mesin Hot Press di PT XYZ adalah 160 jam operasi (setara 6,6 hari kerja dengan asumsi 1 shift = 8 jam, 6 hari/minggu). Nilai ini sangat rendah dan menunjukkan kondisi pembebanan yang jauh melampaui batas desain komponen, karena seal beroperasi pada suhu 150°C melebihi batas material NBR (120°C) serta tekanan hidrolik 150 bar yang melampaui batas tekanan dinamis NBR (80 – 100 bar) (International Organization for Standardization, 2016).

Tabel 7. Perbandingan TBF

Sumber / Jurnal	Komponen	TBF / MTTF	Keterangan
Penelitian ini (Oki F., 2026) — PT XYZ	Seal Silinder Hidrolik Hot Press	±160 jam	Kondisi ekstrem: 150 bar, 150°C
Haryadi et al. (2023) — Reliability Analysis on Axial Hydraulic Pump, AIP Conf. Proc.	Mechanical Seal Pompa Hidrolik Aksial	182,91 jam	MTTF mechanical seal pada pompa banjir — kondisi normal
Muhsin & Syarafi (2018) — Analisis Kehandalan Mesin Continues Frying, Jurnal OPSI	Komponen mesin produksi makanan	~4,2 jam (MTTF)	Komponen mekanis dalam kondisi operasional normal
ISO 14224:2016 (Standar Industri)	Seal Hidrolik Umum	2.000–5.000 jam	Nilai referensi komponen seal pada kondisi standar industri

Laju Kegagalan (Failure Rate)

Tabel 8. Perbandingan Nilai Aktual dengan Standar Industri

Parameter	Nilai Aktual (PT XYZ)	Standar Industri (ISO 14224)	Rasio
MTTF Seal Hidrolik	160 jam	2.000–5.000 jam	1 : 12 - 30
Frekuensi Penggantian	3×/bulan	0,2–0,5×/bulan	6–15× lebih sering
Laju Kegagalan λ	0,00625/jam	0,0002– 0,0005/jam	12–30× lebih tinggi

Laju kegagalan seal silinder hidrolik mesin Hot Press adalah $\lambda = 0,00625$ kegagalan/jam, yang berarti terdapat probabilitas kegagalan sebesar 0,6% per jam operasi. Nilai ini berada 6 hingga 60 kali di atas nilai normal standar industri menurut ISO 14224:2016, yang menetapkan laju kegagalan komponen seal hidrolik pada kondisi normal sebesar 0,0001–0,001 kegagalan/jam. Kondisi ini memperkuat temuan bahwa seal beroperasi dalam kondisi pembebanan yang sangat melampaui batas desain komponen (combined thermal dan mechanical overloading).

Estimasi Keandalan (Reliability) dan Mean Time to Failure (MTTF)

Fungsi Keandalan $R(t)$

Tabel 9. Nilai Keandalan $R(t)$ Seal Silinder Hidrolik pada Berbagai Waktu Operasi

Waktu t (jam)	Perhitungan	Nilai $R(t)$	Interpretasi
50 jam	$R(50)$ $50 \cdot 1.21$ $= \exp \left[- \left(\frac{50}{170} \right) \right]$ $= \exp[-(0.2941)1.21]$ $= \exp(-0.2275)$ $= 0.7966$	0,7966 = (79,66%)	Seal masih sangat andal di awal operasi
100 jam	$R(100)$ $100 \cdot 1.21$ $= \exp \left[- \left(\frac{100}{170} \right) \right]$ $= \exp[-(0.5882)1.21]$ $= \exp(-0.5262)$ $= 0.5909$	0,5909 = 59,09%)	Keandalan turun di bawah 60%
160 jam (MTTF)	$R(160)$ $160 \cdot 1.21$ $= \exp \left[- \left(\frac{160}{170} \right) \right]$ $= \exp[-(0.9412)1.21]$ $= \exp(-0.9293)$ $= 0.3948$ (39.48%)	0,3948 =(39,48%)	Pada MTTF, hanya ~39,48% seal masih berfungsi

200 jam	$R(200)$ $200 \cdot 1.21$ $= \exp \left[- \left(\frac{200}{170} \right) \right]$ $= \exp[-(1.1765)1.21]$ $= \exp(-1.2174)$ $= 0.2960$	0.2960 = (29.60%)	Hampir 70% seal telah gagal
300 jam	$R(300)$ $300 \cdot 1.21$ $= \exp \left[- \left(\frac{300}{170} \right) \right]$ $= \exp[-(1.7647)1.21]$ $= \exp(-1.9883)$ $= 0.2960 \text{ (29.60\%)}$	0.2960 = (29.60%)	Hanya 1 dari 6 seal masih berfungsi
480 jam	(480) $480 \cdot 1.21$ $= \exp \left[- \left(\frac{480}{170} \right) \right]$ $= \exp[-(2.8235)1.21]$ $= \exp(-3.5116)$ $= 0.0298 \text{ (2.98\%)}$	0.0298 = (2.98%)	Hampir seluruh seal gagal di akhir bulan

Kurva keandalan $R(t)$ menunjukkan penurunan yang sangat tajam sejak awal operasi. Pada titik MTTF (160 jam), hanya tersisa 39,48% seal yang masih berfungsi jauh di bawah standar keandalan yang umumnya ditargetkan industri ($R \geq 80\text{--}90\%$). Penurunan ini bersifat eksponensial dan konsisten dengan hipotesis kegagalan dipercepat akibat paparan termal dan tekanan yang melampaui spesifikasi material. Temuan ini mengindikasikan bahwa tidak ada jeda waktu yang aman bagi seal untuk beroperasi tanpa penggantian terjadwal yang ketat.

Perhitungan Mean Time to Failure (MTTF)

MTTF merupakan parameter terpenting dalam analisis keandalan komponen, karena mewakili rata-rata umur pakai komponen sebelum kegagalan pertama. Untuk model distribusi eksponensial, MTTF dihitung sebagai:

$$MTTF = 1 / \lambda = 1 / 0,00625 = 160 \text{ jam}$$

Nilai MTTF = 160 jam memiliki implikasi praktis yang signifikan:

Dalam 1 bulan operasi (480 jam) → diperlukan ± 3 kali penggantian seal ($480 / 160 = 3$ kali) — konsisten dengan data lapangan

Dalam 1 tahun → diperlukan ± 36 kali penggantian seal per mesin

Nilai ini jauh di bawah standar ideal komponen seal hidrolik industri otomotif yang umumnya memiliki MTTF 2.000–5.000 jam [19].

Analisis Weibull Tinjauan Teoritis

Tabel 10. Jadwal Penggantian Seal Berdasarkan Target Keandalan

Target Keandalan R(t)	Interval Penggantian Preventif	Penggantian/Bulan (480 jam)
$R \geq 90\%$	≤ 26 jam	~18 kali
$R \geq 80\%$	≤ 48 jam	~10 kali
$R \geq 70\%$	≤ 72 jam	~6 kali
$R \geq 50\%$	≤ 125 jam	~3 kali

Berdasarkan model Weibull teoritis, dalam kondisi operasi mesin hotpress, 10% seal diprediksi sudah gagal hanya dalam 26 jam operasi pertama sekitar 1-2 hari kerja. Temuan ini memperkuat kesimpulan bahwa interval penggantian seal seharusnya dilakukan jauh lebih awal dari yang mungkin selama ini direncanakan.

Identifikasi Pola Temuan dan Kategorisasi Berdasarkan Teori

Pola 1 Kegagalan Dipercepat akibat Beban Ganda (Accelerated Failure) menunjukkan bahwa seal mengalami kegagalan pada laju yang 6–30 kali lebih tinggi dari standar industri. Hal ini sesuai dengan teori combined stress degradation yang dikemukakan O'Connor & Kleyner (2012), di mana kombinasi tekanan mekanis tinggi (150 bar) dan paparan termal ekstrem (150°C) secara simultan menciptakan kondisi yang mempercepat seluruh mekanisme kegagalan seal. Pola ini dikategorikan sebagai kegagalan prematur dipercepat (premature accelerated failure) dalam nomenklatur keandalan.

Pola 2 Kegagalan Wear-Out Bukan Random (Deterministic Wear-Out) Frekuensi kegagalan yang konsisten sebesar 3 kali per bulan (bukan acak/sporadis) mengindikasikan bahwa pola kegagalan seal bersifat deterministik progresif (wear-out), bukan kegagalan acak. Weibull (1951) mengklasifikasikan jenis kegagalan ini dengan nilai parameter bentuk $\beta > 1$, di mana laju kegagalan terus meningkat seiring waktu operasi. Kondisi ini konsisten dengan mekanisme degradasi termal dan mekanis yang bersifat kumulatif pada material polimer elastomer. Secara praktis, pola wear-out berarti kegagalan seal dapat diprediksi dan dicegah melalui penggantian proaktif sebelum MTTF tercapai.

Pola 3 Ketidaksesuaian Sistemik Komponen Aplikasi (Component Mistake) yang teridentifikasi adalah ketidaksesuaian sistemik antara spesifikasi seal yang digunakan dengan kondisi operasi aktual mesin hotpress. Data suhu operasional 150°C secara jelas melampaui batas material seal konvensional (NBR: maks. 120°C (Nagaraju & Lingaraju, 2022, Huang et al., 2024, Zhao et al., 2022, Fu et al., 2023). Kondisi ini mencerminkan apa yang oleh Birolini (2017) disebut sebagai specification mismatch salah satu penyebab paling umum kegagalan prematur pada komponen teknik. Temuan ini dikategorikan sebagai masalah engineering/desain yang bersifat struktural dan tidak dapat diselesaikan hanya melalui peningkatan frekuensi perawatan tanpa perubahan spesifikasi material.

Implikasi dan Rekomendasi CAPA Berbasis Analisis Keandalan

Corrective Action (Tindakan Korektif)

Tabel 11. Rencana Corrective Action Berdasarkan Analisis Keandalan

NO	Tindakan Korektif	Dasar Ilmiah / Referensi
1	Penggantian material seal ke FKM (Viton) atau PTFE yang memiliki ketahanan termal hingga 200–260°C sesuai kondisi operasi aktual 150°C	Parker Hannifin (2018);

2	Pemeriksaan dan rekondisi permukaan rod serta bore silinder yang kemungkinan telah tergores akibat pengoperasian dengan seal yang terdegradasi	Müller & Nau (1998); [24].
3	Pembersihan sistem hidrolik dari kontaminan (partikel keausan seal) yang dapat memperburuk kegagalan seal pengganti secara dini	ISO 14224 (2016)

Preventive Action (Tindakan Preventif)

Tabel 12. Rencana Preventive Action Berdasarkan Analisis Keandalan

NO	Tindakan Preventif	Target / Indikator keberhasilan
1	Penyusunan jadwal pergantian seal proaktif berbasis nilai MTTF dan target keandalan (rekomendasi : setiap 48-72 jam untuk $R \geq 70-80\%$)	Penurunan frekuensi kegagalan mendadak $\geq 30\%$
2	Penggantian jenis material seal ke FKM/PTFE sebagai Tindakan jangka Panjang untuk menyesuaikan spesifikasi komponen dengan kondisi operasi actual	MTTF meningkat menjadi $\geq 500-1.000$ jam
3	Implementasi prosedur inspeksi berkala (Visual check dan pressure test) setiap 50 jam operasi untuk deteksi dini penurunan performa seal	Tersedianya SOP inspeksi seal terdokumentasi
4	Penyediaan stok seal Cadangan (spare part buffer) berdasarkan perkiraan kebutuhan: ≥ 3 seal/bulan/mesin berdasarkan analisis MTTF	Zero stock out kondisi darurat
5	Pelatihan Operator mengenai tanda tanda awal kegagalan seal dan prosedur pelaporan kegagalan untuk mendukung pengumpulan data TBF yang lebih akurat	Tersedianya data historis TBF individual ≥ 12 bulan

Dari hasil diatas Interval penggantian preventif yang direkomendasikan adalah setiap 37–59 jam operasi (setara 5–7 hari kerja) untuk mempertahankan keandalan $R \geq 70-80\%$. Penggantian reaktif saat ini pada ± 160 jam hanya mempertahankan keandalan 36,71% — jauh di bawah standar praktis. Rekomendasi jangka panjang adalah upgrade material seal ke FKM atau PTFE, yang secara teoritis dapat meningkatkan MTTF menjadi 500–1.000 jam sehingga interval penggantian dapat diperlebar secara signifikan dan biaya operasional berkurang. Analisis akar penyebab menggunakan metode 5 Why menelusuri rantai kegagalan seal terjadi secara bertahap, mulai dari tanda-tanda di permukaan. deformasi dan hilangnya elastisitas seal pada Why 1-2 hingga akar penyebabnya. paling mendasar pada why 3-5, yaitu belum adanya analisis keandalan dan Perhitungan MTTF secara sistematis berfungsi sebagai dasar dalam menentukan jadwal perawatan. Rantai kerusakan ini secara langsung membentuk struktur rencana korektif Action dan Preventive Action (CAPA): temuan pada Why 1-2 bahwa seal tidak berfungsi dengan baik dan perlu diperbaiki untuk mencegah terjadinya masalah yang sama di masa depan. terdegradasi karena paparan suhu dan tekanan yang melebihi batas desainnya material diterjemahkan menjadi tindakan korektif berupa penggantian. seal bahan material yang tahan panas tinggi serta permukaan yang telah direkondisi ke FKM/PTFE. rod dan bore silinder. Sementara itu, akar penyebab

sistemik pada Why 3-5. interval penggantian yang tidak didasarkan pada data keandalan nyata diterjemahkan menjadi serangkaian tindakan pencegahan, yaitu pembuatan jadwal, penggantian proaktif berdasarkan MTTF dan target keandalan (37–59 jam) Inspeksi berkala setiap 50 jam operasi, persediaan stok seal cadangan, serta pelatihan untuk operator agar dapat membantu mengumpulkan data TBF per individu lebih akurat. Dengan demikian, corrective action menjawab akar penyebab Bersifat fisik/material (alasan 1–2), sedangkan tindakan pencegahan menjawab akar masalah. Penyebab sistemik pada cara pengelolaan data dan jadwal perawatan (Mengapa 3-5). yang teridentifikasi sebagai penyebab akar yang benar sehingga kedua rencana tindakan.

Tabel 13. Hubungan Nilai Keandalan $R(t)$ dengan Rekomendasi Tindakan Preventif

Waktu Operasi Aktual (jam)	Nilai $R(t)$ Aktual (Tabel 8)	Target Keandalan Acuan (Tabel 9)	Batas Waktu Preventif	Status	Rekomendasi Tindakan
50	0,7966 (79,66%)	$R \geq 80\%$	≤ 48 jam	Terlambat 24 jam	Ganti seal segera; batas preventif 48 jam untuk menjaga $R \geq 80\%$ sudah terlampaui.
100	0,5909 (59,09%)	$R \geq 70\%$	≤ 72 jam	Terlambat 28 jam	Penggantian preventif seharusnya sudah dilakukan pada jam ke-72; keterlambatan meningkatkan risiko kegagalan mendadak.
160 (MTTF)	0,3948 (39,48%)	$R \geq 50\%$	≤ 125 jam	Terlambat 35 jam	Kondisi kritis mendekati rata-rata umur pakai; tindakan bergeser dari preventif menjadi corrective (Tabel 4.10).
200	0,2960 (29,60%)	$R \geq 50\%$	≤ 125 jam	Terlambat 75 jam	Risiko kegagalan sangat tinggi; penggantian corrective bersifat wajib segera.
300	0,2960 (29,60%)	$R \geq 50\%$	≤ 125 jam	Terlambat 175 jam	Seal berada jauh di luar seluruh batas target keandalan; penggantian darurat diperlukan
480	0,0298 (2,98%)	$R \geq 50\%$	≤ 125 jam	Terlambat 355 jam	Kegagalan total hampir pasti telah terjadi; tindakan yang dilakukan adalah pergantian seal

Berdasarkan tabel diatas, pada jam operasi ke-100, nilai keandalan seal telah turun menjadi $R = 0,5909$ (59,09%), berada di bawah target $R \geq 70\%$ yang mensyaratkan penggantian preventif paling lambat pada jam ke-72. Karena seal tetap dioperasikan hingga jam ke-100, tindakan penggantian mengalami keterlambatan selama 28 jam dari batas yang direkomendasikan, sehingga risiko kegagalan mendadak meningkat secara signifikan.

Pola yang sama berlaku pada titik waktu lain: semakin jauh waktu operasi aktual melampaui batas preventif pada Tabel 9, semakin rendah nilai $R(t)$ pada Tabel 8, dan semakin besar pula kebutuhan untuk beralih dari tindakan preventif menuju tindakan corrective sebagaimana dirinci pada Tabel 10. Pada jam ke-160 (MTTF) hingga jam ke-480, nilai keandalan telah jauh berada di bawah seluruh ambang target pada Tabel 9, yang mengindikasikan bahwa penggantian seal seharusnya telah dilakukan jauh sebelum titik-titik waktu tersebut tercapai.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan terhadap komponen seal silinder hidrolik mesin Hot Press di PT XYZ, dapat disimpulkan bahwa pola distribusi kegagalan bersifat deterministik-progresif (wear-out) dengan laju kegagalan $\lambda = 0,00625$ kegagalan/jam, serta parameter Weibull $\beta = 1,21$ dan $\eta = 170$ jam. Nilai keandalan komponen menurun seiring waktu operasi, yaitu 79,66% pada jam ke-50, 59,09% pada jam ke-100, dan 39,48% pada MTTF 160 jam. Nilai MTTF sebesar 160 jam menjadi acuan rekomendasi penggantian preventif pada 128 jam atau interval 37–59 jam untuk mencapai target keandalan $R(t) \geq 70\text{--}80\%$. Analisis 5 Why menunjukkan bahwa akar penyebab utama kegagalan adalah ketidaksesuaian spesifikasi material seal NBR dengan kondisi operasi mesin 150°C , yang diperparah oleh belum adanya sistem perawatan preventif berbasis data keandalan. Penyebab kegagalan meliputi degradasi termal material NBR (35,7%), pressure spike (25,0%), kontaminasi fluida hidrolik (17,9%), mis pemasangan seal (14,3%), dan pengoperasian melampaui interval penggantian optimal (7,1%).

DAFTAR PUSTAKA

- A. Birolini, *Reliability Engineering: Theory and Practice*, 8th ed. Springer Berlin Heidelberg, 2017. doi: 10.1007/978-3-662-54209-5.
- C. E. Ebeling, *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, 2nd ed. Waveland Press, 2010.
- C. Nagaraju and D. Lingaraju, "Thermal degradation of naturally aged NBR with time and temperature," *Mater. Res. Express*, vol. 9, no. 6, p. 65305, 2022, doi: 10.1088/2053-1591/ac7302.
- Duan, D. Liu, S. Wang, and Y. Shang, "A Hydraulic Reciprocating Rod Seal's Life Evaluation Method Incorporating Failure Mechanism Analysis and Test Observation Data," *Lubricants*, vol. 11, no. 8, p. 319, 2023, doi: 10.3390/lubricants11080319.
- G. Huang et al., "Effect of hydrothermal aging on the tribological performance of nitrile butadiene rubber seals," *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 1, p. 81, 2024, doi: 10.3390/polym16010081.
- I. O. for Standardization, "ISO 14224:2016 Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries: Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment," ISO, 2016. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/64076.html>
- J. Fu, N. Zhao, Y. Qu, J. Yang, and S. Wang, "Review of hydraulic seal failures due to effect of medium to high temperature," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 150, p. 107319, 2023, doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107319.
- M. R. Widyanto, N. E. Setijogianto, and R. G. Sudarmawan, "Analisis Pengaruh Preventive Maintenance pada Mesin Produksi dengan RCM," in *Prosiding SNTM PNJ*, 2023. [Online]. Available: <https://prosiding.pnj.ac.id/sntm/article/view/3409>
- M. R. Widyanto, N. E. Setijogianto, and R. G. Sudarmawan, "Analisis Pengaruh Preventive Maintenance pada Mesin Produksi dengan RCM," in *Prosiding SNTM PNJ*, 2023. [Online]. Available: <https://prosiding.pnj.ac.id/sntm/article/view/3409>
- P. D. T. O'Connor and A. Kleyner, *Practical Reliability Engineering*, 5th ed. John Wiley & Sons, 2012. doi: 10.1002/9781119961260.
- P. H. Corporation, *Parker O-Ring Handbook (ORD 5700)*. Parker Hannifin Corporation, 2018. [Online]. Available: <https://ph.parker.com/us/en/o-ring-handbook>

- P. Kumar, S. Park, Y. Zhang, S.-H. Jo, H. S. Kim, and T. Kim, "A Review of Hydraulic Cylinder Faults, Diagnostics, and Prognostics," *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol.*, vol. 11, no. 5, pp. 1637–1661, 2024, doi: 10.1007/s40684-024-00639-3.
- X. Zhao, E. Appiah, Y. Xia, and J. Wang, "Degradation process analysis and reliability prediction modeling of hydraulic reciprocating seal based on monitoring data," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 140, p. 106565, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106565.