
ANALISIS PERENCANAAN PERAWATAN MESIN LPBFP UNIT ST 1B PLTGU MENGUNAKAN METODE RCM DAN AGE REPLACEMENT

Dzakwan Alif Firmansyah Hakim¹, Said Salim Dahda², Deny Andesta³
Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Gresik
Jl. Sumatera 101 GKB, Gresik 61121, Indonesia
e-mail : dzakwanalif.fh@gmail.com

ABSTRAK

Low Pressure Boiler Feed Pump (LP BFP) merupakan komponen vital dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) karena menjaga suplai air menuju *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)*. Tingginya frekuensi kerusakan pada LP BFP Unit ST 1B selama 2019–2025 menyebabkan *downtime* signifikan dan berpotensi mengganggu kontinuitas operasi. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi komponen kritis, menentukan strategi perawatan yang tepat, serta menetapkan interval penggantian optimal untuk meningkatkan keandalan sistem. Metode penelitian menggunakan pendekatan kualitatif-kuantitatif. Pendekatan kualitatif dilakukan melalui *Reliability Centered Maintenance (RCM)* dengan tahapan *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* dan *Logic Tree Analysis (LTA)*. Pendekatan kuantitatif menggunakan metode *Age Replacement* berbasis data historis kerusakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa O-Ring, Oil Seal, dan Valve merupakan komponen paling kritis. Strategi perawatan yang sesuai adalah pendeteksian dini kerusakan (*Finding Failure*), dengan interval penggantian optimal masing-masing 5.000 jam, 4.500 jam, dan 12.000 jam. Penerapan strategi ini berpotensi menurunkan *downtime* tidak terencana, meningkatkan efisiensi operasional, serta mendukung keberlanjutan sistem PLTGU. Pendekatan ini memberikan kontribusi pada optimalisasi perawatan melalui kombinasi analisis kualitatif dan kuantitatif.

Kata kunci : Boiler Feed Pump, Reliability Centered Maintenance, Age Replacement, FMEA, strategi perawatan preventif.

ABSTRACT

The Low Pressure Boiler Feed Pump (LP BFP) is a vital component in Combined Cycle Power Plant (CCPP) operations, responsible for maintaining the water supply to the Heat Recovery Steam Generator (HRSG). The high failure frequency of the LP BFP Unit ST 1B during the 2019–2025 period has resulted in significant cumulative downtime, potentially disrupting operational continuity. This study aims to identify critical components, determine appropriate maintenance strategies, and establish optimal replacement intervals to improve system reliability. The research employs a qualitative–quantitative approach. The qualitative analysis is conducted using Reliability Centered Maintenance (RCM) with Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and Logic Tree Analysis (LTA). The quantitative analysis uses the Age Replacement method based on historical failure data. The results indicate that the O-Ring, Oil Seal, and Valve are the most critical components. The appropriate maintenance strategy is early failure detection (Finding Failure), with optimal replacement intervals of 5,000 hours, 4,500 hours, and 12,000 hours, respectively. Implementing this strategy is projected to reduce unplanned downtime, improve operational efficiency, and support the sustainability of CCPP systems. This study contributes to maintenance optimization through a combined qualitative and quantitative analysis approach.

Keywords : Boiler Feed Pump, Reliability Centered Maintenance, Age Replacement, FMEA, preventive maintenance strategy.

Jejak Artikel

Upload artikel : 16 Desember 2025

Revisi : 5 Januari 2026

Publish : 30 Januari 2026

1. PENDAHULUAN

Dalam dunia industri, khususnya pada sektor pembangkitan listrik, keberlangsungan operasi sangat bergantung pada ketersediaan dan keandalan peralatan produksi. Keandalan mesin

merupakan faktor krusial dalam proses pembangkitan listrik, terutama pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) yang beroperasi secara kontinyu. Salah satu mesin vital dalam sistem ini adalah *Low Pressure*

Boiler Feed Pump (LP BFP), yang berfungsi menjaga kontinuitas suplai air menuju *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG). LP BFP memiliki peran strategis karena gangguan pada peralatan vital ini dapat mengakibatkan penurunan kapasitas, terganggunya pasokan listrik, dan berhentinya proses operasional, menjadikan pemeliharaan (*maintenance*) sebagai elemen strategis untuk meminimalkan *downtime*.

Table 1. Data *Downtime* unit LP BFP 2019-2025

No	Unit	Frekuensi kerusakan	Downtime (jam)
1	LP BFP 1A	20	10.115,22
2	LP BFP 1B	27	16.595,69
3	LP BFP 1C	12	12.859,47
4	LP BFP 1D	19	13.534,12
TOTAL		78	53.104,51

PT PLN Nusantara Power UP Gresik memiliki 12 unit LP BFP yang terdapat pada PLTGU. Data historis menunjukkan bahwa LP BFP Unit ST 1B merupakan mesin dengan *downtime* tertinggi pada periode 2019–2025, yaitu sebesar 16.595,69 jam dengan 27 kali frekuensi kerusakan. Tingginya frekuensi dan durasi *downtime* tersebut menuntut adanya strategi perawatan yang tepat guna meningkatkan keandalan dan meminimalkan kerugian operasional.

Oleh karena itu, diperlukan perencanaan perawatan yang komperhensif. Metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dipilih sebagai pendekatan sistematis untuk mengidentifikasi fungsi kritis dan strategi perawatan paling efektif berdasarkan resiko kegagalan komponen. *Reliability Centered Maintenance* dikombinasikan dengan metode *Age Replacement* untuk menentukan waktu optimal penggantian komponen berdasarkan usia pakai, yang berguna dalam mencegah kegagalan akibat keausan material.

Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi komponen kritis, menentukan tindakan perawatan yang efektif dan efisien (RCM), serta menetapkan interval waktu optimal untuk penggantian komponen kritis (*Age Replacement*) pada LP BFP Unit ST 1B PLTGU.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Bagian ini menyajikan hasil analisis yang diperoleh dari penerapan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dan metode *Age*

Replacement pada mesin *Low Pressure Boiler Feed Pump* (LP BFP) Unit ST 1B PLTGU PT PLN Nusantara Power UP Gresik. Pembahasan dimulai dari analisis mode kegagalan, penentuan komponen kritis, pemilihan distribusi kerusakan, hingga penetapan interval penggantian optimal yang dipaparkan sebagai berikut:

2.1. Sumber Data

Data yang digunakan pada penelitian ini diperoleh melalui:

- Observasi lapangan
- Wawancara dengan teknisi
- Data historis kerusakan LP BFP unit ST 1B PLTGU tahun 2019-2025

Data kerusakan pada mesin LP BFP ST 1B PLTGU yang telah dikumpulkan selama 2019-2025. Data tersebut meliputi data jenis kerusakan dan lama perbaikan. Berikut ini adalah data kerusakan LP BFP ST 1B PLTGU yang dapat dilihat pada table 2:

Table 2. Data waktu kerusakan LP BFP ST 1 PLTGU

Mesin	NO	Waktu Kerusakan		Downtime (Jam)	Komponen
		Mulai	Selesai		
LP BFP 1B	1	24/03/2020 15:30	24/03/2020 16:15	0,75	Valve
	2	24/05/2020 20:19	25/05/2020 11:00	14,68	Bearing
	3	21/01/2021 08:49	25/01/2021 16:17	103,46	Oil Seal
	4	16/06/2021 09:03	07/07/2021 00:00	494,94	Bearing
	5	28/09/2021 09:11	30/09/2021 15:11	54,00	Slight Glass
	6	08/10/2021 08:54	05/11/2021 16:09	679,24	Oil Seal
	7	26/11/2021 09:02	20/12/2021 16:07	583,09	O-Ring
	8	28/01/2022 08:54	21/09/2022 16:11	5671,29	Oil Seal
	9	05/04/2022 08:44	08/04/2022 00:00	63,27	Pressure Indicator
	10	06/04/2022 09:05	25/04/2022 15:00	461,91	Pressure Indicator
	11	31/10/2022 08:53	07/11/2022 16:12	175,3	O-Ring
	12	03/04/2023 08:55	03/04/2023 11:00	2,08	Komponen Kontrol
	13	06/04/2023 08:48	12/04/2023 00:00	135,19	Valve
	14	06/04/2023 09:00	06/04/2023 14:31	5,52	O-ring
	15	01/08/2023 08:36	07/08/2023 00:00	135,39	Valve
	16	10/08/2023 08:48	17/08/2023 15:01	174,22	Mechanical Seal
	17	15/08/2023 08:52	21/08/2023 14:39	149,77	Discharger Line
	18	23/10/2023 09:12	27/10/2023 15:37	102,42	Oil Seal
	19	21/12/2023 10:14	21/12/2023 15:00	4,76	Oil Seal
	20	02/05/2024 09:16	06/05/2024 15:11	101,91	O-Ring
	21	09/07/2024 10:21	18/11/2024 00:00	3157,64	Interlock breaker
	22	20/08/2024 21:13	21/08/2024 15:45	18,52	Flange Suction
	23	21/08/2024 14:06	26/08/2024 00:00	105,88	Pressure Indicator
	24	19/09/2024 09:10	22/10/2024 15:07	797,94	O-Ring
	25	30/01/2025 09:32	03/02/2025 00:00	86,46	O-Ring
	26	03/03/2025 09:06	11/07/2025 09:07	3120,02	Valve
	27	21/04/2025 08:57	30/04/2025 11:00	207,04	Pressure Indicator

2.2. Langkah – Langkah Metodologi

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis untuk mengidentifikasi komponen kritis pada LP BFP Unit ST 1B serta menentukan interval penggantian optimal. Secara umum, langkah-langkah metodologi penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Identifikasi permasalahan dan pengumpulan data yang terjadi pada LP BFP Unit ST 1B, khususnya terkait tingginya frekuensi kerusakan dan *downtime*.
- Penyusunan *Functional Block Diagram* untuk menggambarkan alur kerja, fungsi utama, dan fungsi pendukung LP BFP.
- Pada tahapan *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) ini bertujuan untuk mengidentifikasi fungsi dari setiap komponen, menentukan kemungkinan mode kegagalan yang dapat terjadi, menguraikan penyebab terjadinya kegagalan, serta menganalisis konsekuensi yang ditimbulkan, yang kemudian dimanfaatkan untuk menghitung nilai *Risk Priority Number* (RPN).
- Setelah nilai RPN diperoleh, komponen yang berisiko tinggi dianalisis lebih lanjut menggunakan *Logic Tree Analysis* (LTA). Analisis ini menentukan konsekuensi kegagalan yang digunakan untuk memastikan komponen yang benar-benar bersifat kritis serta menentukan jenis tugas perawatan yang tepat sesuai karakteristik kegagalannya.
- Setelah melalui analisis FMEA dan LTA, beberapa komponen ditetapkan sebagai komponen kritis berdasarkan: *Risk Priority Number* (RPN). Tahap ini menghasilkan komponen yang menjadi prioritas untuk dianalisis menggunakan metode *Age Replacement*.
- Tahap selanjutnya adalah melakukan analisis kuantitatif terhadap data waktu antar kerusakan komponen kritis. Empat jenis distribusi diuji, yaitu: Normal, Lognormal, Eksponensial, Weibull. Pengujian dilakukan dengan metode *Least Square Curve Fitting*, dan distribusi yang dipilih adalah distribusi dengan nilai *index of fit* (r) terbesar.
- Berdasarkan distribusi terpilih, dilakukan perhitungan parameter keandalan yang

meliputi: *Mean Time To Failure* (MTTF), *Reliability function* $R(t)$, *Probability of failure* $F(t)$, Parameter distribusi seperti β dan η untuk Weibull.

- Tahap selanjutnya adalah menerapkan model *Age Replacement* untuk menentukan waktu penggantian komponen sebelum kerusakan terjadi. Proses perhitungannya dilakukan melalui pendekatan *trial and error*, dengan memanfaatkan jenis distribusi yang sebelumnya yang telah diterapkan dan divalidasi pada perhitungan *Mean Time to Failure* (MTTF).
- Tahap terakhir adalah merumuskan strategi perawatan berdasarkan hasil analisis *Reliability Centered Maintenance* dan *Age Replacement*.

2.3. Diagram Alir

Berikut merupakan gambaran umum diagram alir yang digunakan pada penelitian ini:



Gambar 1. Diagram Alir

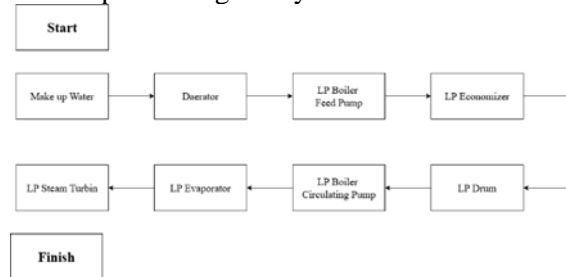
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil analisis yang diperoleh dari penerapan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dan metode *Age Replacement* pada mesin *Low Pressure Boiler*

Feed Pump (LP BFP) Unit ST 1B PLTGU PT PLN Nusantera Power UP Gresik. Pembahasan dimulai dari analisis mode kegagalan, penentuan komponen kritis, pemilihan distribusi kerusakan, hingga penetapan interval penggantian optimal yang dipaparkan sebagai berikut:

3.1. Analisis Fungsional dan Identifikasi Mode kegagalan

LP BFP Unit ST 1B merupakan pompa yang berfungsi memasok air bertekanan rendah menuju *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG). Melalui penyusunan *Functional Block Diagram* (FBD), fungsi utama dan fungsi pendukung sistem dapat dipetakan secara jelas. FBD menunjukkan adanya beberapa komponen yang terlibat dalam mendukung fungsi pompa, khususnya sistem perapat (*sealing*), valve, dan elemen pendukung lainnya.



Gambar 2. *Functional Block Diagram* (FBD) LP BFP

Selanjutnya dilakukan identifikasi mode kegagalan (*failure mode*) menggunakan FMEA. Setiap mode kegagalan dianalisis berdasarkan penyebab, dampak, dan frekuensi terjadinya. Hasil FMEA menunjukkan bahwa terdapat beberapa komponen yang memiliki nilai *Risk Priority Number* (RPN) tinggi, sehingga berpotensi memberikan dampak signifikan terhadap kinerja LP BFP.

3.2. Penentuan Komponen Kritis Menggunakan FMEA dan LTA

Penentuan komponen kritis merupakan tahap penting dalam proses *Reliability Centered Maintenance* (RCM) karena hasilnya akan menentukan arah strategi perawatan dan interval penggantian yang dihitung pada tahap selanjutnya. Pada penelitian ini, *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) digunakan untuk mengidentifikasi dan menilai risiko kegagalan setiap komponen, serta *Logic Tree Analysis* (LTA) untuk menentukan klasifikasi konsekuensi kegagalan. Kombinasi kedua metode ini menghasilkan komponen yang secara kuantitatif dan kualitatif memiliki dampak paling signifikan terhadap operasi LP BFP Unit

ST 1B. berikut merupakan hasil *worksheet* FMEA pada komponen mesin LP BFP ST 1B PLTGU:

Table 3. Hasil *worksheet* FMEA pada komponen-komponen mesin LP BFP ST 1B PLTGU

Low Pressure Boiler Feed Pump ST 1B PLTGU									
No	Equipment	Function	Failure Mode	Failure Causes	Effect of Failure	S	O	D	RPN
1	Valve	Mengatur dan mengisolasi aliran fluida	Bocor, macet, stuck, aus	Korosi, usia pakai, seal rusak, pengoperasian tidak tepat	Gangguan aliran, tekanan tidak stabil, shutdown, kerusakan pompa	8	7	3	168
2	Komponen Kontrol	Mengatur & melindungi operasi LP BFP	Gagal kirim sinyal, hang, trip palsu	Kabel sinyal rusak, gangguan listrik, PLC rusak, sensor gagal, logic error	Trip palsu, kontrol manual, kerusakan tidak terlindungi, shutdown mendadak	8	3	3	72
3	Pressure Indicator	Menampilkan tekanan kerja pompa (suction/discharge)	Tidak akurat, macet, rusak total	Sensor rusak, kotoran, koneksi lemah	Operator salah mengambil keputusan, tekanan tidak termonitor, risiko kerusakan sistem	7	6	2	84
4	Flange Suction	Menyambungkan pipa suction ke pompa	Bocor, retak, baut longgar	Torsi tidak tepat, gasket rusak, korosi, getaran tinggi	Kebocoran fluida, masuk udara, kavitasi, performa turun, potensi shutdown	8	4	3	96
5	O-Ring	Menyegel sambungan agar tidak bocor	O-ring aus/getas, retak, melar	Usia pakai, pemasangan salah, material tidak cocok, overpressure	Kebocoran fluida, performa pompa turun, kontaminasi fluida, kerusakan komponen lain	9	8	3	216
6	Bearing	Menopang shaft, mengurangi gesekan	Aus, macet, panas	Pelumasam buruk, beban berlebihan, kontaminasi, usia pakai, getaran	Overheating, getaran tinggi, kerusakan shaft/seal, shutdown mendadak	9	3	2	54
7	Sight Glass	Menunjukkan level pelumas secara visual	Buram, retak, bocor, salah baca	Getaran mesin, material rapuh, pemasangan miring, tidak dibersihkan	Operator salah membaca level oli, pelumasam terganggu, overheating, shutdown	7	2	2	28

8	Oil Seal	Menahan oli agar tidak bocor & mencegah kontaminasi	Bocor, aus, keras, retak	Usia pakai tinggi, pemasangan tidak tepat, gesekan tinggi, material tidak sesuai	Kebocoran oli, overheating, kontaminasi, kerusakan bearing/shaft, shutdown	8	8	3	192
9	Mechanical Seal	Menyegel shaft dan casing, mencegah kebocoran	Bocor, aus, retak, panas	Pelumasannya buruk, salah pasang, bahan tidak sesuai, getaran tinggi, dry running	Kebocoran, overheating, kerusakan shaft/bearing, shutdown	9	2	2	36
10	Discharger Line	Menyalurkan fluida bertekanan dari pompa	Bocor, retak, korosi, sumbatan	Material tidak sesuai, getaran, sambungan lemah, suhu/tekanan tinggi, korosi	Kebocoran, kehilangan tekanan, risiko safety, shutdown, gangguan downstream system	6	5	3	90
11	Interlock Breaker	Mengontrol dan mengamankan start/stop pompa via sinyal	Gagal close/open, sinyal interlock tidak jalan, trip palsu	Kontak aus, kabel rusak, wiring salah, overload, kelembaban, logic error	Pompa gagal start/stop, trip palsu, proteksi tidak bekerja, potensi kerusakan sistem	6	2	3	36

Setelah nilai RPN diperoleh dari langkah selanjutnya adalah mengelompokkan risiko ke dalam kategori peringkat. Tujuannya adalah agar risiko dengan tingkat kritis tinggi dapat ditangani lebih dahulu melalui tindakan korektif maupun preventif.

Kemudian dapat dilihat hasil kategori kekritisan komponen Low Pressure Boiler Feed Pump (LP BFP) ST 1 PLTGU terdapat 3 komponen dengan kategori kekritisan sangat tinggi dengan nilai RPN 100-500. O-RING dengan nilai RPN 216, Oil Seal dengan nilai RPN 192, dan Valve dengan nilai RPN 168 yang merupakan komponen dengan RPN paling tinggi diantara komponen-komponen lainnya, dengan kategori kekritisan Sangat Tinggi.

Setelah komponen dengan RPN tinggi teridentifikasi, proses selanjutnya adalah menentukan tingkat konsekuensi kegagalan menggunakan *Logic Tree Analysis*. LTA memeriksa apakah kegagalan komponen:

1. Berdampak pada keselamatan (Kategori A: *Safety Problem*)
2. Mengganggu operasi sistem (Kategori B: *Outage Problem*)

3. Mengakibatkan kerugian ekonomi signifikan (Kategori C: *Economic Problem*)
4. Merupakan kegagalan tersembunyi (Kategori D: *Hidden Failure*)

Table 4. Hasil *Logic Tree Analysis* Komponen Kritis LP BFP unit ST 1B PLTGU

No	Equipment	Fungction	Failure Mode	Critically Analysis			
				Evidents	Safety	Outage	Category
1	Valve	Mengatur dan mengisolasi aliran fluida	Bocor, macet, stuck, aus	Y	N	Y	B
2	O-Ring	Menyegel sambungan agar tidak bocor	O-ring aus/getas, retak, melar	Y	N	Y	B
3	Oil Seal	Menahan oli agar tidak bocor & mencegah kontaminasi	Bocor, aus, keras, retak	Y	N	Y	B

Hasil LTA menunjukkan bahwa ketiga komponen tidak menimbulkan risiko keselamatan, namun memiliki dampak langsung terhadap performa operasi, sehingga dikategorikan sebagai *Outage Problem*. Kategori ini berarti komponen harus mendapat perhatian khusus karena kegagalannya berdampak langsung pada keandalan sistem.

3.3. Analisis Distribusi Waktu Antar Kerusakan dan Perbaikan

Dalam menganalisis interval waktu antara terjadinya kegagalan, langkah awal yang dilakukan adalah mengidentifikasi komponen O-Ring, Oil Seal, dan Valve sebagai komponen dengan waktu henti (*downtime*) tertinggi. Selanjutnya, dilakukan penentuan distribusi data untuk mengevaluasi rentang kegagalan pada masing-masing komponen. Berikut merupakan rekap hasil *Index of fit* waktu kerusakan komponen O-Ring, Oil Seal, dan Valve dari setiap masing-masing distribusi yaitu Eksponensial, Normal, Lognormal, dan Weibull:

Table 5. Rekap hasil *Index of Fit* waktu antar kerusakan komponen

Komponen	Distribusi	Index of Fit	% Index of Fit
O-ring	Normal	0.94009	94,01%
	LogNormal	0.96191	96,19%
	Eksponensial	0,96581	96,58%
	Weibull	0.94157	94,16%
Oil Seal	Normal	0.96262	96,26%
	LogNormal	0.97322	97,32%
	Eksponensial	0,98159	98,16%
	Weibull	0.96548	96,55%
Valve	Normal	0,99917	99,92%
	LogNormal	0.97077	97,08%
	Eksponensial	0.99036	99,04%
	Weibull	0.98729	98,73%

Berdasarkan tabel 5, komponen O-Ring memiliki nilai *Index of Fit* tertinggi pada distribusi Eksponensial, yaitu sebesar 96,581%. Untuk komponen Oil Seal, distribusi Eksponensial menunjukkan nilai *Index of Fit* tertinggi, yakni 98,159%. Sedangkan pada komponen Valve, distribusi Normal memiliki nilai *Index of Fit* tertinggi sebesar 99,917%.

Sementara itu berikut merupakan rekap hasil *Index of fit* waktu antar perbaikan komponen O-Ring, Oil Seal, dan Valve dari setiap masing-masing distribusi yaitu Eksponensial, Normal, Lognormal, dan Weibull:

Table 6. Rekap hasil *Index of Fit* waktu antar perbaikan komponen

Komponen	Distribusi	Index of Fit	% Index of Fit
O-ring	Normal	0.919025	91,90%
	LogNormal	0.945677	94,57%
	Eksponensial	0,970975	97,10%
	Weibull	0.970941	97,09%
Oil Seal	Normal	0.784194	78,42%
	LogNormal	0,978658	97,87%
	Eksponensial	0.907716	90,77%
	Weibull	0.973905	97,39%
Valve	Normal	0.806856	80,69%
	LogNormal	0.946282	94,63%
	Eksponensial	0.9117	91,17%
	Weibull	0,961132	96,11%

Berdasarkan tabel 6, komponen O-Ring memiliki nilai *Index of Fit* tertinggi pada distribusi Eksponensial, yaitu sebesar 97,0975%. Untuk komponen Oil Seal, distribusi LogNormal menunjukkan nilai *Index of Fit* tertinggi, yakni 97,8658%. Sedangkan pada komponen Valve, distribusi Weibull memiliki nilai *Index of Fit* tertinggi sebesar 96,1132%.

3.4. Analisis Parameter Nilai MTTF dan MTTR

Setelah melakukan pengujian terhadap data kerusakan, langkah berikutnya adalah menghitung estimasi *Mean Time To Failure* (MTTF) berdasarkan distribusi yang telah ditentukan. Dalam konteks ini, data waktu antara kerusakan pada komponen O-Ring mengikuti distribusi Eksponensial, komponen Oil Seal mengikuti distribusi Lognormal, dan komponen Valve mengikuti distribusi Normal. Berdasarkan distribusi tersebut, diperoleh hasil perkiraan parameter untuk *Mean Time To Failure* (MTTF) masing-masing komponen sebagai berikut:

Table 7. Nilai Parameter Distribusi MTTF

Komponen	Distribusi	Index of Fit (r)	μ	s	λ	MTTF
O-Ring	Eksponensial	96,58%			0,0002	5240,15
Oil Seal	Eksponensial	98,16%			0,0002	4745,25
Valve	Normal	99,92%	14347,4	9770		14347,4

Berdasarkan hasil analisis, interval waktu antara kerusakan (*Time to Failure*) untuk masing-masing komponen diperoleh sebagai berikut. Pada komponen O-Ring, interval waktu antara kerusakan tercatat sebesar 5.240,15 jam, sehingga diperkirakan komponen ini akan mengalami kerusakan setelah beroperasi selama 5.240,15jam. Untuk komponen Oil Seal, interval waktu antara kerusakan adalah 4.745,25 jam, yang menunjukkan estimasi waktu operasional hingga terjadinya kerusakan sebesar 4.745,25 jam. Sedangkan pada komponen Valve, interval waktu antara kerusakan tercatat sebesar 14.347,43 jam, sehingga estimasi waktu operasional komponen ini hingga mengalami kerusakan adalah 14.347,43 jam.

Kemudian untuk melakukan pengujian terhadap data perbaikan, langkah berikutnya adalah menghitung estimasi *Mean Time To Repair* (MTTR) berdasarkan distribusi yang telah ditentukan. Dalam konteks ini, data waktu perbaikan pada komponen O-Ring mengikuti distribusi Eksponensial, komponen Oil Seal mengikuti distribusi Lognormal, dan komponen Valve mengikuti distribusi Weibull. Berdasarkan distribusi tersebut, diperoleh hasil perkiraan parameter untuk *Mean Time To Repair* (MTTR) masing-masing komponen sebagai berikut:

Table 8. Nilai Parameter Distribusi MTTR

Komponen	Distribusi	Index of Fit (r)	μ	s	λ	η	β	MTTR
O-Ring	Eksponensial	0,970975			0,0034			291,7
Oil Seal	LogNormal	0,978658	5,19839	2,345				2829,4
Valve	Weibull	0,961132				444,315	0,28024	5686,3

Berdasarkan hasil analisis, interval waktu perbaikan rata-rata (*Mean Time to Repair – MTTR*) untuk masing-masing komponen diperoleh sebagai berikut. Pada komponen O-Ring, interval waktu perbaikan tercatat sebesar 291,70 jam, sehingga estimasi waktu perbaikan rata-rata komponen ini adalah 291,70 jam. Untuk komponen Oil Seal, interval waktu perbaikan sebesar 2.829,36 jam, yang menunjukkan estimasi waktu perbaikan rata-rata komponen tersebut. Sedangkan pada komponen Valve, interval waktu perbaikan tercatat sebesar 5.686,32 jam, sehingga estimasi waktu perbaikan rata-rata untuk komponen ini adalah 5.686,32 jam.

3.5. Penentuan Interval Penggantian Komponen Menggunakan *Age Replacement*

Penentuan interval waktu penggantian secara preventif merupakan langkah strategis untuk mengurangi kemungkinan terjadinya kerusakan mendadak yang dapat menyebabkan *downtime*. Dalam metode *Age Replacement*, perhitungan interval waktu penggantian pencegahan dilakukan dengan tujuan meminimalkan *downtime*. Interval waktu yang dipilih adalah waktu antara kerusakan (*tp*) yang menghasilkan nilai *downtime* paling rendah. Pada subbab ini, digunakan pendekatan berbasis data keandalan untuk menentukan waktu penggantian komponen yang optimal sebelum terjadi kegagalan, sehingga operasional sistem tetap efisien dan kontinuitas produksi dapat terjaga.

Berikut merupakan data yang diperlukan untuk mencari interval waktu penggantian komponen O-Ring sebagai tindakan pencegahan dengan tujuan meminimalkan *downtime*:

Data kerusakan dengan distribusi Eksponensial

$$\begin{aligned} \text{MTTF} &= 5240,15 \text{ Jam} \\ \lambda &= 0.00019 \end{aligned}$$

Interval waktu untuk melakukan penggantian

$$T_f = T_p = 291,70 \text{ Jam}$$

Berikut ini merupakan contoh perhitungan waktu interval penggantian pencegahan pada komponen O-Ring. Parameter yang digunakan adalah jarak waktu antara kerusakan dikarenakan parameter tersebut dipakai untuk yang paling optimal. Parameter yang digunakan yaitu $tp = 5000 \text{ Jam}$, $\lambda = 0.00019$, $T_p = 291.70 \text{ Jam}$, dan perhitungannya dapat dilihat

dibawah ini:

$$\begin{aligned} R(tp) &= e^{-\lambda t} \\ &= e^{-0.00019 \cdot 5000} \\ &= 0.386741 \\ F(tp) &= 1 - R(tp) \\ &= 1 - 0.386741 \\ &= 0.613259 \\ tp + T_p &= 5000 \text{ Jam} + 291.70 \text{ Jam} \\ T_p &= 5291.70 \\ M(tp) &= \frac{\text{MTTF}}{1 - R(tp)} \\ &= \frac{5240,15}{0.613259} \\ &= 8544,75841 \\ D(tp) &= \frac{T_p \cdot R(tp) + T_f \cdot (1 - R(tp))}{(tp + T_p) \cdot R(tp) + (M(tp) + T_f) \cdot (1 - R(tp))} \\ &= 0,039115 \end{aligned}$$

Berikut adalah data untuk menentukan interval penggantian pencegahan pada komponen Oil Seal dengan tujuan meminimalkan waktu henti (*downtime*):
Data kerusakan dengan distribusi Eksponensial

$$\begin{aligned} \text{MTTF} &= 4745,25 \text{ Jam} \\ \lambda &= 0,00021 \end{aligned}$$

Interval waktu untuk melakukan penggantian

$$T_f = T_p = 2829.36 \text{ Jam}$$

Dibawah ini merupakan contoh perhitungan waktu interval penggantian pencegahan pada komponen Oil Seal. Parameter yang digunakan adalah jarak waktu antara kerusakan dikarenakan parameter tersebut dipakai untuk yang paling optimal. Parameter yang digunakan yaitu $tp = 4500 \text{ Jam}$, $\lambda = 0.00021$, $T_p = 2829,36 \text{ Jam}$, dan perhitungannya dapat dilihat dibawah ini:

$$\begin{aligned} R(tp) &= e^{-\lambda t} \\ &= e^{-0.00021 \cdot 4500} \\ &= 0,3886 \\ F(tp) &= 1 - R(tp) \\ &= 1 - 0.3886 \\ &= 0.6114 \end{aligned}$$

$$tp + = 4500 \text{ Jam} + 2829,36 \text{ Jam}$$

$$Tp = 7329,26$$

$$M(tp) = \frac{MTTF}{1-R(tp)} = \frac{4745,25}{0.6114} = 7761,28557$$

$$D(tp) = \frac{Tp.R(tp)+Tf.(1-R(tp))}{(tp+Tp).R(tp)+(M(tp)+Tf).(1-R(tp))} = 0,303715$$

Berikut adalah data yang diperlukan untuk menentukan interval penggantian pencegahan pada komponen Valve, dengan tujuan meminimalkan waktu henti (*downtime*):

Data kerusakan dengan distribusi Eksponensial

$$MTTF = 4745,25 \text{ Jam}$$

$$\lambda = 0,00021$$

Interval waktu untuk melakukan penggantian

$$Tf = Tp = 2829.36 \text{ Jam}$$

Dibawah ini merupakan contoh perhitungan waktu interval penggantian pencegahan pada komponen Oil Seal. Parameter yang digunakan adalah jarak waktu antar kerusakan dikarenakan parameter tersebut dipakai untuk yang paling optimal. Parameter yang digunakan yaitu $tp = 4500 \text{ Jam}$, $\lambda = 0.00021$, $Tp = 2829,36 \text{ Jam}$, dan perhitungannya dapat dilihat dibawah ini:

$$R(tp) = e^{-\lambda t} = e^{-0.00021 \cdot 4500} = 0,3886$$

$$F(tp) = 1 - R(tp) = 1 - 0.3886 = 0.6114$$

$$tp + = 4500 \text{ Jam} + 2829,36 \text{ Jam}$$

$$Tp = 7329,26$$

$$M(tp) = \frac{MTTF}{1-R(tp)} = \frac{4745,25}{0.6114} = 7761,28557$$

$$D(tp) = \frac{Tp.R(tp)+Tf.(1-R(tp))}{(tp+Tp).R(tp)+(M(tp)+Tf).(1-R(tp))} = 0,303715$$

3.6. Pembahasan dan Hasil Analisis

Perhitungan interval waktu penggantian pencegahan optimal (tp) dilakukan menggunakan model *Age Replacement* dengan kriteria minimisasi *downtime* per satuan waktu, yang direpresentasikan oleh nilai $D(tp)$. Nilai (Tp) dipilih berdasarkan nilai $D(tp)$ terkecil dari berbagai alternatif interval penggantian.

Sebelum perhitungan, nilai *Mean Time To Failure* (MTTF) dan *Mean Time To Repair* (MTTR) dihitung berdasarkan distribusi yang paling sesuai dari data historis kerusakan untuk masing-masing komponen. Berikut adalah hasil rekapitulasi interval penggantian optimal untuk ketiga komponen kritis:

Table 9. Rekapitulasi interval penggantian komponen

Komponen Kritis	Distribusi	MTTF (jam)	Tp (jam)	tp (hari)	D(tp)
O-Ring	Eksponensial	5.240,15	5.000	208,3	0,03912
Oil Seal	Lognormal	4.745,25	4.500	187,5	0,30372
Valve	Normal	14.347,43	12.000	500	0,20926

Untuk O-Ring, dengan memanfaatkan distribusi Eksponensial (MTTF 5.240,15 jam), interval penggantian optimal ditetapkan pada 5.000 jam (208,33 hari). Nilai ini menghasilkan waktu henti per jam operasi $D(tp)$ terkecil, yaitu 0,039115.

Untuk Oil Seal, yang mengikuti distribusi Lognormal (MTTF 4.745,25 jam), interval penggantian optimal adalah 4.500 jam (187,5 hari), dengan nilai $D(tp)$ minimum sebesar 0,303715.

Sementara itu, Valve, menggunakan distribusi Normal (MTTF 14.347,43 jam), memiliki interval penggantian optimal pada 12.000 jam (500 hari), menghasilkan nilai $D(tp)$ minimum sebesar 0,209264.

Implementasi *Age Replacement* dengan interval penggantian optimal ini diharapkan dapat mengurangi *unplanned downtime* secara signifikan, meningkatkan *availability* mesin LP BFP ST 1B PLTGU, dan mengoptimalkan operasional pembangkit listrik secara keseluruhan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1. Kesimpulan

Berdasarkan analisis *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), komponen O-Ring, Oil

Seal, dan Valve pada *Low Pressure Boiler Feed Pump* (LP BFP) Unit ST 1B PLTGU teridentifikasi sebagai komponen paling kritis. Hal ini ditunjukkan oleh nilai Risk Priority Number (RPN) tertinggi: O-Ring (216), Oil Seal (192), dan Valve (168). Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa ketiga komponen tersebut memiliki potensi kegagalan dengan dampak tinggi terhadap sistem, frekuensi kejadian yang signifikan, serta kesulitan deteksi dini yang relatif tinggi.

Berdasarkan pendekatan *Age Replacement Model*, interval penggantian optimal ditentukan untuk meminimalkan risiko downtime dan biaya akibat kegagalan tak terduga. Hasilnya adalah:

- O-Ring: 5.000 jam ($\pm 208,33$ hari), nilai minimum $D(tp) = 0.039115$
- Oil Seal: 4.500 jam ($\pm 187,5$ hari), nilai minimum $D(tp) = 0.303715$
- Valve: 12.000 jam (± 500 hari), nilai minimum $D(tp) = 0.209264$

Penentuan interval ini menunjukkan bahwa pergantian terjadwal berbasis usia pakai dapat meningkatkan reliabilitas sistem, menurunkan downtime tidak terencana, dan memperpanjang umur operasi komponen secara optimal.

4.2. Saran

Berikut ini beberapa saran yang bisa menjadi masukan bagi perusahaan dan penelitian selanjutnya:

1. Implementasi Preventive Maintenance Berbasis Data: Perusahaan disarankan untuk mengadopsi strategi *Finding Failure* melalui penjadwalan inspeksi rutin terhadap O-Ring, Oil Seal, dan Valve sesuai interval yang telah dihitung. Hal ini akan membantu mendeteksi potensi kerusakan sebelum terjadi kegagalan sistemik yang dapat menghentikan proses pembangkitan.
2. Perencanaan Ketersediaan Suku Cadang: Disarankan untuk menetapkan *buffer stok minimum* komponen kritis berdasarkan interval penggantian dan lead time pengadaan. Misalnya, minimal dua set O-Ring dan Oil Seal setiap 6 bulan, serta Valve setiap 12 bulan, untuk memastikan respons cepat terhadap kebutuhan penggantian.
3. Integrasi Aspek Finansial dan Risiko dalam Strategi Perawatan: Penelitian selanjutnya diharapkan mengevaluasi biaya-manfaat dari strategi perawatan ini, termasuk analisis perbandingan antara biaya

preventive replacement dan potensi kerugian akibat *downtime*. Dengan mempertimbangkan aspek finansial dan risiko operasional, perusahaan dapat merumuskan strategi perawatan yang lebih komprehensif dan berkelanjutan.

4. Pengembangan RCM untuk Komponen Lain: Mengingat pentingnya keandalan sistem secara keseluruhan, perusahaan disarankan untuk menerapkan pendekatan serupa pada komponen vital lainnya di PLTGU, guna membentuk sistem manajemen pemeliharaan yang terintegrasi dan berbasis data.

DAFTAR PUSTAKA

- Adillah, R., Jufrizel, Maria, P. S., & Zarory, H. (2024). Analisa Keandalan Instrumentasi Boiler Feed Pump Menggunakan Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) di PT.PLN Nusantara Power UP Tenayan. *JURNAL Al-AZHAR INDONESIA SERI SAINS DAN TEKNOLOGI*, 9(3), 276.
- Alijoyo, A., Wijaya, B., & Jacob, I. (2020). *Failure Mode Effect Analysis Analisis Modus Kegagalan dan Dampak*. 19.
- Alnavis, N. B., Wirawan, R. R., Solihah, K. I., & Nugroho, V. H. (2024). Energi listrik berkelanjutan: Potensi dan tantangan penyediaan energi listrik di Indonesia. *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering*, 1(2), 119–139.
- Ansori, N., & Mustajib, M. I. (2013). *Sistem Perawatan Terpadu (Integrated Maintenance System)* (1st ed.). Graha Ilmu.
- Ardiansyah, M. F., & Widjajati, E. P. (2021). Penjadwalan Preventive Maintenance Pada Mesin Mixing Dalam Produksi Brick Batu Tahan Api Dengan Menggunakan Metode Age Replacement Pada Pt Xyz. *Juminten*, 2(1), 144–155.
- Budi, S., ATABIQ, F., & ASTI, R. A. (2023). Pengaruh Beban Gas Turbine Generator terhadap Efisiensi Heat Recovery Steam Generator pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU). *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 11(3), 639.
- Campbell, J. D., & Jardine, A. K. S. (2001). *Maintenance Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions* (J. D.

- Campbell (ed.); 1st ed.). Marcel Dekker. Inc.
- Darmeain, Marzuki, Zuhaimi, Fauzi, Nurlaili, & Luthfi. (2023). Gas turbine maintenance optimizing using the reliability-centered maintenance method. *Jurnal Polimesin*, 21(1), 2023–2025.
- Duffuaa, S. O., & Raouf, A. (2015). Planning and Control of Maintenance Systems: Modeling and Analysis. In *Journal of Quality in Maintenance Engineering* (2nd ed., Vol. 5, Issue 2). Springer International Publishing AG Switzerland.
- Fikri, K., Darmadi, D. B., Nugraha, D., Tieu, A. K., & Norrish, J. (2023). Implementation of Reliability Centered Maintenance (Rcm) in Pertamina Hulu Energy Subholding Upstream (Phe Shu) Through Pertamina Reliability Data (Pareda) Database & Application Development. *International Journal of Mechanical Engineering Technologies and Applications*, 4(2), 212–219.
- Ignatius Deradjad Pranowo, M. E. (2019). Sistem dan Manajemen Pemeliharaan (Maintenance: System and Management). In T. Yuliyanti (Ed.), *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1).
- Jaddi Madarsara, T., Yari, S., & Saeidabadi, H. (2019). Health and Safety Risk Assessment Using a Combined FMEA and JSA Method in a Manufacturing Company. *Asian Pacific Journal of Environment and Cancer*, 2(1), 63–68.
- Kundori, K. (2022). Pengukuran Laju Kerusakan Dengan Mengindikasikan Nilai MTBF Dalam Manajemen Perawatan Mesin Pada PT. AIC. *Jurnal Teknik Mesin Industri Elektro dan Informatika*, September, 13–23.
- Kusuma, T. Y. T., Assagaf, M. K., & Amijaya, F. D. T. (2022). Planning Activities and Maintenance Time Intervals of Induction Machines using The Reliability Centered Maintenance (RCM) II and Age Replacement Method. *Proceedings of the International Conference on Science and Engineering (ICSE-UIN-SUKA 2021)*, 211, 178–185.
- Ledmaoui, Y., El Maghraoui, A., El Aroussi, M., & Saadane, R. (2025). Review of Recent Advances in Predictive Maintenance and Cybersecurity for Solar Plants. *Sensors*, 25(1), 1–23.
- Molęda, M., Małysiak-Mrozek, B., Ding, W., Sunderam, V., & Mrozek, D. (2023). From Corrective to Predictive Maintenance—A Review of Maintenance Approaches for the Power Industry. *Sensors*, 23(13).
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2002). *Applied Statistics and Probability for Engineers Third Edition*.
- PT PLN Nusantara Power UP Gresik. (2023). Profil Bisnis PT PLN Nusantara Power UP Gresik. *Dokumen FMGR*, 336-13.1.3(030), 1–23. <http://e-jurnal.pnl.ac.id/polimesin>
- Wasiran, W., Yudisworo, W. D., & Prihastuty, E. (2022). Performance Testing of Centrifugal Pump Type with 3 Hp Power. *Mestro: Jurnal Teknik Mesin Dan Elektro*, 4(02), 21–30. <https://doi.org/10.47685/mestro.v5i02.365>
- Yssaad, B., Khiat, M., & Chaker, A. (2014). Reliability centered maintenance optimization for power distribution systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 55, 108–115.
- Hidayat, H., Jufriyanto, M., & Rizqi, A. W. (2021). Perancangan RCM (Reliability Centered Maintenance) Untuk Mengurangi Downtime Mesin Pembuat Botol (Studi Kasus PT IGLAS (Persero), Gresik). *MATRIK: Jurnal Manajemen Dan Teknik Industri Produksi*, 21(2), 157-164.