

**PERENCANAAN KEBIJAKAN PERAWATAN PADA INVERTER
MENGUNAKAN METODE *RELIABILITY CENTERED
MAINTENANCE (RCM)*
(Studi Kasus: PLTS XYZ)**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Strata-1
Program Studi Teknik Industri Program Sarjana- Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia**



Nama : Adimas Haji Akbar
No. Mahasiswa : 21522029

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2025**

PERNYATAAN KEASLIAN

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya mengakui bahwa tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri kecuali kutipan dan ringkasan yang seluruhnya sudah saya jelaskan sumbernya. Jika dikemudian hari ternyata terbukti pengakuan saya ini tidak benar dan melanggar peraturan yang sah maka saya bersedia ijazah yang telah saya terima ditarik kembali oleh Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 09 – 09 - 2025



(Adimas Haji Akbar)
21522029

SURAT BUKTI PENELITIAN



SURAT KETERANGAN SELESAI PENELITIAN

Nomor: 100/SKSP/SH/SEI/IX/2025

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dea Puspitasari

Jabatan : General Manager Human Capital & General Affair

Dengan ini menerangkan bahwa:

Nama : Adimas Haji Akbar

NIM : 21522029

Program Studi: Teknik Industri

Universitas : Universitas Islam Indonesia

Telah melaksanakan kegiatan **penelitian** di **PT Surya Energi Indotama** dengan judul penelitian "Perencanaan Kebijakan Perawatan Pada Inverter Menggunakan Metode *Reliability Centered Maintenance (RCM)*"

Demikian surat keterangan ini dibuat dengan sebenarnya untuk dapat digunakan sebagaimana mestinya.

Bandung, 9 September 2025
General Manager
Human Capital & General Affair



Dea Puspitasari
11025

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

**PERENCANAAN KEBIJAKAN PERAWATAN PADA INVERTER
MENGUNAKAN METODE *RELIABILITY CENTERED
MAINTENANCE (RCM)*
(Studi Kasus: PLTS XYZ)**



Disusun Oleh :
Nama : Adimas Haji Akbar
No. Mahasiswa : 21522029

Yogyakarta, 26 – 09 - 2025

Dosen Pembimbing

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Winda Nur Cahyo', is placed below the title 'Dosen Pembimbing'.

(Ir. Winda Nur Cahyo, S.T., M.T., Ph.D., IPM)

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI
PERENCANAAN KEBIJAKAN PERAWATAN PADA INVERTER
MENGUNAKAN METODE *RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE*
(RCM)
(Studi Kasus: PLTS XYZ)

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Adimas Haji Akbar

No. Mahasiswa : 21522029

Telah dipertahankan di depan sidang penguji sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata-1 Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 26- 09 – 2025

Tim Penguji

Ir. Winda Nur Cahyo, S.T., M.T., Ph.D., IPM

Ketua

Elanjati Worldailmi, S.T., M.Sc.

Anggota I

Dr. Agus Mansur, S.T., M.Eng.Sc

Anggota II





Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia




Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM

015220101

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillah segala puji dan syukur saya sampaikan kepada Allah Subhanallahu Wa Ta'ala, yang telah memberikan saya kekuatan, semangat, dan kesempatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini. Saya mendedikasikan Tugas Akhir ini untuk diri saya sendiri yang selalu berusaha, berkomitmen, dan terus bekerja keras hingga tugas akhir ini tuntas. Kemudian saya dedikasikan kepada keluarga tercinta, yang senantiasa memberikan doa dan dukungan tanpa henti. Selain itu, terima kasih kepada dosen pembimbing dan seluruh sivitas akademika yang telah memberikan bimbingan dalam penyelesaian penelitian ini. Dan juga untuk teman-teman saya yang selalu memberikan dukungan dan kebersamaan dalam menghadapi setiap tahap akademik. Harapan saya, laporan ini dapat memberikan kontribusi bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan sektor Industri Energi Baru Terbarukan.

MOTTO

(Ingatlah) ketika pemuda-pemuda itu berlindung ke dalam goa lalu berdoa, “Ya Tuhan kami, anugerahkanlah kepada kami rahmat dari sisi-Mu dan mudahkanlah bagi kami petunjuk untuk segala urusan kami.”

(QS. Al-Kahf: 10)

"Karena sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan. Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan."

(QS. Al-Insyirah: 5-6)

"It always seems impossible until it's done."

(Nelson Mandela)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabaraakaatuh

Alhamdulillahirabbil'alamiin, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas limpahan rahmat, taufik, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Teknik Industri, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Penyusunan skripsi ini memberikan kesempatan bagi penulis untuk menerapkan ilmu yang diperoleh selama perkuliahan ke dalam kajian yang lebih mendalam, khususnya pada topik keandalan, perawatan, dan manajemen risiko pada sistem pembangkit listrik tenaga surya. Melalui proses penelitian ini, penulis memperoleh wawasan dan pengalaman berharga, baik dari segi teknis, analitis, maupun manajerial yang diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan penerapannya di industri energi, khususnya dalam peningkatan kinerja dan keandalan peralatan.

Dalam proses penyusunan penelitian ini, penulis menyadari bahwa tanpa dukungan dan bantuan dari berbagai pihak, penyelesaian penelitian ini tidak akan berjalan lancar. Banyak bantuan, dukungan, semangat, serta doa yang sangat berperan dalam terselesaikannya penelitian ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan laporan kerja praktik ini, terutama kepada:

1. Allah SWT karena atas berkah, rahmat, dan karunia-Nya penulis diberikan kemampuan untuk melaksanakan dan menyelesaikan laporan kerja praktik ini.
2. Kedua orang tua dan keluarga, yang telah banyak membantu memberikan doa dan dukungan baik moril maupun materi agar penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan laporan kerja praktik ini.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Hari Purnomo, M.T., IPU., ASEAN.Eng. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM selaku Ketua Program Studi Teknik Industri Universitas Islam Indonesia.
5. Bapak Ir. Winda Nur Cahyo, S.T., M.T., Ph.D., IPM selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, masukan, dan kritik yang membangun dalam penyusunan penelitian ini.
6. Ibu Salsabila selaku Human Capital PT. SEI yang telah membantu memberikan kesempatan penulis untuk melaksanakan penelitian di PT. SEI.
7. Bapak Riza Ramadhan staf PT. SEI yang telah memberikan informasi, membantu serta memberikan saran dalam penyusunan penelitian ini.
8. Segenap staf dan karyawan PT. Surya Energi Indotama yang telah membantu kelancaran penelitian ini yang memberikan nasihat, materi, informasi, dan ilmu yang sangat bermanfaat yang tidak dapat disebutkan satu per satu.
9. Teman-teman saya yang selalu memberikan dukungan dan kebersamaan dalam menghadapi setiap tahap akademik.

Akhir kata, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, menjadi bahan referensi, dan memberikan kontribusi positif bagi pengembangan sektor Energi Baru Terbarukan di Indonesia.

Wassalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh

ABSTRAK

Inverter merupakan perangkat yang berfungsi mengubah arus searah (DC) dari panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) sesuai standar jaringan listrik. Pada sistem PLTS *on-grid*, kerusakan inverter menjadi faktor utama penurunan kinerja sistem. Permasalahan ini juga terjadi pada PLTS XYZ, di mana gangguan pada inverter terbukti menurunkan nilai *Performance Ratio (PR)* secara signifikan sehingga berdampak pada berkurangnya keandalan produksi energi listrik. Penelitian ini menggunakan metode *Reliability Centered Maintenance (RCM)* sebagai pendekatan utama karena *RCM* mampu menentukan tindakan yang tepat untuk menjaga sistem tetap berfungsi optimal sesuai tujuannya. Hasil analisis menunjukkan bahwa jenis kerusakan paling kritis adalah *Low Insulation Resistance* dengan nilai *Risk Priority Number (RPN)* tertinggi sebesar 200, selanjutnya ditetapkan strategi perawatan *Time Directed (TD)* pada komponen kritis tersebut. Berdasarkan perhitungan diperoleh nilai *Mean Time to Failure (MTTF)* sebesar 4.271,92 menit, *Mean Time to Repair (MTTR)* sebesar 527,5 menit, interval penggantian komponen atau acuan perencanaan kebutuhan *spare part* sebesar 3 hari, serta interval pemeriksaan setiap 3.6 hari jika dihitung 12 jam kerja/hari, nilai *availability* sistem mencapai 90%. Kesimpulan dari penelitian ini adalah penerapan tindakan perawatan yang tepat dapat meminimalkan risiko kegagalan pada proses produksi energi dan memastikan inverter beroperasi sesuai standar kinerja yang ditetapkan.

Kata Kunci: **Inverter, Perawatan, RCM.**

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
SURAT BUKTI PENELITIAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iv
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
MOTTO.....	vii
KATA PENGANTAR	viii
ABSTRAK	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Kajian Literatur.....	6
2.2 Landasan Teori	12
2.2.1 Perawatan.....	12
2.2.2 <i>Reliability Centered Maintenance</i>	14
2.2.3 <i>Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)</i>	14
2.2.4 <i>Logic Tree Analysis (LTA)</i>	17
2.2.5 <i>Task Selection (TS)</i>	18
2.2.6 Distribusi.....	19
2.2.7 Identifikasi Distribusi Antar Waktu Kerusakan dan Perbaikan	24
2.2.8 <i>Uji Goodness of Fit</i>	25
2.2.9 Estimasi Parameter	27
2.2.10 <i>Mean Time to Failure (MTTF)</i>	28
2.2.11 <i>Mean Time to Repair (MTTR)</i>	29
2.2.12 Penggantian pencegahan Optimal Berdasarkan Umur Komponen (<i>Age Replacement</i>)	30
2.2.13 Interval waktu pemeriksaan	31
2.2.14 <i>Availability</i>	32
2.2.15 Keandalan (<i>Reliability</i>)	32
BAB III METODE PENELITIAN	34
3.1 Objek Penelitian.....	34
3.2 Diagram Alir Penelitian.....	34
BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA.....	40
4.1 Pengumpulan Data	40
4.2 Penentuan Komponen Kritis.....	42
4.2.1 <i>Failure Mode dan Effect Analysis (FMEA)</i>	42
4.2.2 <i>Diagram Pareto</i>	44
4.2.3 <i>Logic Tree Analysis (LTA)</i>	45
4.2.4 <i>Task Selection</i>	46
4.3 Pengolahan Data Kuantitatif.....	47
4.3.1 Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Kerusakan (<i>Time to Failure</i>).....	47

4.3.2 Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Perbaikan (<i>Time to Repair</i>).....	54
4.3.3 <i>Uji Goodness of Fit</i> Distribusi Waktu Kerusakan.....	61
4.3.4 <i>Uji Goodness of Fit</i> Distribusi Waktu Perbaikan.....	62
4.3.5 Penentuan Nilai <i>Mean Time to Failure</i>	65
4.3.6 Penentuan Nilai <i>Mean Time to Repair</i>	65
4.3.7 Perhitungan Interval Waktu penggantian pencegahan dengan Minimasi <i>Downtime</i>	65
4.3.8 Perhitungan Interval Waktu Pemeriksaan.....	67
4.3.9 Perbandingan <i>Reliability</i> Sesudah dan Sebelum Penentuan Interval Waktu Penggantian Komponen	68
4.3.10 Perhitungan <i>Availability</i>	69
4.3.11 Perhitungan biaya	70
BAB V PEMBAHASAN	72
5.1 Analisis <i>Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)</i>	72
5.2 Analisis <i>Logic Tree Analysis (LTA)</i>	72
5.3 Analisis <i>Task Selection</i>	73
5.4 Analisis Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Kerusakan dan Perbaikan	74
5.5 <i>MTTF</i> dan <i>MTTR</i>	76
5.6 Analisis perhitungan interval waktu penggantian atau acuan cadangan komponen serta perhitungan interval waktu pemeriksaan.	76
5.7 Perbandingan <i>Reliability</i> dan <i>Availability</i> serta perhitungan Biaya	77
5.8 Tantangan Dalam Menerapkan Rekomendasi Solusi	78
BAB VI PENUTUP	81
6.1 Kesimpulan.....	81
6.2 Saran.....	81
DAFTAR PUSTAKA	83
LAMPIRAN	84

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Dampak Kerusakan Inverter.....	2
Tabel 2. 1 Kategori <i>Severity FMEA</i>	15
Tabel 2. 2 Kategori <i>Occurrence FMEA</i>	15
Tabel 2. 3 Kategori <i>Detection FMEA</i>	16
Tabel 2. 4 Sifat Distribusi Weibull.....	23
Tabel 4. 1 Dataset Kerusakan Inverter	40
Tabel 4. 2 Pengolahan Data <i>FMEA</i>	43
Tabel 4. 3 Pengolahan Data <i>LTA</i>	45
Tabel 4. 4 Pengolahan Data <i>Task Selection</i>	46
Tabel 4. 5 Data Antar Waktu Kerusakan.....	47
Tabel 4. 6 Waktu Antar Kerusakan Distribusi Eksponensial	48
Tabel 4. 7 Waktu Antar Kerusakan Distribusi Normal	50
Tabel 4. 8 Waktu Antar Kerusakan Distribusi LogNormal.....	51
Tabel 4. 9 Waktu Antar Kerusakan Distribusi Weibull	53
Tabel 4. 10 Rekapitulasi Distribusi Waktu Antar Kerusakan.....	54
Tabel 4. 11 Data Antar Waktu Perbaikan.....	54
Tabel 4. 12 Waktu Antar Perbaikan Distribusi Eksponensial	56
Tabel 4. 13 Waktu Antar Perbaikan Distribusi Normal	57
Tabel 4. 14 Waktu Antar Perbaikan Distribusi LogNormal	59
Tabel 4. 15 Waktu Antar Perbaikan Distribusi Weibull.....	60
Tabel 4. 16 Rekapitulasi Distribusi Waktu Antar Perbaikan.....	61
Tabel 4. 17 Uji <i>Goodness of Fit</i> Waktu Antar Perbaikan.....	62
Tabel 4. 18 Perhitungan <i>Age Replacement</i>	66
Tabel 4. 19 Perbandingan <i>Reability</i>	68
Tabel 4. 20 Biaya Tenaga Kerja.....	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Contoh <i>Logic Tree Analysis</i>	18
Gambar 2. 2 Contoh <i>Task Selection</i>	19
Gambar 2. 3 Distribusi Eksponensial	20
Gambar 2. 4 Distribusi Normal.....	21
Gambar 2. 5 Distribusi LogNormal.....	22
Gambar 3. 1 Alur Penelitian	34

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di zaman sekarang, perkembangan pembangkit tenaga listrik mulai beralih dari tenaga fosil menuju Energi Baru Terbarukan (EBT). Hal ini merupakan bentuk respon terhadap isu krisis energi, keterbatasan sumber daya alam, serta meningkatnya kekhawatiran terhadap dampak perubahan iklim global akibat emisi karbon dari pembangkit konvensional. Salah satu bentuk EBT adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) karena bersifat ramah lingkungan, tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca, serta sumber energinya yang melimpah di daerah beriklim tropis seperti Indonesia.

Di Indonesia sendiri perkembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya mengalami tren positif. Menurut Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar yaitu diperkirakan mencapai 207,89 GW. Untuk memanfaatkan potensi tersebut pemerintah Indonesia telah menetapkan target kapasitas terpasang Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebesar 6,5 GW pada tahun 2025, dan angka ini direncanakan terus meningkat hingga mencapai 45 GW pada tahun 2050 (Neli et al., 2021).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah suatu sistem yang berfungsi mengonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan memanfaatkan prinsip efek *photovoltaic*. *Photovoltaic* merupakan gejala fisika yang terjadi ketika permukaan sel surya (*solar cell*) terkena paparan sinar matahari (Nurjaman & Purnama, 2022). PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) dapat diklasifikasikan ke dalam tiga sistem utama berdasarkan jenis koneksinya. Pertama sistem *on-grid*, yaitu sistem yang terhubung langsung dengan jaringan listrik PLN. Pada sistem ini inverter berperan penting dalam mengubah arus searah (DC) yang dihasilkan panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) yang sesuai dengan standar jaringan listrik. Kedua sistem *off-grid*, yaitu sistem yang berdiri sendiri dan tidak terhubung ke jaringan listrik. Energi listrik yang dihasilkan disimpan dalam baterai dan dapat digunakan saat malam hari atau ketika produksi energi matahari tidak mencukupi. Terakhir sistem *hybrid*, yaitu sistem yang mengombinasikan PLTS dengan sumber energi lain seperti genset atau jaringan PLN sehingga mampu meningkatkan

keandalan suplai energi terutama pada kondisi cuaca tidak mendukung (Sudarmono, 2020).

PLTS XYZ merupakan pembangkit listrik tenaga surya dengan kapasitas terpasang 189 kWp yang dioperasikan menggunakan sistem *on-grid*. Pembangkit ini dibangun melalui kerja sama antar anak perusahaan BUMN sebagai bagian dari dukungan terhadap program energi terbarukan dan target *Net Zero Emission* 2060. Dalam operasionalnya, kinerja inverter menjadi faktor krusial karena berperan dalam mengubah arus listrik DC dari panel surya menjadi arus AC yang sesuai dengan standar jaringan PLN. Apabila inverter mengalami gangguan atau kerusakan, maka proses konversi energi dapat terhenti sehingga berdampak langsung pada penurunan nilai *Performance Ratio (PR)* PLTS XYZ. Dampak kerusakan inverter terhadap penurunan kinerja PLTS XYZ dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Tabel 1. 1 Dampak Kerusakan Inverter pada PLTS XYZ

<i>Statistical Period</i>	<i>Performance Ratio(%)</i>	Kerusakan	Frekuensi
2025-04-20	63.70	<i>Low Insulation Resistance</i>	1
		<i>Abnormal Residual</i>	
		<i>Current</i>	1
2025-04-21	47.53	<i>Low Insulation Resistance</i>	1
2025-04-22	54.25	<i>Low Insulation Resistance</i>	1
2025-04-23	59.48	<i>Grid Loss</i>	4
		<i>High String Voltage</i>	8
		<i>Low Insulation Resistance</i>	1
2025-04-24	72.92	-	0
2025-04-25	74.47	-	0
2025-04-26	73.28	-	0
2025-04-27	72.75	-	0
2025-04-28	74.86	-	0
2025-04-29	75.90	-	0
2025-04-30	75.64	-	0

Berdasarkan data pada Tabel 1.1, dapat dilihat bahwa terdapat korelasi yang jelas antara terjadinya kerusakan dan penurunan nilai *Performance Ratio (PR)* pada sistem PLTS XYZ. Setiap kali terjadi kerusakan pada periode tertentu, nilai *PR* cenderung mengalami penurunan yang cukup signifikan. Selain itu kerusakan yang terjadi terdiri dari berbagai jenis, yang dimana setiap jenis kerusakan menghasilkan durasi *downtime* atau waktu henti produksi yang berbeda-beda. Oleh karena itu

diperlukan suatu pendekatan sistematis dalam menentukan strategi perawatan yang tepat untuk meningkatkan keandalan pada inverter.

Pada penelitian ini metode *RCM* dipilih sebagai pendekatan utama karena *RCM* merupakan proses analisis yang digunakan untuk menentukan tindakan yang seharusnya dilakukan dalam menjamin suatu sistem agar dapat berjalan dengan baik dan sesuai fungsi yang diinginkan (Pramudya et al., 2021). Melalui penerapan metode ini, penelitian ini bertujuan untuk merumuskan strategi pemeliharaan yang tepat sasaran pada inverter PLTS XYZ untuk meminimalkan *downtime* dan mengurangi kemungkinan terjadinya kegagalan sistem. Dengan menganalisis pola kerusakan dan frekuensi gangguan berdasarkan data historis, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan rekomendasi pemeliharaan yang terukur dan berbasis data yang dapat diterapkan secara langsung untuk meningkatkan efisiensi operasional sistem PLTS XYZ.

Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) dipilih karena mampu mengidentifikasi fungsi kritis peralatan, potensi mode kegagalan, serta konsekuensinya terhadap keandalan sistem secara menyeluruh. Pendekatan ini menjadikan kegiatan pemeliharaan tidak hanya bersifat reaktif, tetapi lebih berorientasi pada pencegahan dan pengendalian risiko kegagalan yang signifikan terhadap kinerja, keselamatan, dan ketersediaan sistem. Jika dibandingkan dengan *Life Cycle Cost Analysis (LCCA)*, metode tersebut berfokus pada perhitungan biaya sepanjang siklus hidup aset, namun tidak memberikan kerangka analisis teknis terhadap penyebab dan mekanisme kegagalan. Dengan demikian, *LCCA* kurang tepat bila tujuan penelitian adalah menyusun strategi pemeliharaan yang berbasis keandalan. Sementara itu, *Condition-Based Maintenance (CBM)* hanya memantau kondisi aktual peralatan melalui sensor atau inspeksi untuk menentukan kapan pemeliharaan perlu dilakukan. Secara ilmiah, pendekatan ini bermanfaat untuk mengurangi perawatan yang tidak perlu, tetapi tidak sepenuhnya mencegah kegagalan karena aksi perawatan baru dilakukan setelah degradasi terdeteksi.

Adapun *RCM II* merupakan bentuk pengembangan *RCM I* yang menawarkan perspektif lebih luas. Namun karakteristik tersebut menjadikan *RCM II* lebih relevan untuk konteks manajemen aset pada skala yang membutuhkan integrasi kebijakan lintas fungsi. Sementara itu penelitian ini berfokus pada strategi perawatan untuk menjaga keandalan teknis dan menekan *downtime* pada sistem

PLTS. Oleh karena itu *RCMI* dipandang lebih sesuai karena langsung mengarahkan analisis pada fungsi peralatan, mode kegagalan, serta konsekuensi ekonomis dan keselamatan yang relevan dengan tujuan penelitian.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan apa yang telah diuraikan di latar belakang, maka penelitian ini akan fokus terhadap perumusan masalah sebagai berikut:

1. Kerusakan manakah yang termasuk kategori kritis pada inverter?
2. Bagaimana tindakan perawatan yang tepat pada kerusakan kritis agar inverter berjalan dengan optimal?
3. Berapa estimasi waktu perawatan pencegahan yang disarankan agar inverter dapat bekerja dengan optimal?

1.3 Tujuan Penelitian

Untuk menjawab apa yang telah menjadi fokus pada rumusan masalah, maka tujuan penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengetahui kerusakan apa saja yang tergolong kritis pada inverter.
2. Menentukan tindakan perawatan komponen kritis yang tepat agar inverter berjalan secara optimal.
3. Memberikan usulan waktu perawatan pencegahan pada komponen kritis.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah.

1. Bagi peneliti yaitu menjadi sarana untuk menerapkan keilmuan Teknik Industri dalam studi kasus nyata di lingkungan kerja.
2. Bagi perusahaan yaitu dapat memberikan referensi dalam meningkatkan sistem manajemen perawatan untuk meminimalisir terjadinya *downtime*.
3. Bagi peneliti selanjutnya dapat menjadi referensi dalam menyusun penelitian sejenis terkait manajemen perawatan.

1.5 Batasan Penelitian

Agar penelitian ini memiliki arah, mudah dipahami dan topik bahasan tidak melebar dan meluas, maka perlu melakukan batasan ruang lingkup penelitian sebagai berikut.

1. Penelitian ini dilakukan pada PLTS XYZ 189 kWp dengan *device* Inverter.
2. Data yang digunakan dalam penelitian dibatasi pada rentang bulan April – Mei 2025.

3. Penelitian ini difokuskan hanya pada komponen yang dikategorikan paling kritis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Literatur

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh shin et al. (2022) menggunakan metode *RCM* berdasarkan analisis ekonomi terhadap fasilitas *Photovoltaics*. Penjadwalan pemeliharaan berbasis keandalan pada fasilitas integrasi *photovoltaics* diperlukan untuk menjaga keandalan sistem distribusi dan memastikan kelayakan ekonomi. Fasilitas yang menyebabkan pemadaman listrik pada sistem fotovoltaik dan beban (konsumen) memiliki pengaruh yang relatif kecil terhadap waktu kegagalan. Hal ini disebabkan karena dampak pemadaman listrik pada beban lebih dominan. Sebaliknya fasilitas yang hanya menyebabkan pemadaman pada sistem fotovoltaik sangat dipengaruhi oleh waktu pembangkitan listrik. Sementara itu komponen yang hanya berdampak pada sistem fotovoltaik seperti *IGBT* yang aktif saat pembangkitan berlangsung dinilai lebih efisien jika diganti secara korektif dibandingkan preventif.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Wibowo et al. (2021) memiliki permasalahan berupa mesin bubut memiliki beberapa komponen yang sering mengalami *breakdown* sehingga mengakibatkan *downtime*. Penelitian ini menggunakan metode *rcm* yang bertujuan untuk mengetahui tindakan perawatan yang optimal untuk komponen kritis dan memberikan usulan perawatan. Berdasarkan penelitian ini dapat diketahui bahwa komponen yang memiliki *risk priority number (RPN)* terbesar yaitu *bearing 360*, *stator 288* dan *rotor 288*. Hasil pemilihan tindakan perawatan *RCM* terdapat 5 komponen dengan perawatan *CD* yaitu kipas pendingin, motor *housing*, *bearing*, *main shaft* dan *drive pulley*, terdapat 2 komponen dengan perawatan *FF* yaitu *stator* dan *rotor* dan terdapat 1 komponen dengan tindakan perawatan *TD* yaitu *brush*.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Mahendra et al. (2024) memiliki permasalahan berupa kerusakan tak terduga pada *prime mover truck* tipe *550 horse power* yang menyebabkan bertambahnya durasi *downtime*. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan perbaikan dan pengembangan terhadap sistem perawatan dengan menentukan komponen kritis, nilai keandalan, interval perawatan, dan penyediaan suku cadang menggunakan metode *RCM*. Berdasarkan penelitian ini didapatkan bahwa 5 komponen kritis yakni *air piping and hose*, *fast fuel filler*, komponen *radiator*, *radiator hose*, dan *wheel stud and nut*. Interval perawatan dilakukan ketika nilai keandalan mendekati 0,6

di mana komponen *air piping and hose* mencapai 1750 jam operasi atau setiap 97 hari, komponen *fast fuel filler* pada 1250 jam operasi atau setiap 69 hari, komponen *radiator and reservoir tank* pada 2250 jam operasi atau setiap 125 hari, komponen *radiator hose and line* pada 2750 jam operasi atau setiap 152 hari, dan komponen *wheel stud and nut* pada 3000 jam operasi atau setiap 166 hari.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Marimin et al. (2022) memiliki permasalahan berupa Metode pemeliharaan korektif belum mampu menjamin kelancaran proses produksi. Peneliti menggunakan metode RCM untuk merencanakan kegiatan pemeliharaan preventif guna meningkatkan keandalan mesin. Berdasarkan penelitian ini dapat dilihat bahwa stasiun produksi kelapa sawit yang memiliki *downtime* tertinggi adalah stasiun *boiler* dengan persentase 22,25%. Mesin dengan tingkat kerusakan tertinggi di stasiun *boiler* adalah *fuel conveyor 2* dengan persentase kerusakan sebesar 35,10%. Komponen utama yang menjadi penyebab kerusakan adalah *electromotor*, *chain coupling*, dan *gearbox*. Berdasarkan hasil simulasi, waktu optimal untuk melakukan *preventive maintenance* adalah pada waktu ke-158 untuk *electromotor*, ke-190 untuk *chain coupling*, dan ke-67 untuk *gearbox*. Setelah pemeliharaan dilakukan, nilai keandalan masing-masing komponen mengalami peningkatan, yaitu sebesar 12% pada *electromotor*, 32% pada *chain coupling*, dan 8% pada *gearbox*. Pemeriksaan rutin bulanan disarankan dilakukan minimal 4 kali untuk *electromotor*, 3 kali untuk *chain coupling*, dan 10 kali untuk *gearbox*.

Pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Burhannudin et al. (2022) memiliki permasalahan berupa tingginya *downtime* pada komponen-komponen *Excavator* sehingga mengakibatkan *downtime* dan mengganggu proses produksi. Penelitian ini mengatasi permasalahan dengan melakukan rekomendasi perawatan menggunakan metode RCM. Hasil dari penelitian ini adalah ditemukan sebanyak 16 komponen kritis pada sistem antara lain *fuel pre filter cartridge*, *fuel main filter cartridge*, *pilot filter element*, *drain filter cartridge*, *teeth bucket*, *hydraulic oil filter element*, *breather element* pada tangki hidrolik, *corrosion resistor cartridge*, *starting motor*, berbagai selang hidrolik (*boom*, *arm*, *bucket*), *water pump*, *accumulator*, serta selang bahan bakar. Berdasarkan perhitungan diperoleh rekomendasi interval penggantian komponen yang optimal untuk setiap item tersebut. Penerapan jadwal penggantian ini diperkirakan

mampu mengurangi downtime serta menghasilkan efisiensi biaya pemeliharaan hingga Rp 20.629.592 per tahun atau setara dengan penghematan sebesar 23%.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Putri (2024) memiliki permasalahan berupa perusahaan belum menerapkan strategi perawatan pencegahan (*preventive maintenance*) dalam pengelolaan lampu lalu lintas tenaga surya (APILL). Penelitian ini bertujuan untuk memberikan rekomendasi perbaikan keputusan dalam kegiatan pemeliharaan atau penggantian komponen guna mencapai tingkat keandalan sebesar 80% dengan menggunakan pendekatan *Reliability Centered Maintenance (RCM)*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa baterai merupakan komponen paling. Rekomendasi interval pemeriksaan untuk masing-masing lokasi meliputi: baterai di SP4 Melia Purosani diperiksa setiap 240 jam atau 8 hari, di SP3 BO Plaza setiap 305 jam atau 12 hari, di SP4 Gramedia setiap 434 jam atau 18 hari, di SP4 Tugu setiap 338 jam atau 14 hari, di SP4 Jati Kencana setiap 270 jam atau 11 hari, dan di SP4 Gardu Garuda setiap 305 jam atau 12 hari.

Pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Villanueva et al. (2023) memiliki permasalahan berupa keandalan merupakan isu yang sangat penting dalam elektronik daya tetapi terkadang hal seperti ini belum diperhatikan, dikaji atau dianalisis. Dalam kasus inverter dalam sistem *photovoltaic* keselamatan pengguna, kualitas, keandalan, dan masa pakai sistem harus dijamin. Pada penelitian ini menggunakan metode *RCM* dengan menghitung matirks seperti laju kegagalan dan Waktu Rata-rata Antar Kegagalan. Berdasarkan hasil penelitian ini dapat diketahui bahwa sistem dengan struktur redundan paralel pasif lebih andal dan memiliki masa pakai yang lebih tinggi dibandingkan dengan struktur lainnya.

Pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Enjavimada et al. (2022) memiliki permasalahan berupa perkembangan yang pesat dalam jaringan distribusi listrik, para pengelola sistem harus mampu menangani biaya jaringan secara efektif. Penelitian ini menggunakan metode *RCM* untuk mengatasi permasalahan tersebut secara praktis. Diawali dengan metode multikriteria *gray relative analysis* untuk memprioritaskan mode kegagalan dan memperoleh faktor risiko dari masing-masing mode kegagalan dalam jaringan. Selanjutnya dilakukan optimasi berdasarkan energi yang tidak tersuplai dari saluran distribusi listrik, biaya pemeliharaan, biaya gangguan, biaya keselamatan, dan faktor risiko dari mode kegagalan. Berdasarkan hasil dari penelitian ini adalah total biaya

pemeliharaan dapat dikurangi setidaknya sebesar 7% dibandingkan dengan strategi bisnis apabila metode yang diusulkan diterapkan.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Yang dan Zhang (2020) memiliki objek berupa *Continuous Emission Monitoring System (CEMS)*. Penelitian ini menyatakan bahwa faktor penting dalam pengambilan keputusan operasional industri saat ini meliputi keandalan, keselamatan, dan kondisi lingkungan. Oleh karena itu optimasi pemeliharaan preventif menjadi peluang sekaligus tantangan bagi seluruh pihak terkait. Penelitian ini menggunakan metode *RCM* untuk mengidentifikasi jenis pemeliharaan yang tepat serta menentukan siklus interval pemeliharaan yang optimal. Hasil dari penelitian ini dinyatakan lebih ilmiah dan andal dibandingkan sebelumnya yang hanya berdasarkan panduan pabrikan dan pengalaman tanpa mempertimbangkan konsekuensi kegagalan dari operasi peralatan secara nyata.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Aji dan Puspasari (2023) memiliki objek berupa *Communications-Based Train Control (CBTC)* yang merupakan sistem persinyalan berbasis komunikasi dua arah yang menggunakan gelombang radio antara perangkat *Wayside* dan *Onboard*. penelitian ini memiliki permasalahan berupa sistem *CBTB* membutuhkan pemeliharaan yang kuat terhadap berbagai komponen untuk mencegah kegagalan. Penelitian ini menggunakan metode *RCM* untuk mengetahui tingkat keparahan kegagalan dan jenis pemeliharaan yang tepat. Metode *FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)* dan *FTA (Fault Tree Analysis)* juga digunakan dalam proses evaluasi. Berdasarkan hasil penelitian ini ditemukan bahwa *Remote Input Output (RIO)* adalah komponen yang paling rentan mengalami kegagalan. Selain itu *mainline* dan arahan yang berbeda dari pusat kendali juga berdampak signifikan yang menyebabkan keterlambatan perjalanan. Penelitian ini menghasilkan sebuah SOP untuk menangani kegagalan *mainline* saat jam operasional.

Penelitian terdahulu dilakukan oleh Dessalegn (2021) memiliki permasalahan berupa Perubahan dimensi dan kualitas merupakan permasalahan utama dalam produksi material *PVC* menggunakan proses injeksi molding. Peneliti menggunakan metode diagram pareto dan *FMEA* untuk mengidentifikasi akar penyebab dari produk cacat serta menghasilkan solusi untuk mengurangi persentase cacat. Berdasarkan penelitian ini disimpulkan bahwa cacat *underweight* dan *overflow* dianggap sebagai cacat utama selama proses berlangsung. Cacat ini disebabkan oleh suhu leleh, laju injeksi, dan

tekanan injeksi. Solusi pengaturan mesin yang tepat serta pengendalian parameter proses pada nilai yang telah ditentukan dapat secara signifikan mengurangi jumlah cacat yang terjadi.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Irfanto (2022) merupakan penelitian yang menggunakan metode diagram pareto untuk mengukur kualitas dalam manajemen proyek dengan teknik statistik yang digunakan untuk pengambilan keputusan berdasarkan frekuensi kejadian dibandingkan dengan penyebabnya. Penelitian ini memiliki permasalahan berupa proyek konstruksi memiliki manajemen yang bersifat unik yang seringkali menyulitkan dalam menjaga kualitas pekerjaan. Berdasarkan hasil dari penelitian ini dapat diketahui bahwa jenis kesalahan dominan pada pekerjaan pengecoran yaitu retak dan permukaan yang tidak rata. Kedua masalah ini dapat diatasi dengan metode *chipping*, dan jika diperlukan dilanjutkan dengan metode *grouting*.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Dzulyadain (2021) memiliki permasalahan berupa sering terjadinya kerusakan pada salah satu mesin produksi komponen tersebut yaitu mesin *Press*. Penelitian ini menggunakan *FMECA* untuk menunjukan subsistem yang paling kritis dan didapatkan hasil berupa subsistem *brake* merupakan komponen yang paling kritis. Selanjutnya menggunakan metode *RCM* untuk menentukan kebijakan pemeliharaan. Berdasarkan penelitian ini didapatkan hasil berupa penurunan total biaya pemeliharaan subsistem *brake* hingga 25% dibandingkan dengan biaya pemeliharaan sebelumnya.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Liu (2024) memiliki permasalahan berupa tingginya tingkat kegagalan pada peralatan mekanik yang memiliki struktur kompleks tetapi dalam praktiknya upaya perawatan dilakukan secara tidak terorganisir, tidak praktis, dan tidak berdasarkan pendekatan ilmiah, sehingga menyebabkan waktu henti (*downtime*) yang lama dan kerugian biaya yang besar. Penelitian ini menggunakan metode *RCM* untuk mengidentifikasi bagian-bagian kunci yang perlu mendapat prioritas pemeliharaan. Selain itu penelitian ini juga menyusun rencana pemeliharaan yang lebih masuk akal, dengan tujuan menurunkan biaya pemeliharaan dan meningkatkan kinerja ekonomi. Berdasarkan penelitian ini dapat diketahui bahwa dua komponen yang menggunakan strategi pemeliharaan berdasarkan model maksimalisasi *availability* menunjukkan tingkat ketersediaan di atas 0,99 sedangkan empat komponen lainnya yang

menggunakan model minimalisasi biaya menunjukkan total biaya per satuan waktu di bawah 5,69.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Da Silva (2023) merupakan mengusulkan penggabungan metode *RCM* dan *RBM*, menurut peneliti perencanaan pemeliharaan yang tepat sangat penting dalam manajemen pemeliharaan karena berkontribusi pada peningkatan ketersediaan aset, pemenuhan persyaratan kualitas, serta pengendalian risiko keselamatan dan lingkungan yang terkait dengan aset fisik. Objek pada penelitian ini merupakan pembangkit listrik tenaga air dengan menggunakan metode *Reliability and Risk Centered Maintenance (RRCM)*, memungkinkan organisasi untuk menyusun rencana pemeliharaan yang tidak hanya menjamin keandalan aset fisik, tetapi juga mempertimbangkan dan memprioritaskan risiko dari potensi kegagalan fungsi. Berdasarkan hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa *RRCM* mampu membantu pengembangan dan implementasi rencana pemeliharaan yang terarah pada aspek keandalan, risiko, dan biaya.

Penulis	Objek			Metode		
	Manufaktur	Electronic	Konstruksi	FMEA	LTA	RCM
(Shin et al., 2022)		✓				✓
(Wibowo et al., 2021)	✓			✓	✓	
(Mahendra & Zainuri, 2024)	✓					✓
(Marimin & Zulna, 2022)	✓			✓	✓	✓
(Burhannudin & Anshori, 2022)	✓			✓	✓	✓
(Clea Putri, n.d.)		✓		✓		✓

Penulis	Objek			Metode		
	Manufaktur	<i>Electronic</i>	Konstruksi	<i>FMEA</i>	<i>LTA</i>	<i>RCM</i>
(Villanueva et al., 2023)		✓				✓
(Enjavimadar & Rastegar, 2022)		✓				✓
(Yang et al., 2020)		✓		✓	✓	✓
(Bayu Aji & Arlini Puspasari, 2023)		✓		✓		✓
(Dessalegn et al., 2021)			✓	✓		
(Irfanto, 2022)			✓			
(Dzulyadain et al., 2021)	✓			✓		✓
(Liu et al., 2024)						✓
(da Silva et al., 2023)		✓		✓		✓

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Perawatan

Perawatan adalah sebuah upaya yang dilakukan untuk memastikan kinerja peralatan atau mesin tetap optimal dan dapat beroperasi dengan baik (Rudiana et al., 2024). Sedangkan menurut pendapat lain perawatan merupakan upaya untuk menjaga atau mengembalikan performa sistem agar tetap beroperasi secara optimal dan terhindar dari potensi kegagalan (Ramadhan & Fitriani, 2025). Sedangkan menurut Prastiawan et al.

(2021) perawatan merupakan upaya untuk menghilangkan penyebab terjadinya kerusakan atau gangguan (*breakdown*) pada sistem atau peralatan.

Adapun Perawatan memiliki tujuan menurut Azhari et al. (2024) diantaranya:

- a. Berkontribusi dalam meningkatkan performa mesin agar mampu memenuhi kebutuhan sesuai dengan fungsi yang diharapkan.
- b. Melaksanakan kegiatan perawatan secara optimal dan hemat biaya untuk mencapai efisiensi maksimal dalam pengeluaran perawatan.
- c. Menjaga standar kualitas produk yang dibutuhkan serta memastikan proses produksi berjalan lancar tanpa hambatan.

Adapun Jenis-jenis Perawatan menurut ahli sebagai berikut

- a. Perawatan pencegahan (*Preventive Maintenance*)

Pemeliharaan pencegahan (*Preventive Maintenance*) merupakan aktivitas perawatan yang dilakukan untuk mencegah terjadinya kerusakan yang tidak terduga serta mengidentifikasi kondisi dimana fasilitas produksi mengalami gangguan saat sedang digunakan (Rudiana et al., 2024).

Pelaksanaan kegiatan *Preventive Maintenance* terbagi menjadi dua jenis:

1. Pemeliharaan Rutin (*Routine Maintenance*) adalah aktivitas pemeliharaan yang dilakukan setiap hari secara teratur.
 2. Pemeliharaan Berkala (*Periodic Maintenance*) merupakan kegiatan perawatan dan pemeliharaan yang dilakukan dalam interval waktu tertentu atau secara periodik.
- b. Perawatan setelah kerusakan (*Corrective* atau *Breakdown Maintenance*) adalah tindakan yang dilakukan ketika mesin atau peralatan mengalami kerusakan dan tidak lagi dapat beroperasi dengan semestinya (Rudiana et al., 2024).
 - c. Perawatan Prediksi (*Predictive Maintenance*) adalah perawatan yang memungkinkan mengidentifikasi kondisi-kondisi yang membutuhkan koreksi sebelum berkembang menjadi masalah besar (Prastiawan et al., 2021).

2.2.2 *Reliability Centered Maintenance*

Berikut ini merupakan pengertian metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) menurut para ahli:

- a. *Reliability Centered Maintenance* merupakan suatu metode yang digunakan untuk menentukan, merancang, atau mengembangkan alternatif perawatan berdasarkan kriteria operasional, efisiensi ekonomi, dan aspek keselamatan (Setiawan & Aritonang, 2013).
- b. *Reliability Centered Maintenance (RCM)* adalah pendekatan pemeliharaan yang memanfaatkan data keandalan fasilitas untuk menentukan metode perawatan yang paling optimal dan mudah diterapkan (Mahendra & Zainuri, 2024).
- c. *Reliability Centered Maintenance (RCM)* merupakan metode untuk mengurangi risiko kerusakan mesin yang terjadi secara mendadak, memfokuskan perawatan pada komponen-komponen yang paling krusial, serta meningkatkan keandalan peralatan dan komponennya (Putri, 2023).

Menurut Burhannudin & Anshori (2022) untuk merealisasikan RCM dibutuhkan langkah urut sebagai Berikut:

1. Langkah ini dilakukan untuk mengetahui komponen mana yang akan terganggu atau tidak berfungsi apabila terjadi kerusakan pada komponen utama.
2. Batasan sistem adalah penetapan ruang lingkup sistem yang telah ditentukan untuk mengidentifikasi bagian-bagian mana yang termasuk atau tidak termasuk dalam area yang akan dianalisis.

2.2.3 *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*

FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) adalah metode sistematis yang digunakan untuk mengenali dan mencegah potensi masalah pada produk maupun proses sebelum masalah tersebut muncul. Metode ini berfokus pada pencegahan cacat, peningkatan aspek keselamatan, serta peningkatan kepuasan pelanggan (Wibowo et al., 2021). *FMEA* bertujuan untuk mengidentifikasi berbagai bentuk kegagalan yang dapat memicu terjadinya fungsi yang tidak berjalan sebagaimana mestinya serta menganalisis dampak dari setiap jenis kegagalan. Untuk mengetahui penyebab utama dari kegagalan yang terjadi pada setiap komponen. Analisis *FMEA* dilakukan melalui sejumlah tahapan tertentu diantaranya:

- a. Identifikasi Kegagalan
- b. Identifikasi Fungsi Kegagalan
- c. Identifikasi Penyebab Kegagalan
- d. Identifikasi Efek dari kegagalan
- e. Perhitungan *Severity*

Severity merupakan tingkat keparahan dampak yang ditimbulkan oleh suatu mode kegagalan terhadap kinerja keseluruhan mesin. Skala penilaiannya berkisar antara 1 hingga 10 yang dimana nilai 10 menunjukkan bahwa kegagalan tersebut memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap sistem. Kategori *Severity FMEA* dapat dilihat pada Tabel 2. 1.

Tabel 2. 1 Kategori *Severity FMEA*

Nilai <i>Severity</i>	Kategori	<i>Downtime</i> (menit)
10	Sangat Kritis	> 1000 menit
9	Kritis	901 – 1000 menit
8	Sangat Berat	801 – 900 menit
7	Berat	701 – 800 menit
6	Cukup Berat	601 – 700 menit
5	Sedang	501 – 600 menit
4	Ringan	301 – 500 menit
3	Sangat Ringan	100 – 300 menit
2	Hampir Tidak Terasa	1 – 100 menit
1	Tidak Ada Dampak	0 menit (belum pernah)

- f. Perhitungan *Occurrence*

Occurrence adalah frekuensi atau seberapa sering suatu kerusakan atau kegagalan terjadi. Nilai ini berkaitan dengan perkiraan jumlah total kegagalan yang disebabkan oleh faktor tertentu pada mesin. Skala penilaiannya berada dalam rentang 1 hingga 10. Kategori *Occurrence FMEA* ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Kategori *Occurrence FMEA*

Nilai <i>Occurance</i>	Kategori	Frekuensi Terjadi
10	Sangat Sering	>1 x per minggu

Nilai Occurance	Kategori	Frekuensi Terjadi
9	Sering	1 x per minggu
8	Cukup Sering	3 x per bulan
7	Sering Kadang	2 x per bulan
6	Kadang-kadang	1x per bulan
5	Jarang	1 x per 3 bulan
4	Sangat Jarang	1 x per 6 bulan
3	Tidak Mungkin	1 x per tahun
2	Hampir Tidak Mungkin	Sekali dalam umur sistem
1	Mustahil	Belum pernah terjadi

g. Perhitungan *Detection*

Detection mengacu pada kemampuan sistem kontrol yang ada saat ini dalam mendeteksi penyebab atau jenis kegagalan. Penilaian *detection* menggunakan skala dari 1 hingga 10, di mana nilai 10 menunjukkan bahwa kegagalan sangat sulit untuk terdeteksi. Kategori *Detection FMEA* ditunjukkan pada Tabel 2. 3.

Tabel 2. 3 Kategori *Detection FMEA*

Nilai Detection	Kategori	Parameter
10	Tidak Terdeteksi	Mustahil
9	Sulit Terdeteksi	Sangat Sulit
8	Mendeteksi Acak (Tidak Mungkin)	Sangat Terlambat
7	Mendeteksi Acak (Tidak Mungkin)	Tidak Yakin
6	Deteksi yang mungkin	Sesekali
5	Deteksi yang mungkin	Rendah
4	Deteksi yang andal	Terlambat
3	Deteksi yang andal	Mudah
2	Deteksi setiap saat	Segera
1	Deteksi setiap saat	Tindakan Korektif Segera

h. Perhitungan *Risk Priority Number (RPN)*

Risk Priority Number (RPN) merupakan indikator relatif untuk mengukur tingkat risiko. Nilai *RPN* dihitung dengan mengalikan tiga faktor penilaian, yaitu *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*.

$$RPN = Severity \times Occurrence \times Detection$$

2.2.4 *Logic Tree Analysis (LTA)*

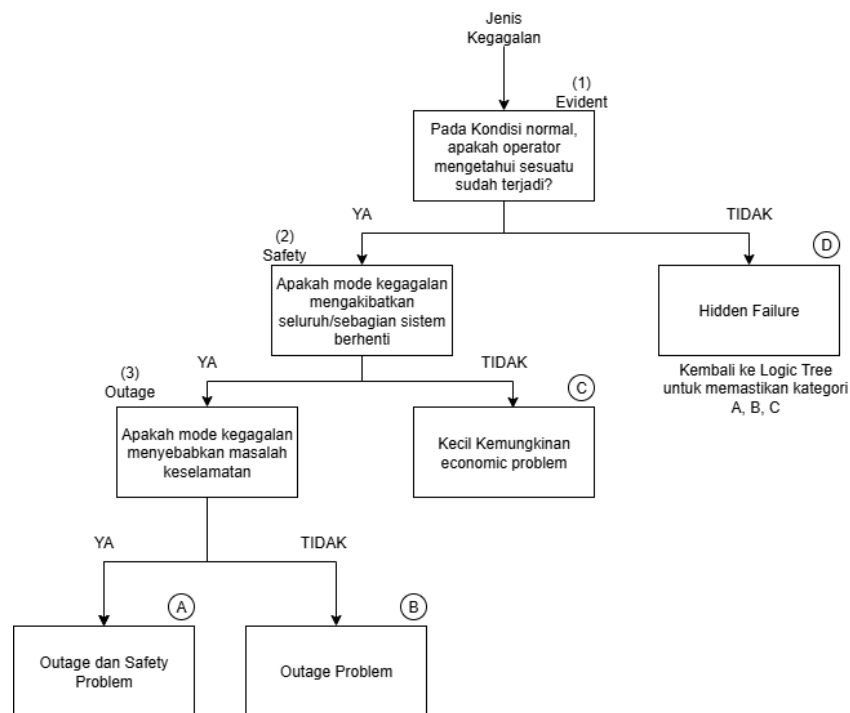
Penyusunan *Logic Tree Analysis (LTA)* bertujuan untuk menetapkan prioritas pada setiap mode kerusakan serta meninjau fungsi dan kegagalan fungsi sehingga status setiap mode kerusakan dapat dibedakan. Dalam analisis kekritisian, terdapat empat aspek utama yang perlu diperhatikan:

1. *Evident*, apakah operator dapat mendeteksi adanya gangguan dalam sistem saat kondisi normal?
2. *Safety*, apakah mode kerusakan ini berpotensi menimbulkan risiko keselamatan?
3. *Outage*, apakah kerusakan ini menyebabkan penghentian total atau sebagian dari operasional mesin?
4. *Category*, klasifikasi yang ditentukan berdasarkan jawaban dari pertanyaan-pertanyaan sebelumnya.

Berikut ini merupakan klasifikasi dari category yang dibagi menjadi 4 yaitu:

- a. Kategori A (Masalah keselamatan), apabila kerusakan komponen berdampak pada keselamatan pekerja.
- b. Kategori B (Masalah penghentian operasi), apabila kerusakan menyebabkan sebagian atau seluruh mesin berhenti.
- c. Kategori C (Masalah ekonomi), apabila kerusakan berdampak pada kerugian finansial perusahaan.
- d. Kategori D (Kegagalan tersembunyi), apabila kerusakan terjadi tanpa disadari oleh operator dalam kondisi normal.

Ilustrasi mengenai *Logic Tree Analysis* dapat dilihat pada Gambar 2. 1.



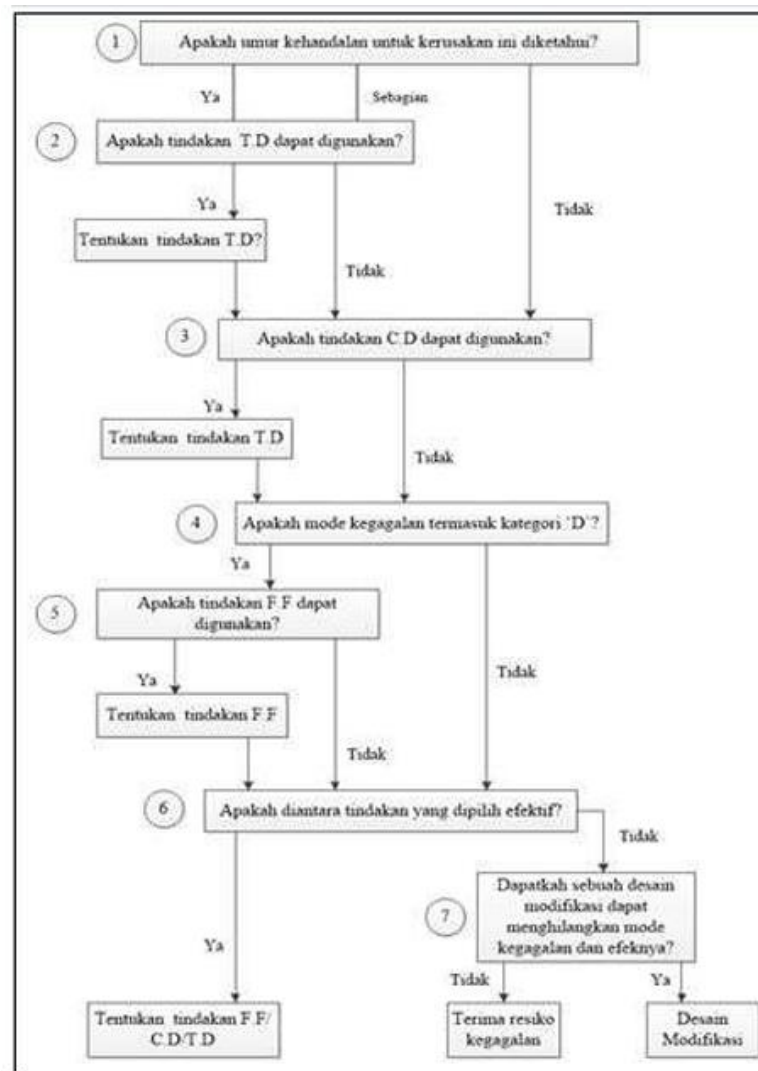
Gambar 2. 1 Contoh *Logic Tree Analysis*

2.2.5 Task Selection (TS)

Task Selection merupakan Langkah-langkah yang didasarkan pada kebijakan yang berpotensi efektif saat diimplementasikan dan mampu menjalankan fungsi secara efisien untuk setiap jenis kegagalan. Pemilihan tindakan merupakan tahap terakhir dalam proses *RCM*. Proses ini akan menentukan tindakan yang tepat untuk mode kerusakan tertentu. Tindakan perawatan dapat dibagi menjadi tiga kategori:

1. *Time Directed (TD)* atau waktu terarah merupakan tindakan pencegahan khusus terhadap penyebab kerusakan atau kegagalan yang dilakukan berdasarkan usia pakai atau jangka waktu penggunaan komponen.
2. *Condition Directed (CD)* atau kondisi terarah merupakan tindakan perawatan yang bertujuan mendeteksi kerusakan melalui pemeriksaan menggunakan pancaindra.
3. *Failure Finding (FF)* atau penentuan kegagalan merupakan kegiatan perawatan yang dilakukan untuk mengidentifikasi kerusakan tersembunyi (*hidden failure*) melalui proses investigasi yang terstruktur dan sistematis.

Ilustrasi mengenai *Task Selection* ditunjukkan pada Gambar 2. 2.

Gambar 2. 2 Contoh *Task Selection*

2.2.6 Distribusi

Menurut Ebeling (1999) distribusi data kerusakan memberikan informasi dasar mengenai umur pakai suatu peralatan dalam sebuah populasi. Beberapa distribusi yang umum digunakan meliputi distribusi eksponensial, normal, lognormal, dan Weibull. Informasi ini penting untuk membantu dalam penentuan interval waktu perawatan yang optimal. Adapun distribusi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Distribusi Eksponensial

Distribusi eksponensial termasuk salah satu distribusi yang umum digunakan dalam analisis keandalan. Distribusi ini memiliki karakteristik utama berupa tingkat kerusakan yang tetap dan muncul secara acak. Berdasarkan penjelasan dari Ebeling (1999) distribusi ini tergolong mudah untuk dianalisis dalam konteks keandalan,

dengan parameter utama λ yang merepresentasikan rata-rata frekuensi terjadinya kerusakan. Dengan syarat bahwa $\lambda(t) = \lambda \geq 0$ dan $\lambda > 0$, maka fungsi eksponensial yang diperoleh dapat dinyatakan dalam bentuk sebagai berikut:

- a. Fungsi Kepadatan Probabilitas (*Probability Density Function*)

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.1)$$

- b. Fungsi Keandalan (*Reliability Function*)

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

- c. Fungsi Distribusi Kumulatif (*Cummulative Distribution Function*)

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

- d. Fungsi Laju Kerusakan (*Hazard Rate Fuction*)

$$\lambda(t) = \lambda = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.4)$$

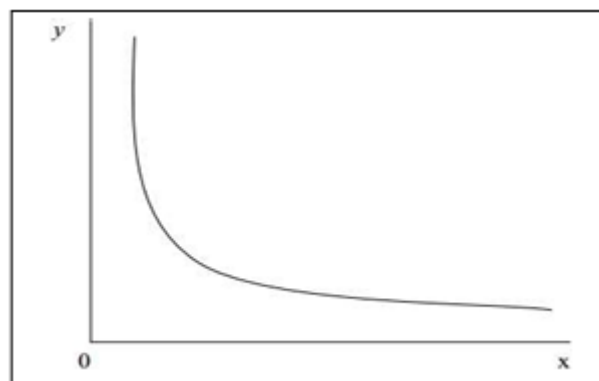
Dimana $t > 0$ dan $\lambda > 0$

Dengan:

e = bilangan euler

λ = tingkat kegagalan perjam atau siklus

Grafik distribusi eksponensial ditampilkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Distribusi Eksponensial

2. Distribusi Normal

Distribusi Normal yang juga dikenal sebagai Distribusi Gauss, merupakan salah satu distribusi probabilitas yang umum diterapkan dalam berbagai analisis statistik. Selain itu distribusi ini juga cocok digunakan untuk menggambarkan fenomena

seperti kelelahan (*fatigue*) dan keausan (*wear out*) pada komponen. Distribusi ini memiliki dua parameter utama yaitu rata-rata dan variansi.

a. Fungsi Keandalan Probabilitas (*Probability Density Function*)

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[\frac{-(t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \text{ untuk } -\infty < t < \infty \quad (2.5)$$

b. Fungsi keandalan (*Reliability Function*)

$$R(t) = 1 - \Phi \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right) \quad (2.6)$$

c. Fungsi Distribusi Kumulatif (*Cummulative Distribution Function*)

$$F(t) = \Phi \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right) \quad (2.7)$$

d. Fungsi Laju Kerusakan (*Hazard Rate Function*)

$$\lambda = \frac{f(t)}{1 - \Phi \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right)} \quad (2.8)$$

Dimana $\mu > 0, \sigma > 0$, dan $t > 0$

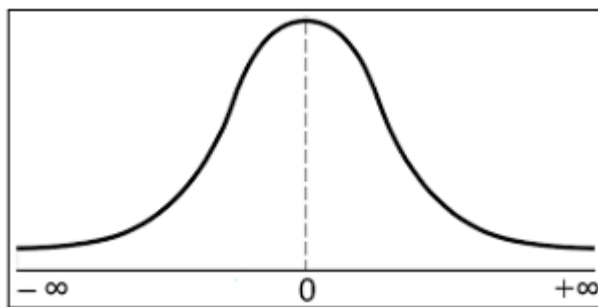
Keterangan:

μ = Rata-rata

σ = Variasi

Φ = Fungsi Densitas Probabilitas

Contoh grafik distribusi normal ditampilkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Distribusi Normal

3. Distribusi Lognormal

Distribusi lognormal ditentukan oleh dua parameter yaitu s sebagai parameter bentuk dan t_{med} sebagai parameter lokasi. Sama seperti distribusi Weibull, distribusi ini memiliki beragam bentuk tergantung parameternya. Umumnya data yang sesuai

dengan distribusi Weibull juga dapat dianalisis menggunakan pendekatan distribusi lognormal.

a. Fungsi Kepadatan Probabilitas (*Probability Density Function*)

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}st} \exp \left\{ -\frac{1}{2S^2} \left[\frac{\ln t}{t_{med}} \right]^2 \right\} \text{ untuk } t \geq 0 \quad (2.9)$$

b. Fungsi Keandalan (*Reliability Function*)

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.10)$$

c. Fungsi Distribusi Kumulatif (*Cummulatif Distribution Function*)

$$F(t) = \Phi \left(\frac{1}{S} \ln \frac{t}{t_{med}} \right) \quad (2.11)$$

d. Fungsi Laju Kerusakan (*Hazard Rate Function*)

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - \Phi \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right)} \quad (2.12)$$

Dimana $s > 0$, $t_{med} > 0$, dan $t > 0$

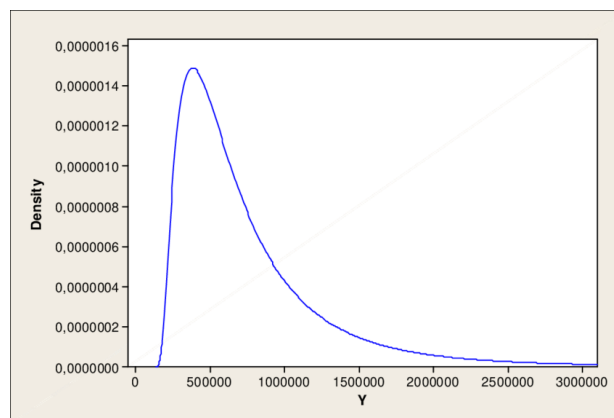
Keterangan:

S = Parameter Bentuk

t_{med} = Parameter Lokasi

Φ = Fungsi Densitas Probabilitas

Contoh grafik distribusi lognormal ditampilkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Distribusi LogNormal

4. Distribusi Weibull

Distribusi Weibull dikenal efektif dalam memodelkan data kerusakan, baik saat tingkat kerusakan meningkat maupun menurun. Karena kemampuannya tersebut distribusi ini sering dimanfaatkan untuk menganalisis data waktu kegagalan

khususnya yang berkaitan dengan usia pakai suatu komponen. Berdasarkan Ebeling (1999), distribusi Weibull menggunakan dua parameter utama yaitu β (beta) sebagai parameter bentuk dan θ (theta) sebagai parameter skala. Adapun rumus dari distribusi Weibull adalah sebagai berikut:

- a. Fungsi Kepadatan Probabilitas (*Probability Density Function*)

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp \left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta} \right] \quad (2.13)$$

- b. Fungsi Keandalan (*Reliability Function*)

$$R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta} \right] \quad (2.14)$$

- c. Fungsi Distribusi Kumulatif (*Cummulatif Distribution Function*)

$$F(t) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta} \right] \quad (2.15)$$

- d. Fungsi Laju Kerusakan (*Hazard Rate Function*)

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \quad (2.16)$$

Dengan:

β = *shape* parameter

θ = *scale* parameter

e = bulangan *euler*

Pada distribusi Weibull, parameter β berpengaruh terhadap bentuk distribusi, sebagaimana dijelaskan oleh Ebeling (1999) dan ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Sifat Distribusi Weibull

Nilai	Sifat Distribusi
$1 < \beta$	Laju kerusakan menurun
$\beta = 1$	Laju kerusakan eksponensial
$1 < \beta < 2$	Laju kerusakan meningkat (kurva konkaf)
$\beta =$	Laju kerusakan linier
$\beta > 2$	Laju kerusakan meningkat (kurva konvek)

Nilai	Sifat Distribusi
$3 \leq \beta \leq$	Laju kerusakan meningkat, distribusi normal

2.2.7 Identifikasi Distribusi Antar Waktu Kerusakan dan Perbaikan

1. Nilai Tengah Kerusakan

$$F(ti) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (2.17)$$

Keterangan:

i = data waktu ke-t

n = jumlah kerusakan

2. Index of Fit

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n(\sum_{i=1}^n y_i^2) - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} \quad (2.18)$$

Menurut Ebeling (1999) perhitungan identifikasi distribusi awal untuk masing-masing distribusi adalah sebagai Berikut:

a. Distribusi Eksponensial

$$X_i = t_i \quad (2.19)$$

$$Y_i = \ln \left[\frac{1}{1 - F(t_i)} \right] \quad (2.20)$$

b. Distribusi Normal

$$X_i = t_i \quad (2.21)$$

$$Y_i = Z_i = \Phi^{-1}[F(t_i)] = \frac{t_i - \mu}{\sigma} \quad (2.22)$$

Dimana t_i adalah data ke-i

Niali Z_i didapat dari tabel standard Normal *Probabilities*

c. Distribusi Lognormal

$$X_i = \ln(t_i) \quad (2.23)$$

$$Y_i = Z_i = \Phi^{-1}[F(t_i)] \quad (2.24)$$

$$Y_i = Z_i = \Phi^{-1} \ln \left[\left(\frac{1}{s} \right) \ln t_i - \left(\frac{1}{s} \right) \ln t_{med} \right] \quad (2.25)$$

Nilai Z_i didapat dari tabel standar normal *probabilities*

d. Distribusi Weibull

$$Xi = \ln(ti) \quad (2.26)$$

$$Yi = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(ti)} \right) \right] \quad (2.27)$$

2.2.8 Uji Goodness of Fit

Pengujian *Goodness of Fit* dilakukan untuk mengevaluasi apakah distribusi yang dipilih sesuai dengan data yang diharapkan. Hal ini penting karena distribusi yang digunakan harus mencerminkan nilai-nilai teoritis yang telah ditetapkan sebelumnya. Uji ini memiliki kemampuan yang cukup tinggi dalam menolak distribusi yang tidak cocok dengan karakteristik data. Adapun jenis-jenis uji yang digunakan dalam metode *Goodness of Fit* di antaranya adalah sebagai berikut:

1. Distribusi Eksponensial Uji Barlet

Hipotesis

H_0 : data *failure* atau *repair* berdistribusi eksponensial

H_1 : data *failure* atau *repair* tidak berdistribusi eksponensial

Uji Statistik

$$B = \frac{2r \left[\left(\ln \left(\frac{1}{r} \right) \sum_{t=1}^r ti \right) - \left(\left(\frac{1}{r} \right) \sum_{t=1}^r \ln ti \right) \right]}{1 + \frac{r+1}{6r}} \quad (2.28)$$

Keterangan:

t_i = Data waktu kerusakan ke- i

r = Jumlah Kerusakan

B = Nilai *Bartlett Test*

H_0 akan diterima jika nilai B didaerah kritis dengan rumus sebagai berikut:

$$X^2 \left(1 - \frac{\alpha}{2}, r - 1 \right) < B < X^2 \left(\frac{\alpha}{2}, r - 1 \right) \quad (2.29)$$

2. Kolmogorvo-Smirnov Test untuk Pengujian Distribusi Normal dan Lognormal

Hipotesis

H_0 : data *failure* atau *repair* berdistribusi normal atau lognormal

H_1 : data *failure* atau *repair* tidak berdistribusi normal atau lognormal

Uji Statistik

$$D_n = \max (D_1, D_2)$$

Dimana

$$D1 = \max \left\{ \phi \left(\frac{ti - f}{s} \right) - \left(\frac{i - 1}{n} \right) \right\} \quad (2.30)$$

$$D2 = \max \left\{ \left(\frac{i}{n} \right) - \phi \left(\frac{ti - f}{s} \right) \right\} \quad (2.31)$$

Probabilitas Kumulatif

$$F(t) = \left(\frac{ti - \mu}{\sigma} \right) \quad (2.32)$$

$$\mu = \left(\frac{\sum_{i=1}^r \ln ti}{n} \right) \quad (2.33)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (\ln ti - \mu)^2}{n}} \quad (2.34)$$

Keterangan:

N = banyaknya jumlah data

S = standard Deviasi

μ = Rata-rata time to *failure*

Pembeda antara distribusi normal dan lognormal terletak pada penggunaan variabel ti , di mana distribusi lognormal menggunakan nilai $ti = \ln$. Jika Dn kurang dari ($<$) dari D_{crit} maka H_0 akan diterima. Sebaliknya jika Dn lebih besar ($>$) dari D_{crit} maka H_1 akan ditolak. Nilai ini didapatkan dari tabel *critical value for the Kolmogorov-Smirnov test for normality*.

3. Distribusi Weibull *Mann's Test*

Hipotesis

H_0 : data *failure* atau *repair* berdistribusi weibull

H_1 : data *failure* atau *repair* tidak berdistribusi weibull

Uji Statistik

$$M = \left(\frac{k1 \sum [\ln ti + \left(\frac{(1 - \ln ti)}{mi} \right)]}{k2 \sum [\ln ti + \left(\frac{(1 - \ln ti)}{mi} \right)]} \right) \quad (2.35)$$

$$K1 = \left(\frac{r}{2} \right) \quad (2.36)$$

$$K2 = \left(\frac{r-1}{2} \right) \quad (2.37)$$

$$M_i = Z(i+1) - Z_i \quad (2.38)$$

$$Z_i = \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{i - 0.5}{n + 0.25} \right) \right] \quad (2.39)$$

Keterangan:

n: Banyaknya jumlah data waktu antar kerusakan atau perbaikan komponen

t_i : Data data waktu antar kerusakan atau perbaikan ke i

M_i : Nilai pendekatan *Mann's test* untuk data ke- i

M: Nilai perhitungan weibull

$M_{0,05; k1; k2}$: nilai distribusi weibull

r: jumlah data

Bila $M_{hitung} < F_{crit}$ maka H_0 diterima. Nilai F_{crit} diperoleh dari tabel distribusi F dengan $\alpha = 0,05$

2.2.9 Estimasi Parameter

Dalam tahapan estimasi parameter, metode yang diterapkan adalah *Maximum Likelihood Estimation (MLE)*. Menurut Ebeling (1999), setiap jenis distribusi memiliki sejumlah parameter yang harus dihitung atau diestimasi terlebih dahulu, yang menjadi dasar dalam analisis lebih lanjut.

a. Distribusi Eksponensial

$$\lambda = \frac{n}{t} \quad (2.40)$$

Keterangan:

n = jumlah kerusakan atau perbaikan

$T = \sum_{ti}^r t_i$ adalah jumlah waktu kerusakan atau perbaikan

b. Distribusi Normal

$$\mu = \left(\frac{\sum_{i=1}^r t_i}{n} \right) \quad (2.41)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \mu)^2}{n}}; \text{ Untuk } n > 30 \quad (2.42)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \mu)^2}{n}}; \text{ Untuk } n \leq 30 \quad (2.43)$$

Keterangan:

t_i = Data waktu kerusakan ke - i

n = Banyaknya data kerusakan atau perbaikan

μ = Nilai *middle* atau tengah

σ = Standar deviasi

c. Distribusi LogNormal

$$\mu = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \ln ti}{n} \right) \quad (2.44)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln ti - \mu)^2}{n}}; \text{ untuk } n > 30 \quad (2.45)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln ti - \mu)^2}{n}}; \text{ Untuk } n \leq 30 \quad (2.46)$$

d. Distribusi Weibull

$$\beta = \frac{n \sum_{i=1}^n XiYi - (\sum_{i=1}^n Xi)(\sum_{i=1}^n Yi)}{(\sum_{i=1}^n Xi^2)(\sum_{i=1}^n Yi^2)} \quad (2.47)$$

$$\theta = e^{-\frac{a}{\beta}} \quad (2.48)$$

Keterangan:

ti = Jumlah data waktu kerusakan atau perbaikan ke i

2.2.10 Mean Time to Failure (MTTF)

Menurut Ebeling (1999), *mean time to failure (MTTF)* merupakan waktu rata-rata yang dibutuhkan hingga suatu komponen mengalami kerusakan. Nilai ini digunakan untuk menunjukkan tingkat keandalan suatu sistem atau komponen sebelum terjadi kegagalan. Perhitungan *MTTF* untuk setiap jenis distribusi memiliki rumus tersendiri tergantung pada distribusi yang digunakan.

a. Distribusi Eksponensial

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (2.49)$$

Keterangan:

λ = rata-rata kedatangan kerusakan yang terjadi.

b. Distribusi Normal

$$MTTF = \mu \quad (2.50)$$

Keterangan:

μ = Nilai Tengah

c. Distribusi LogNormal

$$MTTF = t_{med} \cdot \exp\left(\frac{s^2}{2}\right) \quad (2.51)$$

Keterangan:

t_{med} = parameter lokasi (nilai tengah dari suatu distribusi kerusakan)

s = parameter bentuk (*shape* parameter)

d. Distribusi Weibull

$$MTTF = \theta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2.52)$$

Keterangan:

Nilai $\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})$ didapa dari $\Gamma(x)$ = tabel fungsi gamma.

θ = *scale* parameter yang mempengaruhi nilai tengah dari pola data.

β = *shape* parameter yang mempengaruhi laju kerusakan.

2.2.11 Mean Time to Repair (MTTR)

Menurut Ebeling (1999), *mean time to Repair (MTTR)* merupakan ukuran rata-rata waktu yang diperlukan untuk memperbaiki suatu peralatan atau sistem hingga kembali beroperasi normal setelah mengalami kegagalan. *MTTR* mencakup seluruh aktivitas perbaikan mulai dari proses deteksi masalah, diagnosa, penggantian atau perbaikan komponen, hingga pengujian ulang agar sistem dapat berfungsi dengan baik. Semakin rendah nilai *MTTR*, semakin cepat suatu sistem dapat dipulihkan sehingga downtime dapat diminimalkan. Oleh karena itu, *MTTR* menjadi indikator penting dalam manajemen pemeliharaan dan keandalan, karena berhubungan langsung dengan ketersediaan (*availability*) serta efisiensi operasional suatu organisasi.

Fungsi-fungsi *MTTR* untuk setiap distribusi adalah sebagai berikut:

a. Distribusi Eksponensial

$$MTTR = \frac{1}{\lambda} \quad (2.53)$$

b. Distribusi Normal

$$MTTR = \mu \quad (2.54)$$

c. Distribusi LogNormal

$$MTTR = t_{med} \cdot \exp\left(\frac{s^2}{2}\right) \quad (2.55)$$

d. Distribusi Weibull

$$MTTR = \theta \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (2.56)$$

Nilai $\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})$ didapat dari $\Gamma(x)$ = tabel fungsi gamma.

2.2.12 Penggantian pencegahan Optimal Berdasarkan Umur Komponen (*Age Replacement*)

Penelitian ini menggunakan pendekatan matematis sistem perawatan pencegahan dengan metode *Age Replacement*. Metode ini merupakan strategi pemeliharaan yang menetapkan waktu tertentu sebagai batas maksimal umur komponen sebelum dilakukan penggantian, didasarkan pada pola waktu kerusakan yang mengindikasikan perlunya tindakan perbaikan. Sesuai dengan konsep minimasi menurut Jardine (1997) pendekatan ini mencakup kebijakan penggantian komponen secara preventif saat usia mencapai titik waktu t_p , serta penggantian saat terjadi kerusakan mendadak. Tujuan utama dari model ini adalah untuk menentukan waktu optimal penggantian preventif yang mampu menurunkan rata-rata biaya perawatan dalam setiap satuan waktu.

Pada model *Age Replacement* ini terdapat dua siklus operasi yaitu:

Siklus 1: Merupakan proses pemeliharaan preventif yang ditutup dengan kegiatan penggantian terencana. Penggantian ini dilakukan ketika komponen telah mencapai usia yang telah ditetapkan sebelumnya dalam jadwal perawatan.

Siklus 2: Merupakan proses pemeliharaan preventif yang berakhir karena terjadinya kerusakan. Dalam hal ini, komponen diganti karena mengalami kegagalan sebelum mencapai waktu penggantian yang sudah direncanakan.

$$D(tp) = \frac{Tp \cdot R(tp) + Tf \cdot (1 - R(tp))}{(tp + Tp) \cdot R(t) + (M(tp) + Tf) \cdot (1 - R(tp))} \quad (2.57)$$

Keterangan Rumus:

t_p = Interval waktu penggantian pencegahan

T_f = Waktu untuk melakukan penggantian kerusakan komponen

T_p = Waktu untuk melakukan penggantian *preventive*

$R(tp)$ = Probabilitas terjadinya penggantian pencegahan pada saat t_p

$M(tp)$ = Waktu rata – rata terjadinya kerusakan jika penggantian perbaikan pada masa t_p yang dapat dicari dengan rumus $M(tp)$:

$$M(tp) = \frac{MTTF}{1 - R(tp)} \quad (2.58)$$

2.2.13 Interval waktu pemeriksaan

Di samping pelaksanaan kegiatan penggantian secara preventif, penetapan interval pemeriksaan yang optimal juga perlu dilakukan guna menghindari frekuensi pemeriksaan yang terlalu sering maupun terlalu jarang. Pemeriksaan berkala memiliki peran penting dalam menekan laju kerusakan komponen yang bersifat mendadak, yang apabila tidak terdeteksi dapat menimbulkan pembengkakan biaya perawatan. Model matematis untuk menentukan interval pemeriksaan yang optimal dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$D(n) = \lambda(n) \cdot T_f + nT_i \quad (2.59)$$

Dengan keterangan bahwa $D(n)$ merepresentasikan total waktu henti (*downtime*) per satuan waktu, yang terdiri dari waktu henti akibat kegiatan perbaikan serta waktu henti yang disebabkan oleh kegiatan pemeriksaan dalam satuan waktu yang sama.

Dimana:

$$\lambda(n) \frac{k}{n} \text{ sehingga } \lambda'(n) = \frac{k}{n^2} \quad (2.60)$$

$$k = \frac{\text{jumlah frekuensi kerusakan}}{\text{periode terjadinya kerusakan}} \quad (2.61)$$

$$T_f = \frac{1}{\mu}; T_i = \frac{1}{i} \quad (2.62)$$

Sehingga

$$D(n) = \frac{\lambda(n)}{\mu} + \frac{n}{i} \text{ atau } D(n) = \frac{k}{\mu \cdot n} + \frac{n}{i} \quad (2.63)$$

Jika persamaan di atas mengalami diferensiasi akan menghasilkan bentuk:

$$D'(n) = \frac{k}{\mu \cdot n^2} + \frac{1}{i} = 0 \quad (2.64)$$

Sehingga

$$n = \sqrt{\frac{k \cdot i}{\mu}} \quad (2.65)$$

Keterangan:

$\lambda(n)$ = Laju kerusakan yang terjadi

- k = Nilai konstan dari jumlah kerusakan persatuan waktu
 T_f = Waktu rata – rata untuk melakukan penggantian
 T_i = Waktu rata – rata untuk melakukan pemeriksaan
 n = Frekuensi yang dilakukan per satuan waktu

2.2.14 Availability

Secara umum, availability dipengaruhi oleh dua faktor utama: reliability (keandalan) yang menentukan seberapa sering sistem mengalami kegagalan, dan maintainability (kemudahan perawatan) yang menentukan seberapa cepat sistem dapat dipulihkan ketika terjadi gangguan. Semakin andal dan mudah dipelihara suatu sistem, maka semakin tinggi tingkat availability-nya.

Langkah-langkah dalam menghitung tingkat ketersediaan (*availability*) mengacu pada metode yang dikemukakan oleh Walpole (1995) dapat dijelaskan sebagai berikut:

- a. Perhitungan ketersediaan (*availability*) berdasarkan frekuensi pemeriksaan

$$A(n) = 1 - D(n) \quad (2.66)$$

$$D(n) = \frac{k}{\mu \cdot n} + \frac{1}{i} \quad (2.67)$$

- b. Perhitungan ketersediaan (*availability*) berdasarkan interval penggantian:

$$A(tp) = 1 - [\min D(tp)] \quad (2.68)$$

$D(tp)$ = total *downtime* persiklus

- c. Perhitungan ketersediaan (*Availability*) total

$$Availability = A(n) \times A(tp)$$

2.2.15 Keandalan (*Reliability*)

Keandalan adalah keadaan di mana suatu komponen atau sistem mampu menjalankan fungsinya sesuai harapan dalam rentang waktu yang telah ditentukan (Burhannudin & Anshori, 2022). Konsep ini menekankan pada konsistensi kinerja tanpa adanya gangguan atau kegagalan yang dapat menghambat fungsi utama dari suatu perangkat maupun sistem. Dengan kata lain, semakin tinggi keandalan suatu sistem, semakin kecil kemungkinan terjadinya kerusakan selama periode operasional yang ditetapkan.

Keandalan juga menjadi salah satu faktor penting dalam manajemen aset dan perawatan, karena berhubungan langsung dengan efisiensi, keselamatan, serta biaya operasional. Sistem yang andal mampu meminimalkan downtime, mengurangi biaya

perbaikan tak terduga, serta meningkatkan produktivitas. Oleh karena itu, pengukuran dan pengelolaan keandalan sering dijadikan acuan dalam pengambilan keputusan, baik pada tahap perancangan, implementasi, maupun pemeliharaan suatu sistem atau peralatan.

BAB III

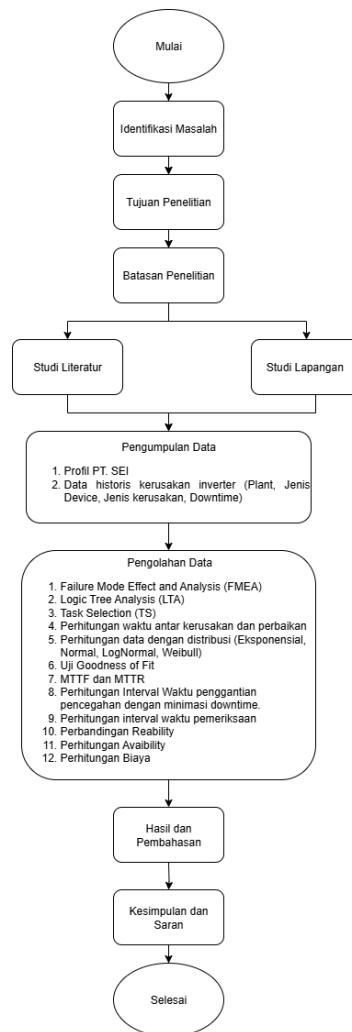
METODE PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah strategi perawatan inverter sebagai faktor utama dalam menjaga keandalan PLTS. Fokus pada strategi perawatan dipilih karena perencanaan dan penerapannya berpengaruh langsung terhadap *performance ratio (PR)*, khususnya melalui pengendalian *downtime*, peningkatan *availability*, serta pengurangan frekuensi kerusakan. Dengan demikian strategi perawatan dalam konteks ini berfungsi untuk meminimalisir risiko penurunan keandalan sistem yang berdampak pada efisiensi energi dan kontinuitas pasokan listrik.

3.2 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah dalam melaksanakan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3. 1.



Gambar 3. 1 Alur Penelitian

a. Identifikasi Masalah

Langkah ini merupakan tahapan awal yang bertujuan untuk memahami kondisi aktual di lapangan dalam mengidentifikasi permasalahan yang terjadi, serta merancang langkah perbaikan yang sesuai. Berdasarkan data yang diperoleh melalui wawancara ditemukan bahwa salah satu isu utama yang dihadapi adalah kerusakan pada komponen inverter yang menyebabkan terhentinya proses konversi energi dan berdampak pada penurunan nilai *performance ratio* sistem PLTS. Oleh karena itu fokus utama dalam penelitian ini adalah menyusun rekomendasi strategi pemeliharaan yang bersifat terukur dan berbasis data sehingga dapat diterapkan secara langsung untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan operasional sistem PLTS.

b. Tujuan Penelitian

Menetapkan sasaran utama yang ingin dicapai dalam penelitian ini dengan merumuskan arah dan fokus penelitian secara jelas.

c. Batasan Penelitian

Menetapkan ruang lingkup penelitian dengan membatasi pembahasan pada aspek-aspek yang paling relevan dengan tujuan agar penelitian lebih terarah, dan menghindari pembahasan yang melebar serta tidak sesuai dengan permasalahan yang diangkat.

d. Studi Literatur dan Studi Lapangan

Tahap berikutnya dilakukan untuk memperoleh berbagai informasi melalui studi literatur yang mencakup buku, jurnal ilmiah, serta hasil penelitian terdahulu. Langkah ini bertujuan untuk memperoleh landasan teoritis, konsep, model, dan informasi yang relevan untuk mendukung dan memperkuat dasar analisis dalam penelitian ini. Serta melalui studi lapangan dengan melakukan observasi secara langsung di lokasi penelitian untuk memperoleh data empiris yang akurat dan faktual. Data ini digunakan sebagai dasar dalam mengidentifikasi permasalahan secara lebih jelas serta memastikan bahwa analisis yang dilakukan sesuai dengan kondisi nyata di lapangan.

e. Sumber data dan Pengumpulan data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari dua jenis yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh secara langsung dari sumber pertama melalui pengamatan atau interaksi langsung, sementara data sekunder berasal dari

sumber tidak langsung seperti dokumen atau laporan. Teknik pengumpulan data yang digunakan pada penelitian ini akan dijelaskan sebagai berikut :

1. Data Primer

Data primer diperoleh dari hasil wawancara dengan pegawai perusahaan untuk mengetahui mengenai permasalahan serta penanganan dari kerusakan komponen tersebut. Hasil dari wawancara digunakan sebagai data penguat mengenai permasalahan yang dihadapi serta mencari informasi tambahan yang dapat digunakan untuk mendukung data sekunder.

2. Data sekunder

Data sekunder diperoleh dari media atau laporan yang disimpan oleh perusahaan. Data sekunder diperoleh didapatkan berdasarkan jadwal alarm/kerusakan pada bulan April – Mei 2025. Dengan data didapatkan akan dilakukan penelitian berdasarkan permasalahan yang ada untuk mengetahui profil dari inverter.

- f. Pengolahan Data

1. *FMEA*

FMEA digunakan untuk menganalisis berbagai mode kegagalan yang terjadi serta dampak yang ditimbulkannya terhadap kinerja secara keseluruhan. Dalam metode ini setiap kegagalan dinilai melalui perhitungan *Risk Priority Number (RPN)* yang merupakan hasil perkalian dari tingkat keparahan (*severity*), kemungkinan terjadinya (*occurrence*), dan kemampuan deteksi (*detection*). Nilai *RPN* yang paling tinggi menunjukkan kegagalan yang paling kritis dan perlu mendapatkan prioritas utama untuk dilakukan tindakan perbaikan atau pencegahan lebih lanjut.

2. *LTA* dan *Task Selection*

Melakukan analisis terhadap dampak yang ditimbulkan dari kegagalan paling kritis untuk memahami pengaruhnya terhadap kinerja sistem, serta menetapkan strategi pemeliharaan yang paling tepat dan efektif untuk meningkatkan keandalan inverter melalui metode *LTA* dan *Task Selection*.

3. Perhitungan waktu antar kerusakan dan perbaikan.

Tahap berikutnya dilakukan dengan menghitung selang waktu antar kerusakan yaitu estimasi lamanya suatu komponen dapat bekerja secara normal sebelum mengalami kerusakan. Selain itu ditentukan durasi

perbaikan, yakni berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki komponen tersebut setelah terjadi kerusakan.

4. Perhitungan data dengan distribusi

Langkah berikutnya yaitu melakukan proses pendistribusian data dengan menentukan jenis distribusi yang paling sesuai yaitu distribusi dengan nilai *index of fit* atau tingkat kecocokan tertinggi. Dalam analisis ini dilakukan pengujian menggunakan empat jenis distribusi yaitu distribusi Eksponensial, Normal, LogNormal, dan Weibull untuk mengetahui model distribusi yang paling merepresentasikan pola data kerusakan yang ada.

5. *Uji Goodness of Fit*

Uji Goodness of Fit dilakukan untuk memastikan bahwa distribusi data yang dipilih benar-benar sesuai atau konsisten dengan pola distribusi data aktual. Dengan kata lain uji ini bertujuan untuk memverifikasi apakah distribusi yang diasumsikan mampu merepresentasikan karakteristik data sebenarnya. Pada distribusi eksponensial digunakan uji Bartlett, sedangkan distribusi normal dan log normal diuji dengan metode *Kolmogorov-Smirnov*, dan untuk distribusi Weibull dilakukan pengujian menggunakan metode *Mann*.

6. *MTTF* dan *MTTR*

MTTF adalah rata-rata waktu operasi suatu komponen sebelum mengalami kegagalan, khususnya pada komponen yang dianggap paling kritis. Sementara itu *MTTR* mengacu pada rata-rata durasi yang dibutuhkan untuk melakukan perbaikan terhadap komponen yang mengalami kerusakan hingga dapat kembali berfungsi normal. Kedua parameter ini berperan penting dalam menentukan efektivitas strategi pemeliharaan dan perencanaan waktu henti (*downtime*) yang optimal.

7. Perhitungan Interval Waktu penggantian komponen

Salah satu langkah yang dapat dilakukan adalah dengan menentukan interval penggantian komponen berdasarkan hasil temuan kerusakan selama pelaksanaan perawatan rutin. Hasil perhitungan ini juga dapat digunakan sebagai acuan dalam penentuan jumlah minimum persediaan komponen cadangan, sehingga ketersediaannya di gudang disarankan tidak melebihi batas waktu yang telah ditetapkan.

8. Perhitungan interval waktu pemeriksaan

Perhitungan yang digunakan untuk menentukan seberapa sering suatu komponen perlu diperiksa agar potensi kerusakan bisa dideteksi sebelum benar-benar terjadi.

9. Perbandingan *Reliability*

Perhitungan yang digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana efektivitas strategi perawatan yang diterapkan.

10. Perhitungan *Availability*

Perhitungan *availability* dilakukan untuk mengetahui sejauh mana tingkat keandalan sistem setelah dilakukan perawatan yang bersifat preventif.

11. Perhitungan Biaya

Perhitungan biaya dilakukan untuk mengevaluasi apakah solusi yang diajukan dapat diterapkan secara efektif dalam konteks keuangan. Dengan kata lain, analisis biaya bertujuan untuk menilai apakah solusi yang disarankan sebanding dengan biaya yang dikeluarkan, serta memastikan bahwa investasi yang dilakukan memberikan nilai yang sesuai dengan manfaat yang diharapkan.

g. Analisis dan Pembahasan

Penelitian ini mencakup analisis data secara kuantitatif maupun kualitatif dengan tujuan memberikan pemahaman yang lebih mendalam serta mengungkap informasi atau nilai-nilai yang relevan. Analisis kuantitatif dilakukan melalui pengolahan data numerik yang dapat diukur secara objektif, sehingga menghasilkan gambaran yang terukur mengenai fenomena yang diteliti. Sementara itu, analisis kualitatif digunakan untuk menelaah aspek-aspek non-numerik, seperti pola, persepsi, maupun faktor-faktor kontekstual yang tidak dapat sepenuhnya dijelaskan oleh data angka. Dengan menggabungkan kedua pendekatan ini, penelitian diharapkan mampu memberikan hasil yang lebih komprehensif dan menyeluruh.

Hasil dari analisis tersebut kemudian dijadikan landasan untuk melakukan evaluasi terhadap kondisi aktual serta mengidentifikasi akar permasalahan yang muncul selama proses penelitian. Evaluasi ini tidak hanya berfokus pada kelemahan atau kendala, tetapi juga pada potensi serta peluang yang dapat dimanfaatkan untuk perbaikan. Selanjutnya, temuan yang diperoleh digunakan untuk merumuskan rekomendasi solusi yang bersifat aplikatif dan berorientasi

pada peningkatan efektivitas maupun efisiensi. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi nyata, baik dalam tataran akademis maupun dalam praktik implementasi di lapangan.

h. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan disusun berdasarkan keseluruhan rangkaian penelitian dengan tujuan utama untuk menjawab rumusan masalah yang telah ditetapkan. Hasil penelitian ini menjadi dasar dalam memahami permasalahan yang terjadi serta memberikan gambaran mengenai efektivitas penerapan strategi perawatan yang relevan terhadap inverter PLTS. Dengan demikian, kesimpulan yang dirumuskan mampu mencerminkan pencapaian tujuan penelitian secara menyeluruh.

Selain itu, penelitian ini juga memberikan saran yang ditujukan kepada perusahaan maupun peneliti selanjutnya sebagai rekomendasi dalam penerapan strategi perawatan terhadap inverter PLTS. Saran tersebut diharapkan dapat digunakan sebagai acuan dalam meningkatkan keandalan sistem, meminimalkan risiko kerusakan, serta mendukung keberlanjutan operasional. Bagi peneliti berikutnya, hasil penelitian ini dapat dijadikan referensi maupun titik awal untuk pengembangan kajian yang lebih mendalam.

BAB IV

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Pengumpulan Data

Pengumpulan data berisikan tentang data waktu kerusakan antara *device* dan jenis kerusakannya. Data *downtime* dari PLTS XYZ 189kWp diambil pada periode April – Mei 2025. Dataset Kerusakan Inverter dapat dilihat pada Tabel 4. 1.

Tabel 4. 1 Dataset Kerusakan Inverter

<i>Device Name</i>	<i>Clearance Time</i>			<i>Occurrence Time</i>		
	Inverter 60kW	Inverter 100kW	<i>SmartLogger</i>	Inverter 60kW	Inverter 100kW	<i>SmartLogger</i>
1	2025-05-24 09:45:53	2025-05-16 17:27:08	2025-05-21 08:11:20	2025-05-24 09:44:50	2025-05-16 17:26:49	2025-05-21 03:47:06
2	2025-05-24 08:54:19	2025-05-16 09:22:49	2025-05-21 08:11:58	2025-05-24 08:53:18	2025-05-16 09:22:31	2025-05-21 03:47:02
3	2025-05-08 09:10:39	2025-05-15 12:41:36	2025-05-21 08:12:38	2025-05-08 08:53:51	2025-05-15 12:41:27	2025-05-21 03:46:04
4	2025-05-06 06:19:12	2025-05-15 11:38:46	2025-05-05 11:26:40	2025-05-06 06:18:08	2025-05-15 11:38:18	2025-05-05 11:10:24
5	2025-05-04 18:04:54	2025-05-15 11:14:39	2025-04-19 09:22:10	2025-05-04 09:09:49	2025-05-15 11:13:11	2025-04-19 09:10:24
6	2025-05-04 07:52:31	2025-05-15 11:10:57		2025-05-04 07:33:32	2025-05-15 11:10:09	
7	2025-04-20 12:35:05	2025-05-15 10:12:58		2025-04-20 10:15:11	2025-05-15 10:07:14	
8	2025-05-08 08:35:52	2025-05-15 10:06:32		2025-05-08 08:34:49	2025-05-15 10:06:13	
9	2025-04-12 17:25:21	2025-05-10 17:14:06		2025-04-12 17:21:21	2025-05-10 17:13:57	
10	2025-05-16 17:27:10	2025-05-10 17:13:41		2025-05-16 17:26:48	2025-05-10 17:13:24	
11	2025-05-16 09:22:53	2025-05-08 13:47:46		2025-05-16 09:22:31	2025-05-08 13:47:38	
12	2025-05-15 12:44:13	2025-05-08 11:14:10		2025-05-15 12:43:42	2025-05-08 11:03:26	
13	2025-05-15 11:40:22	2025-05-08 10:54:56		2025-05-15 11:38:16	2025-05-08 10:54:37	
14	2025-05-15 11:14:59	2025-04-23 15:45:12		2025-05-15 11:13:05	2025-04-23 15:45:03	
15	2025-05-15 11:10:54	2025-04-23 14:48:25		2025-05-15 11:10:02	2025-04-23 14:48:08	
16	2025-05-15 10:12:56	2025-04-04 11:12:49		2025-05-15 10:07:09	2025-04-04 11:12:31	
17	2025-05-15 10:06:29			2025-05-15 10:06:08		

<i>Device Name</i>	<i>Clearance Time</i>			<i>Occurrence Time</i>		
	<i>Inverter 60kW</i>	<i>Inverter 100kW</i>	<i>SmartLogger</i>	<i>Inverter 60kW</i>	<i>Inverter 100kW</i>	<i>SmartLogger</i>
18	2025-05-10 17:14:10			2025-05-10 17:13:57		
19	2025-05-10 17:13:46			2025-05-10 17:13:24		
20	2025-05-08 13:53:45			2025-05-08 13:53:34		
21	2025-05-08 11:16:43			2025-05-08 11:03:27		
22	2025-05-08 10:55:01			2025-05-08 10:54:39		
23	2025-04-23 15:45:16			2025-04-23 15:45:03		
24	2025-04-23 14:48:30			2025-04-23 14:48:08		
25	2025-04-16 04:27:24			2025-04-16 04:26:24		
26	2025-04-04 11:13:53			2025-04-04 11:13:11		
27	2025-05-08 09:09:50			2025-05-08 08:58:44		
28	2025-04-23 12:18:53			2025-04-23 12:17:26		
29	2025-04-23 12:03:52			2025-04-23 12:02:18		
30	2025-04-23 12:01:58			2025-04-23 12:01:07		
31	2025-04-23 11:55:53			2025-04-23 11:48:20		
32	2025-04-23 11:42:10			2025-04-23 11:23:48		
33	2025-04-23 11:21:51			2025-04-23 11:19:50		
34	2025-04-23 11:19:39			2025-04-23 11:18:56		
35	2025-04-23 09:18:11			2025-04-23 09:16:25		
36	2025-04-03 21:58:41			2025-04-03 09:20:09		
37	2025-04-04 17:42:18			2025-04-04 08:07:21		
38	2025-04-12 19:10:39			2025-04-12 08:59:39		
39	2025-04-13 16:11:59			2025-04-13 06:49:19		
40	2025-04-16 16:02:37			2025-04-16 05:18:30		

Device Name	Clearance Time			Occurrence Time		
	Inverter 60kW	Inverter 100kW	SmartLogger	Inverter 60kW	Inverter 100kW	SmartLogger
41	2025-04-19 20:44:19			2025-04-19 13:25:46		
42	2025-04-20 12:34:48			2025-04-20 10:47:16		
43	2025-04-21 18:01:37			2025-04-21 07:17:23		
44	2025-04-22 13:52:53			2025-04-22 06:28:17		
45	2025-04-23 12:51:00			2025-04-23 06:29:27		
46	2025-05-04 18:04:54			2025-05-04 09:42:33		
47	2025-05-05 14:52:18			2025-05-05 06:27:26		
48	2025-05-12 17:59:37			2025-05-12 06:41:12		
49	2025-05-13 10:18:33			2025-05-13 06:28:18		
50	2025-05-22 17:55:17			2025-05-22 06:37:29		
51	2025-05-23 17:58:56			2025-05-23 06:40:09		

4.2 Penentuan Komponen Kritis

Pengolahan data kualitatif berisikan mengenai *Failure Mode* dan *Effect Analysis* (*FMEA*), *Logic Tree Analysis* (*LTA*), dan *Task Selection* (*TS*).

4.2.1 *Failure Mode dan Effect Analysis (FMEA)*

Pengolahan data diawali dengan penerapan metode *FMEA* untuk menentukan kerusakan yang memiliki tingkat kekritisan tertinggi. Analisis *FMEA* dilakukan untuk mengidentifikasi jenis perangkat, jenis kerusakan, serta fungsi dan dampak yang ditimbulkan dari kerusakan tersebut. Selanjutnya dilakukan perhitungan *Risk Priority Number (RPN)* yang diperoleh dari hasil perkalian antara *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*. Nilai *Severity* ditentukan berdasarkan lama *downtime* akibat kerusakan, *Occurrence* ditetapkan dari frekuensi terjadinya kerusakan, sedangkan *Detection* dinilai dari kemampuan sistem kontrol dalam mendeteksi kerusakan. Skala penilaian S, O, dan D ditetapkan berdasarkan hasil diskusi dengan staf Perusahaan dapat dilihat pada Tabel 4. 2 berikut ini.

Tabel 4. 2 Pengolahan Data *FMEA*

<i>No</i>	<i>Device</i>	<i>Equipment</i>	<i>Function</i>	<i>Failure Mode</i>	<i>Effect Of Failure</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	<i>RPN</i>
1	Inverter 60kW	Kabel/konektor	Mengalirkan listrik dari panel ke inverter dan ke grid	<i>Low Insulation Resistance</i>	Inverter Mengalami <i>Cut off</i>	10	10	2	200
2		RCD	Memutus arus saat terjadi kebocoran ke tanah	<i>Abnormal Residual Current</i>	Inverter Mengalami <i>Cut off</i>	5	9	2	90
3		MPPT	Mengoptimalkan daya keluaran dari panel surya	<i>High String Voltage</i>	Inverter Mengalami <i>Cut off</i>	4	9	2	72
4		Grid Relay	Menghubungkan/melepas inverter dari jaringan listrik	<i>Grid Loss</i>	Inverter Mengalami <i>Cut off</i>	2	10	2	40
5		Inverter Cooling	Menjaga suhu inverter agar tidak overheat	<i>Device Fault</i>	Inverter Mengalami <i>Cut off</i>	1	6	2	12
6		Grid Relay	Menghubungkan/melepas inverter dari jaringan listrik	<i>Grid Loss</i>	Inverter Mengalami <i>Cut off</i>	2	10	2	40
7		Modul Komunikasi	Untuk Koneksi Internet	<i>Network Connection Error</i>	Inverter Mengalami <i>Cut off</i>	7	7	2	98

Berdasarkan Tabel 4. 2 dapat diketahui bahwa *device* inverter 60kW dengan jenis kerusakan *Low Insulation Resistance* mendapatkan nilai *RPN* tertinggi yaitu sebesar 200.

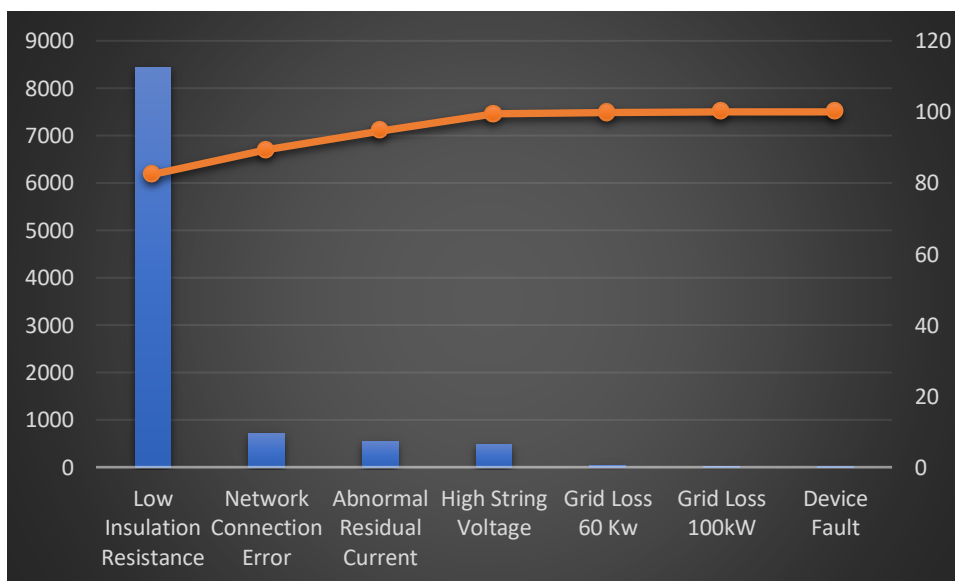
4.2.2 Diagram Pareto

Berikut merupakan penentuan kerusakan kritis dengan *downtime* terbesar sebesar 8440 atau 82.4% dari persentase *downtime* kumulatif pada inverter PLTS. Perhitungan metode *Pareto* pada kerusakan inverter di PLTS XYZ dapat dilihat pada Tabel 4. 3.

Tabel 4. 3 Perhitungan Metode *Pareto*

<i>Device</i>	Alarm Name	<i>Downtime</i> (Menit)	% <i>Downtime</i>	% <i>Downtime</i> Kumulatif
<i>Inverter 60kW</i>	<i>Low Insulation Resistance</i>	8440	82.4	82.4
<i>Smartlogger</i>	<i>Network Connection Error</i>	708	6.9	89.3
<i>Inverter 60kW</i>	<i>Abnormal Residual Current</i>	539	5.3	94.6
<i>Inverter 60kW</i>	<i>High String Voltage</i>	489	4.8	99.4
<i>Inverter 60kW</i>	<i>Grid Loss 60 Kw</i>	39.9	0.4	99.8
<i>Inverter 100kW</i>	<i>Grid Loss 100kW</i>	22	0.2	100
<i>Inverter 60kW</i>	<i>Device Fault</i>	0.8	0	100
Total		10238.7	100	

Pada Gambar 4. 1 merupakan diagram *Pareto* pada inverter yang digunakan dalam sistem pembangkit, yang disusun untuk menentukan komponen kritis berdasarkan data *downtime* inverter sebagai berikut:



Gambar 4. 1 Diagram Pareto Kerusakan Kritis

Berdasarkan Gambar 4. 1 analisis Pareto, diketahui bahwa kerusakan dominan pada inverter adalah *Low Insulation Resistance* dengan kontribusi terbesar terhadap *downtime*. Sementara kerusakan lainnya hanya memberikan pengaruh kecil. Hal ini menunjukkan bahwa fokus utama perbaikan perlu diarahkan pada penanganan masalah isolasi karena menjadi faktor kritis terhadap ketersediaan inverter.

4.2.3 *Logic Tree Analysis (LTA)*

Setelah dilakukan analisis *FMEA* terhadap berbagai jenis kerusakan yang teridentifikasi pada sistem, didapatkan nilai *RPN* (*Risk Priority Number*) yang menunjukkan nilai *RPN* masing-masing jenis *device* dan jenis kerusakannya. Sebagai langkah pendalaman terhadap jenis kerusakan yang dinilai paling kritis, dilakukan analisis lanjutan melalui pendekatan *Logic Tree Analysis* (LTA).

Logic Tree Analysis digunakan untuk menentukan jenis tindakan perawatan yang paling tepat berdasarkan jenis kerusakan terhadap fungsi sistem. Tahapan ini bertujuan untuk mengklasifikasikan jenis kerusakan menjadi kategori *hidden* atau *evident*, serta mengevaluasi dampak dari kegagalan tersebut terhadap keselamatan, kelayakan operasi, dan ekonomi. Berdasarkan hasil analisis ini strategi pemeliharaan yang sesuai dapat ditentukan.

Analisis ini difokuskan pada jenis kerusakan dengan nilai *RPN* tertinggi yang dianggap paling berisiko terhadap kinerja sistem secara keseluruhan. Hasil *Logic Tree Analysis* pada jenis kerusakan dengan nilai *RPN* tertinggi dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Pengolahan Data *LTA*

<i>No</i>	<i>Device</i>	<i>Equipment</i>	<i>Function</i>	<i>Failure Mode</i>	<i>Effect Of Failure</i>	<i>Evidents</i>	<i>Outage</i>	<i>Safety</i>	<i>Category</i>
1	Inverter 60kW	Kabel/konektor	Mengalirkan listrik dari panel ke inverter dan ke grid	<i>Low Insulation Resistance</i>	Inverter Mengalami <i>Cut off</i> dan risiko keselamatan	Y	Y	Y	A

Berdasarkan Tabel 4. 4, jenis kerusakan *Low Insulation Resistance* pada *Logic Tree Analysis (LTA)* mendapatkan hasil yaitu:

1. *Evident*, apakah operator dapat mendeteksi adanya gangguan dalam sistem saat kondisi normal? **YA**
2. *Outage*, apakah kerusakan ini menyebabkan penghentian total atau sebagian dari operasional mesin? **YA**
3. *Safety*, apakah mode kerusakan ini berpotensi menimbulkan risiko keselamatan? **YA**

Berdasarkan hasil analisis *LTA*, kerusakan pada device inverter 60kW dengan jenis kerusakan *Low Insulation Resistance* merupakan jenis kerusakan *Evident* dan berkategori A yaitu kerusakan menimbulkan risiko terhentinya keseluruhan sistem dan risiko keselamatan.

4.2.4 Task Selection

Tahapan ini bertujuan untuk memilih jenis tugas pemeliharaan yang paling sesuai dan efektif dalam mencegah atau mendeteksi kegagalan sebelum menimbulkan dampak yang lebih besar baik terhadap keselamatan, sistem, maupun biaya operasional. Kerusakan berhubungan langsung dengan *Time Directed (TD)*, *Condition Directed (CD)*, *Failure Finding (FF)*. Pengolahan data *Task Selection* pada kerusakan kritis dapat dilihat pada Tabel 4. 5

Tabel 4. 5 Pengolahan Data *Task Selection*

<i>No</i>	<i>Device</i>	<i>Equipment</i>	<i>Function</i>	<i>Failure Mode</i>	<i>Effect Of Failure</i>	1	2	3	4	5	6	7	<i>Selection Task</i>
1	Inverter 60kW	Kabel/konektor	Mengalirkan listrik dari panel ke inverter dan ke grid	<i>Low Insulation Resistance</i>	Inverter Mengalami <i>Cut off</i>	Y	Y	Y	Y	N	Y	-	TD

Berdasarkan Tabel 4. 5 hasil analisis *Task Selection* pada perangkat inverter berkapasitas 60 kW dengan jenis kerusakan *Low Insulation Resistance*, tindakan perawatan yang dipilih adalah *Time Directed (TD)*. Pendekatan ini dipilih karena kerusakan *Low Insulation*

Resistance dapat diminimalkan risikonya melalui pemeriksaan dan perawatan rutin pada interval waktu tertentu. Dengan penerapan *Time Directed*, potensi kegagalan yang berisiko menyebabkan kerusakan pada sistem dapat diidentifikasi lebih dini, sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum kerusakan berkembang menjadi lebih parah dan mengganggu kinerja sistem secara keseluruhan.

4.3 Pengolahan Data Kuantitatif

4.3.1 Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Kerusakan (*Time to Failure*)

Setelah komponen kritis berhasil diidentifikasi, langkah selanjutnya adalah menentukan interval atau jarak waktu antar kerusakan pada *Low Insulation Resistance*. Data antar waktu kerusakan yang menjadi dasar dalam analisis keandalan dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Data Antar Waktu Kerusakan

No	<i>Clearance Time</i>	<i>Occurance Time</i>	Ti
1	2025-04-03 21:58:41	2025-04-03 09:20:09	0
2	2025-04-04 17:42:18	2025-04-04 08:07:21	608.7
3	2025-04-12 19:10:39	2025-04-12 08:59:39	10997.4
4	2025-04-13 16:11:59	2025-04-13 06:49:19	698.7
5	2025-04-16 16:02:37	2025-04-16 05:18:30	3666.5
6	2025-04-19 20:44:19	2025-04-19 13:25:46	4163.1
7	2025-04-20 12:34:48	2025-04-20 10:47:16	843
8	2025-04-21 18:01:37	2025-04-21 07:17:23	1122.6
9	2025-04-22 13:52:53	2025-04-22 06:28:17	746.7
10	2025-04-23 12:51:00	2025-04-23 06:29:27	996.6
11	2025-05-04 18:04:54	2025-05-04 09:42:33	15651.6
12	2025-05-05 14:52:18	2025-05-05 06:27:26	742.5
13	2025-05-12 17:59:37	2025-05-12 06:41:12	9588.9
14	2025-05-13 10:18:33	2025-05-13 06:28:18	748.7
15	2025-05-22 17:55:17	2025-05-22 06:37:29	12738.9
16	2025-05-23 17:58:56	2025-05-23 06:40:09	764.9

Dalam pengujian ini digunakan empat jenis distribusi untuk menghitung nilai indeks kecocokan (*index of fit*) dari masing-masing distribusi. Distribusi yang digunakan meliputi LogNormal, Normal, Eksponensial, dan Weibull. Berikut merupakan contoh perhitungan untuk masing-masing distribusi tersebut.

1. Distribusi Eksponensial

Contoh Perhitungan Distribusi Eksponensial:

$$\begin{aligned}
 X_i &= t_i \\
 &= 608.7 \\
 X_i^2 &= 608.7^2 \\
 &= 370515.69 \\
 F(t_i) &= \frac{i-0.3}{n+0.4} \\
 &= \frac{1-0.3}{15+0.4} \\
 &= 0.045455 \\
 Y_i &= \ln \left[\frac{1}{1-F(t_i)} \right] \\
 Y_i &= \ln \left[\frac{1}{1-(0.045455)} \right] \\
 &= 0.046520016 \\
 Y_i^2 &= 0.046520016^2 \\
 &= 0.002164 \\
 X_i Y_i &= 608.7 * 0.046520016 \\
 &= 28.31673
 \end{aligned}$$

Hasil Perhitungan waktu antar kerusakan Distribusi Eksponensial dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Waktu Antar Kerusakan Distribusi Eksponensial

No	Ti (Menit)	Xi = ti	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	Xi.Yi
1	608.7	608.7	370515.69	0.04545	0.04652002	0.00216	28.3167
2	698.7	698.7	488181.69	0.11039	0.11697168	0.01368	81.7281
3	742.5	742.5	551306.25	0.17532	0.19276552	0.03716	143.128
4	746.7	746.7	557560.89	0.24026	0.27477867	0.0755	205.177
5	748.7	748.7	560551.69	0.30519	0.36412377	0.13259	272.619
6	764.9	764.9	585072.01	0.37013	0.46224162	0.21367	353.569

No	Ti (Menit)	Xi = ti	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	Xi.Yi
7	843	843	710649	0.43506	0.57104448	0.32609	481.39
8	996.6	996.6	993211.56	0.5	0.69314718	0.48045	690.79
9	1122.6	1122.6	1260230.76	0.56494	0.83225998	0.69266	934.295
10	3666.5	3666.5	13443222.25	0.62987	0.99390133	0.98784	3644.14
11	4163.1	4163.1	17331401.61	0.69481	1.186805	1.40851	4940.79
12	9588.9	9588.9	91947003.21	0.75974	1.42603469	2.03357	13674.1
13	10997.4	10997.4	120942806.8	0.82468	1.74111574	3.03148	19147.7
14	12738.9	12738.9	162279573.2	0.88961	2.20373926	4.85647	28073.2
15	15651.6	15651.6	244972582.6	0.95455	3.09104245	9.55454	48379.8
Total	64078.8	64078.8	656993869.1	7.5	14.1964914	23.8464	121051

Berdasarkan Tabel 4. 7 dilakukan perhitungan nilai r pada distribusi Eksponensial sebagai berikut.

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n(\sum_{i=1}^n y_i^2) - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}}$$

$$r = \frac{(15 \cdot 121051) - (64078.8 \cdot 14.1964914)}{\sqrt{15 \cdot 656993869.1 - (64078.8)^2} \sqrt{15 \cdot 23.8464 - (14.1964914)^2}}$$

$$= 0.9563$$

2. Distribusi Normal

Contoh perhitungan Distribusi Normal

$$X_i = t_i$$

$$= 608.7$$

$$X_i^2 = 608.7^2$$

$$= 370515.69$$

$$F(t_i) = \frac{i-0.3}{n+0.4}$$

$$= \frac{1-0.3}{15+0.4}$$

$$= 0.045455$$

$$Y_i = Z_i = \Phi^{-1}[F(t_i)]$$

$$Y_i = Z_i = \Phi^{-1}[(0.045454545)]$$

$$\begin{aligned}
 &= -1.69062163 \\
 Y_i^2 &= -1.69062163^2 \\
 &= 2.8582 \\
 X_i Y_i &= 608.7 * -1.69062163 \\
 &= -1029.1
 \end{aligned}$$

Hasil Perhitungan waktu antar kerusakan Distribusi Normal dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Waktu Antar Kerusakan Distribusi Normal

No	Ti (Menit)	Xi = ti	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	Xi.Yi
1	608.7	608.7	370515.69	0.04545	-1.69062163	2.8582	-1029.1
2	698.7	698.7	488181.69	0.11039	-1.22445874	1.4993	-855.53
3	742.5	742.5	551306.25	0.17532	-0.9333305	0.87111	-693
4	746.7	746.7	557560.89	0.24026	-0.70546729	0.49768	-526.77
5	748.7	748.7	560551.69	0.30519	-0.50951739	0.25961	-381.48
6	764.9	764.9	585072.01	0.37013	-0.3315094	0.1099	-253.57
7	843	843	710649	0.43506	-0.16349353	0.02673	-137.83
8	996.6	996.6	993211.56	0.5	0	0	0
9	1122.6	1122.6	1260230.76	0.56494	0.16349353	0.02673	183.538
10	3666.5	3666.5	13443222.25	0.62987	0.3315094	0.1099	1215.48
11	4163.1	4163.1	17331401.61	0.69481	0.50951739	0.25961	2121.17
12	9588.9	9588.9	91947003.21	0.75974	0.70546729	0.49768	6764.66
13	10997.4	10997.4	120942806.8	0.82468	0.9333305	0.87111	10264.2
14	12738.9	12738.9	162279573.2	0.88961	1.22445874	1.4993	15598.3
15	15651.6	15651.6	244972582.6	0.95455	1.69062163	2.8582	26460.9
Total	64078.8	64078.8	656993869.1	7.5	-3.5527E-15	12.2451	58731

Berdasarkan Tabel 4. 8 dilakukan perhitungan nilai r pada distribusi Normal sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 r &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n(\sum_{i=1}^n y_i^2) - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} \\
 r &= \frac{(15 \cdot 58731) - (64078.8 \cdot (-3.5527E-15))}{\sqrt{15 \cdot 656993869.1 - (64078.8)^2} \sqrt{15 \cdot 12.2451 - (-3.5527E-15)^2}}
 \end{aligned}$$

$$= 0.857320905$$

3. Distribusi LogNormal

Contoh Perhitungan Distribusi LogNormal

$$\begin{aligned} X_i &= \ln t_i \\ &= \ln (608.7) \\ &= 6.41133 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_i^2 &= 6.411325535^2 \\ &= 41.10509512 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F(t_i) &= \frac{i-0.3}{n+0.4} \\ &= \frac{1-0.3}{15+0.4} \\ &= 0.045455 \end{aligned}$$

$$Y_i = Z_i = \Phi^{-1}[F(t_i)]$$

$$\begin{aligned} Y_i = Z_i &= \Phi^{-1}[(0.045454545)] \\ &= -1.69062163 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_i^2 &= -1.69062163^2 \\ &= 2.8582 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_i Y_i &= 6.41133 * -1.69062163 \\ &= -10.83912562 \end{aligned}$$

Hasil Perhitungan waktu antar kerusakan Distribusi LogNormal dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Waktu Antar Kerusakan Distribusi LogNormal

No	Ti (Menit)	$X_i = t_i$	X_i^2	$F(t_i)$	Y_i	Y_i^2	$X_i.Y_i$
1	608.7	6.41133	41.10509512	0.04545	-1.69062163	2.8582	-10.839
2	698.7	6.54922	42.8923018	0.11039	-1.224458743	1.4993	-8.0193
3	742.5	6.61002	43.69240235	0.17532	-0.933330503	0.87111	-6.1693
4	746.7	6.61566	43.76700352	0.24026	-0.705467291	0.49768	-4.6671
5	748.7	6.61834	43.80240277	0.30519	-0.509517392	0.25961	-3.3722

No	Ti (Menit)	Xi = ti	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	Xi.Yi
6	764.9	6.63975	44.08621508	0.37013	-0.331509402	0.1099	-2.2011
7	843	6.73697	45.38672379	0.43506	-0.163493526	0.02673	-1.1015
8	996.6	6.90435	47.67004182	0.5	0	0	0
9	1122.6	7.0234	49.32818552	0.56494	0.163493526	0.02673	1.14828
10	3666.5	8.20699	67.35473094	0.62987	0.331509402	0.1099	2.7207
11	4163.1	8.33402	69.45581049	0.69481	0.509517392	0.25961	4.24633
12	9588.9	9.16836	84.05885183	0.75974	0.705467291	0.49768	6.46798
13	10997.4	9.30541	86.59073269	0.82468	0.933330503	0.87111	8.68503
14	12738.9	9.45242	89.34816036	0.88961	1.224458743	1.4993	11.5741
15	15651.6	9.65833	93.28330801	0.95455	1.69062163	2.8582	16.3286
Total	64078.8	114.235	891.8219661	7.5	-3.55271E-15	12.2451	14.8014

Berdasarkan Tabel 4. 9 dilakukan perhitungan nilai r pada distribusi LogNormal sebagai berikut.

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n(\sum_{i=1}^n y_i^2) - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}}$$

$$r = \frac{(15 \cdot 14.8014) - (114.235 \cdot (-3.5527E-15))}{\sqrt{15 \cdot 891.8219661 - (114.235)^2} \sqrt{15 \cdot 12.2451 - (-3.5527E-15)^2}}$$

$$= 0.90483038$$

4. Distribusi Weibull

Contoh Perhitungan Distribusi Weibull:

$$\begin{aligned} X_i &= \ln t_i \\ &= \ln (608.7) \\ &= 6.41133 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_i^2 &= 6.411325535^2 \\ &= 41.10509512 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F(t_i) &= \frac{i-0.3}{n+0.4} \\ &= \frac{1-0.3}{15+0.4} \\ &= 0.045455 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_i &= \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t_i)} \right) \right] \\
 Y_i &= \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-(0.045455)} \right) \right] \\
 &= -3.067872615 \\
 Y_i^2 &= -3.067872615^2 \\
 &= 9.411842383 \\
 X_i Y_i &= 6.411325535 * -3.067872615 \\
 &= -19.66913004
 \end{aligned}$$

Hasil Perhitungan waktu antar kerusakan Distribusi Weibull dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Waktu Antar Kerusakan Distribusi Weibull

No	Ti (Menit)	Xi = ti	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	Xi.Yi
1	608.7	6.41133	41.10509512	0.04545	-3.067872615	9.41184	-19.669
2	698.7	6.54922	42.8923018	0.11039	-2.145823454	4.60456	-14.053
3	742.5	6.61002	43.69240235	0.17532	-1.646280772	2.71024	-10.882
4	746.7	6.61566	43.76700352	0.24026	-1.29178935	1.66872	-8.546
5	748.7	6.61834	43.80240277	0.30519	-1.010261447	1.02063	-6.6863
6	764.9	6.63975	44.08621508	0.37013	-0.771667529	0.59547	-5.1237
7	843	6.73697	45.38672379	0.43506	-0.560288167	0.31392	-3.7746
8	996.6	6.90435	47.67004182	0.5	-0.366512921	0.13433	-2.5305
9	1122.6	7.0234	49.32818552	0.56494	-0.183610407	0.03371	-1.2896
10	3666.5	8.20699	67.35473094	0.62987	-0.006117338	3.7E-05	-0.0502
11	4163.1	8.33402	69.45581049	0.69481	0.171264823	0.02933	1.42732
12	9588.9	9.16836	84.05885183	0.75974	0.354897648	0.12595	3.25383
13	10997.4	9.30541	86.59073269	0.82468	0.554526136	0.3075	5.1601
14	12738.9	9.45242	89.34816036	0.88961	0.79015558	0.62435	7.46888
15	15651.6	9.65833	93.28330801	0.95455	1.128508398	1.27353	10.8995
Total	64078.8	114.235	891.8219661	7.5	-8.050871417	22.8541	-44.396

Berdasarkan Tabel 4. 10 dilakukan perhitungan nilai r pada distribusi Weibull sebagai berikut.

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n(\sum_{i=1}^n y_i^2) - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}}$$

$$r = \frac{(15 \cdot 44.396) - (114.235 \cdot (-8.050871417))}{\sqrt{15 \cdot 891.8219661 - (114.235)^2} \sqrt{15 \cdot 22.8541 - (-8.050871417)^2}}$$

$$= 0.840595335$$

Rekap hasil *index of fit* dari setiap distribusi yaitu Ekspensial, Normal, LogNormal, dan Weibull dapat dilihat pada tabel 4. 11

Tabel 4. 11 Rekapitulasi Distribusi Waktu Antar Kerusakan

Distribusi	<i>Index of Fit</i>
Ekspensial	0.956297295
Normal	0.857320905
LogNormal	0.90483038
Weibull	0.840595335

Berdasarkan tabel 4. 11, dapat diketahui bahwa distribusi Ekspensial memiliki nilai *Index of Fit* terbesar yaitu 0.96, sehingga dapat disimpulkan bahwa distribusi Ekspensial merupakan distribusi terpilih.

4.3.2 Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Perbaikan (*Time to Repair*)

Setelah komponen kritis berhasil diidentifikasi, langkah selanjutnya adalah menentukan interval atau jarak waktu antar perbaikan *pada Low Insulation Resistance*. Data antar waktu perbaikan yang menjadi dasar dalam analisis keandalan dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Data Antar Waktu Perbaikan

No	<i>Clearance Time</i>	<i>Occurance Time</i>	Ti
1	2025-04-03 21:58:41	2025-04-03 09:20:09	758.5
2	2025-04-04 17:42:18	2025-04-04 08:07:21	574.9
3	2025-04-12 19:10:39	2025-04-12 08:59:39	611
4	2025-04-13 16:11:59	2025-04-13 06:49:19	562.7
5	2025-04-16 16:02:37	2025-04-16 05:18:30	644.1

No	<i>Clearance Time</i>	<i>Occurance Time</i>	Ti
6	2025-04-19 20:44:19	2025-04-19 13:25:46	438.6
7	2025-04-20 12:34:48	2025-04-20 10:47:16	107.5
8	2025-04-21 18:01:37	2025-04-21 07:17:23	644.2
9	2025-04-22 13:52:53	2025-04-22 06:28:17	444.6
10	2025-04-23 12:51:00	2025-04-23 06:29:27	381.5
11	2025-05-04 18:04:54	2025-05-04 09:42:33	502.3
12	2025-05-05 14:52:18	2025-05-05 06:27:26	504.9
13	2025-05-12 17:59:37	2025-05-12 06:41:12	678.4
14	2025-05-13 10:18:33	2025-05-13 06:28:18	230.2
15	2025-05-22 17:55:17	2025-05-22 06:37:29	677.8
16	2025-05-23 17:58:56	2025-05-23 06:40:09	678.8

Dalam pengujian ini digunakan empat jenis distribusi untuk menghitung nilai indeks kecocokan (*index of fit*) dari masing-masing distribusi. Distribusi yang digunakan meliputi LogNormal, Normal, Eksponensial, dan Weibull. Berikut merupakan contoh perhitungan untuk masing-masing distribusi tersebut.

1. Distribusi Eksponensial

Contoh Perhitungan Distribusi Eksponensial:

$$X_i = t_i$$

$$= 107.5$$

$$X_i^2 = 107.5^2$$

$$= 11556.25$$

$$F(t_i) = \frac{i-0.3}{n+0.4}$$

$$= \frac{1-0.3}{16+0.4} = 0.042682927$$

$$Y_i = \ln \left[\frac{1}{1-F(t_i)} \right]$$

$$Y_i = \ln \left[\frac{1}{1-F(0.042682927)} \right] = 0.043620622$$

$$Y_i^2 = 0.043620622^2$$

$$= 0.001902759$$

$$X_i Y_i = 107.5 * 0.043620622$$

$$= 4.68922$$

Hasil Perhitungan waktu antar perbaikan Distribusi Eksponensial dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13 Waktu Antar Perbaikan Distribusi Eksponensial

No	Ti (Menit)	Xi = ti	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	Xi.Yi
1	107.5	107.5	11556.25	0.04268	0.04362062	0.0019	4.68922
2	230.2	230.2	52992.04	0.10366	0.10943384	0.01198	25.1917
3	381.5	381.5	145542.25	0.16463	0.1798855	0.03236	68.6263
4	438.6	438.6	192369.96	0.22561	0.25567934	0.06537	112.141
5	444.6	444.6	197669.16	0.28659	0.33769249	0.11404	150.138
6	502.3	502.3	252305.29	0.34756	0.42703759	0.18236	214.501
7	504.9	504.9	254924.01	0.40854	0.52515545	0.27579	265.151
8	562.7	562.7	316631.29	0.46951	0.63395831	0.4019	356.728
9	574.9	574.9	330510.01	0.53049	0.75606101	0.57163	434.659
10	611	611	373321	0.59146	0.89517381	0.80134	546.951
11	644.1	644.1	414864.81	0.65244	1.05681516	1.11686	680.695
12	644.2	644.2	414993.64	0.71341	1.24971883	1.5618	805.069
13	677.8	677.8	459412.84	0.77439	1.48894852	2.21697	1009.21
14	678.4	678.4	460226.56	0.83537	1.80402956	3.25452	1223.85
15	678.8	678.8	460769.44	0.89634	2.26665308	5.13772	1538.6
16	758.5	758.5	575322.25	0.95732	3.15395628	9.94744	2392.28
Total	8440	8440	4913410.8	8	15.1838194	25.694	9828.48

Berdasarkan Tabel 4. 13 dilakukan perhitungan nilai r pada distribusi Eksponensial sebagai berikut.

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n(\sum_{i=1}^n y_i^2) - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}}$$

$$r = \frac{(16 \cdot 9828.483648) - (8440 \cdot 15.18381939)}{\sqrt{16 \cdot 4913410.8 - (8440)^2} \sqrt{16 \cdot 25.69396452 - (15.18381939)^2}}$$

$$= 0.7972519$$

2. Distribusi Normal

Contoh Perhitungan Distribusi Normal:

$$\begin{aligned}
 X_i &= t_i \\
 &= 107.5 \\
 X_i^2 &= 107.5^2 \\
 &= 11556.25 \\
 F(t_i) &= \frac{i-0.3}{n+0.4} \\
 &= \frac{1-0.3}{16+0.4} \\
 &= 0.042682927 \\
 Y_i = Z_i &= \Phi^{-1}[F(t_i)] \\
 Y_i = Z_i &= \Phi^{-1}[(0.042682927)] \\
 &= -1.720366438 \\
 Y_i^2 &= -1.720366438^2 \\
 &= 2.959660681 \\
 X_i Y_i &= 107.5 * -1.720366438 \\
 &= -184.9393921
 \end{aligned}$$

Hasil Perhitungan waktu antar perbaikan Distribusi Normal dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14 Waktu Antar Perbaikan Distribusi Normal

No	Ti (Menit)	$X_i = t_i$	X_i^2	$F(t_i)$	Y_i	Y_i^2	$X_i.Y_i$
1	107.5	107.5	11556.25	0.04268	-1.72036644	2.95966	-184.94
2	230.2	230.2	52992.04	0.10366	-1.26097717	1.59006	-290.28
3	381.5	381.5	145542.25	0.16463	-0.97558877	0.95177	-372.19
4	438.6	438.6	192369.96	0.22561	-0.75338347	0.56759	-330.43
5	444.6	444.6	197669.16	0.28659	-0.56338796	0.31741	-250.48
6	502.3	502.3	252305.29	0.34756	-0.39191374	0.1536	-196.86
7	504.9	504.9	254924.01	0.40854	-0.23131104	0.0535	-116.79
8	562.7	562.7	316631.29	0.46951	-0.07649613	0.00585	-43.044
9	574.9	574.9	330510.01	0.53049	0.07649613	0.00585	43.9776
10	611	611	373321	0.59146	0.23131104	0.0535	141.331
11	644.1	644.1	414864.81	0.65244	0.39191374	0.1536	252.432
12	644.2	644.2	414993.64	0.71341	0.56338796	0.31741	362.935

13	677.8	677.8	459412.84	0.77439	0.75338347	0.56759	510.643
14	678.4	678.4	460226.56	0.83537	0.97558877	0.95177	661.839
15	678.8	678.8	460769.44	0.89634	1.26097717	1.59006	855.951
16	758.5	758.5	575322.25	0.95732	1.72036644	2.95966	1304.9
Total	8440	8440	4913410.8	8	0	13.1989	2349

Berdasarkan Tabel 4. 14 dilakukan perhitungan nilai r pada distribusi Normal sebagai berikut.

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n(\sum_{i=1}^n y_i^2) - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}}$$

$$r = \frac{(16 \cdot 2348.9955) - (8440 \cdot 0)}{\sqrt{16 \cdot 4913410.8 - (8440)^2} \sqrt{16 \cdot 13.19888606 - (0)^2}}$$

$$= 0.951955689$$

3. Distribusi LogNormal

Contoh Perhitungan Distribusi LogNormal:

$$X_i = \ln t_i$$

$$= \ln (107.5)$$

$$= 4.677490848$$

$$X_i^2 = 4.677490848^2$$

$$= 21.87892063$$

$$F(t_i) = \frac{i-0.3}{n+0.4}$$

$$= \frac{1-0.3}{16+0.4}$$

$$= 0.042682927$$

$$Y_i = Z_i = \Phi^{-1}[F(t_i)]$$

$$Y_i = Z_i = \Phi^{-1}[(0.042682927)]$$

$$= -1.720366438$$

$$Y_i^2 = -1.720366438^2$$

$$= 2.959660681$$

$$X_i Y_i = 4.677490848 \cdot -1.720366438$$

$$= -8.046998269$$

Hasil Perhitungan waktu antar perbaikan Distribusi LogNormal dapat dilihat pada Tabel 4.15.

Tabel 4. 15 Waktu Antar Perbaikan Distribusi LogNormal

No	Ti (Menit)	Xi = ti	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	Xi.Yi
1	107.5	4.67749	21.87892063	0.04268	-1.72036644	2.95966	-8.047
2	230.2	5.43895	29.58216075	0.10366	-1.26097717	1.59006	-6.8584
3	381.5	5.94411	35.33245381	0.16463	-0.97558877	0.95177	-5.799
4	438.6	6.08359	37.01004096	0.22561	-0.75338347	0.56759	-4.5833
5	444.6	6.09718	37.175543	0.28659	-0.56338796	0.31741	-3.4351
6	502.3	6.2192	38.67841818	0.34756	-0.39191374	0.1536	-2.4374
7	504.9	6.22436	38.74266226	0.40854	-0.23131104	0.0535	-1.4398
8	562.7	6.33275	40.10367983	0.46951	-0.07649613	0.00585	-0.4844
9	574.9	6.3542	40.37580824	0.53049	0.07649613	0.00585	0.48607
10	611	6.4151	41.153469	0.59146	0.23131104	0.0535	1.48388
11	644.1	6.46785	41.83313528	0.65244	0.39191374	0.1536	2.53484
12	644.2	6.46801	41.83514349	0.71341	0.56338796	0.31741	3.644
13	677.8	6.51885	42.49543478	0.77439	0.75338347	0.56759	4.9112
14	678.4	6.51974	42.50697165	0.83537	0.97558877	0.95177	6.36058
15	678.8	6.52033	42.5146581	0.89634	1.26097717	1.59006	8.22198
16	758.5	6.63134	43.97470732	0.95732	1.72036644	2.95966	11.4083
Total	8440	98.913	615.1932073	8	0	13.1989	5.96657

Berdasarkan Tabel 4. 15 dilakukan perhitungan nilai r pada distribusi LogNormal sebagai berikut.

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n(\sum_{i=1}^n y_i^2) - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}}$$

$$r = \frac{(16 * 5.966565545) - (98.91303258 * 0)}{\sqrt{16 * 615.1932073 - (98.91303258)^2} \sqrt{16 * 13.19888606 - (0)^2}}$$

$$= 0.853053615$$

4. Distribusi Weibull

Contoh Perhitungan Distribusi Weibull:

$$X_i = \ln t_i$$

$$\begin{aligned}
 &= \ln(107.5) \\
 &= 4.677490848 \\
 X_i^2 &= 4.677490848^2 \\
 &= 21.87892063 \\
 F(t_i) &= \frac{i-0.3}{n+0.4} \\
 &= \frac{1-0.3}{16+0.4} \\
 &= 0.042682927 \\
 Y_i &= \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t_i)} \right) \right] \\
 Y_i &= \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-(0.042682927)} \right) \right] \\
 &= -3.132225248 \\
 Y_i^2 &= -3.132225248^2 \\
 &= 9.810835003 \\
 X_i Y_i &= 4.677490848 * -3.132225248 \\
 &= -14.65095493
 \end{aligned}$$

Hasil Perhitungan waktu antar perbaikan Distribusi Weibull dapat dilihat pada Tabel 4.16.

Tabel 4. 16 Waktu Antar Perbaikan Distribusi Weibull

No	Ti (Menit)	Xi = ti	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	Xi.Yi
1	107.5	4.67749	21.87892063	0.04268	-3.13222525	9.81084	-14.651
2	230.2	5.43895	29.58216075	0.10366	-2.2124351	4.89487	-12.033
3	381.5	5.94411	35.33245381	0.16463	-1.71543473	2.94272	-10.197
4	438.6	6.08359	37.01004096	0.22561	-1.36383119	1.86004	-8.297
5	444.6	6.09718	37.175543	0.28659	-1.08561958	1.17857	-6.6192
6	502.3	6.2192	38.67841818	0.34756	-0.85088323	0.724	-5.2918
7	504.9	6.22436	38.74266226	0.40854	-0.64406097	0.41481	-4.0089
8	562.7	6.33275	40.10367983	0.46951	-0.45577209	0.20773	-2.8863
9	574.9	6.3542	40.37580824	0.53049	-0.27963321	0.07819	-1.7768
10	611	6.4151	41.153469	0.59146	-0.11073738	0.01226	-0.7104
11	644.1	6.46785	41.83313528	0.65244	0.05525982	0.00305	0.35741

No	Ti (Menit)	Xi = ti	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	Xi.Yi
12	644.2	6.46801	41.83514349	0.71341	0.22291859	0.04969	1.44184
13	677.8	6.51885	42.49543478	0.77439	0.39807018	0.15846	2.59496
14	678.4	6.51974	42.50697165	0.83537	0.59002281	0.34813	3.84679
15	678.8	6.52033	42.5146581	0.89634	0.81830433	0.66962	5.33561
16	758.5	6.63134	43.97470732	0.95732	1.14865763	1.31941	7.61714
Total	8440	98.913	615.1932073	8	-8.61739938	24.6724	-45.278

Berdasarkan Tabel 4. 16 dilakukan perhitungan nilai r pada distribusi Weibull sebagai berikut.

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n(\sum_{i=1}^n y_i^2) - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}}$$

$$r = \frac{(16 * -45.27765192) - (98.91303258 * -8.617399379)}{\sqrt{16 * 615.1932073 - (98.91303258)^2} \sqrt{16 * 24.67239774 - (-8.617399379)^2}}$$

$$= 0.927944608$$

Rekap hasil *index of fit* dari setiap distribusi yaitu Eksponensial, Normal, LogNormal, dan Weibull dapat dilihat pada tabel 4. 17

Tabel 4. 17 Rekapitulasi Distribusi Waktu Antar Perbaikan

Distribusi	<i>Index of Fit</i>
Eksponensial	0.7972519
Normal	0.951955689
LogNormal	0.853053615
Weibull	0.927944608

Berdasarkan tabel 4. 17, dapat diketahui bahwa distribusi Normal memiliki nilai *Index of Fit* terbesar yaitu 0.95, sehingga dapat disimpulkan bahwa distribusi Normal merupakan distribusi terpilih.

4.3.3 Uji Goodness of Fit Distribusi Waktu Kerusakan

Uji Goodness of Fit digunakan untuk menguji hipotesis terhadap distribusi yang telah dipilih, yaitu distribusi Eksponensial. Pengujian ini dilakukan berdasarkan data yang diperoleh melalui proses pemilihan dari empat jenis distribusi waktu

kerusakan. Berikut adalah *Uji Goodness of Fit* yang diterapkan pada distribusi data waktu kerusakan dengan menggunakan metode Uji Barlet. Berikut ini merupakan perhitungan *Uji Goodness of Fit* untuk komponen isolator internal:

Hipotesis untuk Uji Barlet adalah:

H_0 : data *failure* berdistribusi Eksponensial

H_1 : data *failure* tidak berdistribusi Eksponensial

Uji Statistik

$$B = \frac{2r \left[\left(\ln \left(\frac{1}{r} \right) \sum_{t=1}^r t_i \right) - \left(\left(\frac{1}{r} \right) \sum_{t=1}^r \ln t_i \right) \right]}{1 + \frac{r+1}{6r}}$$

$$B = \frac{2 \cdot 15 \left[\left(\ln \left(\frac{1}{15} \right) 64078.8 \right) - \left(\left(\frac{1}{15} \right) 114.235 \right) \right]}{1 + \frac{15+1}{6 \cdot 15}}$$

$$B = 18.95555566$$

$$X^2_{a/2; r-1} = X^2_{0.025; 14} = 26.11894805$$

$$X^2_{1-a/2; r-1} = X^2_{0.975; 14} = 5.628726103$$

Berdasarkan perhitungan diatas dapat diketahui bahwa $5.628726103 < 18.95555566 < 26.11894805$ sehingga dapat disimpulkan bahwa H_0 diterima maka data *failure* berdistribusi Eksponensial.

4.3.4 *Uji Goodness of Fit* Distribusi Waktu Perbaikan

Uji Goodness of Fit digunakan untuk menguji hipotesis terhadap distribusi yang telah dipilih, yaitu distribusi Normal. Pengujian ini dilakukan berdasarkan data yang diperoleh melalui proses pemilihan dari empat jenis distribusi waktu perbaikan. Berikut adalah *Uji Goodness of Fit* yang diterapkan pada distribusi data waktu perbaikan dengan menggunakan metode *Kolmogorov-Smirnov Test*. Perhitungan *Uji Goodness of Fit* untuk distribusi waktu perbaikan dapat dilihat pada tabel 4. 18.

Tabel 4. 18 *Uji Goodness of Fit* Waktu Antar Perbaikan

No	(ti)	(ti-tbar)^2	Zti	Fti	D1	D2
1	107.5	176400	-2.395	0.00831	0.00831	0.05419
2	230.2	88387.29	-1.6953	0.04501	-0.0175	0.07999
3	381.5	21316	-0.8325	0.20255	0.07755	-0.0151
4	438.6	7903.21	-0.5069	0.3061	0.1186	-0.0561
5	444.6	6872.41	-0.4727	0.31821	0.06821	-0.0057

No	(ti)	(ti-tbar)^2	Zti	Fti	D1	D2
6	502.3	635.04	-0.1437	0.44287	0.13037	-0.0679
7	504.9	510.76	-0.1289	0.44873	0.07373	-0.0112
8	562.7	1239.04	0.20072	0.57954	0.14204	-0.0795
9	574.9	2246.76	0.27029	0.60653	0.10653	-0.044
10	611	6972.25	0.47614	0.68301	0.12051	-0.058
11	644.1	13595.56	0.66489	0.74694	0.12194	-0.0594
12	644.2	13618.89	0.66546	0.74712	0.05962	0.00288
13	677.8	22590.09	0.85705	0.80429	0.05429	0.00821
14	678.4	22770.81	0.86047	0.80524	-0.0073	0.06976
15	678.8	22891.69	0.86276	0.80586	-0.0691	0.13164
16	758.5	53361	1.31723	0.90612	-0.0314	0.09388
Total	8440	461310.8		Dn Max	0.14204	0.13164

Untuk mendapatkan nilai Dhitung perlu memilih nilai yang paling besar antara D1 dan D2, berdasarkan tabel diatas dapat diketahui bahwa nilai D1 memiliki nilai yang lebih besar yaitu 0.14204. Untuk melakukan validasi data perlu untuk Menyusun hipotesis yang akan diuji menggunakan *Kolmogorov-Smirnov Test*.

Hipotesis

H_0 : data perbaikan berdistribusi normal

H_1 : data perbaikan tidak berdistribusi normal

$\alpha = 0.05$

Dtabel = 0.32733 (Nilai Dtabel dapat dilihat pada tabel *Kolmogorov-Smirnov* dengan nilai 16;0.05) Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai D1 lebih besar dibandingkan nilai Dtabel atau $0.14204 < 0.32733$.

Berikut ini merupakan contoh perhitungan Uji *Kolmogorov-Sminov*

a. $T_{med} = N = 16$

$$= \mu = \left(\frac{\sum_{i=1}^T ti}{n} \right)$$

$$= \mu = \left(\frac{8440}{16} \right)$$

$$= \mu = 527.5$$

$$T_{med} = e^{\mu}$$

$$T_{med} = e^{527.5}$$

$$T_{med} = 1.2312E+229$$

b. S (Standar Deviasi)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (\ln ti - \mu)^2}{n}}$$

$$S = \sqrt{\frac{461310.8}{16}}$$

$$S = 175.3683362$$

c. F(ti)

$$F(ti) = \left(\frac{ti - \mu}{\sigma} \right)$$

$$F(ti) = \left(\frac{107.5 - 527.5}{175.3683362} \right)$$

$$F(ti) = 0.00831$$

d. D₁

$$D_1 = \max \left\{ \Phi \left(\frac{ti - \mu}{s} \right) - \left(\frac{i-1}{n} \right) \right\}$$

$$D_1 = \left\{ \Phi \left(\frac{107.5 - 527.5}{175.3683362} \right) - \left(\frac{1-1}{16} \right) \right\}$$

$$D_1 = 0.00831$$

e. D₂

$$D_2 = \max \left\{ \left(\frac{i}{n} \right) - \Phi \left(\frac{ti - \mu}{s} \right) \right\}$$

$$D_2 = \left\{ \left(\frac{1}{16} \right) - \Phi \left(\frac{107.5 - 527.5}{175.3683362} \right) \right\}$$

$$D_2 = 0.054188891$$

Setelah mendapatkan nilai D₁ dan D₂, langkah selanjutnya adalah mengambil keputusan berdasarkan perbandingan antara nilai D₁ dan D₂ yang paling besar yaitu (0.14204) dan nilai D_{tabel} (0.32733). Berdasarkan perbandingan ini, dapat disimpulkan bahwa nilai DN lebih kecil daripada nilai D_{tabel}. Hal ini mengindikasikan bahwa hipotesis H₀ diterima maka data perbaikan berdistribusi normal.

4.3.5 Penentuan Nilai *Mean Time to Failure*

Berikut adalah metode untuk mendapatkan nilai tengah dari distribusi waktu kerusakan (*MTTF*) yang mengikuti distribusi Eksponensial.

$$\lambda = \frac{n}{\sum_{ti}^r ti}$$

$$\lambda = \frac{15}{64078.8}$$

$$\lambda = 0.000234087$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

$$MTTF = \frac{1}{0.000234087}$$

$$MTTF = 4271.92$$

4.3.6 Penentuan Nilai *Mean Time to Repair*

Berikut adalah metode untuk mendapatkan nilai tengah dari distribusi waktu kerusakan (*MTTR*) yang mengikuti distribusi Normal.

$$MTTR = \mu$$

$$= \mu = \left(\frac{\sum_{i=1}^r ti}{n} \right)$$

$$= \mu = \left(\frac{8440}{16} \right)$$

$$= \mu = 527.5$$

4.3.7 Perhitungan Interval Waktu penggantian pencegahan dengan Minimasi *Downtime*

Perhitungan interval preventif dengan tujuan meminimalkan *downtime* dilakukan menggunakan metode *Age Replacement*, di mana interval antar kerusakan (t_p) yang dipilih adalah interval dengan nilai *downtime* paling rendah. Berikut ini merupakan data yang diperlukan untuk menentukan interval waktu preventif dengan minimasi *downtime*:

1. Data Kerusakan Eksponensial

$$MTTF = 4271.92$$

$$\lambda = 0.000234087$$

2. Interval waktu untuk melakukan perbaikan komponen yang mengalami kerusakan

$$TF/Tp = 527.5$$

Perhitungan interval waktu perbaikan pencegahan dengan minimasi *downtime* dapat dilihat pada tabel 4 .19.

Tabel 4. 19 Perhitungan *Age Replacement*

tp	R(tp)	F(tp)	tp + Tp	M(tp)	MTTF/F(tp) + Tf	D(tp)
608.7	0.86719742	0.1328	1136.2	32167.4	3.75983	0.09902
698.7	0.849118579	0.15088	1226.2	28313.1	3.48387	0.09782
742.5	0.840457044	0.15954	1270	26776	3.36372	0.09726
746.7	0.839631143	0.16037	1274.2	26638.1	3.35263	0.09721
748.7	0.839238142	0.16076	1276.2	26573	3.34738	0.09719
764.9	0.836061605	0.16394	1292.4	26058.1	3.30542	0.09699
843	0.820915452	0.17908	1370.5	23854.2	3.11705	0.09606
996.6	0.791923181	0.20808	1524.1	20530.5	2.80291	0.09439
1122.6	0.768906564	0.23109	1650.1	18485.7	2.58889	0.09316
3666.5	0.423890894	0.57611	4194	7415.12	1.01858	0.08302
4163.1	0.37737093	0.62263	4690.6	6861.1	0.91074	0.0828
9588.9	0.105966239	0.89403	10116.4	4778.25	0.42228	0.09071
10997.4	0.076203647	0.9238	11524.9	4624.31	0.37067	0.09357
12738.9	0.05069094	0.94931	13266.4	4500.03	0.32201	0.09687
15651.6	0.025634078	0.97437	16179.1	4384.31	0.26404	0.10143
Min D(tp)						0.0828

Berdasarkan Tabel 4. 19 berikut ini merupakan contoh perhitungan interval waktu perbaikan pencegahan pada inverter 60kW untuk jenis kerusakan *Low Insulation Resistance* dengan distribusi Eskponensial untuk $tp = 527.5$

a. $F(4163.1) = 1 - e^{-\lambda t}$

$$F(4163.1) = 0.62263$$

b. $R(t) = e^{-\lambda t}$

$$R(t) = 0.37737093$$

c. $(tp+Tp) \times F(tp) = 4690.6 \times 0.62263$

$$(tp+Tp) \times F(tp) = 2920.508278$$

d. $M(4163.1) = \frac{MTTF}{1-R(tp)}$

$$M(4163.1) = \frac{4271.92}{1-0.37737093}$$

$$M(4163.1) = 6861.1$$

e. $D(tp) = \frac{Tp.R(tp)+Tf.(1-R(tp))}{(tp+Tp).R(t)+(M(tp)+Tf).(1-R(tp))}$

$$D(tp) = 0.0828$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas dapat diketahui bahwa nilai $D(tp)$ yang paling minimum adalah pada tp 4163.1, sehingga waktu interval penggantian komponen pada inverter 60kW dengan jenis kerusakan *Low Insulation Resistance* dengan kriteria minimasi *downtime* pada menit ke 4163.1 atau sama dengan 3 hari.

4.3.8 Perhitungan Interval Waktu Pemeriksaan

Berikut ini merupakan perhitungan interval waktu pemeriksaan pada inverter 60kW dengan jenis kerusakan *Low Insulation Resistance*:

1. Jumlah Pemeriksaan (k)
 - a. 1 Bulan = 30 hari kerja; 1 hari 12 jam kerja
 - b. T = 30 hari/bulan x 12 jam/hari = 360 jam/bulan
 - c. Jumlah kerusakan inverter 60kW *Low Insulation Resistance* April - Mei 2025 = 16 Kali
 - d. $K = \frac{16}{2} = 8$
2. Waktu rata – rata yang dibutuhkan untuk perbaikan
 - a. MTTR = 527.5 menit = 8.8 jam
 - b. T = 360 jam/bulan
 - c. $1/\mu = MTTR/T$
 $1/\mu = 8.8/360$
 $1/\mu = 0.024$
 $\mu = 41.67$
3. Waktu rata-rata melakukan pemeriksaan
 - a. Waktu untuk melakukan pemeriksaan t_i adalah 1 jam (60 menit)
 - b. T = 360 jam
 - c. $1/T = t_i/T$
 $= 1/360$
 $= 0.0028$
4. Perhitungan Frekuensi Pemeriksaan

$$N = \sqrt{\frac{k.i}{41.67}}$$

$$N = \sqrt{\frac{8 \times 360}{41.67}}$$

$$N = 8.3 \text{ kali/bulan}$$

5. Interval Waktu Pemeriksaan

$$t/n = 360/8.3$$

$$= 43.4 \text{ jam atau 3.6 hari (jika dihitung waktu kerja 12 jam/hari)}$$

4.3.9 Perbandingan *Reliability* Sesudah dan Sebelum Penentuan Interval Waktu Penggantian Komponen

Untuk meningkatkan keandalan sistem, salah satu langkah yang dapat dilakukan adalah dengan menentukan interval penggantian komponen berdasarkan hasil temuan kerusakan selama pelaksanaan perawatan rutin. Hasil perhitungan ini juga dapat digunakan sebagai acuan dalam penentuan jumlah minimum persediaan komponen cadangan, sehingga ketersediaannya di gudang tidak boleh kosong melebihi batas waktu yang telah ditetapkan. Adapun rumus keandalan yang digunakan dalam hal ini mengacu pada distribusi Eksponensial, yang dianggap cocok untuk menggambarkan waktu terjadinya kegagalan.

- a. *Reliability* Kondisi sebelum interval waktu penggantian

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

- b. *Reliability* Kondisi setelah interval waktu penggantian

$$R(t - nT) = e^{-\lambda(t-nT)}$$

Berikut adalah *Reliability* sebelum dan sesudah dilakukannya tindakan sebagai Berikut:

$$\lambda = 0.000234087$$

Perbandingan *Reliability* sesudah dan sebelum penentuan interval waktu penggantian komponen dapat dilihat pada tabel 4. 20.

Tabel 4. 20 Perbandingan *Reliability*

N	tp	R(tp)	R(t - nT)
0	608.7	0.86719742	0.8672

N	tp	R(tp)	R(t - nT)
0	698.7	0.849118579	0.84912
0	742.5	0.840457044	0.84046
0	746.7	0.839631143	0.83963
0	748.7	0.839238142	0.83924
0	764.9	0.836061605	0.83606
0	843	0.820915452	0.82092
0	996.6	0.791923181	0.79192
0	1122.6	0.768906564	0.76891
0	3666.5	0.423890894	0.42389
1	4163.1	0.37737093	1
1	9588.9	0.105966239	0.2808
1	10997.4	0.076203647	0.20193
1	12738.9	0.05069094	0.13433
1	15651.6	0.025634078	0.06793

Berdasarkan Tabel 4. 20 berikut ini merupakan contoh Perhitungan *Reliability*.

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$R(t) = e^{-0.000234087 * 9588.9}$$

$$R(t) = 0.105966239$$

$$R(t - nT) = e^{-\lambda(t-nT)}$$

$$R(t - nT) = e^{-0.000234087(9588.9 - (1 * 4163.1))}$$

$$R(t - nT) = 0.2808$$

Berdasarkan perhitungan diatas dapat diketahui bahwa pada tingkat ke 4163.1 sebelum dilakukan penggantian sebesar 0.105966239 dan setelah penggantian pencegahan sebesar 0.2808.

4.3.10 Perhitungan *Availability*

Perhitungan *availability* dilakukan untuk mengetahui sejauh mana tingkat keandalan sistem setelah dilakukan perawatan yang bersifat preventif. Berikut ini merupakan tahapan-tahapan dalam menghitung *availability* untuk dua jenis

kejadian, yaitu berdasarkan frekuensi pemeriksaan dan berdasarkan interval waktu penggantian secara preventif.

a. *Availability* berdasarkan frekuensi pemeriksaan

$$\begin{aligned} D(n) &= \frac{k}{\mu.n} + \frac{1}{i} \\ D(n) &= \frac{8}{41.67 \times 8.3} + \frac{1}{360} \\ D(n) &= 0.026 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A(n) &= 1 - D(n) \\ &= 1 - 0.026 \\ &= 0.974 \end{aligned}$$

b. Perhitungan ketersediaan (*Availability*) Berdasarkan interval penggantian:

$$\begin{aligned} A(tp) &= 1 - [\min D(tp)] \\ &= 1 - 0.0828 \\ &= 0.92 \end{aligned}$$

c. Perhitungan ketersediaan *Availability* total

$$\begin{aligned} \text{Availability} &= A(n) \times A(tp) \\ &= 0.97 \times 0.92 \\ &= 0.90 \end{aligned}$$

4.3.11 Perhitungan biaya

Perhitungan Biaya dilakukan untuk 2 bulan. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, frekuensi perawatan diperlukan setiap 3,6 hari sekali, sementara sebelumnya perawatan dilakukan setiap 3 bulan sekali. Perubahan dalam jadwal perawatan ini tentunya akan berdampak pada struktur biaya yang dikeluarkan. Oleh karena itu, berikut ini merupakan perhitungan biaya untuk menilai sejauh mana solusi yang diajukan sebanding dengan biaya yang harus dikeluarkan, serta untuk memastikan bahwa biaya tambahan yang muncul sejalan dengan manfaat yang diperoleh dari peningkatan frekuensi perawatan tersebut.

1. Biaya sebelum perawatan

Tarif daya (Gol. Listrik Bisnis Menengah)	: Rp. 1,114.74 kwh
Rata-rata <i>Downtime</i>	: 527.5 menit atau 8.8 jam

$$\begin{aligned}
 \text{Frekuensi Kerusakan (2 bulan)} & : 16 \text{ kejadian} \\
 \text{Daya Yang hilang} & = 60 \text{ kwh} \\
 \text{Biaya Downtime} & = \text{Rp. } 1,114.74 \text{ kwh} \times 60 \text{ kwh} \times 8.8 \times 16 \\
 & = \text{Rp. } 9,417,227.52
 \end{aligned}$$

2. Biaya Setelah Perawatan

a. Biaya Tenaga Kerja

Merupakan biaya pekerja yang melakukan tindakan *maintenance* selama terjadi, jumlah jam kerja dari pekerja merupakan 8 jam. Perhitungan biaya tenaga kerja dalam melakukan Perawatan dapat dilihat pada Tabel 4. 21.

Tabel 4. 21 Biaya Tenaga Kerja

No	Tenaga Kerja	Biaya Per Hari	Jumlah biaya/jam
1	Tenaga Teknisi	Rp. 116.000	Rp. 14.500

Berdasarkan Tabel 4. 21, biaya tenaga kerja perhari adalah Rp. 116.000 dengan perawatan dilakukan 8 kali per bulan sehingga $\text{Rp. } 116.000 \times 16 = \text{Rp. } 1.856.000$

b. Biaya Downtime

Berdasarkan nilai *Availability* yaitu 90%, kerusakan *downtime* dapat diminimalisir menjadi 10% sehingga biaya *downtime* setelah Perawatan adalah:

$$\begin{aligned}
 \text{Rata-Rata Downtime} & = (8.8 \text{ jam} \times 16 \text{ kejadian}) \times 10\% \\
 & = 14.08 \text{ jam}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Biaya Downtime} & = \text{Rp. } 1,114.74 \text{ kwh} \times 60 \text{ kwh} \times 14.08 \\
 & = \text{Rp. } 941,722.75
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{c. Biaya Total} & = \text{Rp. } 1.856.000 + \text{Rp. } 941,722.75 \\
 & = \text{Rp } 2,797,722.75
 \end{aligned}$$

Dari Perhitungan diatas diketahui bahwa perusahaan dapat menghemat sebesar Rp 6,619,504.77

BAB V

PEMBAHASAN

5.1 Analisis *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*

Pengolahan data diawali dengan penerapan metode *FMEA* untuk menentukan kerusakan yang memiliki tingkat kekritisan tertinggi. Analisis *FMEA* dilakukan untuk mengidentifikasi jenis perangkat, jenis kerusakan, serta fungsi dan dampak yang ditimbulkan dari kerusakan tersebut. Selanjutnya dilakukan perhitungan *Risk Priority Number (RPN)* yang diperoleh dari hasil perkalian antara *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*. Nilai *Severity* ditentukan berdasarkan lama *downtime* akibat kerusakan, *Occurrence* ditetapkan dari frekuensi terjadinya kerusakan, sedangkan *Detection* dinilai dari kemampuan sistem kontrol dalam mendeteksi kerusakan. Skala penilaian S, O, dan D ditetapkan berdasarkan hasil diskusi dengan staf perusahaan. Berdasarkan tabel *FMEA* dapat diketahui bahwa *device* inverter 60kW dengan jenis kerusakan *Low Insulation Resistance*, *Abnormal Residual Current*, *High String Voltage*, *Grid Loss*, *Device Volt* mendapatkan nilai RPN masing-masing yaitu sebesar 200, 90, 72, 40, dan 12. Untuk Inverter 100kW dengan jenis kerusakan *Grid Loss* mendapatkan nilai RPN sebesar 40. untuk *Device SmartLogger* dengan jenis kerusakan *Network Connection Error* mendapatkan nilai RPN sebesar 98. Berdasarkan perhitungan ini dapat disimpulkan bahwa inverter 60kW dengan jenis kerusakan *Low Resistance Insulation* merupakan kerusakan kritis. Selain itu berdasarkan tabel hasil analisis tersebut dapat diketahui bahwa apabila inverter mengalami salah satu jenis kerusakan, maka inverter akan secara otomatis melakukan *cut-off* sebagai bentuk perlindungan. Kondisi ini mengakibatkan proses konversi energi dari panel surya ke jaringan listrik terhenti, sehingga produksi energi pada PLTS akan mengalami gangguan. Mekanisme *cut-off* ini sengaja dirancang untuk mencegah kerusakan lebih parah pada komponen inverter maupun sistem kelistrikan secara keseluruhan.

5.2 Analisis *Logic Tree Analysis (LTA)*

Logic Tree Analysis (LTA) digunakan untuk menentukan tindakan perawatan yang paling tepat dengan mempertimbangkan jenis kerusakan serta pengaruhnya terhadap fungsi sistem. Metode ini bertujuan untuk mengklasifikasikan kerusakan ke dalam kategori *hidden* (kerusakan tersembunyi) atau *evident* (kerusakan yang terlihat jelas), selain itu metode ini menganalisis dampak kegagalan terhadap aspek

keselamatan, kelayakan operasi, serta biaya ekonomi. Melalui pendekatan ini strategi pemeliharaan yang paling sesuai dapat ditentukan dengan terarah.

Dalam penelitian ini analisis *LTA* difokuskan pada jenis kerusakan dengan nilai *Risk Priority Number (RPN)* tertinggi, karena kerusakan tersebut dinilai memiliki risiko paling signifikan terhadap kinerja keseluruhan sistem. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada *device* inverter 60 kW dengan jenis kerusakan *Low Insulation Resistance* dikategorikan sebagai *evident failure* yang berarti kerusakan ini dapat terdeteksi dengan jelas saat terjadi. Berdasarkan klasifikasi *LTA*, kerusakan ini termasuk ke dalam kategori A yang menandakan adanya risiko terhadap terhentinya keseluruhan sistem serta menimbulkan risiko keselamatan operasional. Risiko-risiko keselamatan yang dapat muncul akibat kerusakan *low insulation resistance* antara lain:

1. Sengatan Listrik
2. Korsleting dan Kebakaran
3. Kerusakan Peralatan Lain

Meskipun kerusakan *Low Insulation Resistance* memiliki potensi risiko keselamatan seperti sengatan listrik, korsleting dan kebakaran, serta kerusakan pada peralatan lain, inverter telah dilengkapi dengan sistem *cut-off* otomatis. Sistem ini berfungsi memutus aliran listrik ketika terdeteksi alarm kerusakan sehingga risiko keselamatan dapat dihindari. Namun aktivasi sistem *cut-off* ini juga menyebabkan terhentinya operasi inverter yang pada akhirnya menimbulkan *downtime* dan berdampak pada penurunan *performance ratio* pembangkit.

5.3 Analisis Task Selection

Tahapan ini bertujuan untuk menentukan jenis tugas pemeliharaan yang paling sesuai dan efektif dalam mencegah maupun mendeteksi kegagalan sebelum kegagalan tersebut menimbulkan dampak yang lebih besar terhadap keselamatan, keandalan sistem, maupun biaya operasional. Proses pemilihan ini berkaitan erat dengan tiga pendekatan utama dalam strategi pemeliharaan, yaitu *Time Directed (TD)*, *Condition Directed (CD)*, dan *Failure Finding (FF)*.

Berdasarkan hasil analisis *Task Selection* pada perangkat inverter berkapasitas 60 kW dengan jenis kerusakan *Low Insulation Resistance*, tindakan perawatan yang dinilai paling tepat adalah *Time Directed (TD)*. Pendekatan ini dipilih karena

kerusakan *Low Insulation Resistance* dapat diminimalkan risikonya melalui pemeriksaan dan perawatan rutin pada interval waktu tertentu. Dengan penerapan *Time Directed*, potensi kegagalan yang berisiko menyebabkan kerusakan pada sistem dapat diidentifikasi lebih dini, sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum kerusakan berkembang menjadi lebih parah dan mengganggu kinerja sistem secara keseluruhan.

Contoh penerapan *task* pada strategi ini meliputi pengukuran *Insulation Resistance (IR Test)*, pemantauan isolasi secara *real-time*, pengecekan visual dan pembersihan inverter maupun komponennya, verifikasi sistem *grounding*, serta pemantauan kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembapan. Penerapan langkah-langkah ini memungkinkan deteksi dini potensi kerusakan sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum gangguan berkembang dan menurunkan kinerja sistem.

5.4 Analisis Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Kerusakan dan Perbaikan

Perhitungan selang waktu antar kerusakan yaitu estimasi lamanya suatu komponen dapat bekerja secara normal sebelum mengalami kerusakan. Selain itu ditentukan durasi perbaikan, yakni berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki komponen tersebut setelah terjadi kerusakan. Selanjutnya dilakukan proses analisis data dengan menentukan jenis distribusi yang paling sesuai yaitu distribusi dengan nilai *index of fit* atau tingkat kecocokan tertinggi. Dalam analisis ini dilakukan pengujian menggunakan empat jenis distribusi yaitu distribusi Eksponensial, Normal, LogNormal, dan Weibull untuk mengetahui model distribusi yang paling merepresentasikan pola data kerusakan yang ada.

Berdasarkan perhitungan dapat diketahui nilai masing-masing distribusi pada waktu antar kerusakan. Distribusi eksponensial, normal, lognormal, dan weibull masing-masing mendapatkan nilai sebesar 0.96, 0.86, 0.90, 0.85 berdasarkan nilai-nilai tersebut dapat disimpulkan bahwa data antar waktu kerusakan berdistribusi eksponensial. Distribusi eksponensial merupakan distribusi yang menggambarkan kejadian kegagalan dengan laju kerusakan konstan sepanjang umur komponen. Hal ini berarti probabilitas kerusakan pada periode awal pemakaian sama besarnya dengan probabilitas kerusakan pada periode akhir. Karakteristik ini menunjukkan bahwa kegagalan bersifat acak (*random failure*) dan tidak dipengaruhi oleh faktor keausan atau umur pakai.

Berdasarkan perhitungan dapat diketahui nilai masing-masing distribusi pada waktu antar perbaikan. Distribusi eksponensial, normal, lognormal, dan weibull masing-masing mendapatkan nilai sebesar 0.8, 0.95, 0.85, 0.93 berdasarkan nilai-nilai tersebut dapat disimpulkan bahwa data antar waktu perbaikan berdistribusi Normal. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar waktu perbaikan berada di sekitar nilai rata-rata, dengan sedikit perbaikan yang berlangsung jauh lebih cepat atau jauh lebih lama dari rata-rata tersebut. Karakteristik distribusi normal memungkinkan perusahaan melakukan estimasi yang cukup akurat terhadap kebutuhan sumber daya dan perencanaan *downtime*, karena variasi waktu perbaikan dapat diperkirakan melalui deviasi standar. Dengan demikian, strategi perencanaan pemeliharaan dapat mengacu pada nilai rata-rata waktu perbaikan (*MTTR*) sebagai acuan utama.

Setelah menentukan distribusi terpilih untuk data waktu antar kerusakan dan perbaikan, langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian *Goodness of Fit*, uji ini dilakukan untuk mengevaluasi apakah distribusi yang dipilih sesuai dengan data yang diharapkan. Hal ini penting karena distribusi yang digunakan harus mencerminkan nilai-nilai teoritis yang telah ditetapkan sebelumnya. Pada distribusi eksponensial digunakan uji Bartlett, sedangkan distribusi normal dan log normal diuji dengan metode *Kolmogorov-Smirnov*, dan untuk distribusi Weibull dilakukan pengujian menggunakan metode *Mann*.

Berdasarkan perhitungan diatas, untuk data *failure* berdistribusi eksponensial sehingga dilakukan uji Bartlett. Berdasarkan uji tersebut dapat diketahui Nilai $X1 < B < X2$ atau $5.628726103 < 18.95555566 < 26.11894805$ sehingga dapat disimpulkan bahwa H_0 diterima maka data *failure* berdistribusi Eksponensial. Sedangkan untuk data waktu antar perbaikan berdistribusi normal sehingga dilakukan uji *Kolmogorov-Smirnov*. Dalam melakukan uji ini untuk mendapatkan nilai Dhitung perlu memilih nilai yang paling besar antara D1 dan D2, serta untuk mendapatkan nilai Dtabel dapat dilihat pada tabel *Kolmogorov-Smirnov* dengan nilai 16;0.05 yang artinya nilai Dtabel adalah 0.32733. Setelah mendapatkan nilai D1 dan D2, langkah selanjutnya adalah mengambil keputusan berdasarkan perbandingan antara nilai D1 dan D2 yang paling besar yaitu (0.14204) dan nilai Dtabel (0.32733). Berdasarkan perbandingan ini, dapat disimpulkan bahwa nilai

DN lebih kecil daripada nilai D_{tabel} . Hal ini mengindikasikan bahwa hipotesis H_0 diterima maka data perbaikan berdistribusi normal.

5.5 *MTTF dan MTTR*

MTTF adalah rata-rata waktu operasi suatu komponen sebelum mengalami kegagalan, khususnya pada komponen yang dianggap paling kritis. Sementara itu *MTTR* mengacu pada rata-rata durasi yang dibutuhkan untuk melakukan perbaikan terhadap komponen yang mengalami kerusakan hingga dapat kembali berfungsi normal. Kedua parameter ini berperan penting dalam menentukan efektivitas strategi pemeliharaan dan perencanaan waktu henti (*downtime*) yang optimal.

Berdasarkan perhitungan distribusi untuk data waktu antar kerusakan merupakan berdistribusi Eksponensial sehingga dalam mencari data *MTTF* menggunakan rumus eksponensial dengan rumus $\frac{1}{\lambda}$ untuk nilai λ didapatkan dari $\frac{n}{\sum_{ti}^r ti}$ berdasarkan perhitungan tersebut dapat diketahui nilai *MTTF* sebesar 4271.92 menit atau dibulatkan menjadi 3 hari.

Untuk nilai waktu antar perbaikan merupakan berdistribusi Normal sehingga dalam mencari nilai *MTTR* menggunakan rumus rata-rata dari data waktu antar perbaikan. Berdasarkan perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa nilai *MTTR*nya sebesar 527.5 menit atau 8.8 jam.

5.6 Analisis perhitungan interval waktu penggantian atau acuan cadangan komponen serta perhitungan interval waktu pemeriksaan.

Perhitungan ini bertujuan untuk menentukan waktu ideal penggantian suatu komponen sebelum mengalami kegagalan, sehingga dapat meminimalkan total waktu henti (*downtime*) dari keseluruhan sistem. Selain itu, dilakukan pula analisis mengenai frekuensi pemeriksaan komponen untuk mendeteksi potensi kerusakan sedini mungkin sebelum benar-benar terjadi.

Berdasarkan hasil analisis data diperoleh bahwa interval optimal untuk penggantian komponen pada jenis kerusakan *low insulation resistance* khususnya kabel atau konektor adalah sebesar 4163,1 menit atau sekitar 3 hari. Nilai ini diperoleh dari hasil perhitungan yang tercantum dalam tabel analisis. Pada waktu tersebut nilai

minimum dari fungsi $D(tp)$ tercatat sebesar 0,0828. Sebagai komponen yang tergolong kritis, kabel atau konektor dapat diganti atau diperbaiki.

Meskipun pendekatan *age replacement* tidak harus diterapkan secara langsung karena distribusi kerusakan bersifat eksponensial, nilai tersebut dapat dimanfaatkan sebagai dasar estimasi siklus kebutuhan perbaikan. Oleh karena itu interval 3 hari dapat digunakan untuk merencanakan kebutuhan persediaan (*spare part*), sehingga komponen seperti konektor atau kabel yang berisiko rusak dapat disediakan terlebih dahulu di gudang, mengantisipasi kebutuhan penggantian. Strategi ini memungkinkan sistem tidak mengalami downtime signifikan akibat keterlambatan logistik.

Selanjutnya interval pemeriksaan untuk kabel/konektor diperoleh sebesar 43,4 jam atau 3.6 hari jika 12 jam kerja/hari.. Dengan kata lain kegiatan pemeriksaan dilakukan secara rutin sekitar 8,3 kali dalam satu bulan. Tujuan dari pemeriksaan berkala ini adalah untuk menghindari kerusakan mendadak yang dapat menyebabkan inverter berhenti saat sedang dibutuhkan, sekaligus untuk memperpanjang masa operasional komponen.

Sebelumnya PT SEI menetapkan jadwal penggantian atau perawatan komponen setiap tiga bulan sekali. Meskipun interval penggantian yang lebih singkat ini menyebabkan peningkatan biaya perawatan, manfaat yang diperoleh jauh lebih besar. Dengan pelaksanaan perawatan yang tepat, keandalan inverter serta kelancaran proses produksi dapat lebih terjaga. Kegiatan pemeliharaan yang disarankan untuk dilakukan secara rutin mencakup:

1. Pengukuran *Insulation Resistance (IR Test)*
2. Monitoring Isolasi Kabel
3. Pengecekan Visual dan pembersihan inverter atau komponen
4. Pengecekan jalur *Grounding*
5. Pemantauan kondisi lingkungan (Suhu & Kelembapan)

5.7 Perbandingan *Reliability* dan *Availability* serta perhitungan Biaya

Perhitungan *Reliability* digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana efektivitas strategi perawatan yang diterapkan, sedangkan perhitungan *Availability* dilakukan

untuk mengetahui sejauh mana tingkat keandalan sistem setelah dilakukan perawatan yang bersifat preventif.

Perhitungan *Reliability* ini rumus keandalan yang digunakan dalam hal ini mengacu pada distribusi Eksponensial, yang dianggap cocok untuk menggambarkan waktu terjadinya kegagalan. Didapatkan nilai *Reliability* sebelum dilakukan penggantian komponen pada waktu 9588.9 adalah sebesar 0.1 dan setelah dilakuakn jadwal penggantian komponen pada waktu 9588.9 adalah sebesar 0.28. Berdasarkan perhitungan tersebut dapat diketahui penggantian pencegahan ini efektif dalam meningkatkan niali *Reliability*.

Dalam melakukan perhitungan *Availability* dilakukan perhitungan Berdasarkan frekuensi pemeriksaan dan didapatkan nilai *Availability* sebesar 0.974 serta dilakukan perhitungan nilai *availability* Berdasarkan interval penggantian dan didapatkan nilai 0.92. Berdasarkan perhitungan tersebut dicari *Availability* total dengan mengkalikan 0.974 dengan 0.92, didapatkan nilai *Availability* total sebeasr 0.90. Berdasarkan perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa penelitian ini efektif dalam meningkatkan *Availability* total.

Perhitungan biaya dilakukan dengan tujuan untuk menilai kelayakan penerapan solusi yang diusulkan dari sisi finansial. Analisis dimulai dengan menghitung kerugian akibat *downtime* sebelum penerapan tindakan perawatan yang mencapai Rp 9,417,227.52. Setelah penerapan strategi perawatan, kerugian akibat *downtime* turun menjadi Rp 2.797,722.75. Dengan demikian implementasi solusi ini diproyeksikan mampu memberikan penghematan sebesar Rp 6,619,504.77. Hasil ini menunjukkan bahwa secara ekonomi, langkah perawatan yang diusulkan berpotensi memberikan manfaat signifikan bagi perusahaan melalui pengurangan kerugian operasional.

5.8 Tantangan Dalam Menerapkan Rekomendasi Solusi

Dalam penerapan strategi perawatan *inverter*, terdapat beberapa tantangan yang perlu diperhatikan perusahaan. Apabila perusahaan belum memiliki alat khusus untuk melakukan pengujian *insulation resistance (IR test)*, maka diperlukan investasi tambahan yang berpotensi menambah biaya awal implementasi serta memerlukan pertimbangan matang dalam perencanaan anggaran. Selain itu, interval perawatan yang cukup sering menuntut pengaturan jadwal pemeliharaan

yang lebih efisien agar tidak mengganggu alur kerja teknisi maupun aktivitas operasional lain yang sedang berlangsung.

Di sisi lain frekuensi perawatan yang tinggi juga dapat meningkatkan beban kerja teknisi sehingga berisiko menimbulkan kelelahan yang pada akhirnya dapat memengaruhi kualitas pemeriksaan maupun pelaksanaan perawatan itu sendiri. Kondisi ini menegaskan perlunya perencanaan yang komprehensif, baik dari sisi teknis maupun manajerial, agar strategi perawatan dapat berjalan optimal. Dengan demikian perusahaan tidak hanya mampu menjaga keandalan *inverter* tetapi juga memastikan bahwa kegiatan operasional tetap berjalan secara efisien dan berkelanjutan.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil analisis *Failure Mode Effect and Analysis (FMEA)*, kerusakan yang tergolong paling kritis pada Inverter berkapasitas 60 kW adalah kerusakan *Low Insulation Resistance* pada komponen kabel atau konektor. Kerusakan ini memperoleh nilai *Risk Priority Number (RPN)* tertinggi, yaitu 200, yang diperoleh dari hasil perkalian antara tingkat keparahan (*severity*) sebesar 10, tingkat kemungkinan kejadian (*occurrence*) sebesar 10, dan kemampuan deteksi (*detection*) sebesar 2. Nilai RPN yang tinggi ini menunjukkan bahwa kerusakan tersebut memiliki dampak signifikan terhadap kinerja sistem.
2. Berdasarkan hasil analisis *Task Selection*, kerusakan *Low Insulation Resistance* pada inverter 60 kW disarankan ditangani dengan strategi *Time Directed* melalui pemeriksaan dan perawatan rutin pada interval tertentu. Aktivitas yang dilakukan meliputi pengukuran *Insulation Resistance (IR Test)*, pemantauan isolasi secara *real-time*, pengecekan visual dan pembersihan inverter maupun komponennya, verifikasi sistem *grounding*, serta pemantauan kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembapan. Penerapan langkah-langkah ini memungkinkan deteksi dini potensi kerusakan sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum gangguan berkembang dan menurunkan kinerja sistem.
3. Berdasarkan data kerusakan dan perbaikan Inverter 60 kW dengan mode kegagalan *Low Insulation Resistance*, diperoleh nilai *Mean Time to Failure (MTTF)* sebesar 4.271,92 menit atau sekitar 3 hari, sedangkan *Mean Time to Repair (MTTR)* tercatat sebesar 527,5 menit. Dari hasil pengolahan data ditetapkan bahwa interval penggantian komponen kritis sekaligus sebagai acuan perencanaan kebutuhan persediaan (*spare part*) adalah 4.163,1 menit atau kurang lebih 3 hari. Sementara itu interval pemeriksaan untuk kerusakan *Low Insulation Resistance* pada komponen kabel/konektor direncanakan dilakukan setiap 3.6 hari sekali.

6.2 Saran

1. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan penggunaan data dengan periode pengamatan yang lebih panjang akan semakin memperkaya hasil analisis, memungkinkan identifikasi pola kerusakan secara lebih detail, serta memberikan

gambaran tren jangka panjang yang dapat memperkuat strategi pemeliharaan yang telah direkomendasikan.

2. Penelitian selanjutnya juga dapat mempertimbangkan faktor-faktor lain yang berpotensi memengaruhi keandalan komponen, seperti kondisi lingkungan operasi (suhu, kelembaban, dan debu), kualitas pasokan listrik, beban kerja peralatan, serta kebiasaan operasional di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Costa, T., Silva, F., & Ferreira, L. P. (2017). Improve the extrusion process in tire production using Six Sigma methodology. *Procedia Manufacturing*, Vol. 13, No. 1, 1104-1111.
- Ebeling, C. E. (1999). *An introduction to reliability and maintainability engineering*. ISBN 0-10: 007018852-1
- Fransiscus, H., Cynthia, P. J., & Isabella, S. A. (2014). Implementasi Metode Six Sigma DMAIC untuk Mengurangi Paint Bucket Cacat di PT X. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, Vol. 3, No. 2, 53-63.
- Ghiffari Ibrahim, A. H. (2013, Juli). Analisis Six Sigma Untuk Mengurangi Jumlah Cacat di Stasiun Kerja Sablon (Studi Kasus: CV. Miracle). *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional, 1. Reka Integra*, Vol. 1, No. 1, 153-165
- Indrawati Sri, M. R. (2015). Manufacturing Continuous Improvement Using Lean Six Sigma: An Iron Ores Industry Case Application. *Procedia Manufacturing*, Vol. 4, No. 2, 528-534.
- Jardine, A. (1997). *Maintenance Replacement dan Reliability. Theory and Application*. CRC Press. ISBN 0-10: 036707605-5
- Kussuma, & Fendy, M. (2014). Analisis Kualitas Produk Pakan Ternak Dengan Metode Six Sigma Di PT. Charoen Pokphand Indonesia (Tbk). *JTM*, Vol. 2, No. 3, 54-62.
- Putri, & Fatma, C. (2010). Upaya Menurunkan Jumlah Cacat Produk Shuttlecock Dengan Metode Six Sigma. *Widya Teknika*, Vol.18, No. 2, 14-23.
- Sucipto, Sulistyowati, D. P., & Anggarini, S. (2017). Pengendalian Kualitas Pengalengan Jamur dengan Metode Six Sigma di PT Y, Pasuruan, Jawa Timur. *Jurnal Teknologi dan Manajemen Agroindustri*, Vol. 6, No. 1, 1-7.
- Tan, H. T. (2012). Metode DMAIC Sebagai Solusi Pengendalian Kualitas Produksi Sepatu Tambang: Studi Kasus PT Mangul Jaya-Bekasi. *ComTech*, Vol. 3, No. 1, 509-523.
- Vitho, I., Ginting, E., & Anizar. (2013). Aplikasi Six Sigma Untuk Menganalisis Faktor-faktor Penyebab Kecacatan Produk Crumb Rubber Sir 20 Pada Pt. XYZ. *e-Jurnal Teknik Industri FT USU*, Vol 3, No. 4, 23-28.
- Walpole, R. E. (1995). *Ilmu Peluang dan Statistika untuk Insinyur dan Ilmuwan (Edisi ke-4)*. Bandung: ITB. ISBN - 979-9299-45-4
- Wisnubroto, P., & Rukmana, A. (2015). Pengendalian Kualitas Produk dengan Pendekatan Six Sigma dan Analisis Kaizen serta New Seven Tools Sebagai Usaha Pengurangan Kecacatan Produk. *Jurnal Teknologi*, Vol. 8, No. 1, 65-74.
- Yuliana, Nasution, Y. N., & Wasono. (2017). Penggunaan Metode Kaizen Pada Tahap Improve Dalam Six Sigma (Studi Kasus: Perusahaan Air Minum Dalam Kemasan (AMDK) Merk RAMA Produksi PT Ranam Mahakam Indonesia). *Jurnal Eksponensial. EKSPONENSIAL*, Vol. 8, No. 1, 81-86.

LAMPIRAN

A-Dataset kerusakan Inverter

Alarm Severity	Plant Name	Device	Device Name	SN	Alarm ID	Alarm Name	Clearance Time	Occurrence Time	Downtime (Menit)
Major	IFPRO BAKAUHENI 189 kWp	Inverter		ES2160069979	2051	Abnormal Residual Current	2025-05-24 09:45:53	2025-05-24 09:44:50	1
					2051		2025-05-24 08:54:19	2025-05-24 08:53:18	1
					2051		2025-05-08 09:10:39	2025-05-08 08:53:51	16.8
					2051		2025-05-06 06:19:12	2025-05-06 06:18:08	1.1
					2051		2025-05-04 18:04:54	2025-05-04 09:09:49	535.1
					2051		2025-05-04 07:52:31	2025-05-04 07:33:32	19
					2051	Device Fault	2025-04-20 12:35:05	2025-04-20 10:15:11	139.9
				2064	2051		2025-05-08 08:35:52	2025-05-08 08:34:49	1
				2064	2051		2025-04-12 17:25:21	2025-04-12 17:21:21	4
				2032	2051	Grid Loss	2025-05-16 17:27:10	2025-05-16 17:26:48	0.4
				2032	2051		2025-05-16 09:22:53	2025-05-16 09:22:31	0.4
				2032	2051		2025-05-15 12:44:13	2025-05-15 12:43:42	0.5
				2032	2051		2025-05-15 11:40:22	2025-05-15 11:38:16	2.1
				2032	2051		2025-05-15 11:14:59	2025-05-15 11:13:05	1.9
				2032	2051		2025-05-15 11:10:54	2025-05-15 11:10:02	0.9
				2032	2051		2025-05-15 10:12:56	2025-05-15 10:07:09	5.8
				2032	2051		2025-05-15 10:06:29	2025-05-15 10:06:08	0.4
				2032	2051		2025-05-10 17:14:10	2025-05-10 17:13:57	0.2
				2032	2051		2025-05-10 17:13:46	2025-05-10 17:13:24	0.4
				2032	2051		2025-05-08 13:53:45	2025-05-08 13:53:34	0.2
				2032	2051		2025-05-08 11:16:43	2025-05-08 11:03:27	13.3
				2032	2051		2025-05-08 10:55:01	2025-05-08 10:54:39	0.4
				2032	2051		2025-04-23 15:45:16	2025-04-23 15:45:03	0.2
				2032	2051		2025-04-23 14:48:30	2025-04-23 14:48:08	0.4
				2032	2051		2025-04-16 04:27:24	2025-04-16 04:26:24	1
				2032	2051		2025-04-04 11:13:53	2025-04-04 11:13:11	0.7
				2001	2051		2025-05-08 09:09:50	2025-05-08 08:58:44	11.1

A-Dataset Kerusakan Inverter (Lanjutan)

				2032	2025-04-23 14:48:30	2025-04-23 14:48:08	0.4
				2032	2025-04-16 04:27:24	2025-04-16 04:26:24	1
				2032	2025-04-04 11:13:53	2025-04-04 11:13:11	0.7
				2001	2025-05-08 09:09:50	2025-05-08 08:58:44	11.1
				2001	2025-04-23 12:18:53	2025-04-23 12:17:26	1.5
				2001	2025-04-23 12:03:52	2025-04-23 12:02:18	1.6
				2001	2025-04-23 12:01:58	2025-04-23 12:01:07	0.8
				2001	2025-04-23 11:55:53	2025-04-23 11:48:20	7.6
				2001	2025-04-23 11:42:10	2025-04-23 11:23:48	18.4
				2001	2025-04-23 11:21:51	2025-04-23 11:19:50	2
				2001	2025-04-23 11:19:39	2025-04-23 11:18:56	0.7
				2001	2025-04-23 09:18:11	2025-04-23 09:16:25	1.8
				2062	2025-04-03 21:58:41	2025-04-03 09:20:09	758.5
				2062	2025-04-04 17:42:18	2025-04-04 08:07:21	574.9
				2062	2025-04-12 19:10:39	2025-04-12 08:59:39	611
				2062	2025-04-13 16:11:59	2025-04-13 06:49:19	562.7
				2062	2025-04-16 16:02:37	2025-04-16 05:18:30	644.1
				2062	2025-04-19 20:44:19	2025-04-19 13:25:46	438.6
				2062	2025-04-20 12:34:48	2025-04-20 10:47:16	107.5
				2062	2025-04-21 18:01:37	2025-04-21 07:17:23	644.2
				2062	2025-04-22 13:52:53	2025-04-22 06:28:17	444.6
				2062	2025-04-23 12:51:00	2025-04-23 06:29:27	381.5
				2062	2025-05-04 18:04:54	2025-05-04 09:42:33	502.3
				2062	2025-05-05 14:52:18	2025-05-05 06:27:26	504.9
				2062	2025-05-12 17:59:37	2025-05-12 06:41:12	678.4
				2062	2025-05-13 10:18:33	2025-05-13 06:28:18	230.2
				2062	2025-05-22 17:55:17	2025-05-22 06:37:29	677.8
				2062	2025-05-23 17:58:56	2025-05-23 06:40:09	678.8
			Inverter 60kW	Total			9233.6

B-Tabel *Chi-Square* untuk Distribusi Eksponensial

Degrees of Freedom	Chi-Square (χ^2) Distribution									
	Area to the Right of Critical Value									
	0.995	0.99	0.975	0.95	0.90	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005
1	—	—	0.001	0.004	0.016	2.706	3.841	5.024	6.635	7.879
2	0.010	0.020	0.051	0.103	0.211	4.605	5.991	7.378	9.210	10.597
3	0.072	0.115	0.216	0.352	0.584	6.251	7.815	9.348	11.345	12.838
4	0.207	0.297	0.484	0.711	1.064	7.779	9.488	11.143	13.277	14.860
5	0.412	0.554	0.831	1.145	1.610	9.236	11.071	12.833	15.086	16.750
6	0.676	0.872	1.237	1.635	2.204	10.645	12.592	14.449	16.812	18.548
7	0.989	1.239	1.690	2.167	2.833	12.017	14.067	16.013	18.475	20.278
8	1.344	1.646	2.180	2.733	3.490	13.362	15.507	17.535	20.090	21.955
9	1.735	2.088	2.700	3.325	4.168	14.684	16.919	19.023	21.666	23.589
10	2.156	2.558	3.247	3.940	4.865	15.987	18.307	20.483	23.209	25.188
11	2.603	3.053	3.816	4.575	5.578	17.275	19.675	21.920	24.725	26.757
12	3.074	3.571	4.404	5.226	6.304	18.549	21.026	23.337	26.217	28.299
13	3.565	4.107	5.009	5.892	7.042	19.812	22.362	24.736	27.688	29.819
14	4.075	4.660	5.629	6.571	7.790	21.064	23.685	26.119	29.141	31.319
15	4.601	5.229	6.262	7.261	8.547	22.307	24.996	27.488	30.578	32.801
16	5.142	5.812	6.908	7.962	9.312	23.542	26.296	28.845	32.000	34.267
17	5.697	6.408	7.564	8.672	10.085	24.769	27.587	30.191	33.409	35.718
18	6.265	7.015	8.231	9.390	10.865	25.989	28.869	31.526	34.805	37.156
19	6.844	7.633	8.907	10.117	11.651	27.204	30.144	32.852	36.191	38.582
20	7.434	8.260	9.591	10.851	12.443	28.412	31.410	34.170	37.566	39.997
21	8.034	8.897	10.283	11.591	13.240	29.615	32.671	35.479	38.932	41.401
22	8.643	9.542	10.982	12.338	14.042	30.813	33.924	36.781	40.289	42.796
23	9.260	10.196	11.689	13.091	14.848	32.007	35.172	38.076	41.638	44.181
24	9.886	10.856	12.401	13.848	15.659	33.196	36.415	39.364	42.980	45.559
25	10.520	11.524	13.120	14.611	16.473	34.382	37.652	40.646	44.314	46.928
26	11.160	12.198	13.844	15.379	17.292	35.563	38.885	41.923	45.642	48.290
27	11.808	12.879	14.573	16.151	18.114	36.741	40.113	43.194	46.963	49.645
28	12.461	13.565	15.308	16.928	18.939	37.916	41.337	44.461	48.278	50.993
29	13.121	14.257	16.047	17.708	19.768	39.087	42.557	45.722	49.588	52.336
30	13.787	14.954	16.791	18.493	20.599	40.256	43.773	46.979	50.892	53.672
40	20.707	22.164	24.433	26.509	29.051	51.805	55.758	59.342	63.691	66.766
50	27.991	29.707	32.357	34.764	37.689	63.167	67.505	71.420	76.154	79.490
60	35.534	37.485	40.482	43.188	46.459	74.397	79.082	83.298	88.379	91.952
70	43.275	45.442	48.758	51.739	55.329	85.527	90.531	95.023	100.425	104.215
80	51.172	53.540	57.153	60.391	64.278	96.578	101.879	106.629	112.329	116.321
90	59.196	61.754	65.647	69.126	73.291	107.565	113.145	118.136	124.116	128.299
100	67.328	70.065	74.222	77.929	82.358	118.498	124.342	129.561	135.807	140.169

C-Tabel *Kolmogorov-Sminov* untuk Distribusi Normal

$n \setminus \alpha$	0.001	0.01	0.02	0.05	0.1	0.15	0.2
1		0.99500	0.99000	0.97500	0.95000	0.92500	0.90000
2	0.97764	0.92930	0.90000	0.84189	0.77639	0.72614	0.68377
3	0.92063	0.82900	0.78456	0.70760	0.63604	0.59582	0.56481
4	0.85046	0.73421	0.68887	0.62394	0.56522	0.52476	0.49265
5	0.78137	0.66855	0.62718	0.56327	0.50945	0.47439	0.44697
6	0.72479	0.61660	0.57741	0.51926	0.46799	0.43526	0.41035
7	0.67930	0.57580	0.53844	0.48343	0.43607	0.40497	0.38145
8	0.64098	0.54180	0.50654	0.45427	0.40962	0.38062	0.35828
9	0.60846	0.51330	0.47960	0.43001	0.38746	0.36006	0.33907
10	0.58042	0.48895	0.45662	0.40925	0.36866	0.34250	0.32257
11	0.55588	0.46770	0.43670	0.39122	0.35242	0.32734	0.30826
12	0.53422	0.44905	0.41918	0.37543	0.33815	0.31408	0.29573
13	0.51490	0.43246	0.40362	0.36143	0.32548	0.30233	0.28466
14	0.49753	0.41760	0.38970	0.34890	0.31417	0.29181	0.27477
15	0.48182	0.40420	0.37713	0.33760	0.30397	0.28233	0.26585
16	0.46750	0.39200	0.36571	0.32733	0.29471	0.27372	0.25774
17	0.45440	0.38085	0.35528	0.31796	0.28627	0.26587	0.25035
18	0.44234	0.37063	0.34569	0.30936	0.27851	0.25867	0.24356