

**USULAN *INTERVAL* WAKTU PERAWATAN DAN PENENTUAN UMUR
EKONOMIS PADA MESIN *CURRENT TRANSFORMER (CT)* MENGGUNAKAN
METODE *RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM)* DAN *EQUIVALENT
ANNUAL COST (EAC)* DI PLN UPT Pekanbaru
(Studi Kasus: PT PLN UPT Pekanbaru)**

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 : Fadillah Aditya Maulana
No. Mahasiswa : 21522385

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

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, 11 September 2025



(Fadillah Aditya Maulana)
21522385

SURAT BUKTI PENELITIAN



UIP3B SUMATERA
UPT PEKANBARU

Nomor : 1343/STH.01.04/F22070000/2025
Lampiran : -
Sifat : Segera - Biasa
Hal : Konfirmasi Penelitian

29 Agustus 2025

Kepada

Yth. UNIVERSITAS ISLAM
INDONESIA
JL. KALIURANG KM. 14,5
DI
YOGYAKARTA

Menindaklanjuti surat dari Universitas Islam Indonesia Nomor: 61/penelitian
TA/Sek.Prodi.S1/T1/VIII/2024 Perihal Permohonan Ijin Penelitian Tugas Akhir, maka dengan ini
kami sampaikan bahwa :

No.	Nama	NIM	Prodi
1.	Fadillah Aditya Maulana	21522385	Teknik Industri

Benar bahwa Mahasiswa tersebut telah melakukan penelitian tugas akhir di PT PLN
(Persero) UPT Pekanbaru.

Demikian disampaikan atas perhatian dan kerjasamanya diucapkan terima kasih.

MANAGER UNIT PELAKSANA
TRANSMISI PEKANBARU,

ANDRI CANDRA KRISTIAN

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

**USULAN *INTERVAL* WAKTU PERAWATAN DAN PENENTUAN UMUR
EKONOMIS PADA MESIN *CURRENT TRANSFORMER (CT)* MENGGUNAKAN
METODE *RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM)* DAN *EQUIVALENT
UNIFORM ANNUAL COST (EAC)* DI PT. PLN
(Studi Kasus: PT. PLN UIP3BS)**

TUGAS AKHIR**Disusun Oleh :**

Nama : Fadillah Aditya Maulana
No. Mahasiswa : 21522385

Yogyakarta, 23 September 2025

Dosen Pembimbing

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

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

USULAN *INTERVAL* WAKTU PERAWATAN DAN PENENTUAN UMUR EKONOMIS PADA MESIN *CURRENT TRANSFORMER (CT)* MENGGUNAKAN METODE *RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM)* DAN *EQUIVALENT UNIFORM ANNUAL COST (EAC)* DI PT. PLN
(Studi Kasus: PT. PLN UIP3BS)

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Fadillah Aditya Maulana
No. Mahasiswa : 21522385

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, 11 September 2025

Tim Penguji

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

Ketua

Dian Janari, S.T., M.T.

Anggota I

Elanjati Worldaimi, S.T., M.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

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur ke hadirat Allah SWT, penulis mengucapkan terima kasih atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penelitian tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan lancar dan penuh keberkahan. Segala puji dan rasa syukur penulis haturkan kepada-Nya, yang senantiasa memberikan kekuatan dan petunjuk dalam setiap langkah perjalanan akademik ini.

Penulis juga ingin menyampaikan terima kasih yang mendalam kepada kedua orang tua tercinta, yang dengan kasih sayang dan doa tiada henti selalu mendukung, baik secara moral maupun materil. Tanpa dukungan dan pengorbanan mereka, penulis tidak akan mampu mencapai titik ini.

Ucapan terima kasih yang tulus juga penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan dan semangat selama proses menempuh pendidikan strata-I, mulai dari sahabat, keluarga besar, hingga rekan-rekan sejawat.

Khususnya, penulis sangat berterima kasih kepada Dosen Pembimbing tercinta, Ir. Winda Nur Cahyo, S.T., M.T., Ph.D., IPM, atas bimbingan, arahan, dan motivasinya yang tak ternilai harganya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Terima kasih pula disampaikan kepada Dosen Penguji 1, Dian Janari, S.T., M.T., dan Dosen Penguji 2, Elanjati Worldaimi, S.T., M.Sc., yang telah memberikan masukan dan kritik yang membangun demi kesempurnaan karya ini.

Semoga segala bantuan dan doa yang diberikan mendapatkan balasan terbaik dari Allah SWT. Amin.

MOTTO

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.” (QS. Asy-Syarh: 6)

KATA PENGANTAR

Bissmillahirrahmanirohim

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Alhamdulillah, segala puja puji dan syukur kita limpahkan atas kehadiran Allah SWT. Yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga bagi diri saya sendiri sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir di PLN UPT Pekanbaru dengan baik dan lancar. Semoga kita semua juga mendapat syafa'at dari beliau (Nabi Besar Muhammad SAW) di Yaumul Mahsyar nanti. Amin.

Saya selaku penulis menerima berbagai seluruh masukan dan saran serta dukungan dan semangat dari berbagai pihak didalam PLN UPT Pekanbaru maupun luar perusahaan. Oleh sebab itu pada kesempatan kali ini, izinkan saya selaku penulis Laporan Tugas Akhir ini mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang terlibat dalam pelaksanaan pengkajian Tugas Akhir ini, terkhusus pada

1. Bapak Prof. Dr. Hari Purnomo, MT., IPU., ASEAN. ENG sebagai Pimpinan Fakultas (Dekan) Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
2. Bapak Dr. Drs. Imam Djati Widodo, M.Eng.SC selaku Ketua Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, dan Universitas Islam Indonesia
3. Bapak Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM. Selaku Ketua Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Ir. Winda Nur Cahyo, S.T., M.T., Ph.D., IPM selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir.
5. Kedua Orang tua dan juga keluarga yang secara tulus dan tiada hentinya mengirimkan doa untuk penulis serta senantiasa memberikan dukungan moral dan material.
6. Bapak Manajer, Bapak Ervan, Bapak Herikson, dan Bapak Gumayo selaku tim bidang perencanaan PT. PLN (Persero) UIP3B Sumatera
7. 21522185 sebagai *support system* yang selalu menemani dan memberikan motivasi, informasi, serta dukungan penuh arti dan semangat kepada saya selaku penulis Laporan Tugas Akhir ini.
8. 21522205 sebagai Partner Tugas Akhir, teman seperjuangan yang telah menemani dan memberikan motivasi serta usulan untuk penulis selama Tugas Akhir dan Penulisan Laporan Tugas Akhir berlangsung.
9. Teman-teman Ngan-Ngong, circle kita, A9.V2 dan 21522177 yang telah mendukung dan memberikan informasi seputar Tugas Akhir.

Penulis Menyadari bahwa didalam merangkai penyusunan Laporan Tugas Akhir ini masih dalam tahap belum sempurna dan masih banyak kekurangan. Semoga Laporan Tugas Akhir ini dapat dipergunakan sebagaimana semestinya agar bermanfaat bagi saya selaku penulis dan bagi pembaca dan juga peneliti selanjutnya. Amin amin Yaa Robbal 'Aalamiin.

Wassalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh

ABSTRAK

Keandalan sistem tenaga listrik merupakan elemen fundamental dalam memenuhi kebutuhan energi konsumen secara berkelanjutan. Di PLN UPT Pekanbaru, *Current Transformer* (CT) memegang peran krusial sebagai alat ukur dan proteksi yang harus terjaga kualitas dan keandalannya. Namun, data operasional menunjukkan pola kerusakan yang mengkhawatirkan akibat sistem pemeliharaan yang belum optimal. Empat *subsistem* utama CT berkontribusi signifikan terhadap *downtime*, dengan *Current Carrying Circuit* menjadi penyumbang terbesar sebesar 80%. Permasalahan ini berpotensi menimbulkan kerugian finansial yang cukup besar akibat biaya penggantian yang tinggi serta hilangnya potensi penjualan energi. Penelitian ini bertujuan untuk merumuskan interval waktu perawatan *Preventive* yang tepat agar dapat meminimalkan risiko kerusakan dan *downtime* pada *Current Transformer*. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan menentukan interval waktu perawatan preventif yang optimal pada mesin *Current Transformer* (CT) menggunakan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM), Menganalisis dan menentukan umur ekonomis mesin *Current Transformer* (CT) dengan pendekatan *Equivalent Uniform Annual Cost* (EUAC), Memberikan usulan strategi perawatan berbasis RCM dan EUAC untuk mengoptimalkan biaya pemeliharaan dan meminimalkan risiko kerugian akibat kerusakan mesin. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat membantu meningkatkan efektivitas dan efisiensi pemeliharaan, sekaligus menekan biaya operasional yang timbul akibat kerusakan komponen. Pendekatan yang digunakan dalam studi ini adalah kombinasi metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dan *Equivalent Annual Cost* (EAC). Melalui RCM, komponen-komponen kritis diidentifikasi dengan menggunakan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) sehingga dapat difokuskan pada perawatan dan penggantian yang paling berpengaruh terhadap keandalan sistem. Sementara itu, EAC dimanfaatkan untuk mengevaluasi umur ekonomis aset berdasarkan analisis biaya tahunan yang seragam, sehingga dapat menentukan waktu penggantian yang paling ekonomis. Hasil analisis menunjukkan bahwa data *time to failure* dan *time to repair* paling sesuai dimodelkan dengan distribusi lognormal. Berdasarkan model tersebut, interval penggantian pencegahan optimal untuk komponen *Current Carrying Circuit* adalah 7,55 bulan. Pendekatan ini mampu secara signifikan menekan *downtime* tak terencana dan menghasilkan efisiensi biaya, yang ditunjukkan dengan penurunan biaya pemeliharaan sebesar 45,64% atau penghematan sebesar Rp3.428.571. Selain itu, analisis EAC menunjukkan bahwa umur ekonomis optimal CT adalah 23 tahun dengan nilai EAC minimum sebesar Rp226.681.316. Penggunaan CT melebihi batas umur ini akan meningkatkan biaya tahunan secara signifikan, sehingga keputusan penggantian tepat waktu sangat diperlukan.

Kata Kunci: *Current Transformer, Reliability Centered Maintenance (RCM), Equivalent Annual Cost (EAC), Umur Ekonomis, Interval Perawatan.*

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	2
SURAT BUKTI PENELITIAN.....	3
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	4
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	5
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	6
MOTTO.....	7
KATA PENGANTAR	8
ABSTRAK.....	9
DAFTAR ISI.....	10
DAFTAR TABEL.....	13
DAFTAR GAMBAR	14
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Manfaat Penelitian.....	6
1.5 Batasan Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Kajian Literatur	8
2.2 Landasan Teori	12
2.2.1 Manajemen Aset.....	12
2.2.2 <i>Reliability Centered Maintenance (RCM)</i>	13
2.2.3 <i>Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)</i>	14
2.2.4 <i>Logic Tree Analysis (LTA)</i>	15
2.2.5 <i>Task selection</i>	17
2.2.4 <i>Reliability (Keandalan)</i>	18
2.2.6 Distribusi Probabilitas	19
2.2.7 <i>Indeks of Fit dan Goodnes of Fit Test</i>	21
2.2.8 Parameter Estimasi Distribusi	23
2.2.9 <i>Mean Time To Repair (MTTR)</i>	24
2.2.10 <i>Mean Time to Failure (MTTF)</i>	25
2.2.11 <i>Age Replacement</i>	26
2.2.12 Frekuensi Pemeriksaan.....	26
2.2.13 Ekonomi Teknik	28
2.2.14 <i>Equivalent Annual Cost (EAC)</i>	28
2.2.15 Pengelompokan Biaya Dalam penentuan <i>EAC</i>	28
2.2.16 <i>Minimum Attractive Rate of Return (MARR)</i>	29
BAB III METODE PENELITIAN	30
3.1 Subjek, Objek dan Lokasi Penelitian.....	30
3.2 Diagram Alur Penelitian.....	30
3.2.1 Identifikasi Masalah	34
3.2.2 Penentuan Metode	34
3.2.3 Rumusan Masalah dan Tujuan Penelitian	35
3.2.4 Pengumpulan Data	35
3.2.5 Pengolahan Data Kualitatif <i>Reliability Centered Maintenance (RCM)</i>	35

3.2.6	Pengolahan Data Kuantitatif (RCM)	37
3.2.7	Pengolahan Data Kuantitatif (<i>Age Replacement</i>).....	38
3.2.8	Pengolahan Data Kuantitatif <i>Equivalent Annual Cost (EAC)</i>	39
3.2.9	Analisis dan Pembahasan	40
3.2.10	Kesimpulan dan Saran.....	40
BAB IV	PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA	41
4.1	Latar Belakang Perusahaan	41
4.1.1	Profil Singkat Perusahaan	41
4.1.2	Waktu Kerja	42
4.2	Pengumpulan Data.....	42
4.2.1	Data Waktu Antar Kerusakan Komponen.....	42
4.3	Pengolahan Data.....	44
4.3.1	Penentuan Komponen Kritis	44
4.4	Pengolahan Data Kualitatif (penentuan Tindakan Perawatan).....	54
4.4.1	<i>Task Selection</i> (Pemeliharaan Tindakan)	54
4.5	Pengolahan Data Kuantitatif (penentuan Interval Pemeriksaan dan Penentuan Komponen Kritis).....	57
4.5.1	Penentuan Komponen Kritis	57
4.5.2	Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Kerusakan (<i>Time to Failure</i>)	58
4.5.3	Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Perbaikan (<i>Time to Repair</i>)	64
4.5.4	Uji Goodness of Fit pada Distribusi Data Waktu Kerusakan (<i>Time to Failure</i>)... ..	70
4.5.5	Uji Goodness of Fit pada Distribusi data Waktu Perbaikan (<i>Time to Repair</i>).....	71
4.5.6	Perhitungan parameter Dari Distribusi Waktu Kerusakan (<i>Time to Failure</i>)	72
4.5.7	Perhitungan Parameter Dari Distribusi Waktu Perbaikan (<i>Time to Repair</i>)	72
4.5.8	Penentuan Nilai Tengah Dari Distribusi Data Waktu Kerusakan (<i>Mean to Failure</i>)	73
4.5.9	Penentuan Nilai tengah dari Distribusi Data Waktu Perbaikan (<i>Mean to repair</i>). ..	73
4.5.10	Perhitungan Waktu Penggantian Pencegahan Dengan Minimasi <i>Downtime</i>	73
4.5.11	Perhitungan Interval Waktu Pemeriksaan	75
4.5.12	Perhitungan Total Biaya Perawatan dan Biaya Usulan Perawatan	76
4.6	Pengolahan Data Menggunakan <i>EAC</i>	79
4.6.1	Perhitungan Nilai <i>MARR (Minimum Attractive Rate of Return)</i>	79
4.6.2	Biaya Tahunan atas Investasi (<i>Annual Equivalent Cost of Investment</i>).....	80
4.6.3	Perhitungan <i>Equivalent Annual Cost</i> Investasi Awal.....	80
4.6.4	Perhitungan Biaya Operasional dan Perawatan CT	82
4.6.5	Penentuan Nilai <i>Equivalent Annual Cost (EAC)</i>	83
BAB V	HASIL DAN PEMBAHASAN	86
5.1	Penentuan Komponen Kritis.....	86
5.1.1	<i>Functional Block Diagram (FBD)</i>	86
5.1.2	<i>Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)</i>	87
5.1.3	<i>Logic Tree Analysis (LTA)</i>	88
5.2	Pengolahan Data Kualitatif RCM	88
5.2.1	<i>Task Selection</i>	88
5.3	Pengolahan Data Kuantitatif RCM	89
5.4	Pengolahan Data <i>EAC</i>	90
BAB VI	PENUTUP	91
6.1	Kesimpulan.....	91

6.2 Saran.....	92
DAFTAR PUSTAKA	93
LAMPIRAN.....	95

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kajian Literatur	10
Tabel 4. 1 Waktu Kerja	42
Tabel 4. 2 Data Waktu Antar Kerusakan komponen	42
Tabel 4. 3 <i>Failure Mode & Effect Analysis</i>	45
Tabel 4. 4 <i>Logic Tree Analysis</i>	50
Tabel 4. 5 <i>Task Selection</i>	54
Tabel 4. 6 Penentuan Komponen Kritis	57
Tabel 4. 7 Time to Failure Komponen <i>Current Carrying Circuit</i>	58
Tabel 4. 8 Distribusi Normal MTTF	59
Tabel 4. 9 Distribusi Lognormal MTTF.....	61
Tabel 4. 10 Distribusi Eksponensial.....	62
Tabel 4. 11 Distribusi Weibull MTTF	63
Tabel 4. 12 Hasil <i>Indeks of Fit</i>	64
Tabel 4. 13 Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Perbaikan MTTR.....	64
Tabel 4. 14 Distribusi Normal MTTR.....	66
Tabel 4. 15 Distribusi Lognormal MTTR	67
Tabel 4. 16 Distribusi Eksponensial MTTR.....	68
Tabel 4. 17 Distribusi Weibull MTTR	69
Tabel 4. 18 <i>Hasil Indeks of Fit</i>	70
Tabel 4. 19 uji Goodness of Fit pada Distribusi Data Waktu Kerusakan MTTF.....	70
Tabel 4. 20 Uji Goodness of Fit pada Distribusi data Waktu Perbaikan MTTR	71
Tabel 4. 21 Distribusi Lognormal MTTF.....	74
Tabel 4. 22 Biaya Tenaga Kerja.....	76
Tabel 4. 23 Biaya Material.....	77
Tabel 4. 24 Biaya Kerugian Selama Kerusakan.....	77
Tabel 4. 25 Biaya Penggantian terencana/penggantian pencegahan (Cp)	77
Tabel 4. 26 Biaya penggantian tidak terencana/penggantian kerusakan (Cf)	78
Tabel 4. 27 Biaya penggantian komponen sebelum adanya usulan perawatan pencegahan....	78
Tabel 4. 28 Biaya Preventive Miantenance Menggunakan <i>Age Replacement</i>	78
Tabel 4. 29 Biaya perawatan yang diusulkan setelah menggunakan <i>Preventive maintenance</i>	78
Tabel 4. 30 Biaya Penggantian.....	79
Tabel 4. 31 Biaya Investasi Tahunan 30 Periode	81
Tabel 4. 32 Biaya Operasional dan Perawatan CT.....	82
Tabel 4. 33 Kalkulasi <i>EAC</i> dari periode pertama hingga periode ke-30.....	84

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 <i>Current Transformator (CT)</i>	2
Gambar 1. 2 <i>Diagram Pareto Current Transformer (CT)</i>	2
Gambar 2. 1 <i>Alur Logic Tree Analysis</i>	16
Gambar 3. 1 <i>Alur penelitian</i>	32
Gambar 4. 1 <i>Functional Block Diagram</i>	45
Gambar 4. 2 <i>Analisis EAC</i>	85

BAB I PENDAHULUAN

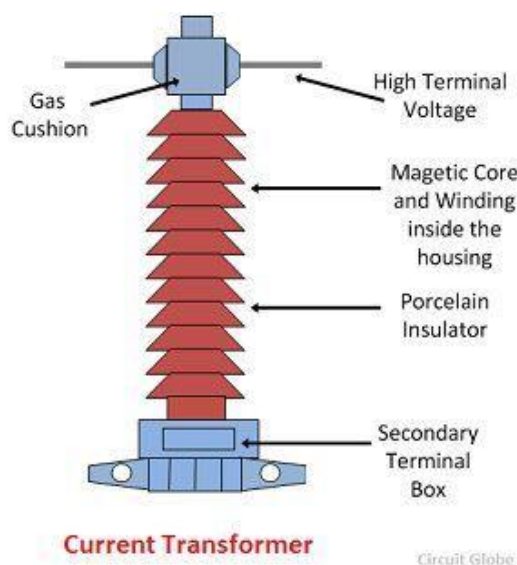
1.1 Latar Belakang

Fungsi utama sistem tenaga listrik adalah memenuhi kebutuhan energi listrik konsumen secara berkelanjutan. Sebelum listrik didistribusikan ke pelanggan, tegangan diatur terlebih dahulu melalui transformator yang terpasang di gardu induk maupun gardu distribusi. *Transformator* memegang peran krusial dalam sistem tenaga listrik karena berfungsi menstabilkan pasokan listrik agar tetap tersedia tanpa interupsi. Alat ini bekerja dengan cara mengubah nilai tegangan listrik dari satu level ke level lainnya, sehingga memungkinkan penyaluran daya yang efisien melalui jaringan transmisi dan distribusi. Mengingat *transformator* merupakan komponen vital yang terhubung langsung dengan jaringan listrik, pemeliharaan dan pengujian rutin mutlak diperlukan untuk memastikan kinerjanya optimal dan terhindar dari gangguan yang dapat menyebabkan kegagalan operasional. Selain itu, karena harganya relatif mahal, mengganti *transformator* bukanlah solusi ekonomis untuk meningkatkan keandalan sistem. Kerusakan pada *transformator* dapat mengakibatkan pemadaman listrik, yang tidak hanya mengganggu pasokan energi tetapi juga menimbulkan kerugian finansial akibat penurunan penjualan energi (kWh). Untuk meminimalkan risiko tersebut, langkah pencegahan seperti pengujian berkala sangat diperlukan guna memastikan *transformator* beroperasi sesuai spesifikasi dan usia pakainya dalam berbagai kondisi lapangan (Sulistiyono & Azis, 2016).

PLN UPT Pekanbaru merupakan perusahaan yang bergerak di bidang transmisi tenaga listrik, khususnya dalam pengelolaan infrastruktur jaringan *interkoneksi* di wilayah Sumatera. Sebagai bagian integral dari sistem ketenagalistrikan nasional, perusahaan ini bertugas menyalurkan daya listrik tegangan tinggi dari pembangkit ke gardu induk dan jaringan distribusi, memastikan pasokan listrik yang andal bagi industri, bisnis, dan masyarakat. Salah satu aset kritis dalam operasionalnya adalah transformator daya, yang berperan penting dalam menstabilkan tegangan sebelum didistribusikan ke konsumen.

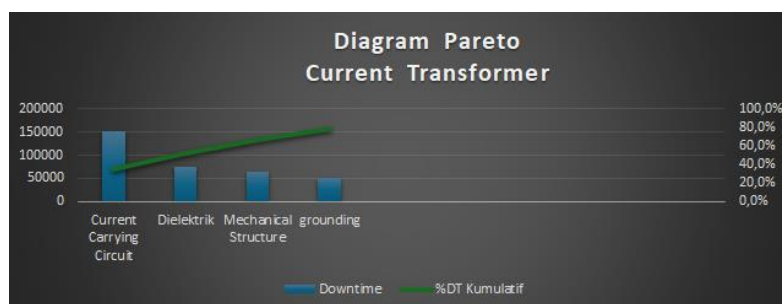
Transformator Arus (Current Transformer/CT) merupakan suatu peralatan yang ada pada sistem transmisi ataupun distribusi energi listrik yang berada di gardu induk. *Transformator Arus* berfungsi untuk menurunkan arus besar pada tegangan tinggi atau menengah menjadi arus kecil pada tegangan rendah yang dipakai untuk pengukuran dan proteksi dan mengisolasi

rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer serta memungkinkan standarisasi rating arus untuk peralatan sisi sekunder. *Transformator Arus* merupakan suatu peralatan yang digunakan untuk sebagai alat ukur dan untuk melindungi rele pada industri yang memakai tegangan tinggi di mana *Transformator CT* ini mempunyai fasilitas pengukuran yang aman untuk mengukur jumlah arus yang besar dan juga dengan tegangan yang tinggi. Untuk menjaga kualitas dan kehandaan dari suatu *Transformator Arus* ini itu diperlukan perawatan secara terjadwal agar dapat bekerja dengan baik sesuai dengan fungsinya dalam keadaan beroperasi. Perawatan dan pemeliharaan yang terjadwal dengan baik dapat meminimalisasi gangguan dan kerusakan serta dapat memperpanjang umur dari *Transformator Arus*.



Gambar 1. 1 *Current Transformator (CT)*

Berdasarkan data aktual dari PLN UPT Pekanbaru, terdapat empat sub sistem utama pada *CT* yang berkontribusi terhadap total *downtime*. Hasil analisis menunjukkan bahwa sub sistem *Current Carrying Circuit* merupakan penyumbang terbesar terhadap *downtime* mencapai 80%, dengan total kontribusi kumulatif mencapai lebih dari 37,6%.



Gambar 1. 2 Diagram Pareto *Current Transformer (CT)*

Berdasarkan visualisasi melalui grafik pareto di atas menguatkan temuan ini, di mana mayoritas kerusakan terkonsentrasi pada tiga komponen tersebut. Fakta ini menunjukkan bahwa fokus perawatan perlu diarahkan pada komponen-komponen kritis ini untuk meningkatkan efektivitas pemeliharaan dan mengurangi kerugian akibat gangguan sistem kelistrikan.

Permasalahan kerusakan *Current Transformer (CT)* dalam lima tahun terakhir menunjukkan pola yang mengkhawatirkan, terutama disebabkan oleh lemahnya sistem pemeliharaan. Masalah utama muncul melalui beberapa tahapan kritis: pertama, isolasi *Current Transformer* yang mengalami degradasi akibat tidak dilakukannya pengujian dielectric strength secara berkala, menyebabkan kebocoran arus dan panas berlebih. Kedua, korosi pada terminal yang terjadi karena tidak adanya inspeksi visual rutin dan aplikasi anti-corrosive coating, mengakibatkan gangguan konduktivitas. Ketiga, akumulasi kontaminan pada bagian winding yang tidak pernah dibersihkan memicu thermal stress dan mempercepat penurunan kinerja. Keempat, drift akurasi pengukuran yang tidak terdeteksi karena absennya program kalibrasi periodik. Dampak gangguan ini bersifat multilevel dan sangat merugikan perusahaan: (1) Secara finansial, biaya penggantian *Current Transformer* yang mencapai Rp 200 juta per unit menjadi beban berat, belum termasuk biaya downtime selama perbaikan. (2) Pada aspek operasional, kegagalan *Current Transformer* menyebabkan malfungsi sistem proteksi yang berpotensi memicu cascade failure di jaringan transmisi. (3) Dari sisi layanan, pemadaman listrik yang diakibatkannya merusak reputasi perusahaan dan berpotensi menimbulkan tuntutan dari pelanggan industri. (4) Secara teknis, kerusakan beruntun ini memperpendek *life cycle* aset dan meningkatkan risiko *catastrophic failure*. Solusi komprehensif harus mencakup: (a) Implementasi *predictive maintenance* dengan *periodic infrared thermography* dan *dissolved gas analysis*, (b) Pelatihan khusus teknisi untuk *advanced diagnostic techniques*, (c) Digitalisasi manajemen aset melalui *IoT-enabled condition monitoring*, serta (d) Alokasi anggaran khusus untuk komponen kritis. Transformasi dari *reactive* menuju smart maintenance ini tidak hanya akan mengurangi kerugian, tetapi juga meningkatkan *reliability* sistem sebesar 40-60% berdasarkan *best practice* industri.

Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan untuk memperbaiki kinerja perawatan adalah *Reliability Centered Maintenance (RCM)*. *RCM* merupakan suatu metode yang berfokus pada penentuan strategi pemeliharaan guna memastikan peralatan dapat berfungsi secara

optimal sesuai dengan desain awalnya (Alrifaey et al., 2020). Tujuan utama *RCM* adalah menjaga keandalan suatu sistem melalui identifikasi risiko kegagalan, evaluasi konsekuensinya, serta penetapan langkah perawatan yang paling efektif. Dengan menerapkan *RCM*, perusahaan dapat meningkatkan efisiensi pemeliharaan *Preventive*, menghilangkan tindakan yang kurang bermanfaat, serta mendorong peningkatan produktivitas, keamanan, dan kinerja sistem secara keseluruhan (Geisbush & Ariaratnam, 2023). Metode *RCM* sering kali dikombinasikan dengan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), yakni teknik analisis kegagalan yang memprioritaskan masalah berdasarkan perhitungan *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi pada suatu mesin. FMEA sendiri merupakan pendekatan sistematis untuk menilai desain suatu sistem dengan mengidentifikasi berbagai kemungkinan kegagalan, baik pada komponen maupun sistem secara keseluruhan, serta menganalisis pengaruhnya terhadap stabilitas operasional (Muhtadi & Puspitasari, 2021).

Beberapa studi terdahulu telah mengimplementasikan metode *Reliability Centered Maintenance* (*RCM*) guna meningkatkan keandalan dan kinerja mesin di berbagai industri. Salah satunya adalah penelitian berjudul "*Perancangan Interval Perawatan Mesin Secara Preventive maintenance Dengan Metode Reliability Centered Maintenance II (RCM II)*" yang dilakukan pada PT Gunung Selamat Lestari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *RCM* mampu mendeteksi komponen-komponen kritis sekaligus menetapkan jadwal perawatan yang lebih efektif. Sebelumnya, PT Gunung Selamat Lestari hanya menerapkan pendekatan *Run To Failure* (RTF), di mana perbaikan baru dilakukan setelah mesin mengalami kerusakan. Namun, setelah dilakukan analisis menggunakan *RCM*, diperoleh rekomendasi interval perawatan berbasis prediksi waktu kegagalan, yaitu: *flexible coupling* setiap 262 jam, *liner cylinder* setiap 316 jam, dan *steer arm* setiap 246 jam. Temuan ini membuktikan bahwa *RCM* memberikan solusi perawatan yang lebih efisien dibandingkan metode tradisional, sehingga disarankan agar perusahaan dapat mengadopsinya dalam strategi pemeliharaan mesin (Simbolon et al., 2020).

Dalam penelitian ini, selain menerapkan metode *RCM*, penulis juga memanfaatkan metode *Equivalent Uniform Annual Cost* (EUAC) untuk mengevaluasi umur ekonomis CT. penelitian ini juga menggunakan metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) untuk menentukan umur ekonomis CT. Metode *EAC* juga biasa disebut dengan metode EUAC, bergantung pada literatur atau ranah keilmuan yang digunakan. EUAC merupakan teknik analisis ekonomi yang berfungsi membandingkan biaya tahunan rata-rata dari berbagai pilihan investasi dengan masa

pakai berbeda. Metode ini mengkonversi seluruh biaya dan pendapatan selama siklus proyek menjadi nilai tahunan seragam, sehingga memudahkan analisis dan perbandingan antar alternatif investasi yang memiliki durasi operasi tidak sama. Pemilihan *EUAC* dalam penelitian ini didasarkan pada beberapa keunggulan, antara lain kemudahan implementasi dan ketersediaan data yang lebih baik dibandingkan metode *Life Cycle Cost (LCC)*. Dengan pendekatan *EUAC*, perusahaan dapat menentukan waktu penggantian peralatan secara lebih akurat, menjaga kelangsungan operasi, serta meningkatkan efisiensi dan produktivitas secara menyeluruh (Yusuf & Budiawan, 2024).

Merujuk pada permasalahan yang telah diuraikan, studi ini memiliki dua tujuan utama: (1) merumuskan interval pemeliharaan yang paling efektif, dan (2) menetapkan usia ekonomis *Current Transformer (CT)* di PLN UPT Pekanbaru melalui penerapan metode *Reliability Centered Maintenance (RCM)* dan *Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC)*. Implementasi kedua metode ini diharapkan dapat memberikan dua manfaat strategis bagi perusahaan, yaitu peningkatan reliabilitas sistem tenaga listrik dan optimalisasi biaya pemeliharaan serta investasi peralatan *Current Transformer*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah atau *problem statement* adalah fokus dari perhatian penulis dalam menjalankan proses penelitiannya. Rumusan masalah merupakan gambaran yang jelas tentang isu yang ingin diselesaikan atau diperbaiki melalui penelitian dimana rumusan masalah adalah kelanjutan dari latar belakang masalah. Rumusan masalah ditulis dalam bentuk pertanyaan. Rumusan masalah dari suatu penelitian dimungkinkan lebih dari 1 (satu) rumusan. Berikut adalah contoh rumusan masalah:

1. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan interval waktu perawatan *Preventive* yang optimal pada mesin *Current Transformer (CT)* di PLN UPT PEKANBARU menggunakan metode *Reliability Centered Maintenance (RCM)*.
2. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan menentukan umur ekonomis mesin *Current Transformer (CT)* dengan pendekatan *Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC)*.
3. Penelitian ini akan mengusulkan strategi perawatan berbasis *RCM* dan *EUAC* yang dapat membantu mengoptimalkan biaya pemeliharaan serta meminimalkan risiko kerugian akibat kerusakan pada mesin *Current Transformer (CT)*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian menjawab rumusan masalah. Berikut adalah contoh tujuan penelitian:

1. Menentukan interval waktu perawatan *Preventive* yang tepat untuk mesin *Current Transformer* (CT) nebggunakan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM)
2. Menilai dan menentukan umur ekonomis mesin *Current Transformer* (CT) dengan pendekatan *Equivalent Uniform Annual* (EUAC).
3. Memberikan usulan perbaikan sttrategi pemeliharaan guna meningkatkan efisiensi biaya dan mengurangi risiko downtime/kerusakan akibat kegagalan mesin *Current Transformer* (CT).

1.4 Manfaat Penelitian

Berikut merupakan manfaat yang akan dicapai berdasarkan tujuan penelitian yang telah dijabarkan sebagai berikut:

1. Manfaat Bagi Perusahaan

Penelitian ini memberikan manfaat bagi PLN UPT PEKANBARU dalam mengidentifikasi variabel – variabel kunci yang memengaruhi kinerja aset. Temuan penelitian dapat dijadikan sebagai dasar untuk mengevaluasi faktor – faktor penentu keberhasilan implementasi manajemen aset, sekaligus memperkaya pemahaman praktis mengenai pengolahan aset perusahaan.

2. Manfaat Bagi Peneliti

Studi ini menjadi media penerapan dan pengembangan keilmuan di bidang manajemen aset. Penelitian memungkinkan peneliti untuk menganalisis variabel – variabel yang menentukan kesuksesan penerapan manajemen aset, khususnya dalam konteks operasional PT. PLN UIP3B SUMATERA.

3. Manfaat Akademis

Hasil penelitian ini dapat menjadi bahan referensi bagi penelitian – penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan implementasi sistem manajemen aset, khususnya disektor utilitas dan ketenagalistrikan.

1.5 Batasan Penelitian

Berikut merupakan Batasan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengambilan data dilakukan pada karyawan PLN UPT PEKANBARU pada divisi logistik & aset sebagai pihak yang bertanggung jawab sebagai pengelola aset *Current Transformer (CT)*.
2. Proses pengambilan data dilakukan pada bulan Maret – April 2025.
3. Pengambilan data dilakukan dengan cara wawancara dan pengambilan dokumen file online kepada stakeholder terkait.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Literatur

Pada pendekatan Literatur, beberapa studi sebelumnya yang relevan dengan topik penelitian dijelaskan secara ringkas. Temuan dari penelitian – penelitian terdahulu tersebut kemudian dianalisis dan dijadikan sebagai dasar untuk memperkuat argumen dalam pembahasan penelitian ini. Adapun beberapa kajian literatur yang terkait adalah sebagai berikut:

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Widya Elisa dan Nurvadillah (2023) mengilustrasikan efektivitas pendekatan kuantitatif deskriptif dalam mengoptimalkan pemeliharaan aset. Studi tersebut mengintegrasikan metode Reliability Centered Maintenance (RCM) dengan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) untuk menganalisis downtime dan mengidentifikasi komponen kritis pada crane di PT. XYZ. Hasil analisis kuantitatif, termasuk perhitungan Mean Time To Repair (MTTR) sebesar 0,495 jam dan Mean Time Between Failure (MTBF) sebesar 1440,33 jam, membuktikan bahwa RCM dan FMEA efektif dalam menentukan interval perawatan yang optimal. Secara konkret, penelitian ini merekomendasikan interval perawatan preventive untuk komponen carbon brush setiap 56 hari. Implementasi dari rekomendasi ini menunjukkan bahwa pendekatan tersebut mampu meminimalkan gangguan operasional dan meningkatkan produktivitas secara signifikan. Temuan dari penelitian ini menjadi landasan penting bagi penelitian yang Anda lakukan, karena menunjukkan bahwa kombinasi RCM dan FMEA adalah metodologi yang valid dan telah terbukti berhasil dalam konteks pemeliharaan industri.

Penelitian Alfian dan Etik (2021) mengilustrasikan penerapan metode Reliability Centered Maintenance (RCM) untuk mengoptimalkan interval perawatan pada mesin injection moulding di PT. X. Studi ini mengintegrasikan analisis kualitatif melalui Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) untuk mengidentifikasi komponen-komponen kritis, diikuti dengan analisis kuantitatif yang mencakup perhitungan Mean Time Between Failure (MTBF) dan Mean Time To Repair (MTTR). Hasil penelitian ini membuktikan bahwa metode RCM efektif dalam mempertahankan keandalan mesin dengan menetapkan interval perawatan yang berbasis pada data kegagalan aktual. Temuan ini menunjukkan bahwa perawatan preventive yang terencana dapat secara signifikan mengurangi downtime tak terduga serta menekan biaya

perbaikan darurat. Dengan demikian, studi ini menjadi landasan yang kuat bahwa RCM adalah pendekatan yang valid untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan operasional, sejalan dengan tujuan penelitian Anda.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Elena dan Ferando (2020) berfokus pada evaluasi biaya siklus hidup aset melalui metode anuitas stokastik, yang memiliki konsep serupa dengan Equivalent Annual Cost (EUAC). Studi ini mengintegrasikan analisis probabilitas dan metode Monte Carlo untuk mengidentifikasi skenario pemeliharaan dan penggantian komponen bangunan yang paling optimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa interval waktu pemeliharaan dan masa pakai komponen memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi biaya tahunan. Temuan ini menegaskan bahwa penentuan waktu yang tepat untuk melakukan pemeliharaan atau penggantian komponen dapat secara langsung memengaruhi efisiensi finansial dan daya tahan aset. Dengan demikian, studi ini memberikan landasan teoritis yang kuat bahwa analisis biaya berbasis waktu, seperti EUAC, merupakan alat yang vital dalam pengambilan keputusan strategis terkait pemeliharaan.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Fikri dan Widjajati (2020) bertujuan untuk menganalisis distribusi waktu downtime dan Time Between Failure pada komponen mesin Air Separation Plant. Selain itu, studi ini juga menghitung Mean Time To Repair dan Mean Time Between Failure (MTBF), yang merupakan langkah kunci dalam menentukan interval penggantian komponen optimal menggunakan pendekatan Age Replacement. Temuan dari penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan metode Age Replacement terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi biaya pemeliharaan. Hasil analisis menunjukkan adanya potensi pengurangan total biaya perawatan tahunan hingga 69,23%. Hal ini menegaskan bahwa penentuan interval penggantian yang optimal dapat secara signifikan menekan downtime dan biaya perawatan, memberikan landasan kuat untuk penelitian Anda.

Penelitian Geisbush dan Ariaratnam (2023) mengilustrasikan penerapan metode Reliability Centered Maintenance (RCM) untuk mengembangkan strategi pemeliharaan pada infrastruktur kritis, yaitu pipa air beton prategang. Studi ini menggunakan analisis numerik dan pemodelan untuk memprediksi kerusakan kawat seiring waktu, yang berfungsi untuk menetapkan ambang batas memulai perencanaan dan penjadwalan kegiatan pemeliharaan secara proaktif. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemeliharaan proaktif yang dihasilkan dari pendekatan RCM dapat mengurangi biaya pemeliharaan hingga 25% dan memperpanjang

umur aset. Secara spesifik, penelitian ini mengembangkan model pemeliharaan yang efektif serta menetapkan ambang batas kerusakan kawat sebesar 55% yang diperkirakan akan tercapai pada Agustus 2025. Hal ini menunjukkan bahwa RCM adalah alat yang efektif untuk mengelola aset berumur panjang dan bernilai tinggi.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Yusuf dan Budiawan (2024) menggunakan metode Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC) untuk menganalisis umur ekonomis mesin penggiling kedelai. Studi ini bertujuan untuk menghitung biaya tahunan rata-rata mesin selama periode operasionalnya, yang melibatkan analisis biaya operasional, pemeliharaan, dan downtime. Hasil analisis menunjukkan bahwa umur ekonomis optimal mesin tersebut adalah 3 tahun, dengan total biaya minimum sebesar Rp19.239.848. Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan metode EUAC memungkinkan perusahaan untuk mengambil keputusan penggantian aset secara lebih efisien. Selain itu, penelitian ini juga memberikan rekomendasi praktis berupa penguatan Standar Operasional Prosedur (SOP) untuk memperpanjang umur mesin dan meningkatkan efisiensi operasional.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Simbolon dan Ginting (2020) berfokus pada analisis masalah perawatan di PT. Gunung Selamat Lestari. Studi ini menggunakan metode Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) untuk mengidentifikasi penyebab dan efek dari kegagalan fungsi mesin. Selain itu, Reliability Centered Maintenance II (RCM II) Decision Worksheet digunakan untuk menentukan strategi perawatan yang paling tepat berdasarkan fungsi dan sistem mesin. Penelitian ini menunjukkan bahwa dengan beralih dari kebijakan perawatan Run To Failure (RTF) menjadi RCM II, perusahaan dapat secara signifikan mengurangi downtime tak terencana dan meningkatkan keandalan mesin. Hasil konkret dari studi ini adalah rekomendasi interval perawatan spesifik untuk beberapa komponen, seperti flexible coupling (262 jam), liner cylinder (316 jam), dan steer arm (246 jam). Temuan ini membuktikan efektivitas RCM dalam mengoptimalkan jadwal perawatan.

Tabel 2. 1 Kajian Literatur

Penulis	Metode			Tujuan Penelitian		
	EUAC	RCM	FMEA	<i>Age Replacement</i>	<i>Preventive maintenance</i>	Umur Ekonomis
(Yuswono & Izza, 2024)				✓	✓	

Penulis	Metode			Tujuan Penelitian		
	EUAC	RCM	FMEA	<i>Age Replacement</i>	<i>Preventive maintenance</i>	Umur Ekonomis
(Purba, Lutfi, & Bonar, 2021)		✓				
(Inayah, Budiasih, & Pamoso, 2020)	✓		✓			
(Alfian & Etik , 2021)		✓				
(Saiful & Satoto, 2023)				✓	✓	✓
(Fikri & Pudji, 2020)		✓				
(Afris & Elisa , 2023)		✓				
(Roganda, Doarjo , & Paris, 2020)		✓				
(Muhammad & Wiwik, 2024)	✓					
(Marek, Malysiak, Ding, Sunderam, & Mrozek, 2023)		✓				
(Harianja, Rebekha, Adi , & Siti, 2025)				✓	✓	
(Wiherdiansyah & Didik, 2024)				✓	✓	
(James & Samuel, 2023)	✓					
(Ramadhan, Irvan, & Risma, 2024)				✓	✓	✓
(Elena & Ferrando, 2020)	✓					
(Maulana, 2025)	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Berdasarkan tinjauan literatur sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa terdapat beragam pendekatan dan metodologi yang digunakan untuk menetapkan interval perawatan *Preventive* maupun memperkirakan usia ekonomis suatu peralatan. *Analisis state of the art*

memperlihatkan variasi fokus penelitian, baik dalam hal tujuan maupun metodologi yang digunakan. Sebagian penelitian berfokus pada pengembangan strategi pemeliharaan *Preventive* dengan menerapkan metode seperti *Reliability Centered Maintenance (RCM)* dan *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*, sementara penelitian lain lebih berorientasi pada analisis usia ekonomis mesin menggunakan pendekatan ekonomi teknik seperti *Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC)* dan *Age Replacement*. Penelitian ini berupaya mengintegrasikan kedua aspek tersebut, yakni merancang interval perawatan *Preventive* dengan metode *Reliability Centered Maintenance* sekaligus menghitung umur ekonomis menggunakan pendekatan *Equivalent Uniform Annual Cost*, dengan studi kasus *Current Transformer (CT)* di PLN UPT Pekanbaru. Meskipun metode *Reliability Centered Maintenance* dan *Equivalent Uniform Annual Cost* bukan hal baru, inovasi penelitian ini terletak pada penerapannya secara terpadu terhadap peralatan kelistrikan kritis dalam konteks manajemen aset. Selain itu, pendekatan yang digunakan disesuaikan dengan karakteristik operasional di sektor ketenagalistrikan, yang masih jarang dieksplorasi dalam penelitian-penelitian sebelumnya.

2.2 Landasan Teori

Landasan teori dalam penelitian ini memuat penjelasan konseptual yang relevan dengan topik pembahasan, khususnya terkait aspek – aspek manajemen aset. Teori ini digunakan sebagai dasar untuk menganalisis hubungan antara variabel – variabel yang terdapat dalam struktur manajemen aset, khususnya pada salah satu dari 6 element manajemen aset yang dipakai penelitian ini yaitu *Asset Lifecycle Management*. Dengan kata lain, penelitian ini mengacu pada prinsip – prinsip teoretis manajemen aset untuk mengkaji bagaimana elemen – elemen dalam aspek organisasi dan manusia saling berinteraksi serta berdampak pada efektivitas implementasi manajemen aset.

2.2.1 Manajemen Aset

Manajemen aset merupakan proses pengorganisasian, perencanaan dan pengawasan terhadap pembelian, penggunaan, perawatan, perbaikan, dan penghapusan aset fisik untuk mengoptimalkan potensi *service delivery* dan meminimalkan resiko yang berkaitan dengan usia hidup aset dengan menggunakan aset *intangible* seperti aplikasi pengambilan keputusan berbasis *knowledge* dan proses bisnis (Putra, Riyanto, & Zulfikar, 2020) . Manajemen Aset berfungsi untuk memantau dan mengendalikan penggunaan barang dalam perusahaan. Ketika pengawasan ini lemah, sistem manajemen akan mengalami gangguan, termasuk terhambatnya

pelaporan pengeluaran barang pemantauan penggunaan aset. Manajemen Aset pada dasarnya adalah pengelolaan persediaan perusahaan yang termasuk dalam kategori kekayaan organisasi. Karena aset ini sangat penting bagi kelancaran operasi bisnis, perusahaan wajib menerapkan manajemen aset yang tepat. Dalam praktiknya, manajemen aset bertugas mengontrol stok barang di tiap laboratorium serta memantau proses pengajuan barang baru. Dengan pengelolaan yang baik, perusahaan dapat memastikan efisiensi dan transparansi dalam penggunaan aset (Riswanda, Witanti, & Sabrina, 2017).

2.2.2 *Reliability Centered Maintenance (RCM)*

Reliability Centered Maintenance (RCM) merupakan suatu metodologi yang dirancang untuk menentukan tindakan perawatan yang diperlukan guna memastikan aset fisik berfungsi sesuai dengan kebutuhan operasional. Pendekatan ini bertujuan menetapkan strategi pemeliharaan yang paling efektif untuk setiap peralatan. *Reliability Centered Maintenance* merupakan pendekatan terpadu yang menggabungkan teknik *Preventive maintenance* dan *corrective maintenance* guna mengoptimalkan masa pakai dan kinerja aset, sistem atau peralatan dengan biaya operasional yang minimal. Metode ini menekankan efisiensi biaya sambil mempertahankan kinerja optimal. Penerapan *Reliability Centered Maintenance* memberikan berbagai manfaat, antara lain: peningkatan prioritas terhadap keselamatan dan kelestarian lingkungan, peningkatan kinerja operasional, efisiensi biaya operasi dan pemeliharaan, peningkatan ketersediaan dan keandalan peralatan, perpanjangan usia komponen, penyediaan basis data yang lebih lengkap, peningkatan motivasi personel serta sinergi yang lebih baik antar departemen dalam instalasi (Azis, Suprawhardana, & Purwanto, 2010) .

Metode *Reliability Centered Maintenance* merupakan pendekatan sistematis untuk menyusun kebijakan *Preventive maintenance* dengan memanfaatkan informasi dan decision worksheet. Metode ini dirancang untuk mengidentifikasi tindakan perawatan yang paling efektif bagi suatu aset fisik. Tujuan utama penerapan *Reliability Centered Maintenance* adalah memastikan aset dapat terus berfungsi optimal sesuai dengan kebutuhan operasional saat ini. Pendekatan ini membantu menentukan strategi pemeliharaan yang tepat berdasarkan analisis mendalam terhadap kondisi dan performa peralatan. Dengan menerapkan *Reliability Centered Maintenance*, organisasi dapat mengembangkan program perawatan yang terarah, mengurangi risiko kegagalan peralatan, sekaligus mengoptimalkan biaya pemeliharaan. Metode ini menjadi

solusi efektif untuk menjaga keandalan aset dalam jangka panjang (Dhamayanti, Alhiman, & Athari, 2016).

2.2.3 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) adalah sebuah metode analisis sistematis dan proaktif yang dirancang untuk mengidentifikasi potensi moda kegagalan (yaitu, cara spesifik suatu produk, proses, atau sistem dapat gagal), memahami efek atau dampak dari kegagalan tersebut, serta menentukan penyebab yang mendasarinya. Tujuan utama dari FMEA adalah untuk memprioritaskan tindakan pencegahan guna mengurangi atau menghilangkan risiko kegagalan sebelum terjadi. Dalam pelaksanaannya, setiap potensi moda kegagalan dievaluasi berdasarkan tiga kriteria utama: *Severity (S)* yang mengukur tingkat keparahan dampak kegagalan, *Occurrence (O)* yang menunjukkan frekuensi atau kemungkinan terjadinya kegagalan, dan *Detection (D)* yang menilai kemampuan untuk mendeteksi kegagalan sebelum menimbulkan dampak signifikan. Ketiga nilai ini kemudian dikalikan untuk menghasilkan *Risk Priority Number (RPN)*.

Mode kegagalan mengidentifikasi mengapa suatu fungsi bisa terhenti, sementara efek atau kegagalan merinci dampak atau konsekuensi yang timbul akibat kegagalan tersebut. Lebih lanjut, SOD adalah singkatan yang mewakili *Severity* (tingkat keparahan), *Occurrence* (frekuensi kejadian), dan *Detection* (kemampuan deteksi), yang kemudian digunakan dalam perhitungan $RPN = S \times O \times D$ dengan rumus yang sudah ditetapkan.

a. Severity

Severity (S) mengacu pada penilaian seberapa serius konsekuensi dari moda kegagalan terhadap keselamatan, kualitas produk, kinerja sistem, atau bahkan lingkungan. Penilaian severity ini biasanya diberikan dalam skala numerik (misalnya, 1 sampai 10), di mana angka yang lebih tinggi menunjukkan dampak yang lebih parah. Penting untuk dicatat bahwa severity dinilai *tanpa* mempertimbangkan seberapa sering kegagalan itu terjadi atau seberapa mudah kegagalan itu bisa dideteksi.

b. Occurance

Dalam konteks *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*, *Occurrence (O)* merujuk pada seberapa sering atau seberapa mungkin suatu moda kegagalan, atau penyebab di baliknya, diperkirakan akan terjadi. Ini adalah estimasi probabilitas atau frekuensi kemunculan kegagalan tersebut. Penilaian ini umumnya diberikan dalam skala numerik, misalnya dari 1

hingga 10, di mana angka yang lebih tinggi menunjukkan kemungkinan kejadian yang lebih besar. Skor *Occurrence* ditentukan berdasarkan berbagai sumber data seperti riwayat kejadian, hasil pengujian, pengalaman dari sistem atau produk serupa, atau perkiraan berdasarkan keahlian insinyur dan ahli terkait. Penting untuk diingat bahwa penilaian *Occurrence* ini dilakukan secara independen dari *Severity* (tingkat keparahan dampak) dan *Detection* (kemampuan untuk mendeteksi kegagalan), meskipun ketiganya akan dikombinasikan untuk menghitung *Risk Priority Number (RPN)*.

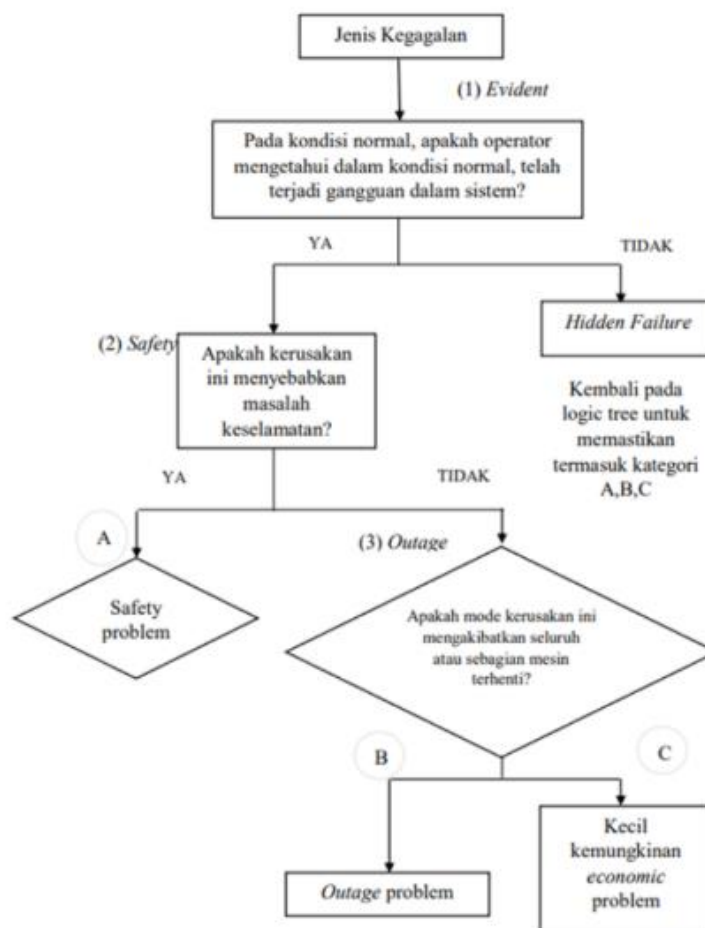
c. *Detection*

Dalam konteks *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*, *Detection (D)* merujuk pada kemampuan untuk mendeteksi atau menemukan suatu moda kegagalan—atau penyebab yang mendasarinya—sebelum ia mencapai pelanggan atau menimbulkan dampak negatif yang tidak diinginkan. Ini adalah penilaian mengenai seberapa efektif kontrol atau sistem yang sudah ada (seperti inspeksi, tes, atau sensor) dalam mengidentifikasi kegagalan tersebut. Penilaian *Detection* biasanya diberikan dalam skala numerik, umumnya dari 1 hingga 10. Penting untuk dicatat bahwa skor yang lebih tinggi menunjukkan peluang deteksi yang lebih rendah (artinya, kegagalan lebih sulit ditemukan), sementara skor yang lebih rendah mengindikasikan peluang deteksi yang lebih tinggi (lebih mudah ditemukan). Penentuan skor *Detection* ini didasarkan pada efektivitas aktual dari metode deteksi yang sudah diterapkan. Sama seperti *Severity* dan *Occurrence*, nilai *Detection* ini dinilai secara independen, meskipun ketiganya akan dikalikan untuk menghitung *Risk Priority Number (RPN)*.

2.2.4 *Logic Tree Analysis (LTA)*

Logic Tree Analysis (LTA), juga dikenal sebagai Analisis Pohon Logika, adalah sebuah metode analitis sistematis yang dipakai untuk memvisualisasikan dan menganalisis hubungan sebab-akibat dari suatu peristiwa atau masalah. Teknik ini bekerja dengan memecah suatu kejadian utama, sering disebut "*top event*" atau "peristiwa puncak," menjadi serangkaian penyebab yang lebih kecil dan saling terkait, yang kemudian direpresentasikan dalam struktur hirarkis berbentuk pohon. Secara definitif, LTA adalah alat pemetaan grafis yang digunakan untuk menguraikan dan merepresentasikan secara logis semua kemungkinan penyebab yang dapat berkontribusi pada terjadinya suatu peristiwa yang tidak diinginkan (seperti kegagalan atau kecelakaan) atau untuk memahami jalur yang mengarah pada hasil yang diinginkan. Proses ini

dimulai dari peristiwa puncak di bagian atas pohon, lalu bercabang ke bawah untuk mengidentifikasi penyebab langsung, yang kemudian dipecah lagi menjadi penyebab akar yang lebih mendasar. Setiap "node" atau "cabang" dalam pohon mewakili suatu kondisi atau peristiwa, dengan hubungan antar node dijelaskan melalui gerbang logika (misalnya, AND, OR) yang menunjukkan bagaimana penyebab-penyebab tersebut harus berinteraksi agar peristiwa puncak terjadi. LTA sangat berguna dalam berbagai aplikasi, terutama analisis keandalan dan keselamatan, karena memungkinkan identifikasi semua potensi jalur kegagalan, penentuan akar penyebab masalah, evaluasi probabilitas peristiwa puncak, dan pengembangan strategi mitigasi yang efektif dengan menargetkan penyebab-penyebab utama. Metode ini memberikan gambaran yang jelas dan terstruktur tentang kompleksitas hubungan sebab-akibat, menjadikannya alat yang ampuh untuk pemecahan masalah dan pengambilan keputusan dalam manajemen risiko.



Gambar 2. 1 Alur Logic Tree Analysis

2.2.5 *Task selection*

Task Selection (Pemilihan Tugas) mengacu pada proses memilih atau memutuskan tugas mana yang akan dikerjakan dari sekumpulan tugas yang tersedia. Ini adalah langkah krusial yang melibatkan evaluasi berbagai faktor untuk menentukan tugas mana yang paling penting, mendesak, atau memberikan nilai terbesar pada suatu waktu tertentu. Secara definitif, *Task Selection* adalah proses pengambilan keputusan strategis yang sistematis untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan tugas-tugas yang harus ditangani terlebih dahulu dari daftar yang ada, dengan mempertimbangkan berbagai kriteria seperti urgensi, dampak, sumber daya yang tersedia, dan tujuan keseluruhan. Terdapat tiga pendekatan utama dalam tahap ini:

2.2.1 *Condition Direct (CD)*

Merupakan tindakan pemeliharaan yang dilakukan dengan memantau parameter-parameter tertentu yang berkaitan langsung dengan potensi kegagalan. Jika selama proses inspeksi ditemukan indikasi kerusakan, maka dilakukan tindakan korektif seperti perbaikan atau penggantian komponen.

2.2.2 *Failure Finding (FF)*

Digunakan untuk mendeteksi kerusakan tersembunyi yang tidak terlihat secara langsung. Pemeriksaan dilakukan secara berkala untuk menemukan potensi kegagalan yang tidak terdeteksi dalam kondisi normal.

2.2.3 *Time Directed (TD)*

Strategi ini bertujuan untuk mencegah atau mengurangi kemungkinan terjadinya kerusakan dengan melakukan perawatan atau penggantian komponen secara terjadwal, sebelum komponen tersebut benar-benar mengalami kegagalan.

2.2.4 *Reliability (Keandalan)*

Metode *Reliability-Centered Maintenance (RCM)*, *Reliability* (keandalan) mengacu pada kemampuan suatu aset atau sistem untuk menjalankan fungsinya sesuai yang diharapkan, tanpa mengalami kegagalan, dalam kondisi operasi dan periode waktu tertentu. Ini adalah probabilitas bahwa suatu komponen, sistem, atau mesin akan berkinerja sesuai spesifikasinya dalam jangka waktu yang ditetapkan. Inti dari *RCM* adalah tidak hanya sekadar menjaga agar sebuah alat tetap beroperasi, melainkan memastikan bahwa alat tersebut dapat terus menjalankan fungsi utamanya dengan konsisten dan andal. Oleh karena itu, *RCM* berfokus pada pemeliharaan keandalan fungsional, yang berarti memastikan bahwa aset dapat memenuhi harapan penggunaannya dalam konteks operasionalnya saat ini, sehingga kegagalan fungsional dapat diminimalkan dan keberlangsungan operasi serta keselamatan tetap terjaga.

Berdasarkan definisi diatas, maka ada beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu:

1. Probabilitas, dimana nilai reliability adalah berada diantara 0 dan 1.
2. Kemampuan yang diharapkan, harus digambarkan secara terang atau jelas. Untuk setiap unit terdapat suatu standar untuk menentukan apa yang dimaksud dengan kemampuan yang diharapkan.
3. Tujuan yang diinginkan, dimana kegunaan peralatan harus spesifik. Hal ini dikarenakan terdapat beberapa tingkatan dalam memproduksi suatu barang konsumen.

4. Waktu, merupakan parameter yang penting untuk melakukan penilaian kemungkinan suksesnya suatu sistem

2.2.6 Distribusi Probabilitas

Dalam penerapan *Reliability Centered Maintenance (RCM)*, distribusi probabilitas digunakan untuk memodelkan waktu kegagalan suatu komponen atau sistem, sehingga dapat membantu dalam penentuan strategi perawatan yang optimal. Empat jenis distribusi yang umum digunakan adalah normal, lognormal, eksponensial, dan weibull, masing-masing memiliki karakteristik dan fungsi yang berbeda sesuai dengan pola kerusakan yang diamati.

a. Distribusi *Normal*

Dalam metode *Reliability-Centered Maintenance (RCM)*, pemahaman tentang distribusi statistik kegagalan sangat krusial untuk menentukan strategi pemeliharaan yang paling efektif. Meskipun *RCM* seringkali lebih berfokus pada distribusi Weibull karena kemampuannya memodelkan berbagai fase usia kegagalan (awal, acak, dan aus), distribusi normal juga memiliki peran penting, terutama dalam konteks tertentu. Distribusi normal, atau sering disebut distribusi Gaussian, adalah salah satu model probabilitas yang paling dikenal dan banyak digunakan dalam analisis data. Dalam *RCM*, distribusi normal umumnya diterapkan untuk memodelkan kegagalan yang disebabkan oleh keausan (*wear-out*) atau *fatigue* (kelelahan material), di mana tingkat kegagalan meningkat seiring bertambahnya usia. Ini terjadi ketika *Mean Time To Failure (MTTF)* atau *Mean Time To Repair (MTTR)* cenderung terpusat di sekitar nilai rata-rata dengan penyebaran yang simetris.

$$X_i = t_i \quad (2.1)$$

$$Y_i = z_i = \Phi^{-1}[F(t_i)] \quad (2.2)$$

b. Distribusi *Lognormal*

Dalam konteks *Reliability-Centered Maintenance (RCM)*, pemilihan distribusi statistik yang tepat untuk memodelkan kegagalan sangat penting untuk strategi pemeliharaan yang efektif. Selain distribusi Weibull dan Normal, distribusi *lognormal* juga memainkan peran signifikan dalam analisis keandalan. Distribusi *lognormal* adalah distribusi probabilitas yang nilai logaritmanya terdistribusi secara normal. Artinya, jika Anda mengambil logaritma natural dari data waktu kegagalan, data logaritma tersebut akan mengikuti distribusi normal. Distribusi ini sangat sering digunakan untuk memodelkan waktu ke kegagalan (*time-to-failure*) pada

komponen atau sistem yang kegagalannya disebabkan oleh akumulasi kelelahan atau degradasi progresif. Ini umum terjadi pada kegagalan yang dipicu oleh proses seperti korosi, pertumbuhan retak, atau keausan yang dipercepat, di mana laju kegagalan cenderung meningkat seiring waktu, tetapi tidak selalu simetris seperti distribusi normal murni. Distribusi lognormal dapat mengakomodasi data yang miring ke kanan (*positively skewed*), yang berarti sebagian besar kegagalan terjadi lebih awal, namun ada juga beberapa kegagalan yang terjadi jauh di kemudian hari.

$$Xi = \ln ti \quad (2.3)$$

$$Yi = zi = \Phi^{-1}[F(ti)] \quad (2.4)$$

c. Distribusi Eksponential

Dalam konteks Reliability-Centered Maintenance (RCM), memahami pola kegagalan komponen melalui distribusi statistik sangat vital. Distribusi eksponensial adalah salah satu distribusi probabilitas yang penting dalam analisis keandalan, khususnya untuk memodelkan kegagalan yang bersifat acak atau mendadak (*random failures*). Secara spesifik, distribusi eksponensial menggambarkan situasi di mana laju kegagalan (*failure rate*) adalah konstan seiring waktu. Ini berarti probabilitas suatu komponen untuk gagal dalam interval waktu tertentu tidak bergantung pada seberapa lama komponen tersebut telah beroperasi. Fenomena ini sering diamati selama "umur berguna" atau "periode hidup normal" suatu komponen, setelah fase "kematian dini" dan sebelum fase "keausan" (*wear-out*). Kegagalan yang dimodelkan oleh distribusi eksponensial biasanya disebabkan oleh peristiwa tak terduga seperti benturan, beban kejut, kesalahan operator, atau cacat laten yang muncul secara acak.

$$Xi = ti \quad (2.5)$$

$$Yi = \ln \left[\frac{1}{1 - F(ti)} \right] \quad (2.6)$$

d. Distribusi Weibull

Dalam Reliability-Centered Maintenance (RCM), distribusi Weibull adalah alat statistik yang sangat kuat dan serbaguna untuk memodelkan waktu kegagalan komponen dan sistem. Fleksibilitasnya menjadikannya salah satu distribusi yang paling banyak digunakan dalam analisis keandalan karena kemampuannya untuk menggambarkan berbagai pola laju kegagalan

yang berubah seiring waktu, tidak seperti distribusi Normal atau Eksponensial yang lebih kaku.

$$Xi = \ln ti \quad (2.7)$$

$$Yi = \ln \left| \ln \left[\frac{1}{\{1 - F(ti)\}} \right] \right| \quad (2.8)$$

2.2.7 Indeks of Fit dan Goodnes of Fit Test

Dalam menentukan distribusi yang dapat mewakili pola dari suatu data dapat dilakukan dengan *Indeks of Fit* dan *Goodnes of Fit Test*

1. Indeks of Fit

Indeks of Fit terdiri dari dua pendekatan, yaitu *Probobality Plot* dan *Least-Square Curve Fitting*. *Probability Plot* umumnya digunakan ketika jumlah sampel sedikit atau data tidak lengkap, sedangkan metode *Least-Square Curve Fitting* dianggap lebih unggul dibandingkan *Probability Plot*. Perhitungan dalam metode *Least-Square Curve Fitting* dilakukan dengan rumus berikut:

- a. Nilai Tengah kerusakan (*medium rank*) Tabel 2.19 merupakan sebagai berikut:

$$F(ti) = \frac{(i - 0,3)}{(n + 0,4)} \quad (2.9)$$

Dimana:

i = data waktu ke i

n = jumlah data kerusakan

b. Index of fit

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (2.10)$$

2. Uji Goodness of Fit

Uji *goodness of fit* dalam model statistik digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana model tersebut sesuai dengan data hasil pengamatan. Indeks *goodness of fit* merangkum selisih antara nilai yang diperoleh dari data aktual dan nilai yang diprediksi oleh model. Sementara itu, statistik *goodness of fit* merupakan bentuk kuantitatif dari indeks tersebut yang memiliki distribusi sampling yang diketahui, dan umumnya dihitung menggunakan pendekatan

asimtotik dalam konteks pengujian hipotesis statistik.

Uji *Goodnes of Fit* dilakukan dengan membandingkan dua hipotesis yang saling bertentangan.

- Hipotesis nol (H_0) menyatakan bahwa data kerusakan atau perbaikan mengikuti atau mendekati suatu distribusi tertentu
- Hipotesis alternatif (H_1) menyatakan bahwa bahwa data tersebut tidak sesuai dengan distribusi tertentu

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana model distribusi statistik mampu merepresentasikan pola data aktual. Jika hasil pengujian menunjukkan bahwa H_0 tidak dapat ditolak, maka distribusi tersebut dianggap cocok dan dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut, seperti estimasi parameter atau penjadwalan perawatan. Sebaliknya, jika H_0 ditolak, maka diperlukan pemilihan distribusi lain yang lebih sesuai dengan karakteristik data.

Dalam tes Goodnes of Fit dilakukan Uji Kolmogorov-Smirnov dengan hipotesis adalah:

H_0 : data time failure berdistribusi normal (lognormal)

H_1 : data time failure tidak berdistribusi normal (lognormal)

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

Dimana:

$$D_1 = \max \Phi \left(\frac{ti - \mu}{s} \right) - \left(\frac{t - 1}{n} \right) \quad (2.11)$$

$$(D_2 = \max \left(\frac{i}{n} \right) - \Phi \left(\frac{ti - \mu}{s} \right) \quad (2.12)$$

$$Cumulative\ probability\ F(t) = \left(\frac{ti - \mu}{\sigma} \right) \quad (2.13)$$

$$\mu = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \ln ti}{n} \right) \quad (2.14)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (\ln ti - \mu)^2}{n}} \quad (2.15)$$

Dimana:

t_i = *time to failure* ke- t

μ = rata-rata *time to failure*

S = Standar deviasi

N = Banyaknya data

Apabila nilai $Dn < D_{crit}$ maka H_0 diterima, nilai D_{crit} diperoleh dari tabel *critical value for the kolmogorov-Smirnov test for normality*. Perbedaan pengujian distribusi normal dengan lognormal adalah pada penggunaan t_i apabila lognormal menggunakan nilai $t_i = \ln(t_i)$.

2.2.8 Parameter Estimasi Distribusi

masing-masing parameter untuk tiap distribusi adalah sebagai berikut:

1. Distribusi *Normal*

Parameter distribusi normal adalah σ Tabel 2.17 dan μ Tabel 2.16 merupakan sebagai berikut

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (2.16)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \mu)^2}{n}} \quad (2.17)$$

2. Distribusi *Lognormal*

Parameter yang digunakan pada distribusi lognormal adalah s (parameter bentuk) pada Tabel 2.19 dan t_{med} (parameter lokasi) pada Tabel 2.20 berikut:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \ln t_i}{n} \quad (2.18)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln t_i - \mu)^2}{n}} \quad (2.19)$$

$$t_{med} = e^{\mu} \quad (2.20)$$

3. Distribusi Eksponensial

Parameter yang digunakan untuk distribusi eksponensial adalah λ

$$\lambda = \frac{n}{T} \quad (2.21)$$

Dimana:

$T = \sum_{ti}^r ti$ yaitu jumlah kerusakan

λ = rata-rata datangnya kejadian

4. Distribusi Weibull

Parameter untuk distribusi Weibull adalah β (*shape parameter*) dan θ (*scale parameter*).

$$a = \beta \frac{\sum_{i=1}^n t_i^\beta \ln(t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^\beta} - \frac{1}{\beta} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(t_i) = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{\sum Yi - b * \sum Xi}{n} \quad (2.23)$$

Untuk menentukan θ , dengan rumus:

$$\theta = e^{-a/b} \quad (2.24)$$

Dimana:

β = parameter bentuk (*shape parameter*)

θ = parameter skala (*scale parameter*)

2.2.9 Mean Time To Repair (MTTR)

Menurut Toller & Alevar (2010), *Mean Time To Repair* (MTTR) mengacu pada durasi yang dibutuhkan untuk mengembalikan suatu sistem ke kondisi normal setelah mengalami kegagalan. Hal ini mencakup seluruh proses, mulai dari diagnosis masalah, waktu respons teknisi, hingga perbaikan sistem itu sendiri. Semakin tinggi nilai *Mean Time To Repair*, semakin buruk pula kinerja sistem. Dengan kata lain, apabila waktu perbaikan semakin lama, tingkat ketersediaan sistem akan semakin rendah. *Mean Time To Repair* juga merupakan parameter penting yang digunakan dalam tahap perencanaan dan perancangan sitem. Parameter ini membantu mengevaluasi aksesibilitas atau penempatan komponen, seperti memastikan komponen yang rentan gagal berada di lokasi yang mudah diakses untuk perbaikan atau penggantian (Fahri, Harahap, & Suliawati, 2025). Selain itu, *Mean Time To Repair* dapat menjadi acuan dalam menentukan perangkat teknologi mana yang memerlukan backup dan mana yang tidak. Jika suatu perangkat memiliki nilai *Mean Time To Repair* yang sangat tinggi, maka sebaiknya disediakan cadangan agar operasional perusahaan dapat segera pulih saat

terjadi kerusakan. *Mean Time To Repair* juga mencerminkan keahlian mekanik atau tim perawatan dalam menangani masalah teknis.

$$= \frac{\text{Total waktu terhentinya alat akibat kerusakan}}{\text{Jumlah kerusakan}} \quad (2.25)$$

Berikut ini merupakan perhitungan MTTR masing-masing distribusi yang menunjukkan pada Tabel 2.26, Tabel 2.27, Tabel 2.28 dan Tabel 2.29 :

1. Distribusi Normal

$$\text{MTTR} = \mu \quad (2.26)$$

2. Distribusi Lognormal

$$\text{MTTR} = t_{med} \cdot e^{s^2/2} \quad (2.27)$$

3. Distribusi Eksponensial

$$\text{MTTR} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.28)$$

4. Distribusi Weibull

$$\text{MTTR} = \text{MTTF} = \theta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2.29)$$

2.2.10 Mean Time to Failure (MTTF)

Mean Time to Failure (MTTF) merupakan rata – rata waktu operasional suatu mesin sebelum mengalami kerusakan. *Mean Time to Failure* dihitung dengan membagi total waktu pengoperasian mesin dengan jumlah kegagalan yang terjadi. Metrik ini membantu dalam mengevaluasi keandalan peralatan dan menentukan kapan perlu dilakukan peningkatan sistem atau perawatan *Preventive*. Jika nilai *Mean to Between Failure* meningkat setelah pemeliharaan *Preventive*, hal ini menunjukkan bahwa keandalan perangkat keras semakin baik dan strategi perawatan yang diterapkan efektif. Namun, penting untuk diingat bahwa *Mean Time to Failure* hanya memperhitungkan kegagalan tak terduga dan tidak termasuk downtime yang direncanakan seperti saat pemeliharaan rutin. Selain itu, *Mean Time to Failure* umumnya digunakan untuk sistem yang dapat diperbaiki (Khaurullah & Dwi, 2022).

$$\text{MTTF} = \frac{\text{Waktu total downtime}}{\text{Jumlah kerusakan}} \quad (2.30)$$

Berikut ini merupakan perhitungan MTTF masing-masing distribusi yang menunjukkan pada Tabel 2.31, Tabel 2.32, Tabel 2.33, dan Tabel 2.34 sebagai berikut:

1. Distribusi Normal

$$MTTF = \mu \quad (2.31)$$

2. Distribusi Lognormal

$$MTTF = t_{med} \cdot e^{s^2/2} \quad (2.32)$$

3. Distribusi Eksponensial

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (2.33)$$

4. Distribusi Weibull

$$MTTR = MTTF = \theta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2.34)$$

2.2.11 Age Replacement

Model *Age Replacement* merupakan metode penggantian komponen yang didasarkan pada usia pemakaian dari komponen tersebut. Pendekatan ini bertujuan untuk mencegah penggantian peralatan dalam waktu singkat setelah pemasangan baru dilakukan. Setelah suatu komponen diganti, baik karena mengalami kerusakan maupun sebagai bagian dari perawatan *Preventive*, jadwal penggantian akan diperbarui dan disesuaikan kembali berdasarkan waktu pemasangan terbaru (Devani & Maidila, 2021). Dengan menggunakan distribusi yang telah digunakan dan divalidasi pada prosedur sebelumnya, perhitungan *Age Replacement* dilakukan dengan rumus pada Tabel 2.35 berikut:.

$$D_{tp} = \frac{Tp * R_{tp} + Tf(1 - R_{tp})}{(t_p + Tp)R_{tp} + (M_{tp} + Tf)(1 - R_{tp})} \quad (2.35)$$

Keterangan rumus:

tp = interval waktu penggantian pencegahan

Tf = waktu untuk melakukan penggantian kerusakan komponen

Tp = waktu untuk melakukan penggantian preventive

$R(tp)$ = probabilitas terjadinya penggantian pencegahan pada saat tp

$M(tp)$ = waktu rata-rata terjadinya kerusakan jika penggantian perbaikan pada masa tp

2.2.12 Frekuensi Pemeriksaan

Dengan menentukan frekuensi pemeriksaan dapat mencegah terjadinya kerusakan, memastikan alat berat tetap beroperasi secara optimal, serta meminimalkan waktu henti akibat kegagalan

komponen yang tidak terduga, diperlukan penerapan teknik inspeksi yang tepat. Interval inspeksi yang ideal dapat ditentukan melalui perhitungan menggunakan rumus berikut

$$D(n) = \lambda(n).Tf + n.Ti \quad (2.36)$$

$D(n)$ = *downtime* yang terjadi karena perbaikan per unit waktu + *downtime* yang terjadi karena pemeriksaan per unit waktu

Dimana:

$$\lambda(n) = \frac{k}{n} \text{ sehingga: } \lambda(n) \frac{k}{n^2} \quad (2.37)$$

$$k = \frac{\text{frekuensi jumlah kerusakan}}{\text{periode terjadinya kerusakan}} \quad (2.38)$$

$$Tf = \frac{1}{\mu}; Ti = \frac{1}{i} \quad (2.39)$$

Sehingga:

$$D(n) = \frac{\lambda(n)}{\mu} + \frac{n}{i} \text{ atau } D(n) = \frac{k}{n \cdot \mu} + \frac{n}{i} \quad (2.40)$$

Jika persamaan diatas dideferensialkan akan menjadi:

$$D(n) = \frac{k}{n \cdot \mu} + \frac{n}{i} = 0 \quad (2.41)$$

Sehingga frekuensi pemeriksaan:

$$n = \sqrt{\frac{k \cdot i}{\mu}} \quad (2.42)$$

Keterangan:

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

k = nilai konstan dari jumlah kerusakan persatuan waktu

Tf = waktu rata-rata untuk melakukan penggantian

Ti = waktu rata-rata untuk melakukan pemeriksaan

n = frekuensi yang dilakukan per satuan waktu

2.2.13 Ekonomi Teknik

ekonomi teknik merupakan disiplin yang menggabungkan prinsip-prinsip ekonomi dengan teknik untuk membantu pengambilan keputusan yang efisien dalam dunia industri dan bisnis. Penerapan ilmu ini sangat penting dalam menganalisa kelayakan finansial sebuah usaha, karena melibatkan evaluasi komprehensif dari berbagai faktor ekonomi dan teknik untuk menentukan potensi keuntungan dan risiko yang terkait dengan investasi atau proyek tertentu (Nabila , Muhammad , Abidah , & Dyan , 2024).

2.2.14 *Equivalent Annual Cost (EAC)*

Metode Equivalent Annual Cost (EAC) merupakan alat penting dalam evaluasi investasi perusahaan, terutama saat membandingkan aset-aset yang saling eksklusif dengan masa manfaat ekonomi yang berbeda-beda. *EAC* menjadi alternatif dari pendekatan NPV konvensional sekaligus menawarkan keuntungan tambahan. Contohnya, *EAC* dapat digunakan untuk menghitung biaya rata-rata tahunan dan membantu dalam memilih opsi pendanaan alternatif seperti pinjaman atau leasing. Prinsip utama metode ini adalah mengubah arus kas yang bervariasi sepanjang waktu menjadi nilai tahunan yang konstan, sehingga memudahkan perbandingan antara berbagai pilihan investasi (Widara, Maharani, & Avellyn, 2018) . Perhitungan *EAC* dilakukan dengan menggunakan formula berikut:

$$EAC = \frac{NPV \times r}{1 - \frac{1}{(1+r)^t}} \quad (2.43)$$

Di mana:

NPV = nilai kini bersih dari seluruh arus kas selama umur aset,

r = tingkat diskonto, dan

t = umur ekonomis aset.

2.2.15 *Pengelompokan Biaya Dalam penentuan EAC*

Dalam menetapkan umur ekonomis suatu aset, khususnya mesin, perlu dilakukan klasifikasi terhadap biaya-biaya yang relevan (Sandy & Bery , 2013). Biaya tersebut mencerminkan aspek keuangan yang mempengaruhi keputusan investasi serta efektivitas operasional aset selama masa pemakaiannya. Pengelompokan biaya yang biasanya digunakan dalam analisis ini meliputi beberapa kategori, yaitu:

1. Biaya Awal

Biaya awal merupakan total dana yang dikeluarkan saat pertama kali memperoleh aset tersebut. Komponennya mencakup harga pembelian, biaya pengiriman, komisi, pengecekan kualitas, garansi, serta proses instalasi dan pengaturan awal. Dalam konteks penentuan umur ekonomis mesin, biaya awal mencakup harga beli mesin, biaya instalasi, dan pengaturan awal yang dianggap sangat signifikan dalam analisis investasi.

2. Biaya Operasional

Biaya operasional mencerminkan pengeluaran yang diperlukan untuk menjalankan mesin dalam kegiatan operasional sehari-hari, termasuk biaya energi seperti listrik atau bahan bakar, biaya pemeliharaan rutin, dan gaji tenaga kerja yang langsung mengoperasikan mesin. Biaya ini menggambarkan efisiensi pengelolaan bisnis dan penting dalam evaluasi umur ekonomis mesin.

3. Biaya Pemeliharaan dan Perbaikan

Biaya ini melibatkan pengeluaran untuk penggantian suku cadang, bahan habis pakai, serta jasa perbaikan dari pihak ketiga. Dalam konteks umur ekonomis, biaya ini mencakup serangkaian kegiatan servis rutin, penggantian komponen yang aus, dan perbaikan akibat kerusakan sehingga mesin tetap dapat beroperasi optimal.

2.2.16 *Minimum Attractive Rate of Return (MARR)*

Minimum Attractive Rate of Return (MARR) adalah tingkat pengembalian investasi terkecil yang masih dianggap layak oleh investor saat mengevaluasi dan memilih proyek investasi. Nilai ini berfungsi sebagai standar pembandingan untuk menilai kelayakan investasi berdasarkan estimasi imbal hasil yang diharapkan oleh investor. MARR menjadi acuan untuk menentukan apakah suatu investasi layak dijalankan, yaitu ketika tingkat pengembalian proyek sama dengan atau lebih tinggi dari MARR. Sebaliknya, jika tingkat pengembalian lebih rendah dari MARR, investasi tersebut dianggap tidak menguntungkan dan tidak layak dilakukan. Penetapan nilai MARR biasanya memperhitungkan faktor risiko, biaya modal, dan tingkat pengembalian alternatif yang dapat diperoleh dari investasi lain dengan risiko serupa.

BAB III

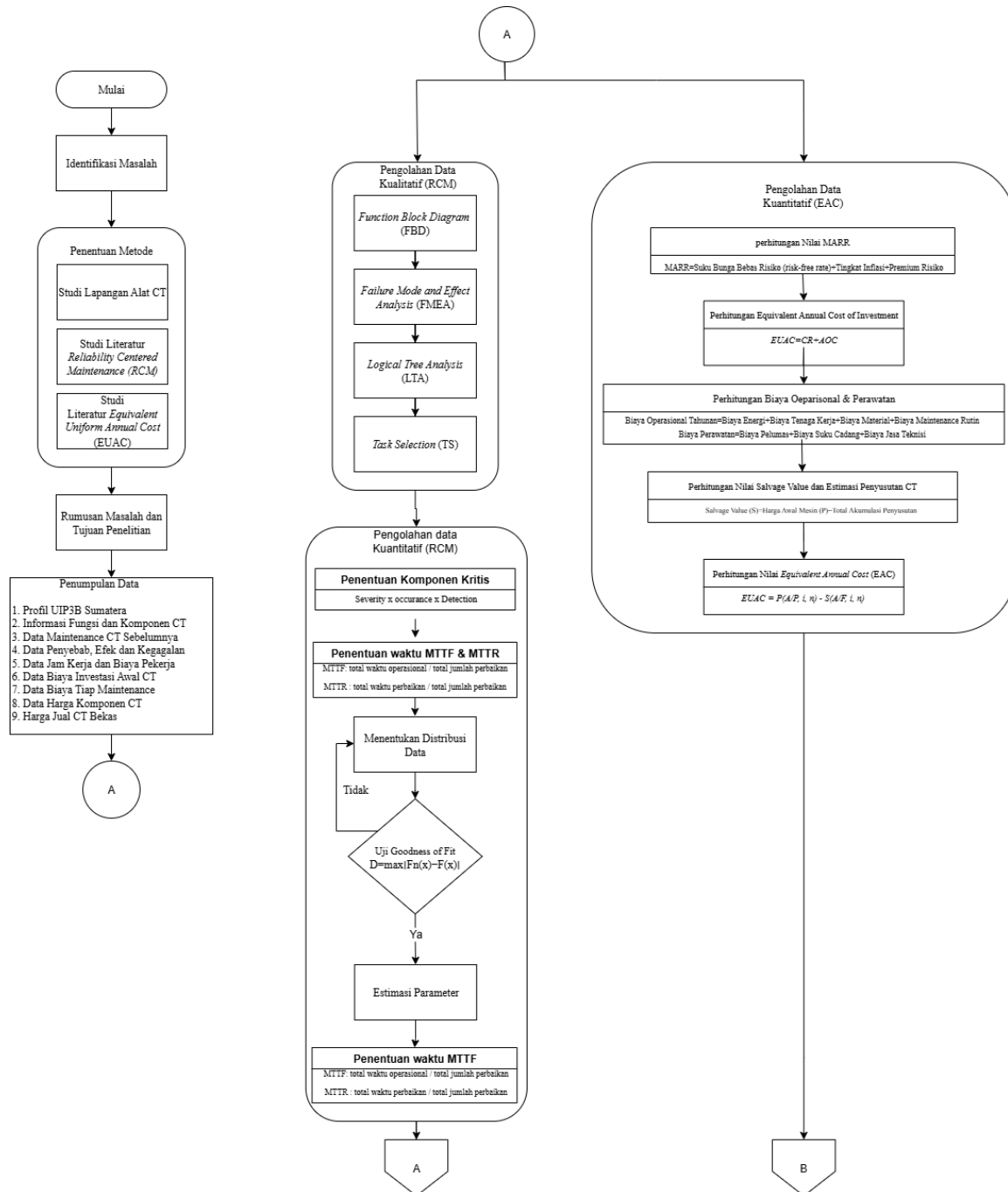
METODE PENELITIAN

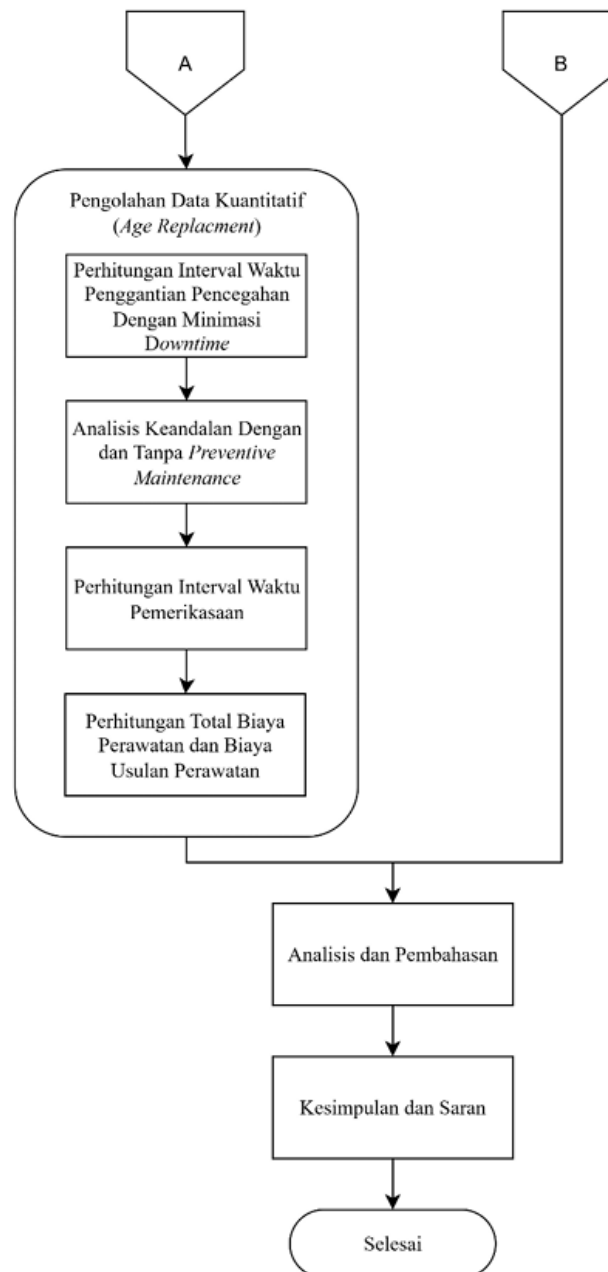
3.1 Subjek, Objek dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan mengambil studi kasus pada PT PLN (Persero) Unit Induk Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (UIP3B) Sumatera. Lokasi penelitian dan pengumpulan data terpusat di kantor UIP3B Sumatera yang beralamat di Jl. Tuanku Tambusai No.1, Labuh Baru Barat, Kecamatan Payung Sekaki, Kota Pekanbaru, Riau. Adapun subjek penelitian dalam studi ini adalah proses dan strategi pemeliharaan yang diterapkan oleh departemen terkait di lingkungan PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera. Sementara itu, objek penelitian yang dianalisis secara spesifik adalah salah satu aset kritis dalam sistem penyaluran, yaitu unit *Current Transformer (CT)*

3.2 Diagram Alur Penelitian

Berikut merupakan diagram alir penelitian yang dilakukan dari awal hingga akhir penelitian:





Gambar 3. 1 Alur penelitian

Penelitian ini diawali dengan mengidentifikasi isu-isu terkait keandalan dan efisiensi manajemen pemeliharaan *Current Transformer (CT)* pada sistem kelistrikan di PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera. Setelah masalah pokok ditetapkan, langkah berikutnya adalah menentukan metodologi melalui studi lapangan terhadap perangkat CT dan tinjauan literatur mengenai dua pendekatan kunci: *Reliability Centered Maintenance (RCM)* dan *Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC)*. Selanjutnya, rumusan masalah dan tujuan penelitian dirumuskan untuk memberikan arah dan fokus yang jelas bagi analisis. Kemudian, dilakukan

pengumpulan data komprehensif, meliputi informasi teknis dan ekonomis seperti profil perangkat, fungsi dan komponen CT, riwayat pemeliharaan, mode dan efek kegagalan, biaya investasi, nilai sisa komponen, serta biaya operasional dan pemeliharaan. Tahap berikutnya adalah pengolahan data, yang terbagi menjadi analisis kualitatif dan kuantitatif.

Analisis data kualitatif dilakukan dengan menerapkan tahapan *RCM*. Dimulai dengan pembuatan *Function Block Diagram* (FBD) untuk memahami interaksi fungsional antarkomponen. Dilanjutkan dengan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi potensi mode kegagalan dan dampaknya. Hasil FMEA kemudian digunakan dalam *Logic Tree Analysis* (LTA) untuk mengklasifikasikan mode kegagalan berdasarkan prioritas (misalnya, keamanan, operasional, atau ekonomi). Tahapan ini diakhiri dengan *Task Selection* (TS), yaitu penentuan strategi pemeliharaan yang paling sesuai untuk setiap mode kegagalan. Selanjutnya, data kuantitatif *RCM* diolah, diawali dengan identifikasi komponen kritis berdasarkan frekuensi dan dampak kegagalan. Ini diikuti dengan perhitungan *Time to Failure* (TTF) dan *Time to Repair* (TTR). Data ini digunakan untuk menentukan distribusi probabilitas yang paling cocok dengan pola kegagalan melalui uji *Goodness of Fit*. Setelah distribusi ditetapkan, estimasi parameter distribusi dilakukan, yang menjadi dasar perhitungan dua indikator keandalan utama: *Mean Time to Failure* (MTTF) dan *Mean Time to Repair* (MTTR).

Selanjutnya, analisis ekonomi dilakukan dengan pendekatan *Equivalent Uniform Annual Cost* (EUAC). Prosesnya dimulai dengan perhitungan *Minimum Attractive Rate of Return* (MARR). Kemudian, dilakukan estimasi biaya tahunan setara investasi, biaya operasional dan pemeliharaan, serta nilai sisa (salvage value) dan estimasi penyusutan aset. Seluruh elemen biaya ini dikonversi menjadi nilai tahunan yang seragam, menghasilkan nilai EUAC yang merepresentasikan rata-rata total biaya tahunan aset sepanjang masa pakainya.

Bagian terakhir dari pengolahan data kuantitatif adalah penerapan pendekatan *Age Replacement*, yang bertujuan untuk menentukan waktu penggantian *Preventive* optimal guna meminimalkan *downtime*. Perhitungan diawali dengan estimasi interval waktu penggantian *Preventive*, diikuti dengan penetapan interval inspeksi komponen. Tahap ini diakhiri dengan perhitungan total biaya pemeliharaan dan usulan strategi perawatan optimal berdasarkan pertimbangan teknis dan ekonomis. Setelah seluruh data kualitatif dan kuantitatif tuntas dianalisis, dilakukan pembahasan hasil untuk menjawab rumusan masalah dan mencapai tujuan

penelitian. Studi ini ditutup dengan penyusunan kesimpulan dan saran yang memberikan rekomendasi teknis dan manajerial untuk pemeliharaan CT yang efisien dan berkelanjutan.

3.2.1 Identifikasi Masalah

Tahapan awal penelitian ini berfokus pada pengenalan dan perumusan masalah krusial yang muncul di lapangan. Identifikasi masalah dilaksanakan melalui observasi langsung kondisi operasional *Current Transformer (CT)* pada PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera. Permasalahan yang teramati meliputi tingginya tingkat kegagalan peralatan, *downtime* yang memicu disrupsi sistem kelistrikan, serta inefisiensi strategi pemeliharaan yang saat ini diterapkan. Dengan demikian, peneliti dapat membentuk kerangka studi yang sistematis dan menentukan arah penelitian yang relevan dengan tuntutan teknis dan operasional di lokasi.

3.2.2 Penentuan Metode

Setelah identifikasi masalah, penelitian ini selanjutnya berfokus pada penetapan metodologi. Penentuan pendekatan dan metode dalam studi ini melibatkan tiga langkah utama:

1. Studi Lapangan Mengenai *Current Transformer (CT)*

Studi ini bertujuan untuk mendapatkan pemahaman langsung tentang kondisi terkini perangkat CT, meliputi struktur, fungsi, dan riwayat pemeliharaannya. Pengamatan dilakukan pada unit-unit CT yang beroperasi di lapangan guna mengidentifikasi komponen esensial, pola kegagalan, dan karakteristik pemeliharaan yang berlaku. Studi lapangan ini menjadi fondasi penghubung antara kerangka teoretis dengan praktik aktual di perusahaan.

2. Studi Literatur *Reliability Centered Maintenance (RCM)*

RCM adalah metodologi terstruktur untuk merumuskan strategi pemeliharaan berdasarkan fungsi dan risiko kegagalan aset. Tinjauan literatur *RCM* dilakukan untuk mendalami kerangka konseptual, prinsip fundamental, serta tahapan implementasi *RCM*, seperti *Function Block Diagram (FBD)*, *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*, *Logic Tree Analysis (LTA)*, dan *Task Selection*. Pemahaman mendalam tentang *RCM* sangat penting karena metode ini berfungsi sebagai instrumen utama dalam mengklasifikasikan mode kegagalan dan menetapkan tindakan perawatan yang akurat dan terukur.

3. Studi Literatur *Equivalent Annual Cost (EAC)*

Studi ini berupaya memahami konsep analisis biaya dalam konteks pemeliharaan dan investasi aset teknis. *EAC* dimanfaatkan untuk membandingkan opsi perawatan atau penggantian komponen dengan mengacu pada nilai biaya tahunan yang setara. Kajian literatur mencakup pemahaman tentang penghitungan biaya investasi, biaya operasional,

biaya perawatan, nilai sisa (salvage value), depresiasi, serta tingkat pengembalian minimum yang diinginkan (*Minimum Attractive Rate of Return/MARR*). Studi ini berperan penting dalam mendukung proses pengambilan keputusan yang berorientasi pada efisiensi ekonomi sepanjang siklus hidup aset.

3.2.3 Rumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Setelah penetapan metode, langkah krusial berikutnya adalah merumuskan masalah dan tujuan penelitian secara jelas. Perumusan masalah ini didasarkan pada temuan identifikasi awal dan kesenjangan antara kondisi operasional aktual di lapangan dengan harapan ideal. Sementara itu, tujuan penelitian dirancang untuk memandu dan memfokuskan analisis, baik dari perspektif teknis maupun ekonomis, sehingga luaran studi ini dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengelolaan pemeliharaan CT yang optimal.

3.2.4 Pengumpulan Data

Tahapan ini merupakan proses untuk mengumpulkan seluruh informasi yang diperlukan dalam proses analisis, baik kualitatif maupun kuantitatif. Data yang dikumpulkan mencakup:

1. Profil perusahaan dan sistem operasi CT
2. Informasi fungsi dan komponen utama CT
3. Data historis pemeliharaan CT sebelumnya
4. Data penyebab, efek, dan jenis kerusakan
5. Jam kerja teknisi serta biaya tenaga kerja
6. Biaya investasi awal peralatan CT
7. Biaya perawatan berkala dan insidental
8. Harga suku cadang dan komponen CT
9. Harga jual kembali (residu) komponen CT

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung, wawancara dengan teknisi atau personel pemeliharaan, serta dokumentasi internal perusahaan. Data yang diperoleh menjadi dasar untuk proses analisis dalam metode *RCM*, *EUAC*, dan *Age Replacement* yang akan dilakukan pada tahapan selanjutnya.

3.2.5 Pengolahan Data Kualitatif *Reliability Centered Maintenance (RCM)*

Pada tahapan ini, data kualitatif dianalisis menggunakan pendekatan *Reliability Centered Maintenance (RCM)* dengan tujuan utama mengidentifikasi mode kegagalan, dampak potensial,

serta merumuskan strategi perawatan yang tepat untuk setiap komponen kritis pada CT. Pengolahan data ini dilakukan melalui serangkaian langkah terstruktur sebagai berikut:

1. *Function Block Diagram (FBD)*

Langkah awal dalam RCM adalah pembuatan *Function Block Diagram (FBD)*. Diagram ini memvisualisasikan hubungan antar fungsi utama dalam sistem CT dan koneksi antar komponennya. FBD mempermudah pemahaman alur kerja sistem dan membantu dalam mengidentifikasi area kritis yang rentan terhadap gangguan. Selain itu, diagram ini menjadi fondasi untuk proses penelusuran kegagalan pada tahapan selanjutnya.

2. *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*

Setelah struktur sistem dipahami melalui FBD, langkah berikutnya adalah pelaksanaan *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*. FMEA bertujuan untuk mengidentifikasi berbagai mode kegagalan yang mungkin terjadi pada setiap komponen, menganalisis penyebab dan konsekuensinya terhadap sistem, serta mengevaluasi risiko menggunakan tiga parameter kunci: *Severity* (tingkat keparahan), *Occurrence* (frekuensi kejadian), dan *Detection* (kemampuan deteksi). Ketiga nilai ini dipakai untuk menghitung *Risk Priority Number (RPN)*, yang menjadi dasar penentuan prioritas penanganan.

3. *Logic Tree Analysis (LTA)*

Langkah selanjutnya adalah *Logic Tree Analysis (LTA)*, yang berperan dalam mengklasifikasikan mode kegagalan berdasarkan dampaknya terhadap keamanan, operasional, dan aspek finansial. LTA memanfaatkan pendekatan pohon keputusan tiga tahap untuk menilai apakah kegagalan dapat dideteksi operator, apakah berimbas pada keselamatan, dan apakah menimbulkan gangguan operasional. Hasil analisis ini mengelompokkan setiap mode kegagalan ke dalam kategori prioritas spesifik, seperti *safety related*, *outage related*, *economic related*, atau *hidden failure*.

4. *Task Selection (TS)*

Berdasarkan hasil klasifikasi LTA, proses penetapan strategi perawatan atau *Task Selection* dilakukan. Pada fase ini, setiap mode kegagalan akan diberikan tindakan pemeliharaan yang sesuai, meliputi perawatan berbasis kondisi (*condition directed*), perawatan berbasis waktu (*time directed*), atau pencarian kegagalan tersembunyi (*finding failure*). Tujuan utama dari *Task Selection* adalah memastikan bahwa tindakan perawatan yang dipilih efektif, efisien, dan proporsional dengan tingkat risiko yang ditimbulkan oleh mode kegagalan tersebut.

3.2.6 Pengolahan Data Kuantitatif (*RCM*)

Setelah analisis kualitatif, tahap selanjutnya berpusat pada pengolahan data kuantitatif. Ini bertujuan untuk mendukung perhitungan keandalan sistem dan memperkuat evaluasi teknis lebih lanjut. Pengolahan data kuantitatif melibatkan serangkaian langkah sebagai berikut:

1. Penentuan Komponen Kritis

Berdasarkan temuan FMEA dan LTA, komponen-komponen yang dianggap paling berisiko tinggi dan memiliki dampak signifikan terhadap kinerja sistem akan diseleksi. Komponen-komponen inilah yang kemudian menjadi fokus analisis statistik mendalam.

2. Perhitungan Waktu TTF (*Time to Failure*) dan TTR (*Time to Repair*)

Time to Failure (TTF) merujuk pada durasi antara pemasangan komponen hingga munculnya kerusakan pertama, sementara *Time to Repair (TTR)* adalah waktu yang diperlukan untuk memperbaiki komponen yang mengalami kegagalan. Data historis kedua parameter ini dikumpulkan dan diproses sebagai fondasi untuk analisis distribusi keandalan.

3. Penentuan Distribusi Data dan Uji *Goodness of Fit*

Langkah ini bertujuan mengidentifikasi distribusi TTF dan TTR yang paling representatif terhadap data yang ada, dengan memilih kurva yang memiliki nilai *index of fit (r)* tertinggi. Beberapa distribusi yang diuji dalam penelitian ini, yang relevan dengan karakteristik data industri, meliputi distribusi *Weibull*, eksponensial, normal, dan lognormal.

Setelah *index of fit* dihitung, tahap berikutnya adalah menguji kecocokan distribusi data menggunakan metode *goodness of fit*. Uji ini membandingkan dua hipotesis awal: asumsi bahwa data kerusakan atau perbaikan mengikuti distribusi tertentu (H_0) dan asumsi bahwa data tersebut tidak mengikuti distribusi tertentu (H_1). Uji *goodness of fit* terbagi menjadi tiga jenis spesifik: Uji *Mann* untuk distribusi *Weibull*, Uji *Bartlett* untuk distribusi Eksponensial, serta Uji *Kolmogorov-Smirnov* untuk distribusi Normal dan Lognormal.

4. Estimasi Parameter Distribusi

Pada tahap ini, metode *Maximum Likelihood Estimator (MLE)* diterapkan untuk mengestimasi parameter-parameter yang belum diketahui. Proses estimasi parameter dilakukan melalui empat pendekatan yang disesuaikan untuk masing-masing jenis distribusi yang relevan, yaitu distribusi *Weibull*, normal, lognormal, dan eksponensial.

5. Perhitungan *MTTF (Mean Time to Failure)* dan *MTTR (Mean Time to Repair)*

Berdasarkan distribusi dan parameter yang telah ditetapkan sebelumnya, nilai *Mean Time to Failure (MTTF)* dan *Mean Time to Repair (MTTR)* dihitung. Kedua indikator ini menyediakan informasi krusial mengenai rata-rata durasi hidup komponen sebelum kegagalan, serta rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk proses perbaikan. Nilai-nilai ini menjadi landasan vital dalam penentuan interval pemeliharaan optimal pada tahapan analisis berikutnya.

3.2.7 Pengolahan Data Kuantitatif (*Age Replacement*)

Pasca implementasi metode *RCM*, analisis dilanjutkan dengan pendekatan *Age Replacement*. Tujuannya adalah untuk menetapkan waktu penggantian *Preventive* serta interval pemeriksaan yang paling optimal. Penentuan ini didasarkan pada nilai MTTF dan MTTR dari distribusi yang terpilih dalam *RCM*, serta mempertimbangkan biaya-biaya terkait. Model ini menganalisis peningkatan risiko kegagalan seiring bertambahnya usia pakai komponen, dengan tujuan akhir merumuskan strategi pemeliharaan yang mampu meminimalkan downtime total dan biaya yang timbul. Tahapan analisis dalam pendekatan ini meliputi:

1. Penentuan Interval Waktu Penggantian Pencegahan Berbasis Minimasi *Downtime*

Pada tahap ini, metode *age replacement* diaplikasikan untuk meminimalkan *downtime*. Pemilihan waktu penggantian komponen dilakukan untuk mengidentifikasi hasil minimal yang dapat mencegah kegagalan sebelum terjadi, sehingga kerugian yang lebih besar dapat dihindari. Di samping itu, perhitungan juga dilakukan untuk mengoptimalkan biaya perawatan.

2. Penentuan Interval Waktu Pemeriksaan

Selain penggantian, penetapan jadwal pemeriksaan rutin juga esensial untuk mendeteksi gejala kegagalan sedini mungkin. Pelaksanaan inspeksi mesin secara berkala memberikan dampak positif, seperti penurunan probabilitas kerusakan, peningkatan umur pakai mesin, serta minimasi downtime mendadak yang disebabkan oleh kegagalan komponen.

3. Perhitungan Total Biaya Perawatan dan Biaya Usulan Perawatan

Tahap ini melanjutkan analisis dengan menghitung total biaya perawatan optimal. Tujuannya adalah mengidentifikasi strategi perawatan yang paling efisien, mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya, menekan biaya tak terduga, dan secara keseluruhan meningkatkan efisiensi strategi perawatan serta kinerja mesin.

3.2.8 Pengolahan Data Kuantitatif *Equivalent Annual Cost (EAC)*)

Setelah diperoleh informasi mengenai interval perawatan melalui pendekatan *RCM*, analisis selanjutnya beralih ke evaluasi ekonomi menggunakan metode *Equivalent Annual Cost (EAC)*. Metode ini berfungsi untuk mengevaluasi dan membandingkan rata-rata total biaya tahunan suatu aset atau sistem sepanjang siklus hidupnya, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang berorientasi pada efisiensi biaya untuk menetapkan umur ekonomis CT. Analisis *EAC* ini meliputi beberapa tahapan:

1. Penentuan *Minimum Attractive Rate of Return (MARR)*

Langkah awal dalam analisis EUAC adalah menetapkan *Minimum Attractive Rate of Return (MARR)*, yaitu tingkat pengembalian minimum yang diharapkan, yang akan menjadi dasar perhitungan nilai tahunan ekuivalen. Nilai MARR ini biasanya ditentukan berdasarkan kebijakan internal perusahaan atau standar industri sebagai tolok ukur kelayakan investasi secara ekonomis.

2. Kalkulasi Biaya Tahunan Ekuivalen Investasi (*Annual Equivalent Cost of Investment*)

Tahap ini bertujuan untuk mengonversi biaya investasi awal aset menjadi nilai tahunan yang setara. Perhitungan dilakukan menggunakan formula anuitas yang mempertimbangkan nilai investasi awal, umur ekonomis aset, dan tingkat MARR. Hasil dari perhitungan ini merepresentasikan besaran biaya investasi yang perlu dialokasikan setiap tahun selama umur aset untuk menutup seluruh pengeluaran modal awal.

3. Perhitungan Biaya Operasional dan Perawatan

Selanjutnya, dilakukan identifikasi dan kalkulasi biaya operasional serta pemeliharaan tahunan yang terkait dengan penggunaan CT. Ini mencakup baik biaya rutin (*Preventive maintenance*) maupun biaya tidak terduga (*corrective maintenance*). Komponen biaya ini merupakan bagian integral dari total biaya tahunan.

4. Perhitungan Nilai *Salvage Value* dan Estimasi Penyusutan

Dalam analisis siklus hidup aset, pertimbangan nilai sisa (*salvage value*) yaitu nilai jual kembali atau nilai akhir aset setelah masa ekonomisnya berakhir juga penting. Di samping itu, estimasi penyusutan digunakan untuk mengukur penurunan nilai aset seiring waktu, yang turut diperhitungkan dalam evaluasi total biaya.

5. Perhitungan Nilai *EAC*

Tahap final adalah mengintegrasikan seluruh komponen biaya yang telah dihitung (biaya investasi, operasional, perawatan, dan nilai sisa) menjadi satu nilai tahunan ekuivalen yang seragam. Nilai *EAC* yang dihasilkan ini kemudian digunakan untuk menentukan umur yang paling ekonomis bagi CT.

3.2.9 Analisis dan Pembahasan

Penelitian ini memusatkan analisis pada dua pendekatan utama. Pertama, dilakukan integrasi antara metode *Reliability Centered Maintenance (RCM)* dan *Age Replacement* untuk menentukan interval waktu perawatan yang paling efisien dan optimal. Kedua, metode *Equivalent Annual Cost (EAC)* diterapkan secara independen guna menetapkan umur ekonomis perangkat CT berdasarkan pertimbangan finansial jangka panjang. Pembahasan kemudian akan meliputi hasil analisis data kualitatif dan kuantitatif dari *RCM* serta *EAC* yang telah dilaksanakan pada tahapan sebelumnya.

3.2.10 Kesimpulan dan Saran

Pada bagian ini, akan disajikan kesimpulan yang menjawab rumusan masalah, didasarkan pada seluruh rangkaian penelitian yang telah dilaksanakan. Selanjutnya, bagian saran akan memuat rekomendasi untuk perusahaan terkait strategi pemeliharaan CT yang lebih efektif, serta memberikan masukan bagi peneliti mendatang untuk mengembangkan metode serupa atau memperluas aplikasinya pada aset kelistrikan lainnya. Saran-saran ini diharapkan dapat menjadi referensi untuk peningkatan efisiensi teknis dan ekonomis dalam pemeliharaan peralatan.

BAB IV

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Latar Belakang Perusahaan

Latar belakang perusahaan ini berisi tentang profil singkat perusahaan, lokasi perusahaan, tujuan, visi dan misi perusahaan dan waktu kerja yang ada pada perusahaan.

4.1.1 Profil Singkat Perusahaan

PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Transmisi (UPT) Pekanbaru adalah unit operasional vital dalam sistem kelistrikan nasional, yang berdedikasi pada pengelolaan dan pemeliharaan jaringan transmisi serta gardu induk di wilayah Riau dan Kepulauan Riau. Peran utamanya adalah menjaga keandalan dan stabilitas pasokan listrik, yang merupakan fondasi bagi keberlanjutan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat di wilayah tersebut. (Sofiah, Kholis, & Ajid, 2020).

Salah satu aset krusial yang berada di bawah pengelolaannya adalah Current Transformer (CT). CT berfungsi sebagai instrumen penting dalam sistem proteksi dan pengukuran arus listrik. Mengingat vitalnya peran ini, kegagalan pada CT tidak hanya dapat menyebabkan kerugian finansial akibat downtime dan biaya perbaikan, tetapi juga berpotensi mengganggu stabilitas seluruh jaringan transmisi. Oleh karena itu, UPT Pekanbaru secara berkelanjutan berupaya meningkatkan efisiensi dan keandalan asetnya.

Dalam konteks ini, penelitian yang mengintegrasikan metode Reliability Centered Maintenance (RCM) dan Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC) menjadi sangat relevan. Pendekatan RCM memungkinkan unit ini untuk menetapkan interval perawatan optimal pada CT, yang secara spesifik berfokus pada komponen kritis seperti Current Carrying Circuit. Sementara itu, metode EUAC memberikan kerangka kerja untuk menganalisis umur ekonomis aset, sehingga UPT Pekanbaru dapat membuat keputusan penggantian yang cerdas secara finansial.

Dengan mengimplementasikan temuan dari penelitian ini, PT PLN UPT Pekanbaru diharapkan dapat mencapai beberapa tujuan strategis yaitu berupa meningkatkan keandalan operasional sistem transmisi, mengurangi biaya perawatan dan kerugian akibat kerusakan tak terduga, mengoptimalkan umur pakai aset CT secara maksimal (Sholihin & Amin, 2021).

4.1.2 Waktu Kerja

Di PLN UPT Pekanbaru, jam kerja teknisi maupun operator umumnya mengikuti standar ketenagakerjaan nasional yang disesuaikan dengan kebutuhan lapangan serta kebijakan internal perusahaan. Tabel 4.1 berikut menunjukkan pembagian jam kerja pegawai teknis PLN UIP3B Sumatera:

Tabel 4. 1 Waktu Kerja

Hari	Waktu kerja (WIB)	Jumlah Jam kerja (Jam)	Keterangan
Senin – Jum’at	08.00 – 16.00	8	Jam Kerja Normal (<i>Shift Pagi</i>)
Sabtu - Minggu	Libur / On – Call	0	<i>Standby</i> Untuk Kondisi Darurat
Shift Malam	16.00 – 00.00	8	Untuk Petugas Pemantauan Sistem
Shift Dini Hari	00.00 – 08.00	8	Bertugas Sesuai Kebutuhan Operasional

Shift malam dan dini hari berlaku untuk tim operasi yang bertugas dalam sistem 24 jam, seperti di Gardu Induk, Trafo, atau Control Center.

4.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data berisi tentang data waktu kerusakan antar komponen-komponen mesin *Current Transformer (CT)*

4.2.1 Data Waktu Antar Kerusakan Komponen

parameter penting untuk menetapkan jadwal perawatan *Preventive* yang optimal. Data ini mencakup catatan waktu mulai terjadinya kerusakan (*actual start*) serta durasi perbaikan hingga mesin kembali beroperasi (*finish time*). Sebagai contoh, pada komponen kritis *Current Transformer (CT)*, data kerusakan dikumpulkan selama periode lima tahun, yakni dari tahun 2019 hingga 2024. Dengan pendekatan ini, interval perawatan dapat ditentukan secara lebih akurat guna meminimalkan downtime dan meningkatkan keandalan peralatan. Pada tabel 4.2 berikut merupakan data waktu antar kerusakan komponen

Tabel 4. 2 Data Waktu Antar Kerusakan komponen

No	Sub sistem	Sub-Sub System	Actual Start	Finish Time	Durasi (jam)
1	Current Carrying Circuit	terminal Primer	15/03/2015 10:00	15/03/2015 12:30	150
			25/05/2019 07:00	25/05/2019 14:00	420
			12/04/2021 13:00	12/04/2021 15:30	150
			30/06/2024 08:00	30/06/2024 10:00	120
		Konduktor Jumper	20/07/2016 08:30	20/07/2016 11:30	180
			01/09/2020 10:00	01/09/2020 15:00	300
		Belitan	05/01/2017 14:00	05/01/2017 16:00	120
			08/02/2022 09:00	08/02/2022 12:00	180
		Terminasi Sekunder & Wiring Kontrol	10/11/2018 09:00	10/11/2018 11:00	120
			19/10/2023 11:00	19/10/2023 13:00	120
2	Dielektrik	Minyak	10/04/2015 09:00	10/04/2015 11:00	120
			22/01/2017 10:00	22/01/2017 12:00	120
			18/06/2019 08:00	18/06/2019 13:30	330
			14/03/2019 11:00	14/03/2019 13:00	120
			25/07/2021 14:00	25/07/2021 16:00	120
			03/05/2023 09:00	03/05/2023 11:00	120
		Isolator / Body	05/09/2016 13:00	05/09/2016 15:00	120
			01/11/2020 09:00	01/11/2020 11:00	120
3	Mechanical Structure	Struktur dan Pondasi	08/03/2015 09:00	08/03/2015 11:30	150
			17/05/2016 10:00	17/05/2016 12:00	120
			02/08/2017 13:00	02/08/2017 15:00	120
			29/09/2018 08:00	29/09/2018 14:00	360
			11/04/2019 09:30	11/04/2019 12:00	150
			07/07/2020 11:00	07/07/2020 13:00	120
			21/10/2021 14:00	21/10/2021 16:30	150
			14/01/2022 09:00	14/01/2022 11:00	120

No	Sub sistem	Sub-Sub System	Actual Start	Finish Time	Durasi (jam)
4	Grounding	Sistem Koneksi Pentanahan	05/06/2023 10:00	05/06/2023 12:00	120
			18/09/2024 11:00	18/09/2024 13:30	150
			15/02/2016 09:00	15/02/2016 11:00	120
			20/06/2020 10:00	20/06/2020 12:00	120
			08/11/2024 14:00	08/11/2024 16:00	120

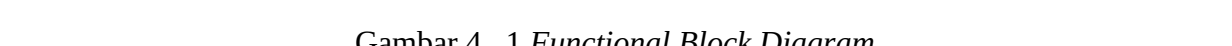
4.3 Pengolahan Data

4.3.1 Penentuan Komponen Kritis

Metode *Reliability-Centered Maintenance (RCM)* melakukan pengolahan data dengan tujuan utama menentukan komponen-komponen kritis suatu sistem melalui analisis fungsi, kemungkinan terjadinya kerusakan, serta efek yang mungkin timbul. Beberapa teknik yang diterapkan dalam proses ini meliputi *Functional Block Diagram (FBD)*, *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*, dan *Logic Tree Analysis (LTA)*. Masing-masing pendekatan tersebut berperan krusial dalam menguraikan fungsi komponen, mengkaji bentuk-bentuk kegagalan, serta menganalisis dampaknya terhadap keseluruhan sistem secara komprehensif. Komponen Kritis

4.3.1.1 *Functional Block Diagram (FBD)*

Functional Block Diagram (FBD) ini diperoleh melalui pengolahan data dan evaluasi mendalam, yang bertujuan untuk mendeskripsikan fungsi kerja mesin CT berdasarkan alur prosesnya. Diagram Gambar 4.1 berikut merepresentasikan FBD dari mesin CT tersebut.



Metode *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* diterapkan untuk mengidentifikasi beragam

Sub System	Failure	Effect of
------------	---------	-----------

No	Sub System & Sub Sub System	Function	Failure Mode	Effect of Failure	S	O	D	RPN
		yang proporsional untuk pengukuran dan proteksi.						
1.1	Terminal Primer	Menghubungkan CT ke sirkuit primer sistem tenaga listrik dengan kontak yang baik dan aman.	- kendor/b ad contact - Korosi	- Peningkatan resistansi kontak & pemanasan berlebih pada terminal. - Tegangan jatuh berlebih pada sisi primer. - Potensi <i>arcing</i> (loncatan api) atau percikan. - Gangguan intermiten pada sirkuit primer. - Potensi kegagalan isolasi di sekitar terminal.	8	7	6	336
1.2	Konduktor Jumper (jika ada)	Menghubungkan bagian-bagian sirkuit primer internal CT atau ke bushing.	- putus - Short Circuit (jika isolasi rusak)	- CT tidak berfungsi (open circuit pada primer). - Arus primer tidak dapat mengalir melalui CT. - Kerusakan komponen internal CT akibat short circuit. - Potensi ledakan/kebakara n CT. - Pemadaman listrik.	1 0	5	7	350
1.3	Belitan (Primer dan sekunder)	Mengubah arus primer menjadi arus sekunder berdasarkan rasio belitan.	- Rasio tidak Sesuai - hubung singkat	- Akurasi pengukuran CT menurun drastis/salah	9	6	8	432

No	Sub System & Sub Sub System	Function	Failure Mode	Effect of Failure	S	O	D	RPN
			antar lilitan - Putus Belitan - Degradasi isolasi antar lilitan	- kegagalan fungsi relay proteksi - pemanasan berlebih pada belitan Kerusakan permanen pada CT				
1.4	Terminasi Sekunder dan Wiring Kontrol	Menghubungkan belitan sekunder CT ke peralatan pengukuran dan proteksi (meter, relay).	- Rasio tidak sesuai - Terminasi terbalik - Terminasi Lepas Terminasi meleleh - Wiring Putus - Short Circuit - Baut Kendor	- Kesalahan pembacaan meter/operasi relay proteksi - Relay proteksi tidak berfungsi/bekerja pada kondisi yang salah - Pemanasan berlebih pada terminasi/wiring - Tinggi pada circuit sekunder - Potensi kerusakan pada alat ukur/relay - Bahaya bagi personel	9	8	9	648
2.	Dielectric	Mengisolasi bagian bertegangan dari bagian lain dan ground, serta menahan tegangan operasi dan surja.						
2.1	Minyak (pada CT tipe Minyak)	Bertindak sebagai media isolasi utama dan pendingin internal.	-Rembes / terkonta minasi air - Degradasi	- Penurunan kemampuan isolasi minyak - Peningkatan partial discharge internal - pemanasan berlebih pada CT	1 0	8	7	560

No	Sub System & Sub Sub System	Function	Failure Mode	Effect of Failure	S	O	D	RPN
			i Kualitas - Kontami nasi Partikel	- Hubung singkat internal CT - ledakan / kebakaran CT - Pemadaman Listrik				
2.2	Kertas (Insulasi kertas minyak)	Menyediakan isolasi padat di sekitar belitan dan membantu mempertahankan integritas dielektrik bersama minyak.	- Flashove r Internal - Degradasi mekanis - Penyerap an kelemba pan	- Kegagalan isolasi internal yang parah - Hubung singkat internal - Pemanasan berlebih dan kerusakan permanen belitan/inti - Ledakan / kebakaran CT - Pemadaman Listrik	1 0	7	8	560
2.3	Isolator / Body (Porselen / Komposit Bushing	Memberikan isolasi eksternal antara konduktor bertegangan dan tangki/ground, serta menahan beban mekanis.	- Retak - Pecah / kerusak an - Degradasi permuka an - Partial Discharg e perumak aan / internal bushing	- Peningkatan arus bocor permukaan - Flashover permukaan saat kotor / lembab - kegagalan isolasi total bushing - Ledakan bushing / kebakaran CT - Pemadaman Listrik - Bahaya keselamatan	1 0	6	6	360
3.	Mechanical Structure	Melindungi komponen internal, menopang CT, dan mempertahankan integritas fisik.						

No	Sub System & Sub Sub System	Function	Failure Mode	Effect of Failure	S	O	D	RPN
3.1	Struktur dan Pondasi	Menopang berat CT secara aman, menjaga stabilitas CT dari gaya eksternal (angin, gempa), dan mentransfer beban ke tanah.	<ul style="list-style-type: none"> - Penyangga Berat CT - Kerusakan akibat gaya eksternal berlebih - Pergeseran / Amblasnya pondasi 	<ul style="list-style-type: none"> - CT menjadi tidak stabil atau miring - Kerusakan fisik pada body CT / bushing - Potensi robohnya CT - Kerusakan pada koneksi elektrik - Pemadaman Listrik - Bahaya keselamatan (robohnya CT) 	9	4	5	180
4	Grounding	Menyediakan jalur aman ke tanah untuk arus gangguan dan arus bocor, serta menjaga potensi listrik bagian non-aktif CT pada nilai aman (nol).						
4.1	Sistem Koneksi pentanahan (Grounding Connection)	Menghubungkan Body CT dan terminal sekunder CT ke system pentanahan gardu induk	<ul style="list-style-type: none"> - Koneksi tidak sempurna - Kerusakan fisik pada konduktor grounding 	<ul style="list-style-type: none"> - Potensi tegangan sentuh berbahaya pada body CT - kegagalan fungsi relay - Arus bocor tidak dapat disalurkan dengan aman ke tanah. - kerusakan pada CT / peralatan lain akibat tegangan berlebih - Potensi kebakaran / ledakan akibat 	9	5	6	270

No	Sub System & Sub Sub System	Function	Failure Mode	Effect of Failure	S	O	D	RPN
				arcing pada titik koneksi yang buruk				

Keterangan:

1. S (*Severity*): Dampak terhadap sistem (1–10)
2. O (*Occurrence*): Frekuensi terjadinya (1–10)
3. D (*Detection*): Kemampuan mendeteksi sebelum gagal (1–10)
4. $RPN = S \times O \times D$

4.3.1.3 Logic Tree Analysis (LTA)

Logic Tree Analysis (LTA) merupakan metode analitis yang berfungsi untuk menetapkan strategi perawatan optimal dalam menangani berbagai mode kegagalan yang telah terdeteksi. Teknik ini memungkinkan pemetaan komprehensif terhadap dampak potensial dari setiap kegagalan, meliputi Aspek eviden (kemunculan gejala yang teramati/tidak. Faktor keselamatan operasional, Dampak *outage* terhadap kelangsungan produksi, Tingkat kritikalitas masing-masing *failure mode*. Klasifikasi tersebut menjadi dasar krusial dalam menyusun hierarki prioritas untuk program maintenance, baik yang bersifat *Preventive* maupun prediktif. Berikut merupakan Tabel 4.4 dari *logic tree analysis*:

Tabel 4. 4 *Logic Tree Analysis*

No	Sub System & Sub Sub System	Function	Functional Failure	Evidents	Safety	Outage	Category
1	<i>Current Carrying Circuit</i>	Mengalirkan arus primer (tinggi) dan menghasilkan arus sekunder yang proporsional untuk pengukuran dan proteksi.					
1.1	Terminal Primer	Menghubungkan CT ke sirkuit primer sistem tenaga	Terminal primer gagal mengalirkan	No	Yes	Yes	B

No	Sub System & Sub Sub System	Function	Functional Failure	Evidents	Safety	Outage	Category
		listrik dengan kontak yang baik dan aman.	arus dengan efektif atau putus koneksi.				
1.2	Konduktor Jumper	Menghubungkan bagian-bagian sirkuit primer internal CT atau ke bushing.	Konduktor jumper gagal mengalirkan arus (putus) atau menyebabkan hubungan singkat.	No	Yes	Yes	A
1.3	Belitan (Primer dan Sekunder)	Mengubah arus primer menjadi arus sekunder berdasarkan rasio belitan.	Belitan gagal menghasilkan rasio arus yang akurat atau mengalami hubungan singkat internal/putus.	No	Yes	Yes	A
1.4	Terminasi Sekunder dan Wiring Kontrol	Menghubungkan belitan sekunder CT ke peralatan pengukuran dan proteksi (meter, relay).	Terminasi/wiring gagal menyalurkan arus sekunder dengan benar atau menyebabkan kegagalan kontrol.	No	Yes	Yes	B
2.	Dielectric	Mengisolasi bagian bertegangan dari bagian lain dan ground, serta menahan					

No	Sub System & Sub Sub System	Function	Functional Failure	Evidents	Safety	Outage	Category
		tegangan operasi dan surja.					
2.1	Minyak (pada CT tipe minyak)	Bertindak sebagai media isolasi utama dan pendingin internal.	Minyak gagal mengisolasi dan mendinginkan secara efektif.	No	Yes	Yes	A
2.2	Kertas (Insulasi Kertas Minyak)	Menyediakan isolasi padat di sekitar belitan dan membantu mempertahankan integritas dielektrik bersama minyak.	Kertas gagal mengisolasi, menyebabkan hubungan singkat internal.	No	Yes	Yes	A
2.3	Isolator / Body (Porselen / Komposit Bushing)	Memberikan isolasi eksternal antara konduktor bertegangan dan tangki/ground.	Isolator/bus hing rusak, menyebabkan flashover atau hubungan singkat eksternal.	Yes	Yes	Yes	A
3.	Mechanical Structure	Melindungi komponen internal, menopang CT, dan mempertahankan integritas fisik.					
3.1	Struktur dan Pondasi	Menopang berat CT secara aman, menjaga stabilitas CT dari gaya	Struktur dan pondasi gagal menopang atau menjaga	Yes	Yes	Yes	A

No	Sub System & Sub Sub System	Function	Functional Failure	Evidents	Safety	Outage	Category
		eksternal, dan mentransfer beban ke tanah.	stabilitas CT.				
4.	Grounding	Menyediakan jalur aman ke tanah untuk arus gangguan dan arus bocor, serta menjaga potensi listrik bagian non-aktif CT pada nilai aman.					
4.1	Sistem Koneksi Pentanahan (Grounding Connection)	Menghubungkan bodi CT dan terminal sekunder CT ke sistem pentanahan gardu induk.	Sistem pentanahan gagal menyediakan jalur aman ke tanah atau koneksi tidak sempurna.	No	Yes	Yes	B

Keterangan Kategori:

1. A (*Critical*): Berdampak langsung pada keselamatan dan ketersediaan sistem → tindakan cepat diperlukan.
2. B (*Significant*): Tidak berdampak langsung pada keselamatan, tapi menyebabkan downtime atau kerugian sistemik.
3. C (*Minor*): Tidak berpengaruh signifikan secara langsung, namun bisa berdampak jangka panjang.
4. D (*Hidden*): Potensi kegagalan laten, tidak terdeteksi langsung namun bisa memicu sistem gagal total.

4.4 Pengolahan Data Kualitatif (penentuan Tindakan Perawatan)

Proses pengolahan data kualitatif berperan sebagai tahap penentuan langkah maintenance berdasarkan temuan analisis failure mode sebelumnya. Tahap krusial dalam proses ini meliputi Task Selection, yaitu mekanisme seleksi terhadap bentuk intervensi perawatan yang paling tepat.

4.4.1 Task Selection (Pemilihan Tindakan)

Task selection digunakan pada penelitian ini untuk melihat dan menentukan jenis perawatan seperti apa yang efektif dan dapat diterapkan oleh perusahaan dengan mempertimbangkan kegagalan yang akan terjadi serta menentukan dari segi biaya perawatan yang dikeluarkan. *Task Selection* (pemilihan tindakan) akan menentukan tindakan yang benar untuk mode kegagalan. Jika tindakan pencegahan belum efektif untuk diterapkan, maka akan diambil tindakan standar yang sesuai dengan dampak kegagalannya. Berikut merupakan hasil *task selection* pada Tabel 4.5:

Tabel 4. 5 *Task Selection*

No	Sub System & Sub Sub System	Mode Kegagalan Kritis (berdasarkan RPN tertinggi)	Kategori (A/B/C/D)	Rekomendasi Tugas Perawatan	<i>Selection Task</i>
1	<i>Current Carrying Circuit</i>				
1.1	Terminal Primer	Kendor / Bad Contact (RPN sekitar 336)	B	- Inspeksi visual & Termografi koneksi terminal.	OC
1.2	Konduktor Jumper	Putus / Rantas Short Circuit (RPN sekitar 350)	A	- Uji kontinuitas & Megger konduktor jumper (saat shutdown). - Redesign (jika sering terjadi).	OC /RD

No	Sub System & Sub Sub System	Mode Kegagalan Kritis (berdasarkan RPN tertinggi)	Kategori (A/B/C/D)	Rekomendasi Tugas Perawatan	<i>Selection Task</i>
1.3	Belitan (Primer & Sekunder)	Rasio tidak sesuai / Hubung Singkat Antar Lilitan (RPN sekitar 432)	A	- Uji Rasio CT, Polaritas, Resistansi Belitan, Arus Eksitasi (saat shutdown). - Partial Discharge Monitoring (online).	OC
1.4	Terminasi Sekunder dan Wiring Kontrol	Terminasi lepas / Wiring putus / Short circuit (RPN sekitar 648)	D	- Inspeksi visual & Termografi pada terminasi sekunder. - Uji fungsi proteksi dan alat ukur (saat shutdown).	OC / FF
2.	Dielectric				
2.1	Minyak (pada CT tipe minyak)	Degradasi Kualitas / Terkontaminasi Air (RPN sekitar 560- 640)	A	- Analisis Gas Terlarut (DGA) dan Kadar Air dalam Minyak (online/sampling).	OC
2.2	Kertas (Insulasi Kertas Minyak)	Flashover Internal (RPN sekitar 560)	A	- Partial Discharge Monitoring (online). - Uji Tangen Delta dan Kapasitansi	OC

No	Sub System & Sub Sub System	Mode Kegagalan Kritis (berdasarkan RPN tertinggi)	Kategori (A/B/C/D)	Rekomendasi Tugas Perawatan	<i>Selection Task</i>
				isolasi (saat shutdown).	
2.3	Isolator / Body (Porselen / Komposit Bushing)	Retak / Kerusakan Fisik (RPN sekitar 360- 490)	A	- Inspeksi visual harian/mingguan untuk retakan/pecah. - Pemantauan arus bocor (leakage current) permukaan.	OC
3.	Mechanical Structure				
3.1	Struktur dan Pondasi	Penyangga berat CT (Retak Pondasi, Baut Kendor) (RPN sekitar 180)	A	- Inspeksi visual berkala pada struktur, pondasi, dan pengecekan kekencangan baut.	OC
4.	Grounding				
4.1	Sistem Koneksi Pentanahan (Grounding Connection)	Koneksi tidak sempurna (kendor/korosi) (RPN sekitar 270)	B	- Inspeksi visual koneksi pentanahan. - Pengukuran Resistansi Pentanahan (saat shutdown).	OC

Keterangan:

- Kolom 1–7 = Kriteria kritikalitas dari *RCM* Decision Diagram (Y = Yes, N = No, – = tidak relevan)

- *Selection Task*:
 1. CD = *Scheduled Discard* (penggantian terjadwal)
 2. SR = *Scheduled Restoration* (pemulihan terjadwal)
 3. OC = *On-Condition* (pemeliharaan berbasis kondisi)

4.5 Pengolahan Data Kuantitatif (penentuan Interval Pemeriksaan dan Penentuan Komponen Kritis)

Pengolahan data kuantitatif dilakukan untuk menentukan interval pemeriksaan dan penentuan komponen kritis. Tahapan ini mencakup penentuan distribusi data waktu antar kerusakan dan perbaikan (*Time to Failure* dan *Time to Repair*), pengujian *goodness of fit*, perhitungan parameter distribusi, nilai tengah (*Mean Time to Failure* dan *Mean Time to Repair*), hingga perhitungan *reliability* dan total biaya perawatan optimum.

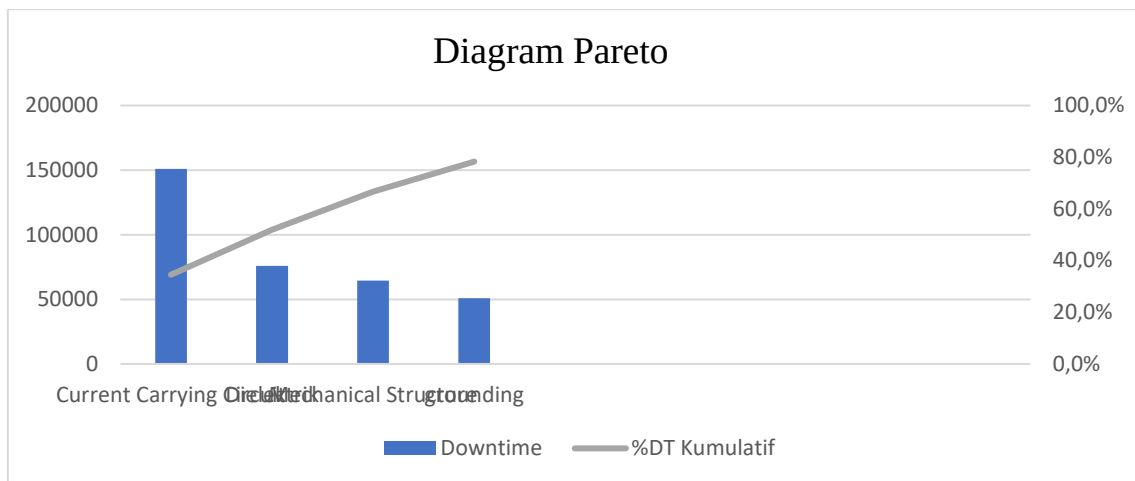
4.5.1 Penentuan Komponen Kritis

Proses penentuan komponen kritis diawali dengan analisis komponen yang mengalami waktu henti (*downtime*) terbesar, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan diagram Pareto untuk melihat kontribusi relatif setiap komponen terhadap total downtime sistem. Komponen-komponen yang masuk dalam 80% kumulatif awal pada diagram Pareto diklasifikasikan sebagai komponen paling kritis karena memberikan dampak paling signifikan terhadap kerugian produksi dan operasional. Berdasarkan data historis kerusakan selama lima tahun terakhir, tabel berikut menyajikan rekapitulasi downtime komponen pada CT (*Curent Transformer*) sebagai dasar analisis lebih lanjut. Berikut merupakan Tabel 4.6 sebagai penentuan komponen kritis:

Tabel 4. 6 Penentuan Komponen Kritis

No	Komponen Mesin	Frekuensi Kerusakan	<i>Downtime</i>	Kumulatif DT	% DT	%DT Kumulatif
1	<i>Current Carrying Circuit</i>	10	111600	111600	37,6%	37,6%
2	Dielektrik	8	70200	181800	23,6%	61,2%
3	Mechanical Structure	10	93600	275400	31,5%	92,7%
4	grounding	3	21600	297000	7,3%	100,0%

Berdasarkan data di atas, *Current Carrying Circuit* termasuk sebagai komponen paling kritis, karena secara kumulatif menyumbang 37,6% dari total downtime sistem.



Gambar 4. 1 Diagram Pareto

Diagram Pareto terbukti sangat efektif dalam memvisualisasikan kontribusi relatif tiap komponen terhadap total waktu henti sistem.

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

Setelah mengetahui komponen kritis maka selanjutnya akan ditentukan jarak antar kerusakan pada komponen *Current Carrying circuit*. Berikut merupakan Tabel 4.7 dari *TTF* komponen *Current Carrying Circuit*:

Tabel 4. 7 Time to Failure Komponen *Current Carrying Circuit*

Mulai Downtime	Selesai Downtime	ti
05/03/2019 11:20	08/03/2019 16:45	0
25/11/2019 08:55	28/11/2019 13:10	376810
18/06/2020 14:40	21/06/2020 11:35	292410
07/02/2021 10:15	10/02/2021 15:20	332560
24/09/2021 13:50	27/09/2021 09:30	325350
03/05/2022 09:30	06/05/2022 12:45	313920
10/12/2022 11:25	13/12/2022 14:10	313840
28/06/2023 08:15	01/07/2023 16:40	283325
12/11/2023 14:30	15/11/2023 10:15	192830
25/03/2024 09:45	28/03/2024 13:20	188610

Penelitian ini menerapkan metode *Least Square Curve Fitting* dengan kriteria seleksi berdasarkan nilai *Index of Fit (IOF)* tertinggi. Terdapat empat model distribusi probabilitas

yang dievaluasi untuk menganalisis data waktu kegagalan, meliputi: (1) Distribusi Eksponensial, (2) Distribusi Normal, (3) Distribusi Lognormal, dan (4) Distribusi Weibull.

1. Distribusi Normal

Berikut merupakan contoh perhitungan distribusi Normal ($i = 1$)

$$\begin{aligned} Xi &= ti \\ &= C \\ Xi^2 &= 709680^2 \\ &= 5,03646E + 11 \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} F(ti) &= \frac{(i - 0,3)}{(n + 0,4)} \\ &= \frac{(1-0,3)}{(9+0,4)} = 0,712765957 \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} Yi &= zi = \Phi^{-1}[F(ti)] \\ &= zi = \Phi^{-1}[0,712765957] = 0,561483339 \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} Yi^2 &= 0,561483339^2 \\ &= 0,31526354^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} XiYi &= 709680 \cdot 0,561483339 \\ &= 398473,4961 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Tabel dibawah ini adanya perhitungan nilai r pada distribusi Normal.

$$r \text{ normal} = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (4.6)$$

$$r \text{ normal} = \frac{9(398473,4961) - (709680)(0,561483339)}{\sqrt{[9(5,03646E+11) - (709680)^2][9(0,31526354) - (0,561483339)^2]}} = 0,95875 \quad (4.7)$$

Tabel 4. 8 Distribusi Normal MTTF

No.	ti	Xi = ti	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	XiYi
1	709680	709680	5,03646E+11	0,712765957	0,561483339	0,31526354	398473,4961
2	243510	243510	59297120100	0,074468085	-1,443299324	2,083112938	-351457,8183
3	970140	970140	9,41172E+11	0,925531915	1,443299324	2,083112938	1400202,406

4	282000	282000	79524000000	0,180851064	-0,912126504	0,831974759	-257219,6741
5	669360	669360	4,48043E+11	0,606382979	0,269904087	0,072848216	180662,9999
6	321000	321000	1,03041E+11	0,287234043	-0,561483339	0,31526354	-180236,1518
7	434490	434490	1,88782E+11	0,5	0	0	0
8	889860	889860	7,91851E+11	0,819148936	0,912126504	0,831974759	811664,8909
9	366900	366900	1,34616E+11	0,393617021	-0,269904087	0,072848216	-99027,80967

2. Distribusi *Lognormal*

Berikut ini adalah contoh perhitungan distribusi *Lognormal* (i = 1):

$$\begin{aligned} Xi &= \ln ti \\ &= \ln(709680) = 13,47256944 \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} xi^2 &= 13,47256944^2 \\ &= 181,5101274 \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} F(ti) &= \frac{(i - 0,3)}{(n + 0,4)} \\ &= \frac{(1-0,3)}{(9+0,4)} = 0,712765957 \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} Yi &= zi = \Phi^{-1}[F(ti)] \\ &= zi = \Phi^{-1}[0,712765957] = 0,56148339 \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} Yi^2 &= 0,56148339^2 \\ &= 0,31526354 \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} XiYi &= 13,47256944 \cdot 0,712765957 \\ &= 7,564623277 \end{aligned} \quad (4.13)$$

Tabel di bawah ini adanya perhitungan nilai r pada distribusi *Lognormal*.

$$r \text{ Lognormal} = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (4.14)$$

r Lognormal

$$\begin{aligned}
 &= \frac{9(7,564623277) - (13,47256944)(0,56148339)}{\sqrt{[9(181,5101274) - (13,47256944)^2][9(0,31526354) - (0,56148339)^2]}} \\
 &= 0,9740
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Tabel 4. 9 Distribusi Lognormal MTTF

No.	ti	Xi = ln(ti)	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	XiYi
1	709680	13,47256944	181,5101274	0,712765957	0,561483339	0,31526354	7,564623277
2	243510	12,40291329	153,832258	0,074468085	-1,443299324	2,083112938	-17,90111636
3	970140	13,78519567	190,0316197	0,925531915	1,443299324	2,083112938	19,89616359
4	282000	12,54966235	157,4940251	0,180851064	-0,912126504	0,831974759	-11,44687965
5	669360	13,41407731	179,9374701	0,606382979	0,269904087	0,072848216	3,620514295
6	321000	12,6791964	160,7620214	0,287234043	-0,561483339	0,31526354	-7,119157532
7	434490	12,98192821	168,53046	0,5	0	0	0
8	889860	13,69881943	187,6576537	0,819148936	0,912126504	0,831974759	12,49505627
9	366900	12,81284461	164,168987	0,393617021	-0,269904087	0,072848216	-3,458239132

3. Distribusi Eksponensial

Berikut merupakan contoh perhitungan distribusi Eksponensial (i = 1):

$$\begin{aligned}
 Xi &= ti \\
 &= 709680
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

$$\begin{aligned}
 Xi^2 &= 709680^2 \\
 &= 5,03646E + 11
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

$$\begin{aligned}
 F(ti) &= \frac{(i - 0,3)}{(n + 0,4)} \\
 &= \frac{(1-0,3)}{(9+0,4)} = 0,712765957
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

$$\begin{aligned}
 Yi &= \ln \left[\frac{1}{\{1 - F(ti)\}} \right] \\
 &= \ln \left[\frac{1}{\{1 - 0,712765957\}} \right] = 1,247457916
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

$$\begin{aligned}
 Y_i^2 &= 1,247457916^2 \\
 &= 1,556151253
 \end{aligned}
 \tag{4.20}$$

$$\begin{aligned}
 X_i Y_i &= 709680 \cdot 1,247457916 \\
 &= 885295,934
 \end{aligned}
 \tag{4.21}$$

Tabel di bawah ini adanya perhitungan nilai r pada distribusi Eksponensial.

$$\begin{aligned}
 r_{\text{Eksponensial}} &= \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \\
 r_{\text{Eksponensial}} &= \frac{9(885295,934) - (709680)(1,247457916)}{\sqrt{[9(5,03646E + 11) - (709680)^2][9(1,556151253) - (1,247457916)^2]}} \\
 &= 0,9608
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

Tabel 4. 10 Distribusi Eksponensial

No	ti	Xi = ti	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	XiYi
1	709680	709680	5,03646E+11	0,712765957	1,247457916	1,556151253	885295,934
2	243510	243510	59297120100	0,074468085	0,077386664	0,005988696	18844,42646
3	970140	970140	9,41172E+11	0,925531915	2,597384633	6,746406933	2519826,728
4	282000	282000	79524000000	0,180851064	0,19948936	0,039796005	56255,99964
5	669360	669360	4,48043E+11	0,606382979	0,93237687	0,869326627	624095,7815
6	321000	321000	1,03041E+11	0,287234043	0,338602163	0,114651425	108691,2943
7	434490	434490	1,88782E+11	0,5	0,693147181	0,480453014	301165,5185
8	889860	889860	7,91851E+11	0,819148936	1,710081438	2,924378525	1521733,069
9	366900	366900	1,34616E+11	0,393617021	0,500243514	0,250243574	183539,3454

4. Distribusi *Weibull*

Berikut merupakan contoh perhitungan distribusi *Weibull* (i = 1):

$$\begin{aligned}
 X_i &= \ln t_i \\
 &= \ln(709680) = 13,47256944
 \end{aligned}
 \tag{4.23}$$

$$\begin{aligned}
 X_i^2 &= 13,47256944^2 \\
 &= 181,5101274
 \end{aligned}
 \tag{4.24}$$

$$\begin{aligned}
 F(ti) &= \frac{(i - 0,3)}{(n + 0,4)} \\
 &= \frac{(i-0,3)}{(9+0,4)} = 0,712765957
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

$$\begin{aligned}
 Yi &= \ln | \ln \left[\frac{1}{\{1 - F(ti)\}} \right] \\
 &= \ln | \ln \left[\frac{1}{\{1 - 0,712765957\}} \right] = 0,221107814
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

$$\begin{aligned}
 Yi^2 &= 0,221107814^2 \\
 &= 0,048888665
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

$$\begin{aligned}
 XiYi &= 13,47256944 \cdot 0,221107814 \\
 &= 2,978890373
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

Tabel di bawah ini adanya perhitungan nilai r pada distribusi *Weibull*.

$$\begin{aligned}
 r_{\text{Weibull}} &= \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \\
 r_{\text{Weibull}} &= \frac{9(2,978890373) - (13,47256944)(0,221107814)}{\sqrt{[9(181,5101274) - (13,47256944)^2][9(0,048888665) - (0,221107814)^2]}} \\
 &= 0,9550
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

Tabel 4. 11 Distribusi Weibull MTTF

No.	ti	Xi = ln(ti)	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	XiYi
1	709680	13,47256944	181,5101274	0,712765957	0,221107814	0,048888665	2,978890373
2	243510	12,40291329	153,832258	0,074468085	-2,558940818	6,54817811	-31,73832108
3	970140	13,78519567	190,0316197	0,925531915	0,954505028	0,911079849	13,15803859
4	282000	12,54966235	157,4940251	0,180851064	-1,611994375	2,598525866	-20,22998512
5	669360	13,41407731	179,9374701	0,606382979	-0,070018179	0,004902545	-0,939229273
6	321000	12,6791964	160,7620214	0,287234043	-1,082929422	1,172736132	-13,73067483
7	434490	12,98192821	168,53046	0,5	-0,366512921	0,134331721	-4,758044422
8	889860	13,69881943	187,6576537	0,819148936	0,536540994	0,287876238	7,349978192
9	366900	12,81284461	164,168987	0,393617021	-0,69266027	0,47977825	-8,87494841

Tabel dibawah ini merupakan hasil dari *index of fit* pada 4 distribusi sebagai berikut pada Tabel 4.12 sebagai hasil indeks of fit:

Tabel 4. 12 Hasil Indeks of Fit

Hasil Indeks Of Fit			
No.	Distribusi	Indeks Of Fit	%IOF
1	Normal	0,958747	95,87%
2	Log Normal	0,974045	97,40%
3	Eksponensial	0,960829	96,08%
4	Weibull	0,954965	95,50%

Dari table berikut dipilih distribusi lognormal karena memiliki nilai Index Of Fit tertinggi yaitu 97,40%. Distribusi Lognormal secara khusus efektif dalam memodelkan kegagalan yang terjadi akibat proses degradasi, seperti kelelahan material atau korosi, di mana laju kegagalan cenderung meningkat seiring waktu. Model ini sering digunakan ketika data waktu kegagalan memiliki kemencengan ke kanan, yang menunjukkan bahwa sebagian besar komponen gagal pada usia yang lebih muda, tetapi beberapa dapat bertahan jauh lebih lama. Distribusi Lognormal dipilih karena kemampuannya dalam merepresentasikan pola kegagalan yang terkait dengan proses degradasi kumulatif. Model ini cocok untuk data yang tidak simetris dan sering diaplikasikan untuk memodelkan waktu kegagalan komponen mekanis dan listrik yang mengalami keausan seiring waktu (Modarres, Kaminskiy, & Kristov, 2016)

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

Selanjutnya ketika komponen kritis sudah diketahui maka menentukan jarak antar perbaikan pada komponen Kontak Utama. Berikut merupakan Tabel 4.13 untuk penentuan distribusi antar waktu perbaikan:

Tabel 4. 13 Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Perbaikan MTTR

No	Mulai Downtime	Selesai Downtime	ti	Dti
1	15/03/2015 10:00	15/03/2015 12:30	0	150
2	20/07/2016 08:30	20/07/2016 11:30	709680	180
3	05/01/2017 14:00	05/01/2017 16:00	243510	120
4	10/11/2018 09:00	10/11/2018 11:00	970140	120
5	25/05/2019 07:00	25/05/2019 14:00	282000	420
6	01/09/2020 10:00	01/09/2020 15:00	669360	300
7	12/04/2021 13:00	12/04/2021 15:30	321000	150
8	08/02/2022 09:00	08/02/2022 12:00	434490	180
9	19/10/2023 11:00	19/10/2023 13:00	889860	120
10	30/06/2024 08:00	30/06/2024 10:00	366900	120

Dalam pengujian ini, diterapkan metode Least Square Fitting dengan memilih IOF) index of Fit. Ada empat jenis distribusi yang digunakan untuk menganalisis waktu kerusakan, yakni Distribusi Normal, Distribusi Lognormal, Distribusi Eksponensial, dan Distribusi Weibull.

1. Distribusi Normal

Berikut Merupakan contoh perhitungan Distribusi Normal (i=1)

$$\begin{aligned} Xi &= dti \\ &= 150 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Xi^2 &= 150^2 \\ &= 22500 \end{aligned} \tag{4.30}$$

$$\begin{aligned} F(dti) &= \frac{(i - 0,3)}{(n + 0,4)} \\ &= \frac{(1 - 0,3)}{(10 + 0,4)} = 0,5 \end{aligned} \tag{4.31}$$

$$\begin{aligned} Yi &= zi | \Phi^{-1}[F(ti)] \\ &= zi | \Phi^{-1}[0,5] = 0 \end{aligned} \tag{4.32}$$

$$\begin{aligned} Yi^2 &= 0^2 \\ &= 0 \end{aligned} \tag{4.33}$$

$$\begin{aligned} XiYi &= 150 \cdot 0 \\ &= 0 \end{aligned} \tag{4.34}$$

Tabel di bawah ini adanya perhitungan nilai r pada distribusi *Normal*.

$$\begin{aligned} r \text{ Normal} &= \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \\ r \text{ Normal} &= \frac{10(0) - (150)(0)}{\sqrt{[10(22500) - (150)^2][10(0) - (0)^2]}} = 0,87762 \end{aligned} \tag{4.35}$$

Tabel 4. 14 Distribusi Normal MTTR

No.	Dti	Xi = Dti	Xi^2	F(Dti)	Yi	Yi^2	XiYi
1	150	150	22500	0,5	0	0	0
2	180	180	32400	0,692307692	0,502402223	0,252407994	90,43240021
3	120	120	14400	0,163461538	-0,980330352	0,961047599	-117,6396423
4	120	120	14400	0,355769231	-0,369790678	0,136745146	-44,37488136
5	420	420	176400	0,932692308	1,496146876	2,238455475	628,381688
6	300	300	90000	0,836538462	0,980330352	0,961047599	294,0991057
7	150	150	22500	0,5	0	0	0
8	180	180	32400	0,692307692	0,502402223	0,252407994	90,43240021
9	120	120	14400	0,163461538	-0,980330352	0,961047599	-117,6396423
10	120	120	14400	0,163461538	-0,980330352	0,961047599	-117,6396423

2. Distribusi Lognormal

Berikut Merupakan Contoh Perhitungan Dsistribusi Lognormal (i=1)

$$\begin{aligned}
 Xi &= \ln dti \\
 &= \ln (150) = 5,0106353
 \end{aligned} \tag{4.36}$$

$$\begin{aligned}
 Xi^2 &= 5,0106353^2 \\
 &= 25,10646605
 \end{aligned} \tag{4.37}$$

$$\begin{aligned}
 F(dti) &= \frac{(i - 0,3)}{(n + 0,4)} \\
 &= \frac{(1-0,3)}{(10+0,4)} = 0,5
 \end{aligned} \tag{4.38}$$

$$\begin{aligned}
 Yi &= zi | \Phi^{-1}[F(ti)] \\
 &= zi | \Phi^{-1}[0,5] = 0
 \end{aligned} \tag{4.39}$$

$$\begin{aligned}
 Yi^2 &= 0^2 \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{4.40}$$

$$\begin{aligned}
 XiYi &= 150 \cdot 0 \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{4.41}$$

Tabel di bawah ini adanya perhitungan nilai r pada distribusi *Lognormal*.

$$r_{\text{Lognormal}} = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}$$

$$r_{\text{Lognormal}} = \frac{10(0) - (150)(0)}{\sqrt{[9(25,10646605) - (150)^2][10(0) - (0)^2]}} = 0,9336 \quad (4.42)$$

Tabel 4. 15 Distribusi Lognormal MTTR

No.	Dti	Xi = ln(Dti)	Xi^2	F(Dti)	Yi	Yi^2	XiYi
1	150	5,0106353	25,10646605	0,5	0	0	0
2	180	5,1929569	26,96680086	0,692307692	0,502402223	0,252407994	2,608953068
3	120	4,7874917	22,92007719	0,163461538	-0,980330352	0,961047599	-4,693323466
4	120	4,7874917	22,92007719	0,355769231	-0,369790678	0,136745146	-1,770369818
5	420	6,0402547	36,48467698	0,932692308	1,496146876	2,238455475	9,037108218
6	300	5,7037825	32,53313452	0,836538462	0,980330352	0,961047599	5,591591082
7	150	5,0106353	25,10646605	0,5	0	0	0
8	180	5,1929569	26,96680086	0,692307692	0,502402223	0,252407994	2,608953068
9	120	4,7874917	22,92007719	0,163461538	-0,980330352	0,961047599	-4,693323466
10	120	4,7874917	22,92007719	0,163461538	-0,980330352	0,961047599	-4,693323466

3. Distribusi Eksponensial

Berikut merupakan contoh perhitungan Distribusi Eksponensial ($i=1$)

$$Xi = dti$$

$$= 150 \quad (4.43)$$

$$Xi^2 = 150^2$$

$$= 22500 \quad (4.44)$$

$$F(dti) = \frac{(i - 0,3)}{(n + 0,4)}$$

$$= \frac{(1 - 0,3)}{(10 + 0,4)} = 0,5 \quad (4.45)$$

$$Yi = zi | \Phi^{-1}[F(ti)]$$

$$= zi | \Phi^{-1}[0,5] = 0,693147181 \quad (4.46)$$

$$\begin{aligned}
 Y_i^2 &= 0,693147181^2 \\
 &= 0,480453014
 \end{aligned}
 \tag{4.47}$$

$$\begin{aligned}
 XiY_i &= 150 \cdot 0,693147181 \\
 &= 103,9720771
 \end{aligned}
 \tag{4.48}$$

Tabel di bawah ini adanya perhitungan nilai r pada distribusi *Eksponensial*.

$$\begin{aligned}
 r_{\text{Eksponensial}} &= \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \\
 r_{\text{Eksponensial}} &= \frac{10(103,9720771) - (150)(0,693147181)}{\sqrt{[10(22500) - (150)^2][10(0,480453014) - (0,693147181)^2]}} = 0,8206 \tag{4.49}
 \end{aligned}$$

Tabel 4. 16 Distribusi Eksponensial MTTR

No.	Dti	Xi = Dti	Xi ²	F(Dti)	Yi	Yi ²	XiYi
1	150	150	22500	0,5	0,693147181	0,480453014	103,9720771
2	180	180	32400	0,692307692	0,502402223	0,252407994	90,43240021
3	120	120	14400	0,163461538	-0,980330352	0,961047599	-117,6396423
4	120	120	14400	0,355769231	-0,369790678	0,136745146	-44,37488136
5	420	420	176400	0,932692308	1,496146876	2,238455475	628,381688
6	300	300	90000	0,836538462	0,980330352	0,961047599	294,0991057
7	150	150	22500	0,5	0	0	0
8	180	180	32400	0,692307692	0,502402223	0,252407994	90,43240021
9	120	120	14400	0,163461538	-0,980330352	0,961047599	-117,6396423
10	120	120	14400	0,163461538	-0,980330352	0,961047599	-117,6396423

4. Distribusi Weibull

Berikut merupakan contoh perhitungan Distribusi Weibull

$$\begin{aligned}
 Xi &= \ln dti \\
 &= \ln (150) = 5,010635294
 \end{aligned}
 \tag{4.50}$$

$$\begin{aligned}
 Xi^2 &= 5,010635294^2 \\
 &= 25,10646605
 \end{aligned}
 \tag{4.51}$$

$$\begin{aligned}
 F(dti) &= \frac{(i - 0,3)}{(n + 0,4)} \\
 &= \frac{(i-0,3)}{(9+0,4)} = 0,5
 \end{aligned}
 \tag{4.52}$$

$$\begin{aligned}
 Yi &= zi \mid \emptyset^{-1}[F(ti)] \\
 &= zi \mid \emptyset^{-1}[0,5] = -0,366512921
 \end{aligned}
 \tag{4.53}$$

$$\begin{aligned}
 Yi^2 &= -0,366512921^2 \\
 &= 0,134331721
 \end{aligned}
 \tag{4.54}$$

$$\begin{aligned}
 XiYi &= 150 \cdot -0,366512921 \\
 &= -1,836462576
 \end{aligned}
 \tag{4.55}$$

Tabel di bawah ini adanya perhitungan nilai r pada distribusi *Weibull*.

$$\begin{aligned}
 r_{\text{Weibull}} &= \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \\
 r_{\text{Weibull}} &= \frac{9(-1,836462576) - (150)(-0,366512921)}{\sqrt{[9(25,10646605) - (150)^2][9(0,134331721) - (-0,366512921)^2]}} \\
 &= 0,8834
 \end{aligned}
 \tag{4.56}$$

Tabel 4. 17 Distribusi Weibull MTTR

No.	ti	Xi = ln(ti)	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	XiYi
1	150	5,010635294	25,10646605	0,5	-0,366512921	0,134331721	-1,836462576
2	180	5,192956851	26,96680086	0,692307692	0,164373955	0,027018797	0,853586855
3	120	4,787491743	22,92007719	0,163461538	-1,72326315	2,969635885	-8,250108102
4	120	4,787491743	22,92007719	0,355769231	-0,821666515	0,675135862	-3,933721657
5	420	6,040254711	36,48467698	0,932692308	0,992688929	0,985431311	5,996093983
6	300	5,703782475	32,53313452	0,836538462	0,593977217	0,352808934	3,387916839
7	150	5,010635294	25,10646605	0,5	-0,366512921	0,134331721	-1,836462576
8	180	5,192956851	26,96680086	0,692307692	0,164373955	0,027018797	0,853586855
9	120	4,787491743	22,92007719	0,163461538	-1,72326315	2,969635885	-8,250108102
10	120	4,787491743	22,92007719	0,163461538	-1,72326315	2,969635885	-8,250108102

Tabel 4.18 dibawah ini merupakan hasil dari Inde of Fit pada 4 Distribusi sebagai berikut:

Tabel 4. 18 Hasil Indeks of Fit

Hasil Indeks Of Fit			
No.	Distribusi	Indeks Of Fit	%IOF
1	Normal	0,877618	87,76%
2	Log Normal	0,933559	93,36%
3	Eksponensial	0,820558	82,06%
4	Weibull	0,883423	88,34%

Dari tabel berikut dipilih Distribusi karena memiliki nilai Index of Fit tertinggi yaitu 93,36%. Distribusi Lognormal secara khusus efektif dalam memodelkan kegagalan yang terjadi akibat proses degradasi, seperti kelelahan material atau korosi, di mana laju kegagalan cenderung meningkat seiring waktu. Model ini sering digunakan ketika data waktu kegagalan memiliki kemencengan ke kanan, yang menunjukkan bahwa sebagian besar komponen gagal pada usia yang lebih muda, tetapi beberapa dapat bertahan jauh lebih lama. Distribusi Lognormal dipilih karena kemampuannya dalam merepresentasikan pola kegagalan yang terkait dengan proses degradasi kumulatif. Model ini cocok untuk data yang tidak simetris dan sering diaplikasikan untuk memodelkan waktu kegagalan komponen mekanis dan listrik yang mengalami keausan seiring waktu (Modarres, Kaminskiy, & Kristov, 2016)

4.5.4 Uji *Goodness of Fit* pada Distribusi Data Waktu Kerusakan (*Time to Failure*)

Goodness of Fit berfungsi untuk menguji hipotesis terkait distribusi yang dipilih—dalam penelitian ini adalah Distribusi Lognormal—yang ditetapkan berdasarkan karakteristik awal data kerusakan. Adapun pengujian distribusi waktu antar kerusakan pada Tabel 4.19 dilaksanakan dengan memanfaatkan metode Kolmogorov-Smirnov

Tabel 4. 19 uji Goodness of Fit pada Distribusi Data Waktu Kerusakan MTTF

No	Ti	ln(ti)	Zti	Fti	D1	D2
1	243510	12,40291329	-1,410545683	0,079189309	0,079189309	0,031921802
2	282000	12,54966235	-1,108654549	0,133789618	0,022678507	0,088432604
3	321000	12,6791964	-0,842178011	0,19984416	-0,022378062	0,133489173
4	366900	12,81284461	-0,56723786	0,285276294	-0,048057039	0,15916815
5	434490	12,98192821	-0,219400275	0,413169128	-0,031275317	0,142386428
6	669360	13,41407731	0,669613809	0,748447996	0,19289244	-0,081781329
7	709680	13,47256944	0,789943411	0,785219591	0,118552925	-0,007441813
8	889860	13,69881943	1,255383279	0,895330172	0,117552394	-0,006441283
9	970140	13,78519567	1,433075878	0,924081923	0,035193034	0,075918077
Total	4886940	117,7972067			Dn Max	0,19289244

Dari Tabel berikut diketahui bahwa:

Dhitung dapat diperoleh dari nilai terbesar antara D1 dan D2, maka Dhitung = 0,4533

Hipotesa untuk melakukan Uji Kolmogorov-Smirnov Test adalah:

H0 = Data Time Failure berdistribusi Lognormal

H1 = Data Time Failure tidak berdistribusi Lognormal

$\alpha = 0,05$

Dtabel = dilihat pada table Kolmogorov-Smirnov, dengan nilai Dcrit 9;0,05 = 0,4533

Wilayah kritis: $D_n < D_{crit}$ maka H0 diterima

Bahwa keputusannya $D_n < D_{crit}$, $D_n = 0,4517 < D_{crit} = 0,4533$, yaitu H0 diterima.

4.5.5 Uji *Goodness of Fit* pada Distribusi data Waktu Perbaikan (*Time to Repair*)

Uji *Goodness of Fit* diterapkan untuk menguji hipotesis pada distribusi yang telah dipilih, dalam hal ini Distribusi Lognormal, yang telah diseleksi melalui tahapan pemilihan distribusi awal data perbaikan. Proses pengujian kesesuaian distribusi terhadap data waktu antar kerusakan pada Tabel 4.20 ini dilakukan dengan metode Kolmogorov-Smirnov.

Tabel 4. 20 Uji Goodness of Fit pada Distribusi data Waktu Perbaikan MTTR

No	dti	ln(ti)	Zti	Fti	D1	D2
1	120	4,787491743	-0,840069995	0,200434571	0,200434571	-0,100434571
2	120	4,787491743	-0,840069995	0,200434571	0,100434571	-0,000434571
3	120	4,787491743	-0,840069995	0,200434571	0,000434571	0,099565429
4	120	4,787491743	-0,840069995	0,200434571	-0,099565429	0,199565429
5	150	5,010635294	-0,292955651	0,384778025	-0,015221975	0,115221975
6	150	5,010635294	-0,292955651	0,384778025	-0,115221975	0,215221975
7	180	5,192956851	0,154069317	0,56122246	-0,03877754	0,13877754
8	180	5,192956851	0,154069317	0,56122246	-0,13877754	0,23877754
9	300	5,703782475	1,406536728	0,920217597	0,120217597	-0,020217597
10	420	6,040254711	2,231515922	0,987176513	0,087176513	0,012823487
Total	1860	51,30118845			Dn Max	0,23877754

Dari Tabel berikut diketahui bahwa:

Dhitung dapat diperoleh dari nilai terbesar antara D1 dan D2, maka Dhitung = 0,4300.

Hipotesa untuk melakukan Uji Kolmogorov-Smirnov Test adalah:

H0 = Data Time Failure berdistribusi Lognormal

H1 = Data Time Failure tidak berdistribusi Lognormal

$$\alpha = 0,05$$

Dtabel = dilihat pada table Kolmogorov-Smirnov, dengan nilai Dcrit 9;0,05 = 0,4300

Wilayah kritis: $D_n < D_{crit}$ maka H_0 diterima

Bahwa keputusannya $D_n < D_{crit}$, $D_n = 0,2351 < D_{crit} = 0,4300$, yaitu H_0 diterima.

4.5.6 Perhitungan parameter Dari Distribusi Waktu Kerusakan (*Time to Failure*)

Parameter yang digunakan untuk perhitungan dari distribusi data waktu kerusakan yaitu β (Beta) (Parameter Bentuk) dan η (Eta) (Parameter Bentuk) dengan perhitungan sebagai berikut:

- a. T_{med} (Parameter Lokasi)

$$N = 9$$

$$\mu = \frac{\sum \ln(t_i)}{N}$$

$$\mu = \frac{117,7972067}{9}$$

$$\mu = 13,08857852$$

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

$$= e^{13,08857852}$$

$$= 483389,7404 \quad (4.57)$$

- b. S (Parameter bentuk)

$$S = \sqrt{\frac{\sum \ln(t_i)}{N}}$$

$$S = \sqrt{\frac{117,7972067}{9}}$$

$$S = 0,486099276 \quad (4.58)$$

4.5.7 Perhitungan Parameter Dari Distribusi Waktu Perbaikan (*Time to Repair*)

Parameter yang digunakan untuk perhitungan dari distribusi data waktu perbaikan yaitu T_{med} (parameter lokasi) dan s (parameter bentuk) dengan perhitungan sebagai berikut:

- a. T_{med} (Parameter Lokasi)

$$N = 10$$

$$\mu = \frac{\sum \ln(t_i)}{N}$$

$$\mu = \frac{51,30118845}{10}$$

$$\mu = 5,130118845$$

$$\begin{aligned}
T_{med} &= e^{\mu} \\
&= e^{5,130118845} \\
&= 169,037206
\end{aligned} \tag{4.59}$$

b. S (Parameter Bentuk)

$$\begin{aligned}
S &= \sqrt{\frac{\sum \ln(ti)}{N}} \\
S &= \sqrt{\frac{51,30118845}{10}} \\
S &= 0,407855421
\end{aligned} \tag{4.60}$$

4.5.8 Penentuan Nilai Tengah Dari Distribusi Data Waktu Kerusakan (*Mean to Failure*)

Berikut merupakan penentuan nilai *Mean Time to Failure* (penentuan nilai tengah) dari distribusi waktu antar kerusakan untuk distribusi Log Normal:

$$\begin{aligned}
MTTF &= T_{med} * e^{\frac{s^2}{2}} \\
&= 483389,7404 * e^{\frac{0,486099276^2}{2}} \\
&= 544011,0163
\end{aligned} \tag{4.61}$$

4.5.9 Penentuan Nilai tengah dari Distribusi Data Waktu Perbaikan (*Mean to repair*)

Berikut merupakan penentuan nilai *Mean Time to Repair* (penentuan nilai tengah) dari distribusi waktu antar perbaikan untuk distribusi Log Normal:

$$\begin{aligned}
MTTF &= T_{med} * e^{\frac{s^2}{2}} \\
&= 169,037206 * e^{\frac{0,40785521^2}{2}} \\
&= 183,6977726
\end{aligned} \tag{4.62}$$

4.5.10 Perhitungan Waktu Penggantian Pencegahan Dengan Minimasi *Downtime*

Perhitungan interval waktu penggantian pencegahan dengan minimasi *downtime* menggunakan metode *Age Replacement* yang dimana nilai interval waktu antar kerusakan (tp) dimana yang terpilih yaitu yang memiliki nilai *downtime* terkecil. Dibawah ini merupakan data-data yang dibutuhkan untuk mencari interval waktu penggantian pencegahan dengan minimasi *downtime* sebagai berikut:

1. Data waktu kerusakan berdistribusi Lognormal

$$MTTF = 544011,0163$$

$$T_{med} = 483389,7404$$

$$S = 0,486099276$$

2. Waktu untuk melakukan penggantian kerusakan komponen

$$T_f = 183,6977726$$

3. Waktu untuk melakukan penggantian Preventive

$$T_p = 183,6977726$$

Dibawah ini merupakan data-data untuk perhitungan interval waktu penggantian pencegahan dengan minimasi *downtime* pada Tabel 4.21 berikut:

Tabel 4. 21 Distribusi Lognormal MTTF

MTTF	544011,0163	Rata-Rata	13,08857852	Distribusi Lognormal		
Tf/Tp	183,6977726	S	0,486099276			
tp	Rtp	Ftp	tp + Tp	Mtp	MTTF/Ftp + Tf	Dtp
1	1	5,49E-160	184,6978	9,91E+164	9,91E+164	0,000337558
54401,1	0,999997	0,000003498	54584,7994	1,56E+11	1,56E+11	0,000306881
108802,2	0,998922	0,001077935	108985,9010	504.678.848,19	5,05E+08	0,000281365
217604,4	0,949698	0,050301511	217788,1043	10.815.003,52	10.815.187,22	0,000244652
326406,6	0,790402	0,209597902	326590,3076	2.595.498,38	2.595.682,08	0,000228996
435208,8	0,585506	0,414493990	435392,5108	1.312.470,21	1.312.653,91	0,000229906
462409,4	0,536366	0,463633800	462593,0616	1.173.363,58	1.173.547,28	0,000231879
489609,9	0,489508	0,510492061	489793,6125	1.065.660,09	1.065.843,79	0,000234349
516810,5	0,445306	0,554693836	516994,1633	980.741,05	980.924,75	0,000237233
544011	0,403983	0,596016528	544194,7141	912.744,85	912.928,55	0,000240453
571211,6	0,365641	0,634358900	571395,2649	857.576,08	857.759,77	0,000243937
598412,1	0,330287	0,669713093	598595,8157	812.304,59	812.488,28	0,000247624
625612,7	0,297859	0,702140538	625796,3665	774.789,36	774.973,06	0,000251455
652813,2	0,268248	0,731751965	652996,9174	743.436,36	743.620,06	0,00025538
707214,3	0,216877	0,783122886	707398,0190	694.668,78	694.852,47	0,000263338
761615,4	0,174833	0,825167157	761799,1206	659.273,71	659.457,41	0,000271201
816016,5	0,140702	0,859297747	816200,2223	633.087,91	633.271,61	0,000278748
Min Dtp =						0,000228996

Berikut merupakan contoh perhitungan interval waktu penggantian pencegahan pada mesin CT di komponen Mekanisme Pemutus dengan distribusi Log Normal untuk $t_p = 326406,6$

- a. $F(326406,6) = \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{t}{T_{med}}\right)$
 $= 0,209597902$
- b. $R(326406,6) = 1 - F_{t_p}$
 $= 0,790402$
- c. $M(326406,6) = \frac{MTTF}{1 - R_{t_p}}$
 $= \frac{544011,0163}{1 - 0,790402}$
 $= 2.595.498,38$
- d. $D_{tp} = \frac{T_p * R_{t_p} + T_f(1 - R_{t_p})}{(t_p + T_p)R_{t_p} + (M_{t_p} + T_f)(1 - R_{t_p})}$

Berdasarkan perhitungan di atas didapat nilai D_{tp} yang paling minimum adalah pada $t_p = 326406,6$ menit. Sehingga waktu interval penggantian *Sub system Current Carrying Circuit* dan *Sub Sub System Terminasi Sekunder & Wiring Kontrol* dengan kriteria minimasi *downtime* pada menit ke 326406,6 atau 7,55 bulan selama periode 10 tahun.

4.5.11 Perhitungan Interval Waktu Pemeriksaan

Berikut merupakan perhitungan interval waktu pemeriksaan pada Trafo Arus:

1. Waktu yang dibutuhkan perusahaan untuk pemeriksaan Trafo Arus adalah 2 jam
2. Jumlah Pemeriksaan (K)
 - a. 1 Bulan = 26 Hari Kerja
 (1 Hari = 8 jam kerja)
 - b. $T = 26 \text{ hari/bulan} \times 8 \text{ jam/hari} = 208 \text{ jam/bulan}$
 - c. Jumlah kerusakan *Sub system Current Carrying Circuit* selama 10 Tahun = 10 kali
 - d. $K = \frac{10}{120} = 0,833$
3. Waktu rata-rata yang dibutuhkan untuk perbaikan
 - a. $MTTR = 183,6977726 \text{ Menit} = 3,061 \text{ Jam}$
 - b. $t = 208 \text{ jam/bulan}$
 - c. $\frac{1}{\mu} = \frac{MTTR}{t}$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{3,061}{208} = 67.951$$

4. Waktu rata-rata melakukan pemeriksaan

a. Waktu untuk melakukan pemeriksaan $t_i = 2$ jam

b. $t = 208$ jam/bulan

c. $\frac{1}{i} = \frac{T_i}{t}$

$$\frac{T_i}{208} = \frac{1}{208} = 0,0048$$

5. Perhitungan Frekuensi Pemeriksaan

$$N = \sqrt{\frac{K \cdot t}{\mu}}$$

$$N = \sqrt{\frac{0,833 \cdot 208}{67,951}}$$

$$N = 1,597$$

6. Interval Waktu pemeriksaan

$$= \frac{t}{N}$$

$$= \frac{208}{1,597} = 130,2442078897934 \text{ jam} = 5,4 \text{ Hari}$$

4.5.12 Perhitungan Total Biaya Perawatan dan Biaya Usulan Perawatan

Perhitungan total biaya perawatan dilakukan untuk menentukan semua biaya yang terkait dengan pemeliharaan pencegahan untuk mencegah kerusakan dari komponen. Biaya ini mencakup berbagai aspek yang diperlukan agar komponen mesin tetap berjalan optimal dan mencegah downtime tidak terduga. Berikut merupakan variabel yang termasuk dalam perhitungan total biaya perawatan *Preventive*.

1. Biaya Tenaga kerja (Teknisi)

Biaya tenaga kerja merupakan biaya yang dibayarkan kepada teknisi atau karyawan yang melakukan perawatan pada mesin. Berikut merupakan Tabel 4.22 yaitu biaya tenaga kerja untuk perbaikan atau pengecekan setiap kali bekerja:

Tabel 4. 22 Biaya Tenaga Kerja

Harga tenaga kerja (Teknisi)	Rp125.000
Harga tenaga kerja (Helper)	Rp137.500
Konsumsi & extra voeding	Rp40.500
Total tenaga kerja	1 orang

Total biaya tenaga kerja	$(Rp125.000Rp137.500+Rp40.500) \times 1$ $= Rp303.000$
--------------------------	---

2. Biaya Material

Biaya material merupakan biaya pembelian bahan baku dan perlengkapan yang digunakan dalam melakukan perawatan. Berikut merupakan Tabel 4.23 yaitu rincian biaya untuk

setiap perawatan mesin:

Tabel 4. 23 Biaya Material

Contact lubricant 500g	Rp1.573.000
Estimasi per perawatan	100gr
Total biaya contact lubricant per perawatan	Rp1.573.000
x 1/5	Rp314.600
Sarung tangan kain bintik – bintik / Lusin	Rp57.420
Pemakaian per perawatan	1/12 Lusin
Total biaya sarung tangan kain bintik – bintik	Rp57.420
x 2/12 lusin	Rp9.570
Total biaya material per perawatan	Rp324.170

3. Biaya Kerugian Selama Kerusakan

Biaya kerugian akibat perawatan komponen dihitung berdasarkan biaya konsumsi & extra voeding per tenaga kerja yang dikerahkan. Sehingga untuk perhitungan biaya kerugian selama kerusakan dihitung pada Tabel 4.24 berikut:

Tabel 4. 24 Biaya Kerugian Selama Kerusakan

Biaya kerugian per jam	Rp40.500
Waktu rata-rata penggantian kerusakan	183,6977726 menit / 3,06 jam
Total biaya kerugian selama kerusakan	$Rp40.500 \times 7,0982 \text{ jam} / Rp123.996$

4. Biaya Penggantian terencana/penggantian pencegahan (Cp)

Biaya penggantian terencana pada Tabel 4.25 berikut:

Tabel 4. 25 Biaya Penggantian terencana/penggantian pencegahan (Cp)

Cp	$(\text{biaya tenaga kerja} + \text{biaya material})$ $(Rp303.000+ Rp324.170)$ $Rp627.170$
----	--

5. Biaya penggantian tidak terencana/penggantian kerusakan (Cf)

Biaya penggantian tidak terencana pada Tabel 4.26 berikut:

Tabel 4. 26 Biaya penggantian tidak terencana/penggantian kerusakan (Cf)	
	(Biaya tenaga kerja + biaya material + biaya kerugian selama kerusakan)
Cf	(Rp303.000+ Rp324.170+ Rp123.996)
	Rp 751.166

6. Biaya penggantian komponen sebelum adanya usulan perawatan pencegahan

Biaya penggantian komponen sebelum usulan pada Tabel 4.27 berikut:

Tabel 4. 27 Biaya penggantian komponen sebelum adanya usulan perawatan pencegahan

Frekuensi kerusakan	10 kali
Biaya Penggantian	10 x Biaya tidak terencana (Failure Cost)
	10 x 751.166
Total	= Rp. 7.511.600

7. Biaya Preventive Maintenance Menggunakan Age Replacement

Biaya preventive maintenance age replacement pada Tabel 4.28 berikut:

Tabel 4. 28 Biaya Preventive Maintenance Menggunakan Age Replacement

	$\frac{C_p * T_{(tp)} + C_f(1 - R_{tp})}{(t_p + T_p)R_{tp} + (M_{tp} + T_f)(1 - F_{tp})}$
C_{tp}	$\frac{627,170 * 326407 + 914647(0,790402)}{(326590)0,790402 + (2.595.682,08)(0,209597902)}$
Total	Rp. 255.193

Berdasarkan perhitungan tersebut dapat diketahui biaya perawatan komponen sebesar Rp. 255.193 untuk sekali perawatan

8. Biaya perawatan yang diusulkan setelah menggunakan *Preventive maintenance*

Biaya perawatan yang diusulkan pada Tabel 4.25 berikut:

Tabel 4. 29 Biaya perawatan yang diusulkan setelah menggunakan *Preventive maintenance*

Periode data kerusakan	10 tahun / 120 Bulan
Waktu interval penggantian komponen	326406,6 menit / 7,55 Bulan

Total frekuensi perawatan komponen	120/8 / 16 kali
------------------------------------	-----------------

9. Total biaya penggantian

Total biaya penggantian pada Tabel 4.30 sebagai berikut:

Tabel 4. 30 Biaya Penggantian

Frekuensi Perawatan x Ctp	16 x Rp 255.193
Total	Rp 4.083.089

Berdasarkan perhitungan di atas, dapat diketahui biaya yang dikeluarkan sebelum menggunakan *Preventive maintenance* selama periode 10 tahun dengan total 10 kali kerusakan adalah sebesar Rp. 7.511.660. Sedangkan biaya pergantian usulan yang didapatkan setelah menggunakan *Preventive maintenance* adalah sebesar Rp 4.083.089, sehingga selisih antara *Preventive maintenance* awal dengan yang baru sebesar Rp 3.428.571 dengan frekuensi perawatan selama periode 10 tahun adalah sebanyak 16 kali.

4.6 Pengolahan Data Menggunakan EAC

Setelah melakukan analisis *Reliability Centered Maintenance (RCM)* dengan FMEA yang berhasil memfokuskan rekomendasi pada Sistem Hidrolik sebagai komponen dengan risiko tertinggi sekaligus memberikan saran frekuensi perawatan *Preventive* yang lebih hemat biaya, langkah berikutnya adalah menentukan umur ekonomis keseluruhan aset CT. Penentuan ini bertujuan untuk menemukan waktu paling optimal dalam penggantian total aset berdasarkan pertimbangan biaya.

Untuk mengetahui waktu optimum penggantian total aset dari sisi biaya, penelitian menggunakan metode *Equivalent Annual Cost (EUAC)*. Metode EUAC dipilih karena dapat menentukan umur ekonomis aset dengan cara mencari titik minimum dari total biaya tahunan setara, yang mencakup biaya modal dan biaya operasional. Dengan menggabungkan strategi perawatan komponen hasil *RCM* dan analisis umur ekonomis menggunakan EUAC, akan diperoleh rencana pengelolaan aset yang lebih menyeluruh dan efektif.

4.6.1 Perhitungan Nilai MARR (*Minimum Attractive Rate of Return*)

Penelitian ini menggunakan nilai MARR sebesar 12% karena persentase tersebut sering digunakan sebagai standar dalam studi kelayakan oleh perusahaan BUMN maupun pembimbing lapangan untuk menilai kelayakan suatu investasi.

4.6.2 Biaya Tahunan atas Investasi (*Annual Equivalent Cost of Investment*)

Pengeluaran tahunan dari suatu investasi menjadi elemen krusial dalam evaluasi feasibilitas ekonomi, terutama dalam menghitung *Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC)* yang merepresentasikan perkiraan biaya rata-rata per tahun yang ekuivalen sepanjang masa operasional ekonomis suatu aset. Kalkulasi ini memberikan kemampuan untuk membandingkan berbagai opsi investasi yang memiliki periode waktu dan komposisi biaya yang beragam. Pada studi ini, analisis dilakukan terhadap *ELECTRIC TRANSFORMER: 170 KV CURRENT TRANSFORMER (CT) : OUTDOOR OIP TYPE, STC: 40 KA,3 SEC, 25MM/KV*, dimana nilai investasi awal diperkirakan mencapai Rp. 372.242.703.

4.6.3 Perhitungan *Equivalent Annual Cost* Investasi Awal

Tahap awal dalam menghitung nilai *Equivalent Annual Cost (EAC)* dari investasi awal *Current Transformer (CT)* adalah mengonversi nilai investasi yang diketahui dari tahun 2015 ke nilai investasi pada tahun dasar perhitungan, yaitu tahun 2025. Proses konversi ini menggunakan faktor konversi F/P dengan tingkat bunga 12% dan periode waktu selama 10 tahun, dimana periode ini dipilih berdasarkan selisih tahun antara 2015 dan 2025. Berikut adalah perhitungan untuk mendapatkan nilai *EAC* investasi awal pada tahun ke-0.

$$P_0 = P \times (F/P, i, n)$$

$$P_0 = P \times (F/P, 12\%, 10)$$

$$P_0 = \text{Rp } 372.242.703 \times (3,1058)$$

$$P_0 = \text{Rp } 1.156.129.331$$

di mana:

P = biaya investasi awal pada tahun 2015,

P₀ = biaya investasi awal tahun ke-0 (2025)

F/P = faktor pertumbuhan nilai uang,

i = tingkat suku bunga tahunan,

n = jumlah tahun antara tahun dasar dan tahun perhitungan.

Setelah mendapatkan nilai investasi awal pada tahun dasar perhitungan (tahun ke-0), langkah selanjutnya adalah menghitung biaya tahunan ekuivalen atau *Equivalent Annual Cost (EAC)* untuk setiap tahun dalam usia ekonomis peralatan, mulai dari tahun pertama hingga tahun ketiga puluh. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan rumus *EAC*, berikut contoh perhitungan *EAC* untuk investasi awal pada tahun pertama, tahun kelima belas, dan tahun ketiga puluh.

$$P_t = \frac{P_0 \times r}{(1 - \frac{1}{(1+r)^t})}$$

Perhitungan untuk mencari *EAC* tahun ke-1:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{Rp1.156.129.331 \times 12\%}{(1 - \frac{1}{(1+12\%)^1})} \\ &= Rp 1.294.864.851 \end{aligned}$$

Perhitungan untuk mencari *EAC* tahun ke-15:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{Rp1.156.129.331 \times 12\%}{(1 - \frac{1}{(1+12\%)^1})} \\ &= Rp 169.747.810 \end{aligned}$$

Perhitungan untuk mencari *EAC* tahun ke-30:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{Rp1.156.129.331 \times 12\%}{(1 - \frac{1}{(1+12\%)^1})} \\ &= Rp 143.526.124 \end{aligned}$$

Selain itu, berikut merupakan ringkasan hasil perhitungan biaya tahunan atas investasi selama 30 tahun seperti Tabel 4.31 berikut:

Tabel 4. 31 Biaya Investasi Tahunan 30 Periode

Tahun	<i>EAC</i> Investasi
1	Rp 1.294.864.851
2	Rp 684.079.544
3	Rp 481.353.268
4	Rp 380.637.589
5	Rp 320.721.528
6	Rp 281.200.387
7	Rp 253.328.441
8	Rp 232.732.119
9	Rp 216.981.068
10	Rp 204.616.583
11	Rp 194.709.989
12	Rp 186.641.828
13	Rp 179.982.971
14	Rp 174.426.673

Tahun	<i>EAC</i> Investasi
15	Rp 169.747.810
16	Rp 165.777.406
17	Rp 162.386.142
18	Rp 159.473.372
19	Rp 156.959.592
20	Rp 154.781.184
21	Rp 152.886.649
22	Rp 151.233.866
23	Rp 149.788.076
24	Rp 148.520.353
25	Rp 147.406.455
26	Rp 146.425.928
27	Rp 145.561.416
28	Rp 144.798.111
29	Rp 144.123.321
30	Rp 143.526.124

4.6.4 Perhitungan Biaya Operasional dan Perawatan CT

Dalam analisis ini, biaya operasional dan perawatan mencakup semua pengeluaran yang diperlukan selama masa umur teknis peralatan untuk mempertahankan kinerja dan keandalannya. Biaya operasional meliputi biaya perawatan dan perbaikan tahunan, perawatan berkala setiap dua tahun, perawatan berkala setiap sepuluh tahun, kegiatan overhaul, perawatan yang bersifat kondisional, serta biaya pengadaan material pendukung. Semua komponen biaya tersebut dihitung sesuai dengan jadwal pemeliharaan yang telah ditetapkan, kemudian dijumlahkan untuk setiap tahun penggunaan. Dengan cara ini, nilai biaya operasional tiap tahun mencerminkan total pengeluaran riil yang dibutuhkan agar peralatan tetap beroperasi dengan optimal. Ringkasan biaya operasional dan perawatan tahunan dari tahun pertama hingga tahun ketiga puluh disajikan dalam tabel 4.32 berikut:

Tabel 4. 32 Biaya Operasional dan Perawatan CT

Tahun	Biaya Operasional & Perawatan
1	Rp 63.549.108
2	Rp 64.004.918
3	Rp 64.260.522
4	Rp 64.536.575
5	Rp 64.834.712
6	Rp 65.156.700
7	Rp 65.504.447
8	Rp 65.880.014

Tahun	Biaya Operasional & Perawatan	
9	Rp	66.285.626
10	Rp	66.723.687
11	Rp	67.196.793
12	Rp	67.707.748
13	Rp	68.259.578
14	Rp	68.855.556
15	Rp	69.499.211
16	Rp	70.194.359
17	Rp	70.945.119
18	Rp	71.755.939
19	Rp	72.631.625
20	Rp	73.577.366
21	Rp	74.598.767
22	Rp	75.701.879
23	Rp	76.893.240
24	Rp	78.179.911
25	Rp	79.569.514
26	Rp	81.070.286
27	Rp	82.691.120
28	Rp	84.441.621
29	Rp	86.332.162
30	Rp	88.373.946

4.6.5 Penentuan Nilai *Equivalent Annual (EUAC)*

Tahap akhir dari analisis ekonomi ini adalah melakukan evaluasi terhadap *Equivalent Annual Cost (EAC)* untuk *Current Transformer (CT)*. Evaluasi ini bertujuan untuk menentukan umur ekonomis peralatan dengan memperhitungkan biaya tahunan total yang mencakup seluruh siklus hidup aset, mulai dari investasi awal hingga biaya operasional dan perawatan setiap tahunnya. Penilaian *EAC* dilakukan untuk setiap tahun dari tahun pertama hingga tahun ketiga puluh, dengan menggunakan data *EAC* investasi awal dan biaya operasional serta perawatan CT yang telah dikumpulkan sebelumnya. Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung *EAC* pada tahun ke- t adalah:

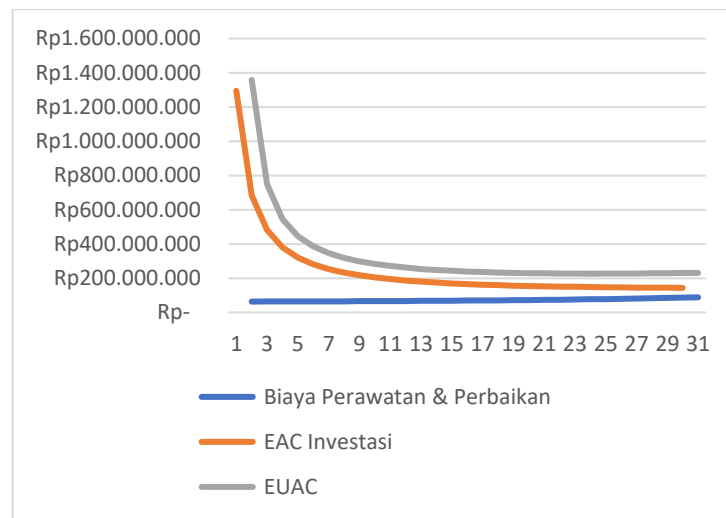
$$EAC_t = EAC \text{ Investasi Awal} + \text{Biaya Operasional dan Perawatan}$$

Kalkulasi diimplementasikan untuk setiap periode tahunan, selanjutnya dilakukan komparasi terhadap besaran *EAC* yang dihasilkan. Besaran *EAC* minimal mengindikasikan titik optimum dimana kombinasi antara pengeluaran investasi, *maintenance*, dan nilai residu aset mencapai kondisi paling efisien dari perspektif finansial. Berikut poada Tabel 4.33 ini dipresentasikan tabulasi hasil kalkulasi *EAC* dari periode pertama hingga periode ke-30:

Tabel 4. 33 Kalkulasi *EAC* dari periode pertama hingga periode ke-30

Tahun Ke -	Biaya Perawatan & Perbaikan	Rp 1.156.129.331 <i>EAC</i> Investasi	EUAC
1	Rp 63.549.108	Rp 1.294.864.851	Rp 1.358.413.958
2	Rp 64.004.918	Rp 684.079.544	Rp 748.084.462
3	Rp 64.260.522	Rp 481.353.268	Rp 545.613.791
4	Rp 64.536.575	Rp 380.637.589	Rp 445.174.164
5	Rp 64.834.712	Rp 320.721.528	Rp 385.556.240
6	Rp 65.156.700	Rp 281.200.387	Rp 346.357.087
7	Rp 65.504.447	Rp 253.328.441	Rp 318.832.889
8	Rp 65.880.014	Rp 232.732.119	Rp 298.612.133
9	Rp 66.285.626	Rp 216.981.068	Rp 283.266.694
10	Rp 66.723.687	Rp 204.616.583	Rp 271.340.271
11	Rp 67.196.793	Rp 194.709.989	Rp 261.906.782
12	Rp 67.707.748	Rp 186.641.828	Rp 254.349.576
13	Rp 68.259.578	Rp 179.982.971	Rp 248.242.550
14	Rp 68.855.556	Rp 174.426.673	Rp 243.282.229
15	Rp 69.499.211	Rp 169.747.810	Rp 239.247.021
16	Rp 70.194.359	Rp 165.777.406	Rp 235.971.765
17	Rp 70.945.119	Rp 162.386.142	Rp 233.331.261
18	Rp 71.755.939	Rp 159.473.372	Rp 231.229.311
19	Rp 72.631.625	Rp 156.959.592	Rp 229.591.217
20	Rp 73.577.366	Rp 154.781.184	Rp 228.358.551
21	Rp 74.598.767	Rp 152.886.649	Rp 227.485.415
22	Rp 75.701.879	Rp 151.233.866	Rp 226.935.745
23	Rp 76.893.240	Rp 149.788.076	Rp 226.681.316
24	Rp 78.179.911	Rp 148.520.353	Rp 226.700.263
25	Rp 79.569.514	Rp 147.406.455	Rp 226.975.969
26	Rp 81.070.286	Rp 146.425.928	Rp 227.496.214
27	Rp 82.691.120	Rp 145.561.416	Rp 228.252.536
28	Rp 84.441.621	Rp 144.798.111	Rp 229.239.732
29	Rp 86.332.162	Rp 144.123.321	Rp 230.455.483
30	Rp 88.373.946	Rp 143.526.124	Rp 231.900.069

Penentuan umur ekonomis dalam penelitian ini didasarkan pada hasil perhitungan *Equivalent Annual Cost (EAC)* yang dirangkum dalam Tabel 4.33 sebagai rekapitulasi hasil perhitungan secara menyeluruh, dan kemudian divisualisasikan lebih lanjut melalui grafik berikut ini:



Gambar 4. 2 Analisis *EAC*

Dari hasil analisis *EAC* yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa nilai *EAC* paling rendah terjadi pada tahun ke-23, yaitu sebesar Rp 226.681.316. Hal ini menunjukkan bahwa pada tahun tersebut total biaya tahunan berada pada titik terendah. Dengan demikian, umur ekonomis optimal untuk CT ini adalah 23 tahun, dan disarankan agar peralatan dijual atau diganti setelah melewati periode tersebut guna mengurangi beban biaya tahunan secara keseluruhan.

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Penentuan Komponen Kritis

Penentuan komponen kritis merupakan tahap krusial dalam penerapan metode *Reliability Centered Maintenance (RCM)*, dengan fokus untuk mengidentifikasi komponen-komponen pada sistem *Current Transformer (CT)* yang memiliki potensi risiko terbesar dalam menimbulkan gangguan sistem secara menyeluruh. Dalam penelitian ini, proses identifikasi dikembangkan melalui pendekatan yang sistematis, meliputi penggunaan diagram fungsi (FBD), analisis mode dan dampak kegagalan (FMEA), serta analisis pohon logika kegagalan (LTA) secara berurutan dan terstruktur guna memastikan pemahaman komprehensif terhadap area-area risiko utama dalam sistem.

Salah satu subsistem utama yang menjadi fokus identifikasi komponen kritis adalah *Current Carrying Circuit*, yang merupakan bagian vital dalam CT dan diketahui memiliki kontribusi terbesar terhadap downtime sistem. Dengan memasukkan *Current Carrying Circuit* sebagai subsistem yang dianalisis secara mendalam, penelitian ini dapat memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai faktor-faktor kegagalan utama serta dampak potensialnya terhadap keandalan dan performa sistem tenaga listrik secara keseluruhan. Pendekatan ini memastikan bahwa strategi pemeliharaan yang dirancang benar-benar terarah pada komponen-komponen yang paling kritis dan berisiko tinggi, sehingga dapat meminimalkan gangguan sistem serta meningkatkan efisiensi operasional.

5.1.1 *Functional Block Diagram (FBD)*

Functional Block Diagram (FBD) berperan sebagai alat visual yang memetakan aliran fungsi serta hubungan antar subsistem dalam *Current Transformer (CT)*. Dengan mengelompokkan CT menjadi tiga subsistem utama, yaitu sistem kontrol (sekunder), mekanik (aksi), dan eksekusi (primer), FBD memudahkan identifikasi titik-titik kritis mulai dari input sinyal hingga proses pemutusan arus listrik. Hasil pemetaan menunjukkan bahwa kegagalan pada subsistem kontrol dapat mengakibatkan kegagalan switching yang berimbas langsung pada kontinuitas pasokan listrik. FBD memberikan gambaran menyeluruh mengenai peran tiap komponen sekaligus membantu dalam menilai dampak kegagalan secara sistemik. Karena seluruh subsistem CT saling berinteraksi dan bekerja secara terpadu, gangguan pada satu subsistem dapat

melemahkan kinerja keseluruhan sistem, bahkan menyebabkan sistem CT berhenti berfungsi sepenuhnya.

Meski demikian, FBD tidak menyediakan informasi tentang potensi kegagalan atau tingkat keparahannya. Oleh karena itu, FBD lebih tepat dijadikan sebagai dasar awal sebelum melanjutkan ke analisis risiko yang lebih mendalam seperti FMEA dan LTA.

5.1.2 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

FMEA merupakan alat analisis yang berfungsi untuk mengidentifikasi potensi mode kegagalan pada setiap komponen, mengevaluasi dampaknya terhadap keseluruhan sistem, serta memberikan prioritas berdasarkan nilai *Risk Priority Number (RPN)*. Dalam penelitian ini, FMEA mengungkapkan bahwa sistem hidrolik memiliki nilai RPN tertinggi, yaitu 648, yang disebabkan oleh gangguan pada sistem proteksi dan pengukuran yang berpotensi mengakibatkan kesalahan operasi relay, kerusakan peralatan, pemanasan berlebih pada wiring, serta risiko keselamatan bagi personel. Selain itu, komponen minyak dan kertas juga menempati posisi risiko tinggi dengan nilai RPN masing-masing 560.

RPN dihitung dari perpaduan tiga faktor, yaitu tingkat keparahan (*Severity*), frekuensi kejadian (*Occurrence*), dan kemampuan deteksi (*Detection*). Penilaian skor ini didasarkan pada wawancara dengan teknisi, data historis kerusakan, serta panduan teknis dari manual CT. FMEA memberikan gambaran krusial yang membantu menentukan komponen-komponen yang memerlukan perhatian khusus dalam program pemeliharaan.

Tingginya nilai *Severity* di sebagian besar komponen pada FMEA merupakan hal yang wajar karena fungsi utama CT adalah mengubah arus tegangan tinggi dan menengah menjadi arus tegangan rendah. Jika CT tidak berfungsi dengan baik, kerusakan serius dapat terjadi pada peralatan kelistrikan lain serta menimbulkan bahaya lingkungan sekitar. Berdasarkan *Functional Block Diagram (FBD)* sebelumnya, terlihat bahwa seluruh subsistem dan sub-subsistem CT terhubung secara erat, sehingga kegagalan pada satu komponen dapat langsung memengaruhi kinerja sistem secara menyeluruh. Akibatnya, CT tidak dapat beroperasi maksimal, yang berisiko memicu ledakan atau kerusakan pada sistem lain. Kondisi inilah yang menjadi alasan tingginya nilai *Severity* pada banyak komponen dalam tabel FMEA.

Meski demikian, metode FMEA memiliki keterbatasan, diantaranya skor yang bersifat subjektif. Oleh karena itu, perlu dilakukan validasi tambahan menggunakan data kuantitatif atau metode lain seperti *Root Cause Analysis (RCA)* guna memperkuat hasil analisis.

5.1.3 Logic Tree Analysis (LTA)

Logic Tree Analysis (LTA) digunakan untuk mengelompokkan mode kegagalan berdasarkan tingkat keterlihatan gejala (*evident*), risiko keselamatan (*safety*), serta potensi menyebabkan pemadaman (*outage*). Hasil analisis LTA menunjukkan bahwa kegagalan pada sistem konduktor, belitan sekunder & primer, minyak, kertas, isolator body dan struktur pondasi masuk dalam kategori A, karena keduanya dapat mengganggu operasional dan membahayakan keselamatan sistem.

Keunggulan LTA terletak pada kemampuannya mendeteksi kegagalan tersembunyi (*hidden failure*) yang tidak segera tampak namun memiliki dampak signifikan, seperti penurunan kualitas gas SF₆. Selain itu, LTA membantu dalam pengambilan keputusan terkait pemilihan tugas (*task selection*) dengan memberikan pemahaman tentang tingkat urgensi dan jenis perawatan yang diperlukan.

5.2 Pengolahan Data Kualitatif RCM

Setelah komponen kritis berhasil diidentifikasi, tahap berikutnya adalah menentukan jenis tindakan perawatan yang sesuai dengan karakteristik kegagalan yang telah ditemukan. Proses pengolahan data kualitatif dalam konteks *Reliability Centered Maintenance* (RCM) ini kemudian mengarah pada pemilihan tugas perawatan (*task selection*) yang optimal untuk menjaga keandalan dan performa sistem.

5.2.1 Task Selection

Task selection ditetapkan berdasarkan hasil FMEA dan LTA dengan mengelompokkan tindakan perawatan menjadi *time directed* (TD), *condition directed* (CD), dan *failure finding* (FF). Komponen dengan RPN tertinggi seperti belitan dan terminasi sekunder diprioritaskan dengan kombinasi FF+TD/CD untuk memastikan fungsi proteksi, sedangkan konduktor jumper dengan RPN tinggi memerlukan TD+CD melalui uji berkala. Komponen dielektrik seperti minyak CT dan kertas isolasi direkomendasikan CD/TD melalui analisis DGA dan uji Tangen Delta, sementara komponen dengan RPN lebih rendah seperti terminal primer, isolator, struktur mekanis, dan sistem pentanahan cukup dengan CD berupa inspeksi visual, termografi, serta pengukuran resistansi. Pendekatan ini memastikan efisiensi pemanfaatan sumber daya dengan fokus pada perawatan berbasis kondisi pada komponen non-kritis dan kombinasi tindakan *Preventive* pada komponen kritis.

Pendekatan ini memberikan efisiensi dalam sumber daya karena tidak semua komponen harus diperiksa secara periodik tanpa indikasi kerusakan. Namun, efektivitasnya sangat bergantung pada kesiapan fasilitas pemantauan dan pelatihan teknisi dalam melakukan diagnosis kondisi komponen. *Task selection* juga menjadi dasar penting dalam penyusunan interval pemeriksaan yang akan dibahas lebih lanjut dalam pengolahan data kuantitatif.

5.3 Pengolahan Data Kuantitatif RCM

Pengolahan data kuantitatif dalam penelitian ini bertujuan untuk menentukan interval optimal pemeriksaan maupun penggantian komponen dengan mengacu pada distribusi statistik dari waktu antar kerusakan (*Time to Failure*) dan waktu perbaikan (*Time to Repair*). Fokus utama diarahkan pada sistem hidrolik yang diidentifikasi sebagai komponen paling kritis berdasarkan nilai downtime dan RPN. Analisis distribusi probabilitas dilakukan menggunakan metode *Least Square Curve Fitting* terhadap empat jenis distribusi, yaitu normal, lognormal, eksponensial, dan Weibull. Pemilihan keempat distribusi ini didasarkan pada kemampuannya dalam merepresentasikan berbagai pola kegagalan. Distribusi normal digunakan untuk kegagalan yang berpola simetris, lognormal untuk kasus kegagalan yang cenderung meningkat seiring waktu, eksponensial untuk kegagalan acak dengan laju konstan, sedangkan Weibull dipilih karena fleksibilitasnya dalam menggambarkan beragam pola kegagalan.

Distribusi terbaik ditentukan melalui *Index of Fit* (IOF), yaitu ukuran kesesuaian antara data aktual dengan kurva distribusi. Hasil analisis menunjukkan bahwa distribusi lognormal memberikan nilai IOF tertinggi, yaitu 97,40% untuk TTF dan 93,36% untuk TTR. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa data waktu kegagalan paling sesuai dimodelkan dengan distribusi lognormal. Namun, karena IOF hanya menilai persentase kesesuaian dan cenderung subjektif terhadap bentuk kurva, validasi tambahan dilakukan dengan uji statistik *Goodness of Fit* menggunakan metode Kolmogorov-Smirnov. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa distribusi lognormal memiliki nilai signifikansi di atas taraf α 0,05, sehingga tidak terdapat perbedaan signifikan dengan data aktual, dan model tersebut dapat diterima secara statistik.

Berdasarkan distribusi yang diperoleh, interval penggantian pencegahan dihitung dengan pendekatan *Age Replacement* untuk meminimalkan downtime. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa waktu optimal penggantian pada komponen *Current Carrying Circuit* adalah 326.406,6098 menit atau sekitar 7,55 bulan. Strategi ini ditujukan untuk melakukan

tindakan perawatan sebelum terjadi kegagalan, sehingga downtime tak terencana dapat ditekan. Meski demikian, peningkatan frekuensi perawatan perlu mempertimbangkan ketersediaan sumber daya, jadwal pemeliharaan, serta potensi gangguan operasional yang lebih sering.

Sebagai tambahan, dilakukan analisis biaya untuk membandingkan kondisi aktual dengan skenario usulan berdasarkan metode *RCM* dan *Age Replacement*. Total biaya pemeliharaan aktual tercatat Rp7.511.600 dengan 16 kali kerusakan, sedangkan biaya usulan sebesar Rp4.083.089. Selisih sebesar Rp3.428.571 atau sekitar 45,64% menunjukkan adanya potensi penghematan biaya sekaligus peningkatan keandalan melalui pendekatan ini.

5.4 Pengolahan Data EAC

Pengolahan data EUAC dilakukan untuk menentukan umur ekonomis optimal *Current Transformer* (CT) dengan mempertimbangkan komponen biaya investasi, operasional, dan pemeliharaan. Parameter penting yang digunakan adalah MARR sebesar 12%, yang merepresentasikan tingkat pengembalian minimum yang dapat diterima.

Hasil analisis menunjukkan bahwa umur ekonomis optimal CT adalah 23 tahun, dengan nilai *EAC* minimum sebesar Rp226.681.316. Hal ini mengindikasikan bahwa dari sisi finansial, lebih efisien bagi PLN untuk mengganti atau melepas CT pada usia tersebut meskipun perangkat masih dapat berfungsi. Apabila CT tetap dioperasikan melewati umur 23 tahun, maka beban biaya tahunan akan meningkat, terutama akibat bertambahnya biaya pemeliharaan dan menurunnya nilai aset seiring waktu.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, penelitian ini menghasilkan beberapa temuan penting:

1. Evaluasi downtime aktual yang dikombinasikan dengan metode *FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)* menunjukkan bahwa terdapat tiga komponen utama yang berperan kritis pada *Current Transformer (CT)*. Di antara komponen tersebut, *Sub Sistem Current Carrying Circuit*, khususnya bagian Terminasi Sekunder dan Wiring Kontrol, tercatat sebagai penyumbang downtime terbesar sebesar 37,6% sekaligus memiliki nilai *Risk Priority Number (RPN)* tertinggi, yaitu 648. Fakta ini menegaskan bahwa bagian tersebut merupakan titik lemah paling signifikan pada CT, sehingga layak ditempatkan sebagai prioritas utama dalam program peningkatan keandalan.
2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa melalui analisis distribusi probabilitas dengan metode *Least Square Curve Fitting*, data *Time to Failure (TTF)* dan *Time to Repair (TTR)* pada *Current Transformer (CT)* paling sesuai dimodelkan dengan distribusi lognormal, dengan nilai IOF tertinggi masing-masing 97,40% dan 93,36% serta terverifikasi melalui uji *Kolmogorov-Smirnov*. Berdasarkan model tersebut, interval penggantian pencegahan yang optimal dihitung menggunakan metode *Age Replacement* dan diperoleh waktu penggantian komponen *Current Carrying Circuit* sebesar 326.406,6098 menit atau sekitar 7,55 bulan. Pendekatan ini mampu menekan downtime tak terencana serta menghasilkan efisiensi biaya, ditunjukkan dengan penurunan biaya pemeliharaan dari Rp7.511.600 (16 kerusakan) menjadi Rp4.083.089, atau hemat sebesar Rp3.428.571 (45,64%). Dengan demikian, metode ini terbukti tidak hanya meningkatkan keandalan sistem tetapi juga memberikan manfaat finansial yang signifikan.
3. Hasil analisis *EAC* menunjukkan bahwa umur ekonomis optimal *Current Transformer (CT)* adalah 23 tahun dengan nilai *EUAC* minimum sebesar Rp226.681.316 pada tingkat MARR 12%. Hal ini menandakan bahwa secara finansial, PLN akan lebih efisien mengganti atau melepas CT pada usia 23 tahun meskipun perangkat masih berfungsi, karena penggunaan melebihi batas tersebut akan meningkatkan biaya tahunan akibat kenaikan biaya pemeliharaan dan penurunan nilai aset.

6.2 Saran

Mengacu pada kesimpulan dan hasil pembahasan yang telah diperoleh, terdapat beberapa rekomendasi yang dapat dijadikan acuan untuk pengembangan penelitian di masa mendatang maupun implementasi praktis di PLN UPT Pekanbaru:

1. Perluasan Analisis Komponen Kritis Walaupun penelitian ini berfokus pada *Current Transformer* dengan subsistem *Current Carrying Circuit* serta terminasi sekunder dan *wiring control*, disarankan agar analisis *RCM* diperluas pada komponen lain dengan RPN tinggi dan berpengaruh signifikan, seperti terminal primer, konduktor jumper, maupun komponen penting lainnya. Hal ini akan menghasilkan program perawatan *Preventive* yang lebih menyeluruh bagi seluruh peralatan *Current Transformer (CT)*.
2. Analisis Sensitivitas Parameter – Penelitian lanjutan sebaiknya mengkaji sensitivitas parameter-parameter penting dalam perhitungan *EAC*, khususnya *MARR*, guna memahami pengaruh variasi nilai terhadap umur ekonomis optimal *Current Transformer (CT)*.
3. Integrasi Faktor Non-Moneter – Keputusan penggantian aset sebaiknya tidak hanya didasarkan pada aspek biaya, tetapi juga mempertimbangkan faktor non-moneter seperti kemudahan operasional, ketersediaan suku cadang, serta kebutuhan pelatihan teknisi untuk peralatan baru.
4. Peningkatan Kualitas Data Historis – Untuk meningkatkan akurasi analisis keandalan, PLN disarankan melakukan pencatatan data downtime dan *repair time* yang lebih detail dan konsisten, termasuk akar penyebab kegagalan serta kondisi operasional. Data yang lebih lengkap akan mendukung pemodelan keandalan yang lebih presisi.
5. Optimalisasi Implementasi Jadwal Perawatan – Meskipun interval perawatan optimal telah ditentukan, penerapannya perlu disesuaikan dengan keterbatasan sumber daya, ketersediaan suku cadang, serta jadwal operasional. Optimalisasi jadwal diharapkan mampu menekan risiko gangguan pasokan listrik sekaligus meningkatkan efisiensi pemeliharaan.

DAFTAR PUSTAKA

- Muhtadi, & Puspitasari. (2021). Penentuan Interval Waktu Perawatan Mesin Injection Moulding Menggunakan Metode RCM Di Pt “X”. *Info-Teknik*, 22((2)), 141-156.
- Afris, (2023). Penentuan Interval Waktu Perawatan Mesin Alat Angkut Crane Dengan Metode *Reliability Centered Maintenance (RCM)*(Studi Kasus: Pt. Xyz). In *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri (Snti)*, 10(1), 84-90.
- Azis, Suprawhardana, & Purwanto. (2010). Penerapan Metode *Reliability Centered Maintenance (RCM)* Berbasis Web Pada Sistem Pendingin Primer Di Reaktor Serba Guna Ga. Siwabessy. *Jurnal Forum Nuklir*, 4(1), 81-98.
- Dhamayanti, Alhiman, & Athari. (2016). Perncangan Usulan *Preventive maintenance* Pada Mesin Komori Ls440 Dengan Menggunakan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM Ii) Dan Risk Based Maintenance (Rbm) Di Pt. Abc. *E-Proceedings Of Engineering*, 3(2).
- Ferrando, D. G. (2020). The Stochastic Annuity Method For Supporting Maintenance Costs Planning And Durability In The Construction Sector: A Simulation On A Building Component. *Sustainability*, 12(7), 2909.
- Fahri, Harahap, & Suliawati. (2025). Analisis Efektivitas *Preventive maintenance* Dengan Metode Periodic Inspection Untuk Meningkatkan Kinerja Pada Unit Wa800-3. *Blend Sains Jurnal Teknik*, 3(3), 246-267.
- Fikri, N. A., & Pudji, W. E. (2020). Penentuan Interval Perawatan Mesin Air Separation Plant Secara Preventive Downtime Maintenance Dengan Menggunakan Metode Age Replacement Pada Pt. Xyz. *Juminten*, 1((3)), 153-164.
- Harianja, Rebekha, A. S., & S. A. (2025). Pengaruh Pemeliharaan Predictive Maintenance Terhadap Kinerja Sistem Distribusi Di Wilayah Rawan Gangguan. *Jurnal Indragiri Penelitian Multidisiplin*, 5(2), 54-62.
- Inayah, Budiasih, & Pamoso. (2020). Menggunakan Metode Risk Based Maintenance Dan Analisis Replacement Di Pt Xyz Proposed Interval Maintenance Time, Business Consequence Analysis, And Economic Life Determination Using Risk Based Maintenance And Replacement Analysis Methods At Pt Xyz. *E Proceeding Of Engineering*, 7.
- Geibush, & Ariaratnam. (2023). Failure Prevention In Large-Diameter Water Pipelines Using Reliability-Centered Maintenance. *Water*, 15((24)), 4283.
- Khaurullah, & D. A. (2022). Analisis Penentuan Waktu Kegiatan Perawatan *Preventive* Yang Tepat Bagi Mesin Produksi Glasstube Lampu 2u Sesuai Keandalannya (Studi Kasus: Pt. Panca Aditya Sejahtera). . *Jurnal Teknik Industri*, 25(1), 52-75.
- Ding, Sunderam, & Mrozek. (2023). From Corrective To Predictive Maintenance—A Review Of Maintenance Approaches For The Power Industry. *Sensors*, 23(10), 5970.
- Yusuf, & Budiawan. (2024). Penetapan Umur Ekonomis Mesin Penggiling Kedelai Menggunakan Metode *Equivalent Uniform Annual Cost* (Studi Kasus: Usaha Mikro Produk Tahu Handayani). *Industrial Engineering Online Journal*, 14(1).
- Melina, Maudiani, Haikal, Ahmad, & Shelina. (2024). Penerapan Ilmu Ekonomi Teknik Dalam Menganalisa Kelayakan Finansial Usaha Bagi Siswa Smkn1 Situbondo. *Abdi Insani*, 11 (2), 1949-1960.
- Purba, Parinduri, & Harahap. (2021). Penentuan Interval Waktu *Preventive maintenance* Pada Mesin Open Top Roller Menggunakan Metode Reliability Centered Maintenance Di Unit Pabrik Teh Kebun Tobasari Pt. Perkebunan Nusantara Iv. Cetak). *Buletin Utama Teknik, Online*, 16((2)), 1410-4520.

- Putra, Riyanto, & Zulfikar. (2020). Rancang Bangun Sistem Informasi Manajemen Aset Pada Universitas Pamulan. *Journal Of Engineering, Technology & Applied Science*, 2(1), 32-50.
- Simbolon, & Ginting. (2020). Perancangan Interval Perawatan Mesin Secara *Preventive maintenance* Dengan Metode Reliability Centered Maintenance Ii (RCM Ii). *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, 1(3), 2723, 6609.
- Ramadhan, Irvan, & R. F. (2024). Optimalisasi Efektivitas *Preventive maintenance* Berbasis Usage-Based Maintenance Untuk Mengurangi Downtime Di Pt Pqr. *Journal Of Integrated System*, 7(2), 166-183.
- Riswanda, Witanti, & Sabrina. (2017). Sistem Informasi Manajemen Aset Di Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Bandung. *Seminar Nasional Komputer Dan Informatika (Senaski)*.
- Satoto, H. F. (2023). Analisis Efektivitas *Preventive maintenance* Pada Automatic Nail Machine Di Cv. Tiga Bhakti. *Jurnal Ilmiah Teknik Dan Manajemen Industri*, 3(1), 485-500.
- Sandy, & B. A. (2013). Analisis Penentuan Umur Ekonomis Untuk Replacement Mesin Boiler Menggunakan Metode Biaya Tahunan Rata-Rata Di Ptpn V Pks Terantam. *Doctoral Dissertation, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau*.
- Saputra, & Sudastra, (2023). Strategi Manajemen Aset Untuk Meningkatkan Kualitas Pelayanan Air Minum Di Perumda Air Minum Tirta Khatulistiwa, Kota Pontianak. *Envirotek. Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 15(2), 171-180.
- Sholihin, & Amin. (2021). Pt. Pln (Persero) Ulp Siak Sri Indrapura Komponen Komponen Phb-Tr. *Pt. Pln (Persero)*.
- Sofiah, & Kholis, (2020). Sejarah Plta Lamajan Pangalengan Sebagai Situs Peninggalan Belanda Di Kabupaten Bandung Tahun 1925. *Historia Madania: Jurnal Ilmu Sejarah*, 4(1), 129-146.
- Sulistiyono, & Azis, H. N. (2016). Analisis Pengaruh Masa Operasional Terhadap Penurunan Kapasitas Transformator Distribusi Di Pt. Pln (Persero). *Jurnal Teknik Mesin (Jtm)*, 5(168), 4.
- Wiherdiansyah, & Aribowo. (2024). Analisis Pemeliharaan *Preventive* Gardu Kubikal Untuk Meningkatkan Keandalan Sistem Distribusi Listrik Di Pt. Haleyora Powerindo. *Jurnal Surya Teknika*, 11(2), 511-516.
- Widara, (2018). Biaya Operasi Dump Truck Hd605 Komatsu Pada Pengangkutan Batu Gamping Di Pt Xyz Kabupaten Bogor. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Terapan*, 1-8.
- Hariswanda, & Anshory. (2024). *Preventive maintenance* As A Key To Reliable Power Distribution In Indonesia. *Procedia Of Engineering And Life Science*, 5, 658-664.
- Yusuf, & Budiawan. (2024). Penetapan Umur Ekonomis Mesin Penggiling Kedelai Menggunakan Metode *Equivalent Uniform Annual Cost* (Studi Kasus: Usaha Mikro Produk Tahu Handayani). *Industri Engineering Online Journal*, 14(1).

LAMPIRAN

A-Tabel Nilai Kritis Kolmogorov–Smirnov

Table gives critical D -values for $\alpha=0.05$ (upper value) and $\alpha=0.01$ (lower value) for various sample sizes. * means you cannot reject H_0 regardless of observed D .

$n_2 \backslash n_1$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*	16/16	18/18	20/20	22/22	24/24
3	*	*	15/15	18/18	21/21	21/24	24/27	27/30	30/33	30/36
4		16/16	20/20	20/24	24/28	28/32	28/36	30/40	33/44	36/48
5			*	24/30	30/35	30/40	35/45	40/50	39/55	43/60
6				30/36	30/42	34/48	39/54	40/60	43/66	48/72
7				36/36	36/42	40/48	45/54	48/60	54/66	60/72
8					42/49	40/56	42/63	46/70	48/77	53/84
9					42/49	48/56	49/63	53/70	59/77	60/84
10						48/64	46/72	48/80	53/88	60/96
11						56/64	55/72	60/80	64/88	68/96
12							54/81	53/90	59/99	63/108
13							63/81	70/90	70/99	75/108
14								70/100	60/110	66/120
15								80/100	77/110	80/120
16									77/121	72/132
17									88/121	86/132
18										96/144
19										84/144

For larger sample sizes, the approximate critical value D_α is given by the equation

$$D_\alpha = c(\alpha) \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2}}$$

where the coefficient is given by the table below.

α	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001
$c(\alpha)$	1.22	1.36	1.48	1.63	1.73	1.95

Examples: (1) At $\alpha=0.05$ and samples sizes 5 and 8, $D_\alpha = 30/40 = 0.75$.

(2) At $\alpha=0.01$ and samples sizes 15 and 28, $D_\alpha = 1.63 \sqrt{\frac{15+28}{15 \cdot 28}} = 0.522$.

TABEL BUNGA PEMAJEMUKAN DISKRIT

i = 7%

n	P/F	F/P	P/A	A/P	F/A	A/F	P/G	A/G
1	0.934579	1.070000	0.934579	1.070000	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000
2	0.873439	1.144900	1.808018	0.553092	2.070000	0.483092	0.873439	0.483092
3	0.816298	1.225043	2.624316	0.381052	3.214900	0.311052	2.506034	0.954929
4	0.762895	1.310796	3.387211	0.295228	4.439943	0.225228	4.794720	1.415536
5	0.712986	1.402552	4.100197	0.243891	5.750739	0.173891	7.646665	1.864950
6	0.666342	1.500730	4.766540	0.209796	7.153291	0.139796	10.978376	2.303217
7	0.622750	1.605781	5.389289	0.185553	8.654021	0.115553	14.714874	2.730392
8	0.582009	1.718186	5.971299	0.167468	10.259803	0.097468	18.788938	3.146541
9	0.543934	1.838459	6.515232	0.153486	11.977989	0.083486	23.140408	3.551740
10	0.508349	1.967151	7.023582	0.142378	13.816448	0.072378	27.715552	3.946071
11	0.475093	2.104852	7.498674	0.133357	15.783599	0.063357	32.466480	4.329629
12	0.444012	2.252192	7.942686	0.125902	17.888451	0.055902	37.350611	4.702516
13	0.414964	2.409845	8.357651	0.119651	20.140643	0.049651	42.330185	5.064842
14	0.387817	2.578534	8.745468	0.114345	22.550488	0.044345	47.371809	5.416727
15	0.362446	2.759032	9.107914	0.109795	25.129022	0.039795	52.446053	5.758295
16	0.338735	2.952164	9.446649	0.105858	27.888054	0.035858	57.527072	6.089681
17	0.316574	3.158815	9.763223	0.102425	30.840217	0.032425	62.592262	6.411025
18	0.295864	3.379932	10.059087	0.099413	33.999033	0.029413	67.621949	6.722474
19	0.276508	3.616528	10.335595	0.096753	37.378965	0.026753	72.599099	7.024182
20	0.258419	3.869684	10.594014	0.094393	40.995492	0.024393	77.509060	7.316307
21	0.241513	4.140562	10.835527	0.092289	44.865177	0.022289	82.339322	7.599014
22	0.225713	4.430402	11.061240	0.090406	49.005739	0.020406	87.079298	7.872471
23	0.210947	4.740530	11.272187	0.088714	53.436141	0.018714	91.720129	8.136853
24	0.197147	5.072367	11.469334	0.087189	58.176671	0.017189	96.254502	8.392336
25	0.184249	5.427433	11.653583	0.085811	63.249038	0.015811	100.676482	8.639101
26	0.172195	5.807353	11.825779	0.084561	68.676470	0.014561	104.981369	8.877332
27	0.160930	6.213868	11.986709	0.083426	74.483823	0.013426	109.165559	9.107217
28	0.150402	6.648838	12.137111	0.082392	80.697691	0.012392	113.226419	9.328943
29	0.140563	7.114257	12.277674	0.081449	87.346529	0.011449	117.162177	9.542701
30	0.131367	7.612255	12.409041	0.080586	94.460786	0.010586	120.971824	9.748684
31	0.122773	8.145113	12.531814	0.079797	###	0.009797	124.655014	9.947084
32	0.114741	8.715271	12.646555	0.079073	###	0.009073	128.211989	10.138096
33	0.107235	9.325340	12.753790	0.078408	###	0.008408	131.643499	10.321912
34	0.100219	9.978114	12.854009	0.077797	###	0.007797	134.950738	10.498727
35	0.093663	10.676581	12.947672	0.077234	###	0.007234	138.135278	10.668734
36	0.087535	11.423942	13.035208	0.076715	###	0.006715	141.199019	10.832126
37	0.081809	12.223618	13.117017	0.076237	###	0.006237	144.144137	10.989095
38	0.076457	13.079271	13.193473	0.075795	###	0.005795	146.973041	11.139829
39	0.071455	13.994820	13.264928	0.075387	###	0.005387	149.688331	11.284519
40	0.066780	14.974458	13.331709	0.075009	###	0.005009	152.292766	11.423349
41	0.062412	16.022670	13.394120	0.074660	###	0.004660	154.789229	11.556506
42	0.058329	17.144257	13.452449	0.074336	###	0.004336	157.180700	11.684170
43	0.054513	18.344355	13.506962	0.074036	###	0.004036	159.470233	11.806521
44	0.050946	19.628460	13.557908	0.073758	###	0.003758	161.660929	11.923737
45	0.047613	21.002452	13.605522	0.073500	###	0.003500	163.755923	12.035990
46	0.044499	22.472623	13.650020	0.073260	###	0.003260	165.758359	12.143452
47	0.041587	24.045707	13.691608	0.073037	###	0.003037	167.671383	12.246289
48	0.038867	25.728907	13.730474	0.072831	###	0.002831	169.498122	12.344666
49	0.036324	27.529930	13.766799	0.072639	###	0.002639	171.241679	12.438744
50	0.033948	29.457025	13.800746	0.072460	###	0.002460	172.905119	12.528679



