

**ANALISIS UMUR EKONOMIS DAN PENENTUAN INTERVAL PERAWATAN
OPTIMAL PEMUTUS TEGANGAN (PMT) DENGAN PENDEKATAN METODE
*EQUIVALENT ANNUAL COST (EAC) DAN RELIABILITY CENTERED
MAINTENANCE (RCM) DI PT PLN UIP3B SUMATERA***

TUGAS AKHIR

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



Nama : Haifan Hawari Massigara
No. Mahasiswa : 21522205

**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, 10 – 09 - 2025



(Haifan Hawari Massigara)

21522205

SURAT BUKTI PENELITIAN

UIP3B SUMATERA
UPT PEKANBARU

Nomor : 1342/STH.01.04/F22070000/2025
Lampiran : -
Sifat : Segera - Biasa
Hal : Konfirmasi Penelitian

29 Agustus 2025

Kepada

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

Menindaklanjuti surat dari Universitas Islam Indonesia Nomor 62/penelitian
TA/Sek.Prodi.S1/20/TI/VIII/2024 tanggal 29 Agustus 2025 perihal Permohonan Ijin
Penelitian Tugas Akhir maka dengan ini kami sampaikan bahwa :

No.	Nama	NIM	Prodi
1	HAIFAN HAWARI MASSIGARA	21522205	Teknik Indutri

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

ANALISIS UMUR EKONOMIS DAN PENENTUAN INTERVAL PERAWATAN OPTIMAL PEMUTUS TEGANGAN (PMT) DENGAN PENDEKATAN METODE *EQUIVALENT ANNUAL COST* (EAC) DAN *RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE* (RCM) DI PT PLN UIP3B

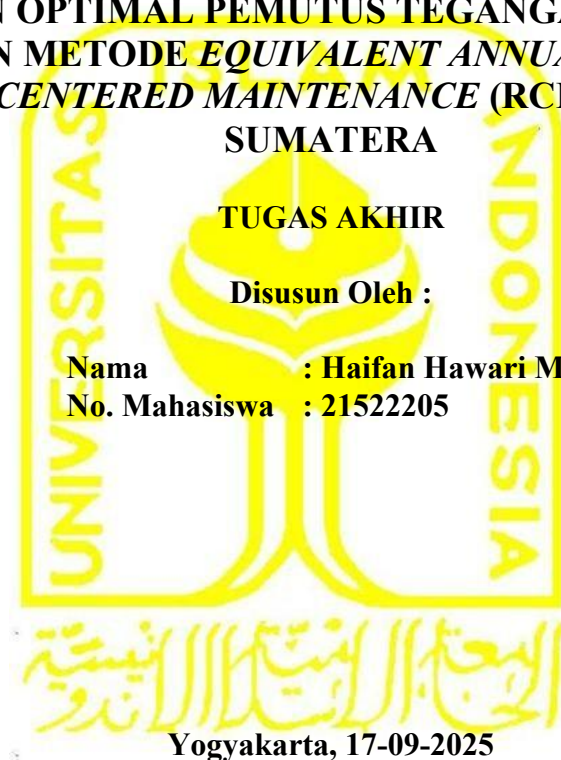
SUMATERA

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Haifan Hawari Massigara

No. Mahasiswa : 21522205



Yogyakarta, 17-09-2025

Dosen Pembimbing

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

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

ANALISIS UMUR EKONOMIS DAN PENENTUAN INTERVAL PERAWATAN OPTIMAL PEMUTUS TEGANGAN (PMT) DENGAN PENDEKATAN METODE *EQUIVALENT ANNUAL COST (EAC) DAN RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM) DI PT PLN UIP3B SUMATERA*

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Haifan Hawari Massigara

No. Mahasiswa : 21 522 205

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, 17 - 09 - 2025

Tim Penguji

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

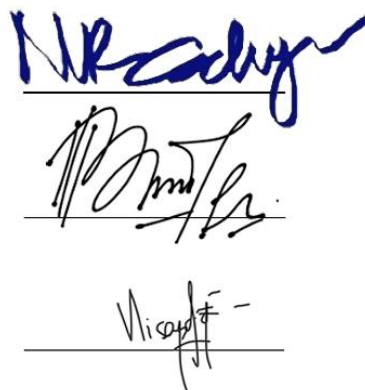
Ketua

Ir. Bambang Suratno, S.T., M.T., Ph.D., IPM.

Anggota I

Putri Dwi Annisa, 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.,

015220101

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan rasa syukur yang mendalam, skripsi ini saya persembahkan untuk Ayah dan Ibu tercinta sebagai wujud terima kasih atas segala doa, pengorbanan, dan kasih sayang yang tak terhingga.

.

MOTTO

*"I hear and I forget. I see and I remember. I do and I understand."
(Attributed to Confucius)*

KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puji dan syukur kehadirat Allah SWT, atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya, penyusunan laporan tugas akhir yang berjudul “Analisis Umur Ekonomis dan Penentuan Interval Perawatan Optimal Pemutus Tegangan (PMT) Dengan Pendekatan Metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) dan *Reliability Centered Maintenance* (RCM) Di PT PLN UIP3B Sumatera” dapat dirampungkan dengan baik. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada junjungan kita, Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat, dan para pengikutnya hingga akhir zaman.

Penyelesaian tugas akhir ini tentu tidak terlepas dari bimbingan, dukungan, dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis dengan tulus hendak menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT, yang senantiasa memberikan kemudahan dan kelancaran di setiap langkah selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
2. Orang tua, Bapak Heryanto dan Ibu Sumarni atas doa yang tiada henti serta dukungan moral dan material yang menjadi sumber kekuatan bagi penulis.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Hari Purnomo, M.T., IPU., ASEAN.Eng., selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM., selaku Ketua Program Studi Sarjana Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
5. Bapak Ir. Winda Nur Cahyo, S.T., M.T., Ph.D, IPM., Asean.Eng. selaku dosen pembimbing, atas kesabaran, waktu, serta arahan, kritik, dan saran selama proses pembimbingan laporan tugas akhir ini.
6. Segenap Bapak dan Ibu Dosen Program Studi Teknik Industri, Universitas Islam Indonesia, yang telah membagikan ilmu dan pengetahuannya yang sangat berharga selama masa perkuliahan.
7. Seluruh *manager*, *Staff*, dan Karyawan PT. PLN UIP3B Sumatera yang telah memberikan izin dan kesempatan kepada penulis untuk melaksanakan penelitian tugas akhir di perusahaan.
8. Kepada 21320313, yang telah memberikan dukungan, semangat, dan pengertian yang tak ternilai selama proses penyusunan tugas akhir ini.
9. Serta teman seperjuangan 21522177, 21522212, 21522308 ,21522206, 21522178, 21522187, dan 21522173 atas kerja sama dan dukungan timbal balik dalam menyelesaikan laporan tugas akhir.
10. Semua pihak lain yang turut membantu kelancaran penyusunan tugas akhir ini, yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis berdoa semoga Allah SWT membalas segala kebaikan yang telah diberikan dengan pahala yang berlipat ganda. Aamiin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa laporan tugas akhir ini masih memiliki banyak kekurangan. Untuk itu, segala bentuk kritik dan saran yang membangun akan diterima dengan

tangan terbuka demi perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, besar harapan penulis agar laporan ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca.

ABSTRAK

Pemutus Tenaga (PMT) merupakan aset krusial dalam sistem transmisi PT PLN UIP3B Sumatera, di mana manajemen siklus hidupnya berdampak langsung pada keandalan pasokan listrik dan efisiensi finansial. Seiring bertambahnya usia aset, biaya perawatan yang meningkat menuntut adanya model pengelolaan yang terstruktur untuk menentukan nasib aset secara ekonomis. Penelitian ini mengajukan dua tahapan. Tahap pertama berfokus pada penentuan umur ekonomis PMT menggunakan metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) untuk menetapkan waktu divestasi aset yang optimal. Tahap kedua, yang diimplementasikan apabila umur ekonomis tersebut dinilai terlalu pendek, adalah perumusan strategi perawatan yang terfokus untuk menekan biaya dan meningkatkan keandalan operasional. Strategi ini diawali dengan identifikasi komponen kritis melalui FMEA, yang hasilnya menjadi landasan penerapan *Reliability-Centered Maintenance* (RCM). Hasil dari tahap pertama menunjukkan bahwa umur ekonomis optimal PMT adalah 19 tahun, dengan nilai EAC terendah sebesar Rp559.154.927. Selanjutnya, untuk tahap kedua, analisis FMEA mengidentifikasi sistem Hidrolik, Kontak Utama, dan *Interrupter* sebagai komponen kritis, dengan sistem Hidrolik memiliki RPN tertinggi (480). Berdasarkan hasil tersebut, RCM merekomendasikan interval perawatan sinkron setiap 4 bulan untuk Hidrolik dan Kontak Utama, serta 1 tahun untuk *Interrupter* dengan interval pemeriksaan Hidrolik setiap 10 hari, Kontak Utama setiap 9 hari, dan *Intrrupter* setiap 11 hari, dengan rekomendasi ini diestimasikan dapat menghemat biaya hingga Rp58.814.367. Model dua tahap ini menghasilkan sebuah kerangka kerja strategis bagi PT PLN untuk mengevaluasi kelayakan aset secara ekonomis dan jika perlu, mengimplementasikan jadwal perawatan yang efisien untuk memaksimalkan nilai dan keandalan aset kritis.

Kata Kunci: *Reliability Centered Maintenance* (RCM), *Equivalent Annual Cost* (EAC), Pemutus Tegangan (PMT), Umur Ekonomis, Strategi Perawatan.

DAFTAR ISI

COVER	1
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
SURAT BUKTI PENELITIAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iv
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
MOTTO	vii
KATA PENGANTAR	viii
ABSTRAK	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Kajian Literatur	7
2.2 Landasan Teori	12
2.2.1 Ekonomi Teknik	12
2.2.2 <i>Time Value of Money</i>	12
2.2.3 <i>Equivalent Annual Cost (EAC)</i>	12
2.2.4 Pengelompokan Biaya Dalam Penentuan EAC	13
2.2.5 <i>Minimum Attractive Rate of Return (MARR)</i>	13
2.2.6 Manajemen Aset	14
2.2.7 Manajemen Perawatan	14
2.2.8 Strategi Perawatan	14
2.2.9 Reliability Centered Maintenance (RCM)	16
2.2.10 Tahapan <i>Reliability Centered Maintenance (RCM)</i>	16
2.2.11 Distribusi Probabilitas	20
2.2.12 <i>Probability Plots</i> dan <i>Least-Squares Curve Fitting</i>	21
2.2.13 Uji Goodness of Fit	22
2.2.14 Parameter Estimasi Distribusi	25
2.2.15 MTTR dan MTTF	27
2.2.16 <i>Age Replacement</i>	28
2.2.17 Frekuensi Pemeriksaan	29
BAB III METODE PENELITIAN	31
3.1 Subjek, Objek dan Lokasi Penelitian	31
3.2 Diagram Alir Penelitian	31
3.2.1 Identifikasi Masalah	35
3.2.2 Penentuan Metode	35

3.2.3	Rumusan Masalah dan Tujuan Penelitian	36
3.2.4	Pengumpulan Data.....	36
3.2.5	Pengolahan Data Kuantitatif <i>Equivalent Annual Cost</i> (EAC).....	37
3.2.6	Pengolahan Data Kualitatif <i>Reliability Centered Maintenance</i> (RCM).....	38
3.2.7	Pengolahan Data Kuantitatif (RCM)	39
3.2.8	Pengolahan Data Kuantitatif (<i>Age Replacement</i>)	40
3.2.9	Analisis dan Pembahasan	41
3.2.10	Kesimpulan dan Saran	42
BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA		43
4.1	Latar Belakang Perusahaan	43
4.1.1	Profil Singkat Perusahaan.....	43
4.1.2	Lokasi PT PLN UIP3B Sumatera	43
4.1.3	Visi, Misi, dan Moto Perusahaan.....	44
4.1.4	Waktu Kerja.....	45
4.2	Pengumpulan Data	45
4.2.1	Data Waktu Antar Kerusakan Komponen	45
4.2.2	Estimasi Biaya Investasi Awal Pemutus Tegangan (PMT).....	48
4.2.3	Biaya Operasi Tahunan (<i>Annual Operating Cost</i> - AOC).....	49
4.2.4	Biaya Perawatan dan Perbaikan Tahunan	49
4.3	Pengolahan Data EAC.....	49
4.3.1	Perhitungan Nilai MARR (<i>Minimum Attractive Rate of Return</i>).....	50
4.3.2	Biaya Investasi Awal	50
4.3.3	Perhitungan <i>Equivalent Annual Cost</i> Investasi Awal.....	50
4.3.4	Perhitungan Biaya Operasional dan Perawatan PMT.....	52
4.3.5	Penentuan Nilai <i>Equivalent Annual Cost</i> (EAC)	54
4.4	Pengolahan Data RCM.....	56
4.4.1	Penentuan Komponen Kritis.....	56
4.4.2	<i>Functional Block Diagram</i> (FBD).....	57
4.4.3	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i> (FMEA)	58
4.4.4	<i>Logic Tree Analysis</i> (LTA).....	64
4.5	Pengolahan Data Kualitatif (Penentuan Tindakan Perawatan)	65
4.5.1	<i>Task Selection</i> (Pemilihan Tindakan).....	65
4.6	Pengolahan Data Kuantitatif (Penentuan Interval Pemeriksaan dan Penentuan Komponen Kritis).....	67
4.6.1	Penentuan Komponen Kritis.....	67
4.6.2	Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Kerusakan (<i>Time to Failure</i>).....	69
4.6.3	Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Perbaikan (<i>Time to Repair</i>).....	74
4.6.4	Uji <i>Goodness of Fit</i> Pada Distribusi Data Waktu Kerusakan (<i>Time to Failure</i>).....	80
4.6.5	Uji <i>Goodness of Fit</i> Pada Distribusi Data Waktu Perbaikan (<i>Time to Repair</i>).....	81
4.6.6	Perhitungan Parameter Dari Distribusi Waktu Kerusakan (<i>Time to Failure</i>) ..	82
4.6.7	Perhitungan Parameter Dari Distribusi Waktu Perbaikan (<i>Time to Repair</i>) ..	83
4.6.8	Penentuan Nilai Tengah Dari Distribusi Data Waktu Kerusakan (<i>Mean Time to Failure</i>)	83
4.6.9	Penentuan Nilai Tengah Dari Distribusi Data Waktu Perbaikan (<i>Mean Time to Repair</i>)	84
4.6.10	Perhitungan Interval Waktu Penggantian Pencegahan Dengan Minimasi Downtime	84

4.6.11	Analisis Keandalan Dengan dan Tanpa <i>Preventive Maintenance</i>	86
4.6.12	Perhitungan Interval Waktu Pemeriksaan	88
4.6.13	Perhitungan Total Biaya Perawatan dan Biaya Usulan Perawatan	89
4.6.14	Hasil Analisa RCM Untuk Seluruh Komponen Kritis	91
BAB V PEMBAHASAN		93
5.1	Pengolahan Data EAC.....	93
5.2	Penentuan Komponen Kritis	93
5.2.1	<i>Functional Block Diagram</i> (FBD).....	93
5.2.2	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i> (FMEA)	94
5.2.3	<i>Logic Tree Analysis</i> (LTA).....	95
5.3	Pengolahan Data Kualitatif RCM	95
5.3.1	<i>Task Selection</i>	95
5.4	Pengolahan Data Kuantitatif RCM	95
BAB VI PENUTUP		98
6.1	Kesimpulan.....	98
6.2	Saran.....	98
DAFTAR PUSTAKA		100
LAMPIRAN		A

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>State of Art</i>	10
Tabel 4. 1 Waktu Kerja	45
Tabel 4. 2 Data Waktu Antar Kerusakan Komponen Mesin PMT	46
Tabel 4. 3 Estimasi Biaya Investasi Awal PMT.....	48
Tabel 4. 4 Aktivitas Perawatan dan Pembersihan PMT	49
Tabel 4. 5 Rekapitulasi EAC Investasi Awal	51
Tabel 4. 6 Biaya Operasional dan Perawatan PMT	53
Tabel 4. 7 Perhitungan EAC PMT Selama Umur Ekonomis 30 Tahun.....	55
Tabel 4. 8 <i>Failure Mode and Effect Analysis</i> (FMEA) PMT	58
Tabel 4. 9 Kriteria <i>Severity</i> FMEA	61
Tabel 4. 10 Kriteria <i>Occurrence</i> FMEA	62
Tabel 4. 11 Kriteria <i>Detection</i> FMEA.....	63
Tabel 4. 12 <i>Logic Tree Analysis</i> (LTA) PMT	65
Tabel 4. 13 <i>Task Selection</i>	66
Tabel 4. 14 Data <i>Downtime</i> Komponen PMT.....	67
Tabel 4. 15 <i>Time to Failure</i> Komponen Hidrolik	69
Tabel 4. 16 <i>Time to Failure</i> Distribusi Normal.....	70
Tabel 4. 17 <i>Time to Failure</i> Distribusi <i>Lognormal</i>	71
Tabel 4. 18 <i>Time to Failure</i> Distribusi Eksponensial.....	72
Tabel 4. 19 <i>Time to Failure</i> Distribusi <i>Weibull</i>	74
Tabel 4. 20 <i>Index of Fit Time to Failure</i>	74
Tabel 4. 21 <i>Time to Repair</i> Komponen Hidrolik	75
Tabel 4. 22 <i>Time to Repair</i> Distribusi Normal.....	76
Tabel 4. 23 <i>Time to Repair</i> Distribusi <i>Lognormal</i>	77
Tabel 4. 24 <i>Time to Repair</i> Distribusi Eksponensial.....	78
Tabel 4. 25 <i>Time to Repair</i> Distribusi <i>Weibull</i>	79
Tabel 4. 26 <i>Index of Fit Time to Repair</i>	80
Tabel 4. 27 <i>Uji Goodness of Fit Time to Failure</i>	80
Tabel 4. 28 <i>Uji Goodness of Fit Time to Repair</i>	81
Tabel 4. 29 Interval Waktu Penggantian Pencegahan	84
Tabel 4. 30 Hasil Perhitungan $R(t)$, $R_m(t)$, dan $R(t-nT)$	86

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Struktur <i>Logic Tree Analysis</i>	19
Gambar 3. 1 Alur Penelitian.....	33
Gambar 4. 1 Lokasi PT PLN UIP3B Sumatera.....	44
Gambar 4. 2 Grafik <i>Equivalent Annual Cost</i>	56
Gambar 4. 3 <i>Function Block</i> Diagram PMT	57
Gambar 4. 4 Diagram Pareto Data <i>Downtime</i>	68
Gambar 4. 5 Hasil Perhitungan $R(t)$, $R_m(t)$, dan $R(t-nT)$	87

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di era industri yang berkembang pesat saat ini, keandalan sistem kelistrikan menjadi faktor utama dalam menunjang kelangsungan operasional berbagai sektor industri. PT PLN UIP3B Sumatera sebagai salah satu perusahaan penyedia tenaga listrik di Indonesia memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan pasokan listrik, khususnya di wilayah Sumatera. Setiap perusahaan yang bergerak di bidang energi memiliki aset yang harus dikelola dengan baik untuk menjaga kinerja operasionalnya. Aset memiliki peran krusial bagi keberlangsungan operasional perusahaan. Tanpa aset, perusahaan tidak dapat menjalankan aktivitasnya. Aset ini bisa berupa kas, properti seperti tanah dan bangunan, berbagai jenis peralatan, perlengkapan, hingga tenaga kerja (Apriani & Kenotariatan, 2023).

Bagi perusahaan penyedia energi listrik seperti PT PLN (Persero), menjaga performa aset operasional bukan sekadar tanggung jawab, melainkan sebuah keharusan untuk menjamin keandalan dan kontinuitas pasokan energi. Oleh karena itu, penerapan manajemen aset yang efektif menjadi faktor krusial. Manajemen aset dapat didefinisikan sebagai serangkaian kegiatan sistematis untuk mengatur dan memanfaatkan kekayaan—baik fisik maupun non-fisik—yang memiliki nilai ekonomi guna mendukung pencapaian sasaran perusahaan (Hidayat et al., 2021), yang pelaksanaannya harus selaras dengan prinsip tata kelola perusahaan yang baik (*good corporate governance*). Kegagalan dalam manajemen aset dapat menimbulkan dampak signifikan, seperti yang pernah terjadi di PT PLN UIP3B Sumatera wilayah Pekanbaru, di mana gangguan pada sistem transmisi menyebabkan pemadaman selama 1,4 jam dan energi tidak tersalurkan (ETS) mencapai 93,43 MWh. Data historis juga mengonfirmasi bahwa masalah ini berskala lebih luas, dengan kerugian energi di Sumatera pernah mencapai 10.682,24 MWh akibat gangguan sistem (Nyoman Widyastuti, 2014). Data-data tersebut menggarisbawahi urgensi penerapan strategi pengelolaan aset yang tepat, di mana penjadwalan pemeliharaan yang presisi dan penentuan umur ekonomis aset menjadi elemen kunci untuk meningkatkan efisiensi biaya operasional serta mencegah kerusakan dini pada komponen sistem transmisi.

Salah satu komponen utama dalam sistem transmisi tenaga listrik adalah Pemutus Tegangan (PMT), Perangkat pemutus tenaga (PMT) memegang peranan krusial dalam pendistribusian listrik, karena berfungsi sebagai sakelar mekanik yang dapat menghubungkan maupun memutus aliran arus listrik, baik dalam kondisi operasi normal maupun saat terjadi gangguan seperti korsleting dan memastikan distribusi daya yang optimal (Fitriyono et al., 2022).

Seiring bertambahnya usia, PMT tidak hanya rentan mengalami kerusakan tetapi juga menuntut biaya perawatan yang semakin tinggi. Kegagalan perangkat ini dapat menyebabkan dampak finansial yang masif, seperti yang terjadi pada gangguan sistem SUTET Ungaran-Pemalang, yang menggarisbawahi pentingnya manajemen siklus hidup aset secara cermat untuk menghindari kerugian. Maka dari itu, fokus utama penelitian ini adalah penentuan umur ekonomis PMT. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi kapan waktu optimal bagi aset untuk dijual sebelum menimbulkan beban finansial yang berlebihan bagi PLN, mengingat semakin tua usia PMT, frekuensi dan biaya perbaikan akan cenderung meningkat serta keandalannya akan semakin menurun. Apabila hasil analisis mengindikasikan bahwa umur ekonomis PMT tergolong sangat pendek, maka diajukan beberapa rekomendasi untuk optimalisasi. Rekomendasi tersebut mencakup dua strategi utama: pertama, menurunkan biaya perbaikan dengan cara menentukan interval waktu pemeriksaan yang tepat sehingga biaya inspeksi menjadi lebih efisien. Kedua, meningkatkan keandalan operasional yang sekaligus dapat menurunkan risiko kegagalan mesin dan mencegah potensi kerugian finansial yang lebih besar.

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk penentuan umur ekonomis dari suatu aset, seperti *Life Cycle Cost (LCC)* dan *Total Cost Of Ownership*. *Life Cycle Cost (LCC)* merupakan pendekatan ekonomi yang digunakan untuk menilai total biaya suatu proyek, mencakup seluruh tahapan mulai dari pengelolaan, operasional, pemeliharaan, hingga penghapusan komponen, sehingga metode ini menjadi pertimbangan krusial dalam proses pengambilan keputusan proyek (Tjakra et al., 2013). *Total Cost of Ownership (TCO)* adalah akumulasi seluruh biaya yang timbul sepanjang siklus hidup suatu produk, dengan memperhitungkan tingkat diskonto dan inflasi tahunan. Konsep ini bertujuan membantu dalam pengambilan keputusan pembelian yang lebih optimal dengan mempertimbangkan biaya-biaya selain harga awal, serta membandingkan keseluruhan pengeluaran yang terkait selama masa ekonomi produk tersebut (Pranata & Tjahjaningsih, 2023).

Selain itu, untuk meningkatkan efektivitas perawatan dan efisiensi biaya operasional dan meningkatkan keandalan suatu aset bisa dimulai dari penentuan waktu *preventif maintenance* dari suatu aset khususnya mesin, dalam menentukan waktu *preventif maintenance* ini bisa menggunakan berbagai metode antara lain *Reliability Based Maintenance (RBM)*, *Condition-Based Maintenance (CBM)*, dll. Metode *Reliability Based Maintenance (RBM)* yang merupakan strategi berbasis kuantitatif yang menggabungkan analisis keandalan dan evaluasi risiko guna merumuskan kebijakan pemeliharaan yang efisien dari segi biaya. Pendekatan ini terdiri atas tiga tahapan yang saling terhubung, yaitu penilaian konsekuensi, estimasi risiko, dan evaluasi risiko.

Kombinasi dari ketiga tahap tersebut digunakan untuk menyusun rencana perawatan menyeluruh pada suatu sistem (Farid et al., 2020). *Condition Based Maintenance* (CBM) merupakan pendekatan yang efisien dalam meningkatkan keandalan komponen pada peralatan berat. Melalui pemanfaatan teknologi pemantauan kondisi dan analisis data, perusahaan mampu menekan potensi terjadinya kerusakan, memperbaiki tingkat keandalan sistem, serta mengoptimalkan biaya perawatan. Strategi ini tidak hanya mendorong peningkatan performa operasional, tetapi juga memperkuat posisi kompetitif perusahaan dalam industri yang terus berkembang (Kautsar Ilmi et al., 2024).

Metode yang digunakan untuk menentukan umur ekonomis PMT pada penelitian ini adalah *Equivalent Annual Cost* (EAC). Metode EAC juga biasa disebut dengan metode EUAC, bergantung pada literatur atau ranah keilmuan yang digunakan. Metode EAC atau EUAC merupakan metode evaluasi ekonomi yang digunakan untuk membandingkan rata-rata biaya tahunan dari berbagai alternatif investasi yang memiliki masa operasional tidak sama. Pendekatan ini mengubah seluruh komponen biaya dan pendapatan selama masa proyek menjadi nilai tahunan yang tetap, sehingga mempermudah proses analisis serta perbandingan antar opsi investasi dengan jangka waktu operasional yang beragam. Pemilihan metode *Equivalent Uniform Annual Cost* (EAC) didasarkan pada kemudahannya, baik dari segi penerapan maupun ketersediaan data, dibandingkan dengan pendekatan *Life Cycle Cost* (LCC). Metode ini membantu dalam menentukan waktu penggantian mesin secara tepat, menjaga kelancaran operasional, serta mendukung pencapaian efisiensi dan produktivitas yang optimal (Yusuf & Budiawan, 2024).

Menurut penelitian yang dipublikasikan di Jurnal Teknik Industri yang berjudul “Analisis Penggantian Mesin *Hot Press* dengan Menggunakan Metode *Equivalent Uniform Annual Cost* (EUAC) di PT XYZ”, hasil analisis menunjukkan bahwa biaya tahunan bersih mesin *Hot Press* lama tipe KU-HPD 66 setelah *overhaul* selama 4 tahun sebesar Rp 363.531.666,-, lebih tinggi dibandingkan mesin baru tipe KU-HPD 566 dengan biaya Rp 331.537.186,- dan umur teknis 8 tahun. Oleh karena itu, penggantian ke mesin baru disarankan demi efisiensi biaya operasional (Anestesia Purba et al., 2022). Penelitian ini membuktikan efektivitas metode EUAC dalam menentukan umur ekonomis suatu peralatan listrik dan mengoptimalkan keputusan investasi perusahaan.

Selain itu, metode yang bisa digunakan untuk meningkatkan efektivitas perawatan adalah *Reliability Centered Maintenance* (RCM). RCM adalah pendekatan yang membantu menentukan jenis pemeliharaan yang perlu dilakukan agar peralatan tetap menjalankan fungsinya seperti yang direncanakan (Alrifaei et al., 2020). Fungsi *Reliability Centered Maintenance* (RCM) untuk

memastikan keandalan sistem dengan mengidentifikasi potensi kegagalan, menganalisis dampaknya, dan menentukan strategi pemeliharaan yang tepat. RCM membantu mengoptimalkan pemeliharaan preventif, mengurangi aktivitas yang tidak efektif, serta meningkatkan efisiensi, keselamatan, dan produktivitas sistem (Geisbush & Ariaratnam, 2023). Metode RCM ini diintegrasikan dengan metode *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* sebagai analisis mode kegagalan yang terjadi dengan menghitung nilai RPN tertinggi pada mesin. FMEA adalah suatu metode yang bertujuan untuk mengevaluasi desain sistem dengan mempertimbangkan berbagai jenis mode kegagalan yang ada dalam sistem, termasuk komponen-komponennya, serta menganalisis dampaknya terhadap keandalan sistem (Muhtadi & Puspitasari, 2021).

Beberapa penelitian sebelumnya telah menggunakan metode RCM untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan mesin yang digunakan pada perusahaan, salah satu penelitian yang berjudul “Perancangan Interval Perawatan Mesin Secara *Preventive Maintenance* Dengan Metode *Reliability Centered Maintenance* II (RCM II)” dengan subjek penelitian adalah PT Gunung Selamat Lestari menunjukkan bahwa penerapan metode RCM dapat mengidentifikasi komponen kritis dan menentukan interval perawatan yang efisien. Metode perawatan yang diterapkan di PT. Gunung Selamat Lestari adalah melakukan perbaikan atau pemeliharaan hanya setelah terjadi kerusakan, yang dikenal dengan istilah RTF (*Run To Failure*). Setelah dilakukan analisis interval perawatan, dihasilkan usulan perawatan yang memperhitungkan waktu kegagalan, dengan rincian komponen flexible coupling selama 262 jam, liner cylinder selama 316 jam, dan steer arm selama 246 jam. Dengan demikian, jelas bahwa penerapan *Reliability Centered Maintenance* lebih efisien, sehingga diharapkan perusahaan dapat mengadopsi metode ini dalam kegiatan perawatannya (Simbolon et al., 2020).

Penelitian ini berfokus pada analisis ekonomi dan keandalan dengan batasan yang jelas. Ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada penentuan umur ekonomis PMT dengan menggunakan metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) untuk mengidentifikasi waktu optimal penjualan aset sebelum menjadi beban finansial. Selanjutnya, untuk rekomendasi intervensi, penelitian ini menggunakan metode *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) yang bertujuan untuk menurunkan biaya pemeliharaan dan meningkatkan keandalan operasional jika umur ekonomis dinilai terlalu pendek. Batasan lainnya adalah analisis tidak mencakup faktor eksternal di luar data operasional dan perawatan yang tersedia. Dengan demikian, tujuan utama yang ingin dicapai melalui penelitian ini adalah menyediakan sebuah model pengambilan keputusan yang terstruktur bagi PT PLN untuk mengelola siklus hidup PMT secara lebih efisien, menekan potensi kerugian finansial, dan memastikan keandalan pasokan listrik tetap terjaga.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Meningkatnya biaya perawatan dan risiko kegagalan seiring bertambahnya usia operasional PMT berpotensi menjadi beban finansial bagi perusahaan. Oleh karena itu, diperlukan analisis umur ekonomis menggunakan metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) untuk menentukan waktu optimal pelepasan aset secara ekonomis.
2. Apabila hasil analisis umur ekonomis dinilai terlalu pendek, diperlukan sebuah strategi perawatan yang terfokus dan efisien. Untuk itu, penelitian ini akan melakukan identifikasi komponen kritis terlebih dahulu melalui analisis FMEA dan data historis *downtime*. Hasil identifikasi ini kemudian akan menjadi landasan penerapan metode *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) untuk merumuskan rekomendasi interval perawatan yang optimal, guna menekan biaya sekaligus meningkatkan keandalan operasional.

Berikut merupakan pertanyaan pada penelitian ini:

1. Bagaimana metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) dapat menentukan umur ekonomis PMT sebagai acuan waktu optimal untuk pelepasan aset?
2. Bagaimana identifikasi komponen kritis pada PMT berdasarkan FMEA dan analisa data *downtime* yang dapat menjadi landasan dalam prioritas penerapan strategi perawatan RCM?
3. Apabila umur ekonomis PMT dinilai terlalu pendek, bagaimana metode *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) dapat digunakan untuk merekomendasikan interval waktu perawatan yang efisien guna menekan biaya dan meningkatkan keandalan komponen kritis?

1.3 Tujuan Penelitian

Berikut merupakan tujuan penelitian pada penelitian ini:

1. Menentukan umur ekonomis PMT dengan menggunakan metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) sebagai dasar untuk menetapkan rekomendasi waktu optimal pelepasan aset.
2. Mengidentifikasi dan memetakan komponen kritis pada PMT berdasarkan metode FMEA dan analisis data *downtime* untuk menjadi landasan prioritas dalam penerapan strategi perawatan RCM.
3. Merumuskan rekomendasi interval waktu perawatan yang efisien untuk komponen kritis menggunakan metode *Reliability-Centered Maintenance* (RCM), sebagai strategi intervensi pada PMT yang teridentifikasi memiliki umur ekonomis pendek.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Manfaat bagi Perusahaan

Penelitian ini bermanfaat bagi PT PLN UIP3B Sumatera dalam mengidentifikasi faktor-faktor utama yang memengaruhi performa aset. Hasil temuan dapat digunakan sebagai landasan untuk menilai faktor-faktor keberhasilan dalam penerapan manajemen aset, sekaligus memperdalam pemahaman praktis terkait pengelolaan aset perusahaan.

2. Manfaat bagi Peneliti

Penelitian ini berfungsi sebagai sarana untuk mengaplikasikan dan mengembangkan ilmu dibidang manajemen aset. Studi ini juga memberikan kesempatan kepada peneliti untuk mengeksplorasi variabel-variabel kunci yang berperan dalam kesuksesan implementasi manajemen aset, terutama dalam konteks operasional PT PLN UIP3B Sumatera.

3. Manfaat Akademis

Hasil dari penelitian ini dapat dijadikan referensi untuk penelitian-penelitian berikutnya yang berfokus pada penerapan sistem manajemen aset, khususnya di sektor utilitas dan ketenagalistrikan.

1.5 Batasan Penelitian

Agar penelitian lebih terarah, maka batasan-batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Objek penelitian dibatasi hanya pada mesin Pemutus Tegangan (PMT) yang beroperasi di lingkungan PT PLN UIP3B Sumatera.
2. Penentuan interval perawatan hanya mempertimbangkan faktor teknis mesin dan data historis kegagalan yang tersedia, tanpa memperhitungkan faktor eksternal seperti perubahan regulasi atau kondisi lingkungan ekstrem.
3. Proses pengambilan data dilakukan pada bulan Maret – April 2025.
4. Pengambilan data dilakukan dengan cara wawancara dan pengambilan dokumen file *online* kepada *stakeholder* terkait.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Literatur

Kajian literatur merupakan alat penting untuk tinjauan konteks, karena literatur sangat berguna dan membantu dalam memberikan konteks serta makna dalam penulisan yang sedang dilakukan. Melalui kajian literatur, peneliti dapat menyatakan secara eksplisit dan pembaca dapat mengetahui mengapa topik yang ingin diteliti merupakan masalah penting yang harus diteliti, baik dari segi subjek yang akan diteliti maupun dari sisi hubungan penelitian tersebut dengan penelitian lain yang relevan.

Penelitian oleh (Alrifae et al., 2020) menjadi salah satu referensi penting dalam penerapan metode RCM untuk pengambilan keputusan perawatan mesin berbasis risiko dan biaya. Penelitian ini berfokus pada objek *electrical gas turbine* generator yang digunakan di sebuah *plant* minyak dan gas di Yaman. Penelitian ini mengembangkan model RCM *hybrid* dengan menggabungkan beberapa metode kuantitatif seperti HL-FMEA (*Hierarchical Linguistic Failure Mode and Effects Analysis*) untuk identifikasi dan klasifikasi risiko, CMPSO (*Chaotic Map Particle Swarm Optimization*) untuk optimasi kebijakan pemeliharaan, ANP (*Analytic Network Process*) untuk pembobotan multi-kriteria, dan DMDT (*Decision-Making Deterministic Tree*) untuk pengambilan keputusan perawatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa RCM *hybrid* yang diusulkan dapat meningkatkan reliabilitas sistem dari 88,2% menjadi 96,23%, serta menurunkan biaya perawatan dari USD 1.288.163,72 menjadi USD 789.644,40, atau efisiensi sebesar 38,7%. Selain itu, risiko *unavailability* berhasil ditekan hingga 95% dibandingkan metode RCM tradisional, dari 2.49×10^{-4} menjadi 1.31×10^{-5} .

Purba et al., (2021) dalam penelitiannya menggunakan metode RCM dan FMEA pada mesin *Open Top Roller* di pabrik Pengolahan Teh di Kebun Tobasari PTPN IV untuk menentukan jadwal interval waktu perawatan dan mengetahui tindakan atau kegiatan perawatan yang harus dilakukan, Berdasarkan analisis FMEA dan RCM, diketahui bahwa TEHA memiliki interval perawatan tertinggi sebesar 43,5%. Untuk komponen Electro Motor, nilai *reliability* saat $t = 159.577.646$ adalah 32,7%, dengan interval perawatan sebesar 288 jam atau tiap 12 hari sekali.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh (Simbolon et al., 2020) untuk meneliti penerapan metode RCM II dalam mengembangkan sistem perawatan mesin *Digester* di PT.

Gunung Selamat Lestari. Perusahaan ini sebelumnya hanya menerapkan strategi perawatan *Run to Failure* (RTF), yang sering menyebabkan *downtime* tidak terencana. Penelitian ini memanfaatkan kombinasi FMEA untuk mengidentifikasi mode dan efek kegagalan, serta RCM II *Decision Worksheet* untuk menentukan jenis dan interval perawatan yang tepat. Hasilnya menunjukkan bahwa tiga komponen mesin utama yaitu *flexible coupling*, *liner cylinder*, dan *steer arm* memiliki waktu perawatan optimal masing-masing 262 jam, 316 jam, dan 246 jam. Pendekatan ini terbukti dapat mengurangi frekuensi *breakdown* dan mendukung efisiensi operasional mesin, sehingga lebih unggul dibanding metode reaktif.

Dalam penelitian (Afris et al., 2023) menggunakan metode RCM yang diintegrasikan dengan FMEA untuk mengetahui interval waktu perawatan pada mesin alat angkut *crane* pada PT. XYZ dan didapatkan hasil mesin yang memiliki nilai *downtime* paling tinggi adalah mesin alat angkut CC-07 dengan total *downtime* 1800 menit atau 30 jam dan pada komponen *carbon brush* dilakukan pemeriksaan dan penggantian komponen dengan interval waktu perawatan yaitu 1344 jam atau 56 hari.

Metode RCM juga digunakan oleh (Geisbush & Ariaratnam, 2023) untuk menyusun strategi perawatan preventif pada sistem perpipaan air berdiameter besar di Amerika Serikat. Studi ini menekankan pentingnya prediksi kerusakan dini melalui pemantauan kerusakan kawat (*wire breaks*) pada *Prestressed Concrete Cylinder Pipe* (PCCP). RCM digunakan untuk menganalisis pola kerusakan berdasarkan data sensor dan regresi tren, serta menetapkan batas ambang (*threshold*) untuk memulai perawatan sebelum terjadinya *Serviceability Limit State*. Salah satu hasil penting penelitian ini adalah bahwa dengan menerapkan sistem pemantauan akustik fiber optik (AFO), prediksi jumlah kerusakan dapat dilakukan jauh sebelum kerusakan besar terjadi, seperti misalnya prediksi kerusakan 67 kawat akan tercapai pada Agustus 2025.

Penelitian oleh Goenaga-Pérez et al. (2023) bertujuan mengevaluasi efektivitas biaya (EUAC) dari desain bangunan hemat energi berdasarkan standar *nearly Zero Energy Buildings* (nZEB) terbaru di Spanyol. Penelitian ini menggunakan simulasi *parametris* 830 skenario desain dengan kombinasi berbagai sistem energi aktif (ESS), strategi penghematan energi (ESM), dan integrasi sumber energi terbarukan (RES) di lima zona iklim. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan kombinasi sistem seperti *heat pump*, *PV tiles*, dan *cogeneration*, desain bangunan dapat mencapai konsumsi energi non-terbarukan negatif dan EUAC negatif. Temuan ini membuktikan bahwa pendekatan EUAC sangat berguna untuk

menentukan umur ekonomis dari suatu sistem energi bangunan dan mampu mengidentifikasi titik optimal biaya dalam perencanaan energi jangka panjang.

Penelitian oleh (Anesthesia Purba et al., 2022) mengkaji kelayakan penggantian mesin *Hot Press tipe* KU-HPD 66 di PT XYZ dengan menggunakan metode *Equivalent Uniform Annual Cost* (EUAC). Mesin lama telah digunakan selama lebih dari umur ekonomisnya (10 tahun vs 8 tahun) dan sering mengalami gangguan seperti kebocoran sil dan semburan oli, yang berdampak pada penurunan produktivitas dan kenaikan biaya perawatan. Dengan menggunakan pendekatan EUAC, peneliti menghitung dan membandingkan biaya tahunan rata-rata dari dua alternatif: mempertahankan mesin lama (*defender*) atau membeli mesin baru (*challenger*). Hasil analisis menunjukkan bahwa mesin baru memiliki biaya tahunan lebih rendah (Rp 331,5 juta/tahun) dibanding mesin lama (Rp 363,5 juta/tahun), sehingga secara ekonomi lebih menguntungkan untuk melakukan penggantian.

(Koamri et al., 2023) melakukan penelitian pada mesin *cutting plat* besi milik CV. Musta'im dengan menggunakan metode *Replacement Analysis* berbasis *Equivalent Uniform Annual Cost* (EUAC) untuk menentukan umur ekonomis dan waktu optimal penggantian mesin. Penelitian ini mempertimbangkan komponen biaya seperti operasional, *downtime*, depresiasi, dan pengembalian modal dalam rentang waktu 20 tahun (2003–2022). Dari hasil analisis, diperoleh bahwa total biaya tahunan minimum terjadi pada tahun ke-4 (2006), yaitu Rp 7.153.339, yang menandakan titik umur ekonomis mesin. Setelah melewati usia tersebut, biaya operasional meningkat secara signifikan, sehingga disarankan penggantian mesin agar efisiensi operasional dapat dipertahankan.

Tabel 2. 1 *State of Art*

Penulis	Tujuan Penelitian		Metode			
	<i>Preventive Maintenance</i>	Umur Ekonomis	RCM	FMEA	EUAC	<i>LCC</i>
(Alrifaey et al., 2020)	✓		✓	✓		
(Juwandono & Purnama, 2023)	✓		✓	✓		
(Ramadani et al., 2022)	✓	✓	✓	✓		✓
(Purba et al., 2021)	✓		✓	✓		
(Simbolon et al., 2020)	✓		✓	✓		
(Afris et al., 2023)	✓		✓	✓		
(Geisbush & Ariaratnam, 2023)	✓		✓			
(Goenaga-Pérez et al., 2023)		✓			✓	
(Anesthesia Purba et al., 2022)		✓			✓	
(Koamri et		✓			✓	

Penulis	Tujuan Penelitian		Metode			
	<i>Preventive Maintenance</i>	Umur Ekonomis	RCM	FMEA	EUAC	<i>LCC</i>
al., 2023)						
(Yusuf & Budiawan, 2024)		✓				✓
(Tambun, 2021)		✓				✓
Usulan	✓	✓	✓	✓	✓	

Berdasarkan kajian pustaka yang telah disampaikan, dapat diketahui bahwa terdapat berbagai pendekatan dan metode yang digunakan dalam menentukan interval waktu perawatan preventif maupun umur ekonomis suatu mesin. Tabel *state of the art* menunjukkan perbedaan posisi masing-masing penelitian, baik dari segi tujuan penelitian maupun metode yang diterapkan. Beberapa penelitian difokuskan pada perancangan strategi pemeliharaan preventif menggunakan metode seperti *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dan *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), sedangkan penelitian lainnya lebih menekankan pada penentuan umur ekonomis dengan pendekatan ekonomi teknik seperti *Equivalent Uniform Annual Cost* (EUAC). Penelitian saat ini mengombinasikan kedua fokus tersebut, yaitu menentukan umur ekonomis mesin dengan pendekatan EAC pada objek Pemutus Tegangan (PMT) di PT PLN UIP3B Sumatera dan juga merancang interval waktu perawatan preventif menggunakan metode RCM untuk rekomendasi agar biaya perawatan dari PMT dapat menurun sehingga diharapkan dapat meningkatkan umur ekonomis dari PMT. Meskipun metode RCM dan EUAC telah digunakan pada penelitian sebelumnya, keunikan penelitian ini terletak pada penerapannya secara simultan terhadap peralatan kelistrikan kritis dalam konteks manajemen aset, serta pendekatannya yang disesuaikan dengan karakteristik dan kebutuhan operasional di sektor ketenagalistrikan, yang belum banyak dikaji dalam penelitian sebelumnya.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Ekonomi Teknik

Ekonomi Teknik pada dasarnya merupakan cabang ilmu yang mempelajari metode penilaian terhadap suatu rancangan teknis, dengan tujuan untuk menentukan apakah perencanaan tersebut layak dan menguntungkan jika diterapkan dari perspektif ekonomi (Siagian et al., 2023).

2.2.2 *Time Value of Money*

Konsep nilai waktu dari uang (*time value of money*) telah lama menjadi bagian fundamental dalam ilmu ekonomi modern. Prinsip ini menyatakan bahwa nilai uang saat ini lebih tinggi dibandingkan nilai yang sama di masa mendatang. Sebagai ilustrasi, satu juta rupiah yang dimiliki hari ini lebih bernilai dibandingkan satu juta rupiah yang akan diterima di masa depan. Menurut William R. Lasher, *time value of money* berlandaskan pada pemahaman bahwa sejumlah uang yang dimiliki saat ini lebih berharga daripada janji untuk menerima jumlah yang sama di kemudian hari. Pemahaman terhadap konsep ini sangat krusial bagi seorang manajer keuangan karena menjadi landasan dalam berbagai analisis keuangan, seperti penilaian harga saham, perhitungan nilai obligasi, penerapan metode *Net Present Value* (NPV), evaluasi berbagai alternatif investasi, estimasi tingkat bunga atau *return*, serta kalkulasi amortisasi utang dan aspek keuangan lainnya (Saidah et al., 2024).

2.2.3 *Equivalent Annual Cost (EAC)*

Menurut (Han et al., 2022) metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) adalah alat yang sangat berguna dalam investasi perusahaan ketika kita membandingkan aset-aset yang saling eksklusif dengan umur ekonomis yang berbeda. Konsep EAC merupakan alternatif dari aturan NPV tradisional, namun memiliki manfaat tambahan. Misalnya, EAC membantu menentukan biaya dalam rata-rata tahunan serta mengidentifikasi skema pembiayaan alternatif seperti pengaturan utang atau pembiayaan sewa. Inti dari metode ini adalah meratakan arus kas yang tidak merata selama periode waktu tertentu, sehingga memungkinkan perbandingan yang lebih baik di antara berbagai opsi yang tersedia. EAC dihitung menggunakan persamaan:

$$EAC = \frac{NPV \times r}{1 - \frac{1}{(1+r)^t}} \quad (2.1)$$

Di mana:

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

r = tingkat diskonto, dan

t = umur ekonomis aset.

2.2.4 Pengelompokan Biaya Dalam Penentuan EAC

Dalam menentukan umur ekonomis suatu aset, khususnya mesin, diperlukan pengelompokan biaya-biaya yang relevan. Biaya-biaya ini mencerminkan aspek finansial yang memengaruhi kelayakan investasi serta efisiensi operasional aset sepanjang masa penggunaannya. Adapun pengelompokan biaya yang digunakan dalam analisis meliputi (Yusuf & Budiawan, 2024):

1. Biaya Awal

Biaya awal adalah keseluruhan dana yang dibutuhkan saat memperoleh suatu aset. Biaya ini mencakup berbagai hal yang berhubungan dengan proses pembelian dan penggunaan aset tersebut, seperti harga beli, ongkos pengiriman, biaya komisi, pengecekan kualitas, garansi, hingga pemasangan. Dalam konteks penentuan umur ekonomis mesin, biaya awal mencakup harga beli, biaya instalasi, serta pengaturan awal. Biaya ini sering menjadi komponen besar dan krusial dalam analisis kelayakan investasi.

2. Biaya Operasional

Biaya operasional mencerminkan efisiensi pengelolaan kegiatan bisnis sehari-hari. Biaya ini meliputi pengeluaran terkait kegiatan penjualan, administrasi, dan operasional lainnya. Dalam perhitungan umur ekonomis mesin, biaya operasional terdiri dari pengeluaran yang dibutuhkan untuk menjalankan mesin, seperti biaya energi (listrik atau bahan bakar), pemeliharaan rutin, serta upah tenaga kerja yang terlibat langsung.

3. Biaya Pemeliharaan dan Perbaikan

Biaya pemeliharaan dan perbaikan mencakup pengeluaran untuk suku cadang, bahan habis pakai, serta jasa dari pihak ketiga. Biaya ini diperlukan untuk merawat dan memperbaiki berbagai fasilitas dan peralatan seperti bangunan, kendaraan, peralatan pabrik, dan aset tetap lainnya. Dalam konteks umur ekonomis, biaya ini mencakup servis rutin, penggantian komponen aus, serta perbaikan akibat kerusakan.

2.2.5 *Minimum Attractive Rate of Return (MARR)*

Minimum Attractive Rate of Return (MARR) adalah tingkat pengembalian paling rendah yang masih dianggap layak oleh investor dalam mengevaluasi dan memilih suatu proyek investasi. Nilai ini berperan sebagai standar acuan untuk menilai kelayakan investasi berdasarkan estimasi imbal hasil yang diharapkan (Yusuf & Budiawan, 2024).

2.2.6 Manajemen Aset

Berdasarkan penjelasan dalam buku *Framework Peningkatan Kinerja Sistem Manajemen Aset Berbasis 55001 & ISO 31000* oleh (Cahyo, 2020), manajemen aset merupakan serangkaian aktivitas yang terkoordinasi dalam suatu organisasi untuk mewujudkan nilai dari aset yang dimiliki. Nilai tersebut tidak hanya terbatas pada aspek finansial, tetapi juga meliputi kontribusi terhadap pencapaian tujuan organisasi, serta mempertimbangkan aspek sosial, lingkungan, risiko, dan kinerja. Karena itu, setiap organisasi perlu mendefinisikan nilai aset sesuai dengan karakteristik, kebutuhan, dan harapan para pemangku kepentingan (*stakeholder*).

Manajemen aset mencakup seluruh siklus hidup aset, mulai dari pengadaan hingga penghapusan. Selama periode tersebut, seluruh keputusan terkait aset harus mempertimbangkan keseimbangan antara biaya, risiko, dan kinerja. Misalnya, dalam proses pemilihan aset produksi, organisasi perlu menilai alternatif yang tersedia berdasarkan efisiensi jangka panjang, bukan hanya biaya awal. Implementasi manajemen aset yang efektif dapat meningkatkan keselamatan kerja, kepatuhan terhadap regulasi, efisiensi biaya, serta mendukung pengambilan keputusan strategis. Oleh karena itu, manajemen aset bukan hanya menjadi tanggung jawab satu departemen tertentu, tetapi merupakan proses lintas fungsi yang berkontribusi langsung terhadap pencapaian kinerja organisasi secara menyeluruh.

2.2.7 Manajemen Perawatan

Manajemen perawatan mencakup serangkaian kegiatan yang bertujuan untuk menetapkan sasaran, menentukan prioritas, serta merancang strategi perawatan yang tepat, termasuk pembagian tanggung jawab dalam pelaksanaannya. Tujuan utama dari kegiatan perawatan ini adalah untuk memastikan mesin tetap andal dan dapat berfungsi secara optimal. Oleh karena itu, penerapan strategi perawatan yang efektif sangat diperlukan guna menjamin kelangsungan proses produksi (Wibowo et al., 2021).

2.2.8 Strategi Perawatan

Strategi perawatan merupakan pendekatan sistematis dalam menjaga keandalan dan umur operasional suatu peralatan melalui berbagai metode pemeliharaan. Perawatan diperlukan untuk mencegah degradasi fungsi peralatan serta memastikan bahwa komponen-komponen penting tetap bekerja sesuai masa desainnya. Terdapat tiga strategi utama dalam kegiatan perawatan, yaitu *breakdown maintenance*, *preventive maintenance*, dan *predictive maintenance* (Cahyo, 2019).

1. *Breakdown Maintenance* (Reaktif)

Strategi ini dikenal juga sebagai *run to failure*, yaitu pendekatan yang menunggu hingga peralatan benar-benar mengalami kerusakan sebelum dilakukan tindakan perbaikan. Tidak ada aktivitas perawatan yang dilakukan selama peralatan masih berfungsi. Meskipun pendekatan ini tergolong sederhana, penelitian menunjukkan bahwa *breakdown maintenance* masih menjadi metode yang paling umum diterapkan, terutama pada sistem yang tidak kritis atau memiliki biaya perbaikan rendah.

2. *Preventive Maintenance*

Perawatan preventif didefinisikan sebagai tindakan terjadwal yang dilakukan untuk mencegah terjadinya kerusakan melalui inspeksi, pelumasan, penyetelan, atau penggantian komponen pada interval tertentu. Strategi ini bertujuan untuk menjaga keandalan dan memperpanjang umur aset dengan cara mengurangi tingkat degradasi yang dapat diterima. Keunggulan dari *preventive maintenance* antara lain:

- A. Dapat menekan biaya secara signifikan pada berbagai proses yang membutuhkan investasi modal besar.
- B. Memberikan fleksibilitas dalam menyesuaikan frekuensi perawatan sesuai kebutuhan operasional.
- C. Berkontribusi dalam memperpanjang usia pakai komponen secara keseluruhan.
- D. Mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi.
- E. Menurunkan kemungkinan terjadinya kegagalan pada peralatan maupun proses produksi.
- F. Dapat menghasilkan efisiensi biaya pemeliharaan sebesar 12% hingga 18% jika dibandingkan dengan pendekatan pemeliharaan reaktif.

Namun demikian, strategi ini juga memiliki beberapa kekurangan:

- A. Risiko terjadinya kegagalan sistem secara tiba-tiba (*catastrophic failure*) masih tetap ada.
- B. Membutuhkan sumber daya manusia dalam jumlah besar (bersifat padat karya).
- C. Berpotensi menyebabkan dilakukannya aktivitas pemeliharaan yang sebenarnya tidak diperlukan.
- D. Terdapat kemungkinan kerusakan pada komponen akibat tindakan perawatan yang tidak dibutuhkan atau dilakukan secara tidak tepat.

Pada penelitian ini, fokus diarahkan pada perencanaan penjadwalan *preventive maintenance* terhadap peralatan pemutus tegangan (PMT), guna menentukan interval waktu perawatan optimal yang dapat meminimalkan risiko kerusakan serta mengoptimalkan biaya dan performa aset.

3. *Predictive Maintenance*

Predictive maintenance adalah strategi perawatan berbasis kondisi, di mana tindakan dilakukan hanya ketika data menunjukkan tanda-tanda awal degradasi fungsi. Melalui pemantauan parameter-parameter tertentu, perawatan dilakukan secara lebih presisi dibandingkan *preventive maintenance*. Strategi ini dinilai lebih efisien karena hanya dilakukan saat diperlukan, namun membutuhkan peralatan diagnostik yang canggih serta sistem pemantauan yang berkelanjutan.

2.2.9 **Reliability Centered Maintenance (RCM)**

RCM adalah pendekatan yang membantu menentukan jenis pemeliharaan yang perlu dilakukan agar peralatan tetap menjalankan fungsinya seperti yang direncanakan (Alrifaeey et al., 2020). Fungsi *Reliability Centered Maintenance* (RCM) untuk memastikan keandalan sistem dengan mengidentifikasi potensi kegagalan, menganalisis dampaknya, dan menentukan strategi pemeliharaan yang tepat. RCM membantu mengoptimalkan pemeliharaan preventif, mengurangi aktivitas yang tidak efektif, serta meningkatkan efisiensi, keselamatan, dan produktivitas sistem (Geisbush & Ariaratnam, 2023).

2.2.10 **Tahapan *Reliability Centered Maintenance* (RCM)**

Berikut merupakan Langkah-langkah atau tahapan dalam menjalankan RCM sebagai berikut:

1. Identifikasi Sistem dan Pengumpulan Data

Tahapan awal dalam proses RCM adalah mengidentifikasi sistem yang akan dianalisis dan mengumpulkan informasi secara detail terkait fungsi sistem serta potensi kegagalan pada setiap komponen. Informasi ini menjadi dasar dalam memahami bagaimana kegagalan fungsi dapat memengaruhi kinerja keseluruhan sistem.

2. Penentuan Batas Sistem

Langkah ini bertujuan untuk mendefinisikan batas sistem secara jelas guna menghindari adanya tumpang tindih atau kekeliruan dengan sistem lain. Penentuan batas diperlukan agar ruang lingkup analisis menjadi lebih fokus dan terarah.

3. *Functional Diagram Block* (FBD)

Functional Block Diagram (FBD) merupakan diagram yang digunakan untuk menggambarkan alur kerja dan keterkaitan antar fungsi dalam suatu sistem atau peralatan

(Qurratulaini et al., 2025). Diagram ini membantu memvisualisasikan tahapan operasional secara sistematis, sehingga memudahkan pemahaman terhadap proses yang berlangsung di dalam sistem tersebut. Melalui analisis FBD, setiap bagian atau subsistem yang terlibat dalam suatu proses, termasuk perbaikan atau pemeliharaan, dapat diidentifikasi secara lebih terstruktur. Dengan demikian, FBD menjadi alat bantu penting dalam menguraikan langkah-langkah operasional dalam berbagai proses teknis maupun manajerial.

4. Analisis Fungsi dan Kegagalan Fungsi

Fokus analisis bukan pada kerusakan fisik komponen, melainkan pada kondisi yang menyebabkan sistem tidak menjalankan fungsinya dengan benar. Setiap fungsi dianalisis untuk mengetahui kondisi-kondisi penyebab kegagalan agar tindakan pencegahan bisa direncanakan secara efektif.

5. Analisis Mode dan Efek Kegagalan (FMEA)

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) merupakan salah satu metode teknik rekayasa yang banyak digunakan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan, kesalahan, maupun permasalahan pada suatu sistem, desain, proses, atau layanan sebelum berdampak langsung kepada pengguna akhir. Pendekatan ini berfokus pada penilaian risiko secara preventif terhadap berbagai kemungkinan mode kegagalan, sehingga memungkinkan dilakukannya tindakan korektif lebih awal guna mencegah terjadinya kerusakan atau gangguan yang lebih serius (Pangestuti et al., 2022).

Berdasarkan (Nevada et al., 2024) dalam metode FMEA, risiko setiap mode kegagalan dievaluasi menggunakan *Risk Priority Number* (RPN), yang dihitung berdasarkan tiga aspek utama yaitu:

- A. *Severity* (S) yang menggambarkan tingkat dampak atau keparahan akibat dari kegagalan yang mungkin terjadi pada sistem.
- B. *Occurrence* (O) yaitu penilaian terhadap frekuensi atau seberapa sering kemungkinan penyebab kegagalan tertentu dapat terjadi.
- C. *Detection* (D) yaitu estimasi sejauh mana sistem pengawasan atau pemantauan dapat mengenali adanya potensi kegagalan sebelum kerusakan benar-benar terjadi dan menyebabkan gangguan operasional.

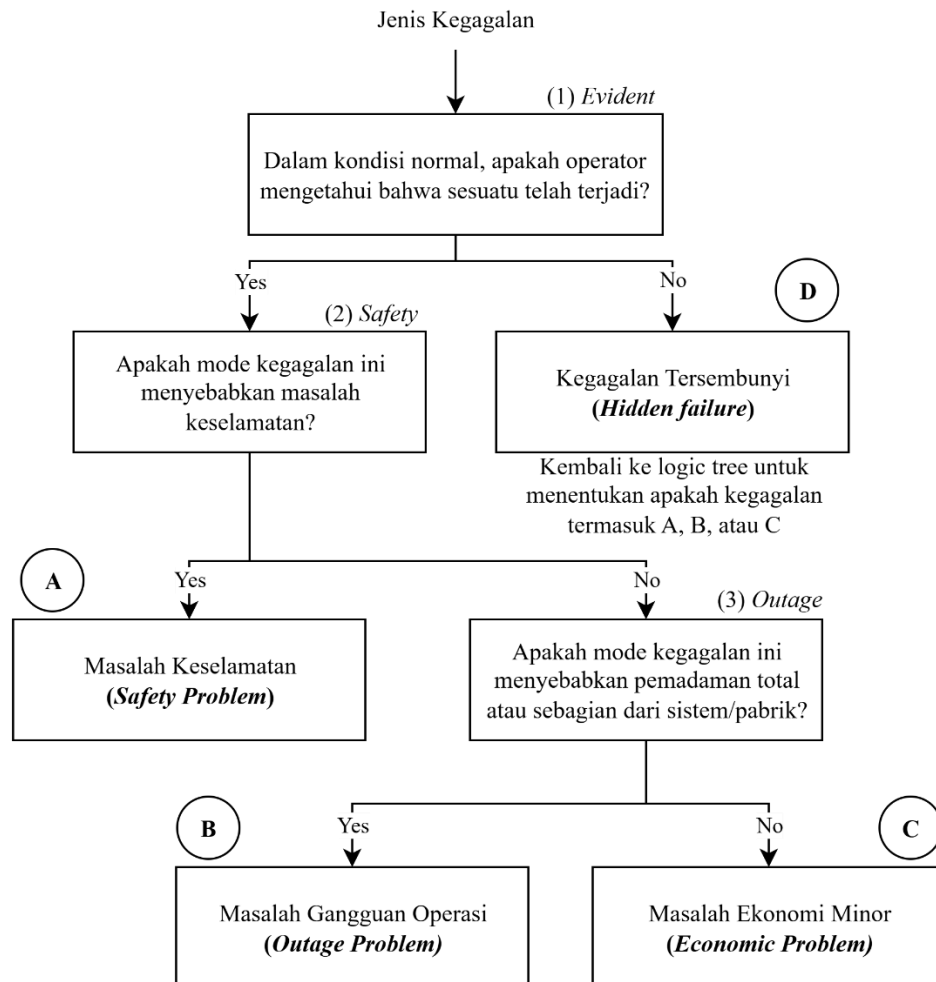
Nilai dari ketiga aspek ini kemudian dikalikan untuk memperoleh RPN sebagai dasar dalam menentukan prioritas tindakan perbaikan.

6. Analisis Pohon Logika (*Logic Tree Analysis/LTA*)

Penyusunan *Logic Tree Analysis* (LTA) merupakan pendekatan kualitatif yang bertujuan untuk mengevaluasi dampak dari setiap mode kegagalan (*failure mode*) yang mungkin terjadi. Menurut (Smith & Hinchcliffe, 2004) *Logic Tree Analysis* (LTA) merupakan salah satu metode analisis dalam proses *Reliability Centered Maintenance* (RCM) yang berfungsi untuk mengklasifikasikan mode kegagalan berdasarkan tingkat prioritas penanganannya. Teknik ini membantu dalam memutuskan jenis perhatian dan sumber daya yang perlu diberikan pada setiap potensi kegagalan dalam sistem. LTA menggunakan pendekatan pohon keputusan yang terdiri dari tiga pertanyaan utama yang dijawab secara berurutan dengan jawaban "ya" atau "tidak". Jawaban dari pertanyaan ini akan menentukan kategori kegagalan menjadi empat kelompok utama, yaitu berkaitan dengan keselamatan (*safety related*), gangguan operasional (*outage related*), dampak ekonomi (*economic related*), atau kegagalan tersembunyi (*hidden failure*). Proses dimulai dengan menilai apakah operator dapat menyadari adanya gangguan selama menjalankan tugas secara normal. Jika tidak, maka kegagalan diklasifikasikan sebagai tersembunyi. Jika iya, pertanyaan berikutnya menilai apakah kegagalan tersebut berdampak pada keselamatan. Apabila tidak, maka penilaian dilanjutkan untuk melihat apakah gangguan menyebabkan penghentian operasi atau hanya berdampak pada kerugian ekonomi. Pendekatan ini memungkinkan analisis untuk menilai mode kegagalan secara sistematis dan objektif sebelum menetapkan strategi perawatan yang sesuai. Berdasarkan hasil analisis LTA, setiap mode kegagalan dapat diklasifikasikan ke dalam empat kategori utama, yaitu (Iskandar et al., 2021):

- A. Kategori A (Masalah Keselamatan): apabila mode kegagalan berpotensi menimbulkan cedera atau membahayakan keselamatan jiwa manusia.
- B. Kategori B (Masalah Gangguan Operasional): apabila kegagalan berdampak langsung terhadap kelangsungan operasi sistem, baik dari segi kuantitas maupun kualitas output, serta dapat menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan atau menyebabkan sistem berhenti beroperasi.
- C. Kategori C (Masalah Ekonomi Minor): apabila kegagalan tidak memengaruhi aspek keselamatan maupun operasional, namun tetap menimbulkan kerugian ekonomi dalam skala kecil yang masih dapat ditoleransi.

D. Kategori D (Kegagalan Tersembunyi): apabila kegagalan tidak langsung terdeteksi dan memerlukan pemeriksaan khusus untuk ditemukan, serta dapat dikombinasikan dengan kategori lain seperti D/A, D/B, atau D/C.



Gambar 2. 1 Struktur *Logic Tree Analysis*

Sumber: (Smith & Hinchcliffe, 2004)

7. Penentuan Tindakan Perawatan (*Task Selection*)

Task Selection merupakan tahap akhir dalam proses analisis menggunakan metode RCM. Pada tahap ini, untuk setiap mode kegagalan disusun berbagai alternatif tindakan yang memungkinkan, kemudian dipilih satu tindakan yang dinilai paling optimal dan efisien untuk diterapkan (Satrijo et al., 2021). Menurut (Fauliyadi et al., 2021) langkah ini bertujuan untuk menentukan jenis strategi perawatan yang paling sesuai dengan jenis kerusakan yang teridentifikasi. Terdapat tiga pendekatan utama dalam tahap ini:

- A. *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.
- B. *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.
- C. *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.

2.2.11 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.

1. Distribusi Normal

Distribusi normal digunakan ketika waktu kegagalan komponen cenderung terdistribusi secara simetris di sekitar nilai rata-rata. Artinya, kerusakan memiliki peluang yang sama untuk terjadi lebih awal atau lebih lambat dari nilai tengahnya. Model ini sangat sesuai untuk sistem atau peralatan yang mengalami degradasi secara bertahap dan stabil. Perbedaan penting antara distribusi normal dan distribusi uniform terletak pada bentuk kurvanya: distribusi normal berbentuk lonceng (*bell curve*) dan memiliki konsentrasi nilai di sekitar rata-rata, sedangkan distribusi uniform menyatakan bahwa semua nilai dalam suatu rentang memiliki probabilitas yang sama, sehingga cocok untuk menggambarkan ketidakpastian total tanpa adanya dominasi nilai tertentu.

2. Distribusi Lognormal

Distribusi Lognormal digunakan ketika data waktu kegagalan bersifat asimetris dan memiliki kecenderungan menyebar ke kanan (*right-skewed*). Distribusi ini cocok digunakan untuk memodelkan kegagalan yang disebabkan oleh akumulasi kerusakan atau keausan pada komponen yang umurnya dipengaruhi oleh banyak faktor tidak linier.

Karena waktu kegagalan tidak mungkin bernilai negatif, distribusi lognormal dianggap realistis dalam banyak kasus praktis.

3. Distribusi Eksponensial

Distribusi Eksponensial secara spesifik digunakan untuk memodelkan kegagalan yang bersifat acak (*random failures*) dengan tingkat laju kegagalan yang konstan. Ini berarti bahwa probabilitas kegagalan sebuah komponen pada jam berikutnya tidak dipengaruhi oleh berapa lama komponen tersebut telah beroperasi. Model ini sangat relevan untuk sistem yang sangat kompleks atau komponen elektronik di mana kegagalan dapat terjadi kapan saja tanpa pola penuaan yang jelas.

4. Distribusi Weibull

Distribusi ini sangat umum digunakan dalam analisis waktu kerusakan karena kemampuannya dalam merepresentasikan pola laju kegagalan yang bisa meningkat maupun menurun. Dalam penerapannya, distribusi Weibull memperhitungkan tingkat kegagalan berdasarkan kecenderungan pola data aktual yang diamati.

2.2.12 *Probability Plots dan Least-Squares Curve Fitting*

Berdasarkan isi buku “*An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*” karya (Ebeling, 1997) *probability plots* digunakan untuk mengevaluasi kecocokan data terhadap distribusi tertentu dengan cara mentransformasikan data agar membentuk garis lurus. Ketika data sesuai distribusi, garis regresi linear (*least-squares*) akan memiliki *Index of Fit* yang tinggi. Nilai r ini menunjukkan seberapa baik model merepresentasikan data. Metode ini lebih akurat dibandingkan *plotting* manual di atas kertas grafik khusus, karena mengurangi subjektivitas dan menghasilkan estimasi parameter yang lebih presisi.

Perhitungan dalam metode *Least-Square Curve Fitting* dilakukan dengan rumus berikut:

Nilai Tengah kerusakan (medium rank)

$$F(ti) = \frac{(i - 0,3)}{(n + 0,4)} \quad (2.2)$$

Dimana:

i = data waktu ke- t

n = Jumlah data kerusakan

Indeks of Fit

$$\frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (2.3)$$

Untuk menentukan identitas distribusi awal untuk setiap distribusi dapat menggunakan rumus berikut:

Distribusi Normal

$$\begin{aligned} x_i &= t_i \\ y_i = z_i &= \Phi^{-1}[F(t_i)] \end{aligned} \quad (2.4)$$

Distribusi Lognormal

$$\begin{aligned} x_i &= \ln t_i \\ y_i = z_i &= \Phi^{-1}[F(t_i)] \end{aligned} \quad (2.5)$$

Distribusi Eksponensial

$$\begin{aligned} x_i &= t_i \\ y_i &= \ln \left(\frac{1}{1 - F(t_i)} \right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Distribusi Weibull

$$\begin{aligned} x_i &= \ln t_i \\ y_i &= \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t_i)} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.2.13 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 (Maryam et al., 2022).

Uji Goodness 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 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 (Pardiyono & Suryani, 2020). Pengujian yang dilakukan untuk tiap-tiap distribusi akan berbeda, seperti berikut (Ebeling, 1997):

1. Pengujian untuk distribusi normal dan lognormal

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

H_0 : data *time failure* terdistribusi normal (lognormal)

H_1 : data *time failure* tidak terdistribusi normal (lognormal)

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

Dimana:

$$D_1 = \max \Phi \left(\frac{ti - \mu}{s} \right) - \left(\frac{t-1}{n} \right) \quad (2.8)$$

$$D_2 = \max \left(\frac{i}{n} \right) - \Phi \left(\frac{ti - \mu}{s} \right) \quad (2.9)$$

$$\text{Cumulative probability } F(t) = \left(\frac{ti - \mu}{\sigma} \right) \quad (2.10)$$

$$\mu = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \ln ti}{n} \right) \quad (2.11)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln ti - \mu)^2}{n}} \quad (2.11)$$

Dengan,

t_i = *time to failure* ke- i

μ = rata-rata *time to failure*

S = Standar deviasi

N = Banyaknya data

Apabila nilai $D_n < D_{crit}$ 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. Pengujian untuk distribusi eksponensial

Untuk distribusi eksponensial dilakukan uji *Bartlett* dengan hipotesis yang digunakan adalah:

H0: *Time failure* berdistribusi eksponensial

H1: *Time failure* tidak berdistribusi eksponensial

Rumus uji *Bartlett* sebagai berikut:

$$B = \frac{2r [\ln((1/r) \sum_{i=1}^r t_i) - (1/r) \sum_{i=1}^r \ln t_i]}{1 + (r + 1)/(6r)} \quad (2.12)$$

Di mana:

r = jumlah kerusakan

t_i = data waktu kerusakan ke-i

B = nilai uji statistik untuk *Bartlett's test*

H0 bisa diterima jika nilai B berada didalam wilayah kritis dengan persamaan sebagai berikut:

$$X^2_{1-\alpha/2, r-1} < B < X^2_{\alpha/2, r-1} \quad (2.13)$$

Di mana:

α = nilai signifikasni

3. Pengujian untuk distribusi Weibull

Untuk distribusi weibull dilakukan *Mann's test* dengan hipotesis yang digunakan adalah:

H0: *Time failure* berdistribusi weibull

H1: *Time failure* tidak berdistribusi weibull

Rumus untuk *Mann's test* sebagai berikut:

$$M = \frac{k_1 \sum_{i=k_1+1}^{r-1} [(\ln t_{i+1} - \ln t_i)/M_i]}{k_2 \sum_{i=1}^{k_1} [(\ln t_{i+1} - \ln t_i)/M_i]} \quad (2.14)$$

Di mana,

$$k_1 = \left\lceil \frac{r}{2} \right\rceil \quad (2.15)$$

$$k_2 = \left\lceil \frac{r-1}{2} \right\rceil \quad (2.16)$$

$$M_i = Z_{i+1} - Z_i \quad (2.17)$$

$$Z_i = \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{i-0.5}{n+0.25} \right) \right] \quad (2.18)$$

Dengan,

t_i = data antar waktu kerusakan ke-i

n = jumlah data antar kerusakan suatu komponen

M_i = nilai pendekatan *mann* untuk data ke- i

M = nilai perhitungan distribusi weibull

r = banyak data

Keputusan diambil dengan kriteria: jika $M > F_{crit}$ maka hipotesis alternatif (H1) diterima yang berarti data tidak mengikuti distribusi Weibull dua-parameter dan kemungkinan lebih sesuai dengan Weibull tiga-parameter atau distribusi lainnya, sedangkan jika $M \leq F_{crit}$ maka hipotesis nol (H0) diterima. Nilai F_{crit} diperoleh dari tabel distribusi F dengan derajat kebebasan pembilang sebesar $2k_2$ dan penyebut sebesar $2k_1$, di mana k_1 dan k_2 berasal dari perhitungan parameter uji.

2.2.14 Parameter Estimasi Distribusi

Menurut (Ebeling, 1997) Estimasi parameter adalah proses statistik yang digunakan untuk menentukan nilai numerik dari parameter pada suatu distribusi probabilitas setelah bentuk distribusinya diketahui. Meskipun metode grafik dan *fitting least squares* memberikan perkiraan awal, metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) lebih disukai karena memberikan estimasi statistik terbaik, terutama dalam pengujian *goodness-of-fit*. MLE melibatkan penyusunan fungsi *likelihood* berdasarkan data yang diamati dan menemukan nilai parameter yang memaksimalkan fungsi ini, sehingga membuat data yang diamati menjadi paling mungkin terjadi. Masing-masing parameter untuk tiap distribusi adalah sebagai berikut:

1. Distribusi Normal

Parameter pada distribusi normal adalah σ dan μ

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \bar{x} \quad (2.19)$$

$$\sigma = \frac{(n-1)s^2}{n} \quad (2.20)$$

Dengan nilai s didapat dengan rumus berikut:

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(t_i - MTTF)^2}{n-1}}; (bentuk\ dasar)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 - nMTTF^2}{n-1}}; (bentuk\ komputasi\ varians)$$

2. Distribusi Lognormal

Parameter yang digunakan pada distribusi lognormal adalah s (parameter bentuk) dan t_{med} (parameter lokasi)

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \ln t_i}{n} \quad (2.21)$$

Sehingga,

$$t_{med} = e^{\mu} \quad (2.22)$$

dan

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln t_i - \mu)^2}{n}} \quad (2.23)$$

3. Distribusi Eksponensial

Parameter yang digunakan untuk distribusi eksponensial adalah λ

$$\lambda = \frac{n}{T} \quad (2.24)$$

Dimana:

$T = \sum_{ti}^r t_i$ yaitu total waktu kerusakan

λ = rata-rata datangnya kejadian

4. Distribusi Weibull

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

$$g(\beta) = \frac{\sum_{i=1}^r t_i^{\beta} \ln(t_i) + (n-r)t_s^{\beta} \ln t_s}{\sum_{i=1}^r t_i^{\beta} + (n-r)t_s^{\beta}} - \frac{1}{\beta} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(t_i) = 0 \quad (2.25)$$

Rumus ini tidak bisa diselesaikan secara aljabar langsung. Maka itu harus diselesaikan secara numerik menggunakan metode iteratif seperti Newton-Raphson:

$$\beta_{j+1} = \beta_j - \frac{g(\beta_j)}{g'(\beta_j)}$$

Dimana,

$$g'(x) = \frac{dg(x)}{dx}$$

Untuk menentukan θ , dengan rumus:

$$\theta = \left\{ \frac{1}{r} \left[\sum_{i=1}^r t_i^\beta + (n-r)t_s^\beta \right] \right\}^{1/\beta} \quad (2.26)$$

Dimana:

β = parameter bentuk (*shape* parameter)

θ = parameter skala (*scale* parameter)

t_i = waktu kegagalan ke- i

t_s = waktu sensoring (observasi berakhir tanpa kegagalan)

n = jumlah total data

r = jumlah unit yang mengalami kegagalan selama periode pengamatan

2.2.15 MTTR dan MTTF

Mean Time to Repair (MTTR) merupakan ukuran statistik yang menggambarkan rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk melakukan perbaikan pada suatu mesin atau peralatan setelah terjadi kerusakan hingga kembali beroperasi secara normal. Waktu perhitungan MTTR dimulai sejak peralatan dinyatakan gagal (*down*) hingga perbaikan selesai dan fungsi sistem pulih sepenuhnya. Indikator ini sering digunakan untuk mengevaluasi tingkat responsivitas dan efisiensi tim pemeliharaan dalam menangani gangguan operasional. Semakin rendah nilai MTTR, maka semakin baik kinerja perawatan karena menunjukkan bahwa perbaikan dapat dilakukan dengan cepat dan efektif. MTTR juga berperan penting dalam perencanaan strategi pemeliharaan berbasis waktu dan sumber daya.

$$MTTR = \frac{\text{Total waktu terhentinya alat akibat kerusakan}}{\text{Jumlah kerusakan}} \quad (2.27)$$

Berikut ini merupakan perhitungan MTTR masing-masing distribusi:

Distribusi Normal

$$MTTR = \mu$$

Distribusi Lognormal

$$MTTR = t_{med} \cdot e^{s^2/2}$$

Distribusi Eksponensial

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

Distribusi Weibull

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

Sementara itu, *Mean Time to Failure* (MTTF) adalah indikator yang digunakan untuk mengukur rata-rata waktu operasional suatu aset atau komponen hingga mengalami kegagalan untuk pertama kalinya. Berbeda dengan MTTR, MTTF umumnya diterapkan pada peralatan yang bersifat *non-repairable*, yaitu komponen yang setelah rusak tidak dirancang untuk diperbaiki, melainkan langsung diganti. Nilai MTTF memberikan estimasi terhadap umur pakai komponen, yang sangat berguna dalam perencanaan penggantian dan pengelolaan stok suku cadang. Dalam konteks manajemen keandalan, MTTF menjadi salah satu parameter penting untuk menilai kualitas dan daya tahan produk, serta menjadi dasar dalam merancang kebijakan perawatan preventif guna meminimalkan *downtime*.

$$MTTF = \frac{\text{Waktu total downtime}}{\text{Jumlah kerusakan}} \quad (2.28)$$

Berikut ini merupakan perhitungan MTTF masing-masing distribusi:

Distribusi Normal

$$MTTF = \mu$$

Distribusi Lognormal

$$MTTF = t_{med} \cdot e^{s^2/2}$$

Distribusi Eksponensial

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

Distribusi Weibull

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

2.2.16 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 preventif, 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.

$$D_{tp} = \frac{Tp * R_{tp} + Tf(1 - R_{tp})}{(t_p + Tp)R_{tp} + (M_{tp} + Tf)(1 - R_{tp})} \quad (2.29)$$

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

2.2.17 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:

$$D(n) = \lambda(n).Tf + n.Ti \quad (2.30)$$

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

Dimana:

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

$$k = \frac{\text{frekuensi jumlah kerusakan}}{\text{periode terjadinya kerusakan}}$$

$$Tf = \frac{1}{\mu}; Ti = \frac{1}{i}$$

Sehingga:

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

Jika persamaan di atas didiferensialkan akan menjadi:

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

Sehingga frekuensi pemeriksaan:

$$n = \sqrt{\frac{k \cdot i}{\mu}}$$

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

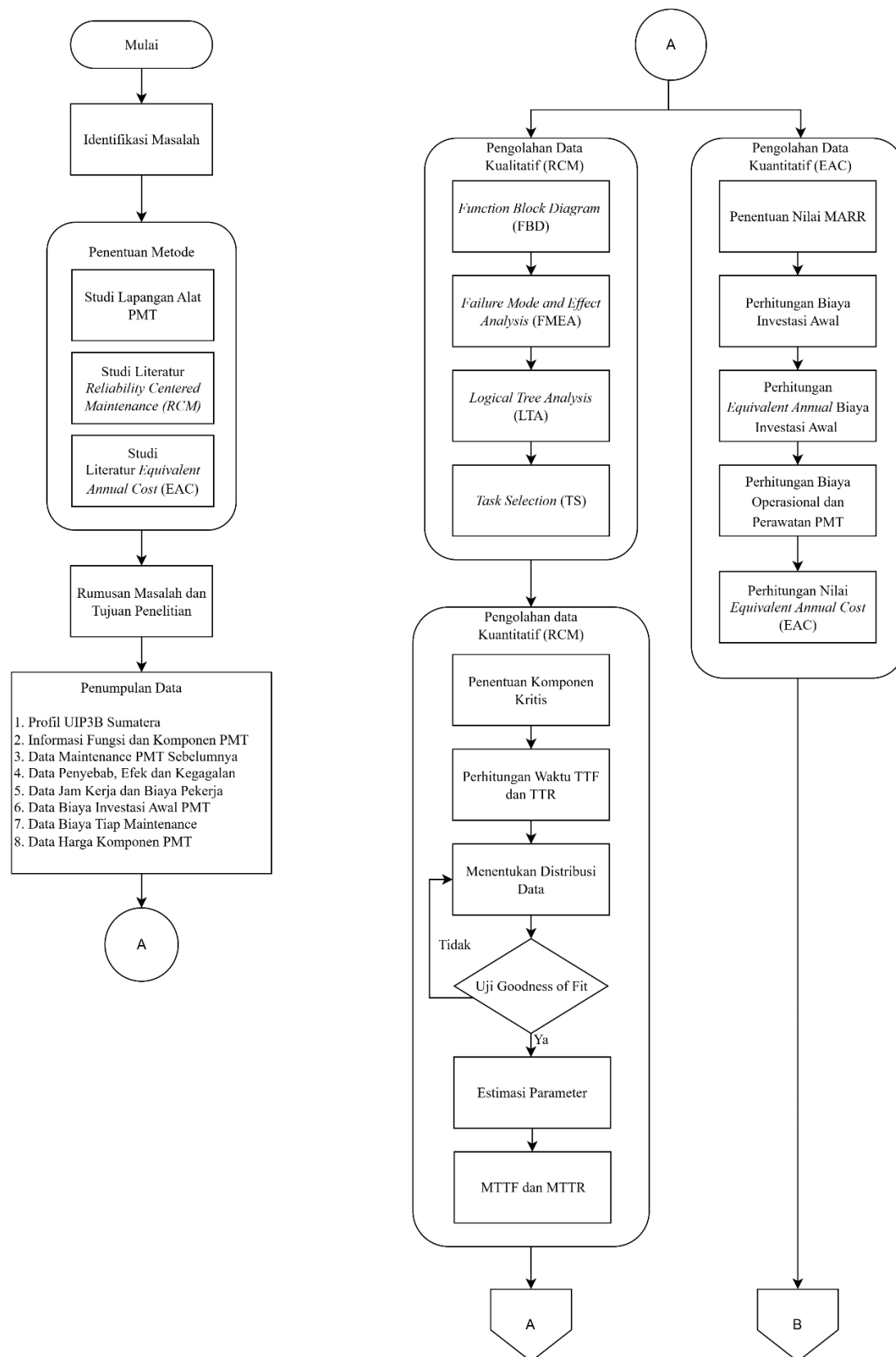
BAB III METODE PENELITIAN

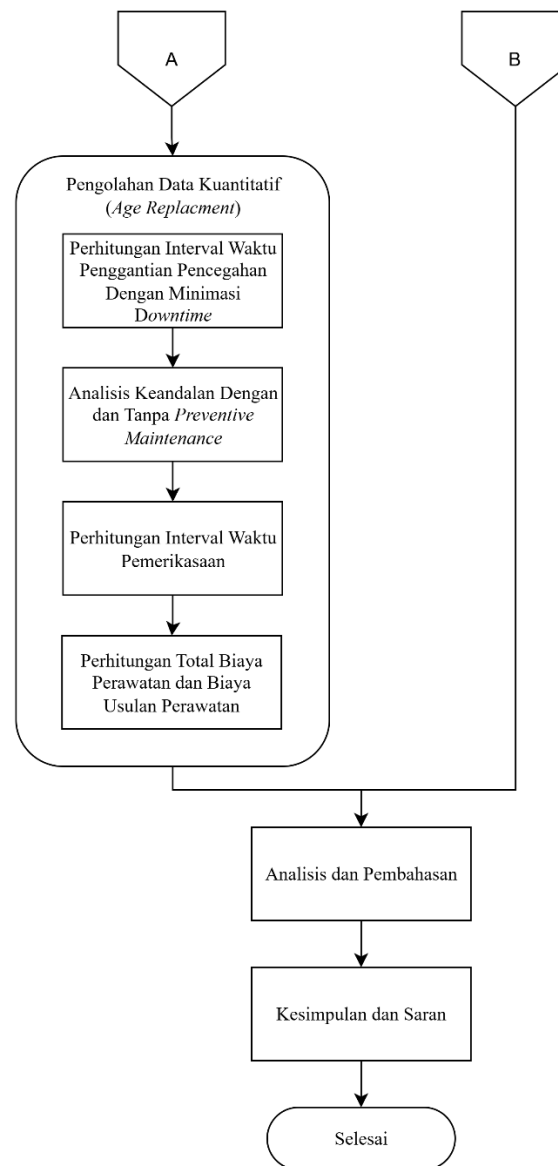
3.1 Subjek, Objek dan Lokasi Penelitian

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 Pemutus Tegangan (PMT).

3.2 Diagram Alir Penelitian

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





Gambar 3. 1 Alur Penelitian

Penelitian ini diawali dengan identifikasi masalah, yaitu permasalahan yang berkaitan dengan keandalan dan efisiensi pengelolaan pemeliharaan pemutus tenaga (PMT) pada sistem kelistrikan di lingkungan PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera. Setelah permasalahan diidentifikasi, dilakukan penentuan metode yang terdiri dari studi lapangan terhadap alat PMT serta kajian literatur terhadap dua pendekatan utama, yaitu metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dan *Equivalent Annual Cost* (EAC). Langkah selanjutnya adalah

perumusan masalah dan tujuan penelitian untuk memperjelas arah dan fokus analisis. Setelah itu, dilakukan pengumpulan data yang mencakup berbagai informasi teknis dan ekonomis, seperti profil alat, fungsi dan komponen PMT, data pemeliharaan sebelumnya, penyebab dan efek kerusakan, biaya investasi, serta biaya operasional dan perawatan. Selanjutnya, dilakukan analisis ekonomi dengan pendekatan *Equivalent Annual Cost* (EAC). Langkah pertama adalah menentukan *Minimum Attractive Rate of Return* (MARR) yang akan digunakan. Kemudian dilakukan perhitungan total biaya investasi awal, perhitungan *Equivalent Annual Cost* untuk biaya investasi awal dan biaya operasional dan perawatan PMT. Seluruh komponen ini dikonversi menjadi nilai tahunan yang seragam, sehingga menghasilkan nilai EAC yang mencerminkan total biaya tahunan rata-rata dari aset selama masa pakainya yang juga akan menampilkan biaya EAC terendah sebagai acuan penentuan umur ekonomis untuk PMT.

Pada metode RCM penelitian diawali dengan tahap pengolahan data, yang terbagi menjadi dua bagian utama: kualitatif dan kuantitatif. Data kualitatif dianalisis menggunakan tahapan dalam RCM. Tahap pertama dimulai dari pembuatan *Function Block Diagram* (FBD) untuk memahami hubungan antar fungsi komponen sistem. Selanjutnya, dilakukan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi potensi mode kegagalan dan dampaknya. Hasil FMEA digunakan dalam proses *Logic Tree Analysis* (LTA), yaitu untuk mengklasifikasikan mode kegagalan berdasarkan prioritas penanganan, seperti aspek keselamatan, operasional, atau ekonomi. Tahapan ini diakhiri dengan *Task Selection* (TS), yaitu penetapan strategi tindakan pemeliharaan yang sesuai untuk setiap mode kegagalan. Selanjutnya adalah mengolah data kuantitatif RCM, pada bagian ini analisis dimulai dengan penentuan komponen kritis berdasarkan frekuensi dan dampak kegagalan. Dilanjutkan dengan perhitungan waktu TTF (*Time to Failure*) dan TTR (*Time to Repair*). Data ini digunakan untuk menentukan jenis distribusi probabilitas yang paling sesuai dengan pola kegagalan melalui uji *Goodness of Fit*. Apabila distribusi telah ditentukan, dilakukan estimasi parameter distribusi, yang kemudian menjadi dasar dalam perhitungan dua indikator keandalan utama, yaitu MTTF (*Mean Time to Failure*) dan MTTR (*Mean Time to Repair*). Bagian terakhir dari pengolahan data kuantitatif adalah pendekatan *Age Replacement*, yang bertujuan menentukan waktu penggantian preventif optimal untuk meminimalkan *downtime*. Perhitungan dimulai dari estimasi interval waktu penggantian preventif, dilanjutkan dengan penetapan interval waktu inspeksi terhadap komponen. Tahap ini diakhiri dengan perhitungan

total biaya pemeliharaan dan usulan strategi perawatan optimal berdasarkan kombinasi teknis dan ekonomis. Setelah seluruh data kualitatif dan kuantitatif dianalisis, dilakukan analisis dan pembahasan hasil untuk menjawab rumusan masalah dan mencapai tujuan penelitian. Penelitian ditutup dengan penyusunan kesimpulan dan saran yang memberikan rekomendasi teknis maupun manajerial terkait pemeliharaan PMT secara efisien dan berkelanjutan.

3.2.1 Identifikasi Masalah

Tahapan ini merupakan dasar awal dari proses penelitian, yang bertujuan untuk mengenali dan merumuskan permasalahan utama yang terjadi di lapangan. Identifikasi masalah dilakukan dengan mengamati kondisi aktual operasional alat Pemutus Tenaga (PMT) di lingkungan kerja, dalam hal ini PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera. Permasalahan yang dicermati umumnya berkaitan dengan tingginya frekuensi kerusakan, *downtime* yang berdampak pada gangguan sistem kelistrikan, serta belum optimalnya strategi pemeliharaan yang diterapkan. Melalui proses ini, peneliti dapat menyusun fokus kajian secara sistematis dan menentukan arah penelitian yang relevan terhadap kebutuhan teknis dan operasional di lapangan.

3.2.2 Penentuan Metode

Setelah masalah diidentifikasi, tahap berikutnya adalah menetapkan pendekatan dan metode yang digunakan dalam penelitian. Penentuan metode dalam penelitian ini melibatkan tiga langkah utama:

1. Studi Lapangan Alat PMT

Studi ini dilakukan untuk memperoleh pemahaman langsung mengenai kondisi aktual peralatan PMT, termasuk struktur, fungsi, dan sejarah pemeliharannya. Observasi dilakukan terhadap unit-unit PMT yang digunakan di lapangan, dengan tujuan mengidentifikasi komponen-komponen penting, pola kegagalan yang terjadi, serta karakteristik pemeliharaan yang telah diterapkan. Studi lapangan menjadi landasan untuk mengaitkan antara teori yang diadopsi dengan praktik aktual di perusahaan.

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

RCM merupakan metode sistematis dalam menyusun strategi pemeliharaan berdasarkan fungsi dan risiko kegagalan peralatan. Studi literatur terhadap RCM dilakukan untuk memahami kerangka konseptual, prinsip-prinsip dasar, serta tahapan implementasi RCM, seperti *Function Block Diagram* (FBD), *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), *Logic Tree Analysis* (LTA), dan *Task Selection*. Pemahaman yang mendalam terhadap

RCM diperlukan karena metode ini menjadi alat utama dalam mengklasifikasikan mode kegagalan dan menentukan tindakan perawatan yang tepat dan terukur.

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

Studi ini bertujuan untuk memahami konsep analisis biaya dalam konteks pemeliharaan dan investasi aset teknis. EAC digunakan untuk membandingkan berbagai alternatif perawatan atau penggantian komponen berdasarkan nilai biaya tahunan ekuivalen. Kajian literatur dilakukan untuk memahami cara menghitung biaya investasi awal, biaya operasional, biaya perawatan, dan tingkat pengembalian minimum yang diharapkan (*Minimum Attractive Rate of Return/MARR*). Studi ini mendukung pengambilan keputusan yang berbasis efisiensi ekonomi dalam siklus hidup aset.

3.2.3 Rumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Setelah metode ditetapkan, langkah selanjutnya adalah menyusun rumusan masalah dan tujuan penelitian secara eksplisit. Rumusan masalah disusun berdasarkan hasil identifikasi awal dan mempertimbangkan kesenjangan antara kondisi aktual di lapangan dengan kondisi ideal yang diharapkan. Adapun tujuan penelitian dirancang untuk memberikan arah dan fokus terhadap kegiatan analisis, baik dalam aspek teknis maupun ekonomis, agar hasil akhir penelitian dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengelolaan perawatan PMT secara 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 PMT
2. Informasi fungsi dan komponen utama PMT
3. Data historis pemeliharaan PMT sebelumnya
4. Data penyebab, efek, dan jenis kerusakan
5. Jam kerja teknisi serta biaya tenaga kerja
6. Biaya investasi awal peralatan PMT
7. Biaya perawatan berkala dan insidental
8. Harga suku cadang dan komponen PMT

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, *Age Replacement*, dan EAC yang akan dilakukan pada tahapan selanjutnya.

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

Setelah diperoleh informasi interval waktu perawatan melalui pendekatan RCM, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis ekonomi menggunakan metode *Equivalent Annual Cost* (EAC). Metode ini digunakan untuk mengevaluasi dan membandingkan total biaya tahunan rata-rata dari aset atau sistem selama siklus hidupnya, sehingga mendukung pengambilan keputusan berbasis efisiensi biaya untuk menentukan umur ekonomis dari PMT. Analisis EAC terdiri dari beberapa tahapan berikut:

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

Langkah awal dalam analisis EAC adalah menentukan tingkat pengembalian minimum yang diharapkan (MARR) yang digunakan sebagai dasar dalam menghitung nilai tahunan ekuivalen. Nilai MARR biasanya ditetapkan berdasarkan kebijakan perusahaan atau standar industri sebagai tingkat pengembalian investasi yang layak secara ekonomis.

2. Perhitungan Biaya Investasi Awal

Tahapan ini bertujuan untuk memperoleh estimasi total biaya yang diperlukan pada awal periode investasi. Nilai investasi awal dihitung dengan menjumlahkan seluruh komponen biaya yang terkait, meliputi harga perolehan alat, biaya instalasi, biaya administrasi, serta biaya kontinjensi yang mungkin timbul selama proses pengadaan. Pendekatan ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai besaran dana yang dibutuhkan sebelum aset mulai dioperasikan.

3. Perhitungan *Equivalent Annual* Biaya Investasi Awal

Tahap ini merupakan proses perhitungan *Equivalent Annual Cost* dari biaya investasi awal Pemutus Tenaga (PMT). Biaya investasi awal yang tersedia berasal dari data pada tahun 2015. Oleh karena itu, sebelum dihitung nilai tahunan ekuivalennya, biaya investasi tersebut terlebih dahulu dikonversi ke nilai sekarang (tahun ke-0), yaitu tahun perhitungan 2025. Konversi ini dilakukan agar nilai investasi awal yang digunakan dalam analisis memiliki kesetaraan waktu dengan tahun dasar perhitungan, sehingga hasil estimasi biaya tahunan ekuivalen dapat merepresentasikan kondisi aktual pada periode penelitian.

4. Perhitungan Biaya Operasional dan Perawatan PMT

Pada tahap perhitungan biaya operasional dan perawatan, seluruh pengeluaran yang diperlukan untuk menjaga kinerja serta keandalan Pemutus Tenaga (PMT) selama masa

umur teknisnya diperhitungkan secara menyeluruh. Komponen biaya yang termasuk dalam kategori ini meliputi biaya perawatan dan perbaikan tahunan, perawatan berkala dua tahunan, perawatan berkala sepuluh tahunan, kegiatan overhaul, perawatan kondisional, hingga biaya pengadaan material pendukung. Perhitungan masing-masing komponen biaya dilakukan berdasarkan jadwal pemeliharaan yang telah ditetapkan oleh standar operasional maupun rekomendasi pabrikan. Selanjutnya, seluruh komponen biaya tersebut diakumulasikan sesuai dengan tahun penggunaannya, sehingga diperoleh estimasi total biaya operasional tahunan yang akan dikumulatifkan untuk setiap tahun perhitungan. Dengan cara ini, nilai biaya operasional yang dihitung dapat merepresentasikan kebutuhan dalam menjaga keberlangsungan fungsi PMT secara optimal sepanjang umur pemakaiannya.

5. Perhitungan Nilai EAC

Tahapan terakhir adalah menggabungkan seluruh komponen biaya (*equivalent annual* biaya investasi awal dan biaya operasional dan perawatan PMT) menjadi nilai tahunan ekuivalen yang seragam. Nilai EAC ini digunakan untuk menentukan umur paling ekonomis dari PMT.

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

Pada tahapan ini, data kualitatif dianalisis menggunakan *pendekatan Reliability Centered Maintenance* (RCM), dengan tujuan untuk mengidentifikasi mode kegagalan, dampak potensial, serta menentukan strategi perawatan yang tepat untuk masing-masing komponen kritis pada PMT. Pengolahan data dilakukan melalui beberapa langkah terstruktur sebagai berikut:

1. *Function Block Diagram* (FBD)

Langkah awal dalam pendekatan RCM adalah menyusun *Function Block Diagram* (FBD), yaitu diagram yang menggambarkan hubungan antar fungsi utama dalam sistem PMT serta keterkaitan antar komponennya. FBD memudahkan pemahaman terhadap alur kerja sistem dan membantu dalam mengidentifikasi titik-titik kritis yang berpotensi mengalami gangguan. Diagram ini juga menjadi dasar dalam proses penelusuran kegagalan pada tahapan berikutnya.

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

Setelah struktur sistem dipahami melalui FBD, langkah selanjutnya adalah melakukan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). FMEA bertujuan untuk mengidentifikasi

berbagai mode kegagalan yang mungkin terjadi pada setiap komponen, menganalisis penyebab dan akibatnya terhadap sistem, serta memberikan penilaian risiko menggunakan tiga parameter utama, yaitu *severity* (tingkat keparahan), *occurrence* (frekuensi kejadian), dan *detection* (kemampuan deteksi). Ketiga nilai tersebut digunakan untuk menghitung *Risk Priority Number* (RPN) sebagai dasar untuk menentukan prioritas penanganan.

3. *Logic Tree Analysis* (LTA)

Langkah berikutnya adalah *Logic Tree Analysis* (LTA), yang digunakan untuk mengklasifikasikan mode kegagalan berdasarkan dampaknya terhadap keselamatan, operasional, dan aspek ekonomi. LTA menggunakan pendekatan pohon keputusan tiga tahap, untuk menilai apakah kegagalan dapat terdeteksi oleh operator, apakah berdampak pada keselamatan, dan apakah menyebabkan gangguan operasi. Berdasarkan hasil analisis ini, setiap mode kegagalan dikelompokkan ke dalam kategori prioritas tertentu, seperti *safety related*, *outage related*, *economic related*, atau *hidden failure*.

4. *Task Selection* (TS)

Berdasarkan hasil klasifikasi dari LTA, dilakukan proses penetapan strategi perawatan atau *Task Selection*. Pada tahap ini, setiap mode kegagalan akan diberikan tindakan pemeliharaan yang sesuai, yang dapat berupa *condition directed* (berbasis kondisi), *time directed* (berdasarkan waktu), *finding failure* (untuk mendeteksi kegagalan tersembunyi). Tujuan dari *task selection* adalah memastikan bahwa tindakan perawatan yang dilakukan bersifat efektif, efisien, dan sesuai dengan tingkat risiko yang ditimbulkan oleh kegagalan.

3.2.7 Pengolahan Data Kuantitatif (RCM)

Setelah analisis kualitatif dilakukan, tahap selanjutnya adalah mengolah data kuantitatif guna mendukung perhitungan keandalan sistem dan mendasari evaluasi teknis lebih lanjut. Pengolahan data kuantitatif mencakup langkah-langkah berikut:

1. Penentuan Komponen Kritis

Berdasarkan hasil FMEA dan LTA, dilakukan seleksi terhadap komponen-komponen yang dianggap paling berisiko dan memiliki dampak signifikan terhadap performa sistem. Komponen-komponen ini akan menjadi fokus dalam analisis statistik lebih lanjut.

2. Perhitungan Waktu TTF dan TTR

TTF (*Time to Failure*) merupakan waktu antara pemasangan komponen hingga terjadi kerusakan pertama, sedangkan TTR (*Time to Repair*) adalah waktu yang dibutuhkan

untuk memperbaiki komponen yang rusak. Data historis terkait kedua parameter ini dikumpulkan dan diolah sebagai dasar untuk analisis distribusi keandalan.

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

Untuk mengidentifikasi distribusi TTF dan TTR berdasarkan distribusi yang paling mewakili data yang ada dengan memilih kurva yang memiliki nilai *index of fit* (r) tertinggi. Beberapa distribusi yang di uji dalam penelitian ini adalah distribusi-distribusi yang bisa mewakili berbagai karakteristik data di industri yaitu distribusi Weibull, eksponensial, normal, dan lognormal.

Setelah dilakukan perhitungan *index of fit*, tahap berikutnya adalah pengujian kecocokan distribusi data menggunakan metode *goodness of fit*. Dalam pengujian ini, dilakukan perbandingan antara dua hipotesis awal, yaitu data kerusakan atau perbaikan diasumsikan mengikuti distribusi tertentu (H_0) dan data tersebut tidak mengikuti distribusi tertentu (H_1). Uji *goodness of fit* dibagi ke dalam tiga jenis, yaitu *Mann Test* untuk distribusi *Weibull*, *Bartlett Test* untuk distribusi Eksponensial, serta *Kolmogorov-Smirnov Test* untuk distribusi Normal dan Lognormal.

4. Estimasi Parameter Distribusi

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

5. Perhitungan MTTF dan MTTR

Berdasarkan distribusi dan parameter yang telah ditetapkan, dilakukan perhitungan nilai MTTF (*Mean Time to Failure*) dan MTTR (*Mean Time to Repair*). Kedua indikator ini memberikan informasi penting mengenai rata-rata umur pakai suatu komponen sebelum mengalami kerusakan, serta rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk melakukan perbaikan. Nilai ini menjadi dasar untuk menentukan interval pemeliharaan yang optimal pada tahapan analisis berikutnya.

3.2.8 Pengolahan Data Kuantitatif (*Age Replacement*)

Setelah melakukan metode RCM, analisis dilanjutkan dengan pendekatan *Age Replacement*, yang bertujuan untuk menentukan waktu penggantian preventif dan interval pemeriksaan yang optimal berdasarkan MTTF dan MTTR sesuai dengan distribusi terpilih pada RCM serta biaya yang terlibat. Model ini mempertimbangkan risiko kegagalan yang meningkat seiring

bertambahnya usia pakai, dan mengarah pada strategi pemeliharaan yang mampu meminimalkan total *downtime* dan biaya. Tahapan dalam analisis ini meliputi:

1. Perhitungan Interval Waktu Penggantian Pencegahan dengan Minimasi *Downtime*

Pada tahap ini, metode *age replacement* diterapkan dengan meminimalkan *downtime*, di mana pemilihan dilakukan berdasarkan hasil minimum guna menentukan waktu penggantian komponen sebelum terjadi kegagalan, sehingga kerugian yang lebih besar dapat dicegah. Selain itu, dilakukan pula perhitungan untuk mengoptimalkan biaya perawatan.

2. Analisis Keandalan Dengan dan Tanpa *Preventive Maintenance*

Tahap analisis keandalan dilakukan untuk membandingkan kinerja peralatan dalam dua kondisi, yaitu tanpa penerapan preventive maintenance dan dengan penerapan preventive maintenance secara berkala. Melalui analisis ini dapat diketahui perbedaan probabilitas peralatan tetap berfungsi sepanjang periode operasi ketika tidak dilakukan perawatan dibandingkan dengan kondisi ketika dilakukan pemeliharaan pencegahan. Konsep ini berlandaskan pada asumsi bahwa preventive maintenance mampu mengembalikan kondisi peralatan mendekati keadaan awalnya, sehingga peluang keberfungsian peralatan dalam jangka panjang dapat lebih terjaga.

3. Perhitungan Interval Waktu Pemeriksaan

Selain penggantian, juga diperlukan penentuan jadwal pemeriksaan rutin guna mendeteksi gejala kegagalan sejak dini. Pelaksanaan pemeriksaan mesin secara berkala dapat memberikan dampak positif, seperti menurunnya probabilitas terjadinya kerusakan, meningkatnya usia pakai mesin, serta diminimalkannya *downtime* mendadak akibat kerusakan komponen.

4. Perhitungan Total Biaya Perawatan dan Biaya Usulan Perawatan

Tahap selanjutnya dilakukan dengan menghitung biaya perawatan yang optimal guna mengidentifikasi strategi perawatan yang paling efisien. Perhitungan ini bertujuan untuk mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya, menekan biaya tak terduga, serta meningkatkan efisiensi strategi perawatan dan kinerja mesin secara keseluruhan.

3.2.9 Analisis dan Pembahasan

Analisis dalam penelitian ini difokuskan pada dua pendekatan utama. Pertama, integrasi antara metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dan *Age Replacement* digunakan untuk menentukan interval waktu perawatan yang paling optimal dan efisien. Kedua, metode

Equivalent Annual Cost (EAC) digunakan secara terpisah untuk memperoleh umur ekonomis alat PMT berdasarkan pertimbangan finansial jangka panjang. Lalu, pembahasan akan mencakup hasil dari analisis data kualitatif dan kuantitatif dari metode RCM dan EAC yang telah dilakukan pada tahap sebelumnya.

3.2.10 Kesimpulan dan Saran

Pada bagian ini akan disampaikan kesimpulan yang akan menjawab dari rumusan masalah yang telah dibuat berdasarkan dari seluruh rangkaian penelitian yang telah dilakukan. Selanjutnya, bagian saran berisi rekomendasi bagi perusahaan terkait strategi pemeliharaan PMT yang lebih efektif, serta masukan bagi peneliti selanjutnya untuk mengembangkan metode serupa atau memperluas penerapannya pada aset kelistrikan lainnya. Saran ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam peningkatan efisiensi teknis maupun ekonomis 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

Sejarah kelistrikan di Indonesia bermula sejak masa penjajahan Belanda, ketika pada tahun 1897 didirikan perusahaan listrik pertama bernama *Nederlandsche Indische Electriciteit Maatschappij* (NIEM). Perusahaan ini membangun pembangkit listrik tenaga uap pertama di kawasan Gambir, Jakarta, yang memanfaatkan aliran Sungai Ciliwung dan memiliki kapasitas gabungan 3200+3000+1350 kW.

Menjelang akhir abad ke-19, NIEM memperluas usahanya ke Surabaya dan membentuk *Nederlandsche Indische Gas Maatschappij* (NIGM), yang sejak 1909 bertugas membangun pembangkit dan jaringan distribusi listrik di kota-kota besar di Pulau Jawa. NIGM berkembang menjadi ANIEM, perusahaan listrik swasta terbesar di Hindia Belanda, menguasai sekitar 40% kebutuhan listrik. Ekspansi terus dilakukan hingga ANIEM memperoleh hak konsesi di Banjarmasin dan wilayah Jawa hingga Kalimantan.

Pada masa pendudukan Jepang (1942–1945), kelistrikan di Jawa dikelola oleh *Djawa Denki Djigjo Kosja*, yang kemudian menjadi *Djawa Denji Djigjo Sja*, cabang dari Hosjoden Kabusiki Kaisja di Tokyo. Pengelolaan dibagi menjadi tiga wilayah: Jawa Barat (Jakarta), Jawa Tengah (Semarang), dan Jawa Timur (Surabaya).

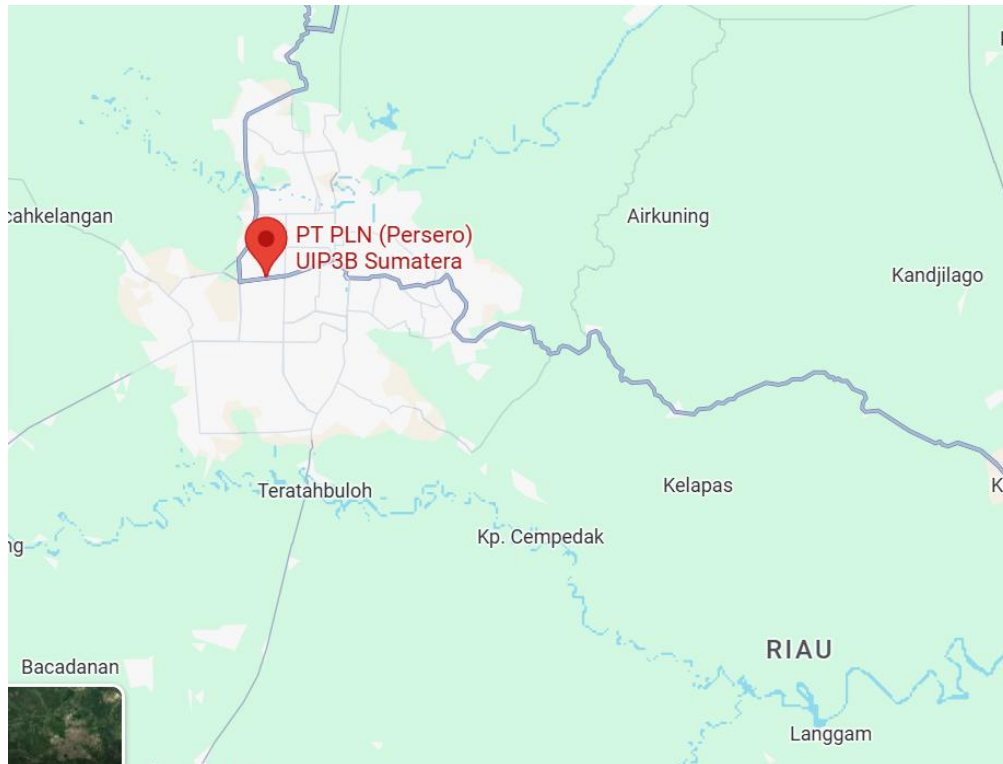
Setelah proklamasi kemerdekaan Indonesia tahun 1945, seluruh aset kelistrikan diambil alih oleh pemuda-pemuda Indonesia. Pemerintah kemudian membentuk *Djawatan Listrik dan Gas*, yang resmi berdiri pada Oktober 1945 dengan kapasitas pembangkit listrik hanya sebesar 157,5 MW. Inilah tonggak awal pengelolaan kelistrikan nasional oleh bangsa sendiri.

Dari sinilah cikal bakal Perusahaan Listrik Negara (PLN) terbentuk. PLN terus berkembang hingga menjadi perusahaan milik negara yang bertugas menyediakan listrik bagi seluruh rakyat Indonesia, sebagai bagian penting dari pembangunan nasional.

4.1.2 Lokasi PT PLN UIP3B Sumatera

PT PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan dan Penyaluran Sumatera Bagian Tengah (UIP3B Sumatera) berlokasi di Jl. Tuanku Tambusai, Kelurahan Labuh Baru Barat, Kecamatan Payung Sekaki, Kota Pekanbaru, Provinsi Riau (kode lokasi: GC25+JMH).

Lokasi ini berada di pusat kota Pekanbaru yang strategis, sehingga mendukung kelancaran koordinasi operasional pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik di wilayah Sumatera. Sebagai bagian penting dari sistem kelistrikan nasional, UIP3B Sumatera bertanggung jawab dalam memastikan keandalan pasokan listrik untuk kawasan tengah Pulau Sumatera.



Gambar 4. 1 Lokasi PT PLN UIP3B Sumatera

Gambar di atas menunjukkan lokasi PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera yang menjadi objek penelitian dalam studi ini. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada keberadaan infrastruktur kelistrikan utama yang memegang peranan penting dalam sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik di wilayah Sumatera, sehingga relevan untuk dianalisis dari sisi keandalan peralatan, khususnya pemutus tenaga (PMT).

4.1.3 Visi, Misi, dan Moto Perusahaan

Berikut merupakan visi, misi, dan moto dari PLN UIP3B Sumatera:

1. Visi

Diakui sebagai perusahaan kelas Dunia yang bertumbuh Kembang, Unggul dan terpercaya dengan bertumpu pada Potensi insani.

2. Misi

Misi dari perusahaan PT. PLN UIP3B Sumatera ini sebagai berikut.

- A. Menjalankan Bisnis kelistrikan dan bidang lain yang terkait, berorientasi pada kepuasan pelanggan, anggota perusahaan dan pemegang saham.
- B. Menjalankan tenaga listrik sebagai media untuk meningkatkan kualitas kehidupan masyarakat.
- C. Mengupayakan agar tenaga listrik menjadi pendorong kegiatan ekonomi negara
- D. Menjalankan kegiatan usaha yang berwawasan lingkungan

3. Moto

Moto dari PT. PLN UIP3B Sumatera yaitu “Listrik untuk kehidupan yang lebih baik.”

4.1.4 Waktu Kerja

Di PT PLN UIP3B Sumatera, jam kerja teknisi maupun operator umumnya mengikuti standar ketenagakerjaan nasional yang disesuaikan dengan kebutuhan lapangan serta kebijakan internal perusahaan. Tabel 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–Jumat	08.00 – 16.00	8	Jam kerja normal (shift pagi)
Sabtu & Minggu	Libur / <i>On-call</i>	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 Pemutus Tegangan (PMT).

4.2.1 Data Waktu Antar Kerusakan Komponen

Waktu antar kerusakan (*Time Between Failures*) digunakan dalam analisis keandalan mesin guna menentukan interval perawatan preventif yang ideal. Data ini mencatat kapan kerusakan terjadi (*actual start*) dan kapan selesai diperbaiki (*finish time*). Berikut ini adalah data

kerusakan pada beberapa komponen kritis Pemutus Tegangan (PMT) yang dihimpun dalam rentang waktu 10 tahun yaitu dari tahun 2015 hingga 2024.

Tabel 4. 2 Data Waktu Antar Kerusakan Komponen Mesin PMT

No.	Sub-Sistem	Komponen	Start Downtime	Finish Downtime
1	Primer	Interrupter	15/07/2015 08:30	15/07/2015 15:30
2		Interrupter	18/07/2016 08:00	18/07/2016 16:00
3		Interrupter	17/07/2017 08:00	17/07/2017 15:00
4		Interrupter	16/07/2018 08:30	16/07/2018 16:30
5		Interrupter	15/07/2019 08:00	15/07/2019 16:00
6		Interrupter	20/07/2020 08:00	20/07/2020 15:30
7		Interrupter	19/07/2021 08:00	19/07/2021 16:00
8		Interrupter	18/07/2022 08:30	18/07/2022 16:30
9		Interrupter	17/07/2023 08:00	17/07/2023 16:00
10		Interrupter	10/06/2024 08:00	10/06/2024 16:00
11		Kontak Utama	20/04/2015 09:00	20/04/2015 12:00
12		Kontak Utama	11/11/2015 13:00	11/11/2015 16:00
13		Kontak Utama	03/05/2016 10:00	03/05/2016 13:00
14		Kontak Utama	01/09/2016 11:00	01/09/2016 14:00
15		Kontak Utama	05/12/2016 08:00	05/12/2016 18:00
16		Kontak Utama	19/04/2017 13:30	19/04/2017 16:30
17		Kontak Utama	22/08/2017 09:30	22/08/2017 12:30
18		Kontak Utama	10/05/2018 09:00	10/05/2018 12:00
19		Kontak Utama	30/10/2018 14:00	30/10/2018 17:00
20		Kontak Utama	28/01/2019 10:00	28/01/2019 13:00
21		Kontak Utama	15/06/2019 09:00	15/06/2019 12:00
22		Kontak Utama	25/09/2019 08:30	25/09/2019 17:30
23		Kontak Utama	04/12/2019 13:00	04/12/2019 16:00
24		Kontak Utama	20/05/2020 10:30	20/05/2020 13:30
25		Kontak Utama	19/11/2020 11:00	19/11/2020 14:00
26		Kontak Utama	09/03/2021 09:00	09/03/2021 12:00
27		Kontak Utama	29/09/2021 10:00	29/09/2021 13:00
28		Kontak Utama	13/12/2021 14:00	13/12/2021 17:00
29		Kontak Utama	18/04/2022 13:00	18/04/2022 16:00
30		Kontak Utama	26/10/2022 08:00	26/10/2022 17:00
31		Kontak Utama	22/02/2023 10:00	22/02/2023 13:00
32		Kontak Utama	07/09/2023 09:00	07/09/2023 12:00
33		Kontak Utama	08/01/2024 10:30	08/01/2024 13:30
34		Terminal Utama	25/02/2016 09:00	25/02/2016 12:00
35		Terminal Utama	14/11/2017 10:00	14/11/2017 15:00
36		Terminal Utama	26/02/2018 09:00	26/02/2018 12:30
37		Terminal Utama	24/02/2020 09:30	24/02/2020 12:30
38		Terminal Utama	28/02/2022 09:00	28/02/2022 12:00

No.	Sub-Sistem	Komponen	Start Downtime	Finish Downtime
39	Dielektrik	Terminal Utama	15/11/2023 13:00	15/11/2023 19:00
40		Terminal Utama	26/02/2024 09:00	26/02/2024 12:00
41		Gas SF6 & Sistem Perapat	16/06/2016 08:00	16/06/2016 12:00
42		Gas SF6 & Sistem Perapat	25/09/2017 09:30	25/09/2017 14:30
43		Gas SF6 & Sistem Perapat	21/06/2018 08:30	21/06/2018 13:00
44		Gas SF6 & Sistem Perapat	24/06/2020 09:00	24/06/2020 14:00
45		Gas SF6 & Sistem Perapat	20/06/2022 08:00	20/06/2022 12:30
46		Gas SF6 & Sistem Perapat	11/10/2023 08:00	11/10/2023 17:00
47	Sekunder	Gas SF6 & Sistem Perapat	11/06/2024 09:00	11/06/2024 13:00
48		Baterai & Suplai DC	20/07/2018 10:00	20/07/2018 13:00
49		Baterai & Suplai DC	10/08/2023 10:30	10/08/2023 13:30
50		Kabel Kontrol & Terminal	22/01/2015 09:00	22/01/2015 11:00
51		Kabel Kontrol & Terminal	18/08/2015 14:00	18/08/2015 15:30
52		Kabel Kontrol & Terminal	25/01/2016 09:30	25/01/2016 11:30
53		Kabel Kontrol & Terminal	05/07/2016 10:00	05/07/2016 11:00
54		Kabel Kontrol & Terminal	23/01/2017 10:00	23/01/2017 12:30
55		Kabel Kontrol & Terminal	11/09/2017 13:00	11/09/2017 15:00
56		Kabel Kontrol & Terminal	29/01/2018 09:00	29/01/2018 11:00
57		Kabel Kontrol & Terminal	03/12/2018 11:00	03/12/2018 12:30
58		Kabel Kontrol & Terminal	28/01/2019 09:00	28/01/2019 11:30
59		Kabel Kontrol & Terminal	15/05/2019 14:00	15/05/2019 15:00
60		Kabel Kontrol & Terminal	08/10/2019 10:30	08/10/2019 12:00
61		Kabel Kontrol & Terminal	27/01/2020 09:30	27/01/2020 12:00
62		Kabel Kontrol & Terminal	01/06/2020 11:00	01/06/2020 12:00
63		Kabel Kontrol & Terminal	25/01/2021 09:00	25/01/2021 11:00
64		Kabel Kontrol & Terminal	23/08/2021 13:30	23/08/2021 15:00
65		Kabel Kontrol & Terminal	24/01/2022 10:00	24/01/2022 12:00
66		Kabel Kontrol & Terminal	14/07/2022 09:00	14/07/2022 10:30
67		Kabel Kontrol & Terminal	30/01/2023 09:00	30/01/2023 11:30
68		Kabel Kontrol & Terminal	20/11/2023 14:00	20/11/2023 15:00
69		Kabel Kontrol & Terminal	29/01/2024 09:00	29/01/2024 11:00
70		Kabel Kontrol & Terminal	03/06/2024 10:00	03/06/2024 11:30
71		Tripping Coil	19/06/2017 08:30	19/06/2017 12:30
72		Tripping Coil	06/12/2021 09:00	06/12/2021 15:00
73	Mekanik	Hidrolik	05/02/2015 09:00	05/02/2015 11:00
74		Hidrolik	11/08/2017 10:00	11/08/2017 12:30
75		Hidrolik	19/11/2018 08:30	19/11/2018 16:30
76		Hidrolik	03/10/2019 08:00	04/10/2019 12:00
77		Hidrolik	21/05/2020 11:00	21/05/2020 12:30
78		Hidrolik	08/12/2020 13:30	08/12/2020 15:30
79		Hidrolik	25/05/2021 08:00	25/05/2021 16:00
80		Hidrolik	10/11/2021 09:30	10/11/2021 12:00

No.	Sub-Sistem	Komponen	Start Downtime	Finish Downtime
81		Hidrolik	28/03/2022 08:00	29/03/2022 19:00
82		Hidrolik	15/07/2022 10:00	15/07/2022 16:00
83		Hidrolik	19/11/2022 09:00	19/11/2022 10:30
84		Hidrolik	27/02/2023 08:30	27/02/2023 11:30
85		Hidrolik	18/05/2023 09:00	18/05/2023 11:30

4.2.2 Estimasi Biaya Investasi Awal Pemutus Tegangan (PMT)

Estimasi biaya investasi awal dilakukan untuk mengetahui total biaya yang diperlukan dalam pengadaan dan instalasi peralatan PMT tipe SF6 3P 170KV 4000A. Perincian komponen biaya investasi awal meliputi biaya material, tenaga kerja, administrasi, dan biaya tambahan kontinjensi.

Tabel 4. 3 Estimasi Biaya Investasi Awal PMT

No.	Komponen	Rincian	Biaya	Keterangan
1	Biaya Material	PMT	Rp311.069.291	Kebutuhan peralatan utama
		SCADA	Rp125.000.000	Sistem kendali dan monitoring
		Panel Kontrol	Rp300.000.000	Sistem kendali lokal
Total Biaya Material			Rp736.069.291	
2	Biaya Tenaga Kerja	Perencanaan & Persiapan (3 orang × 4 minggu × Rp3.000.000)	Rp36.000.000	Insinyur
		Instalasi (5 orang × 6 minggu × Rp2.500.000)	Rp75.000.000	Teknisi dan montir
		Pengujian & Commisioning (4 orang × 2 minggu × Rp3.500.000)	Rp28.000.000	Teknisi & insinyur
		Pemeliharaan Awal (2 orang × 1 minggu × Rp2.500.000)	Rp5.000.000	Teknisi dan operator
Total Biaya Tenaga Kerja			Rp144.000.000	

No.	Komponen	Rincian	Biaya	Keterangan
3	Biaya Administrasi	5% dari total biaya tenaga kerja	Rp7.200.000	Administrasi proyek
4	Biaya Tambahan	Kontinjensi (10% dari total biaya)	Rp88.726.929	Mengantisipasi biaya tidak terduga
Total Estimasi Biaya			Rp975.996.220	

4.2.3 Biaya Operasi Tahunan (*Annual Operating Cost - AOC*)

Biaya operasi tahunan meliputi konsumsi energi dari seluruh komponen PMT. Berdasarkan estimasi penggunaan, biaya konsumsi energi tahunan diperkirakan sebesar Rp1.000.000.

4.2.4 Biaya Perawatan dan Perbaikan Tahunan

Biaya ini meliputi aktivitas pemeliharaan rutin harian hingga tahunan serta penggantian komponen berdasarkan umur pakai. Estimasi disusun berdasarkan panduan pemeliharaan dari dokumen internal PLN.

Tabel 4. 4 Aktivitas Perawatan dan Pembersihan PMT

Periode	Total Biaya
Tahunan	Rp13.696.742
2 Tahunan	Rp24.392.500
10 Tahunan	Rp50.000.000
Kondisional	Rp4.625.335
Overhaul	Rp23.450.594

4.3 Pengolahan Data EAC

Setelah analisis *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dengan FMEA berhasil memfokuskan usulan pada Sistem Hidrolik sebagai komponen dengan tingkat risiko tertinggi dan memberikan saran frekuensi *preventif maintenance* yang lebih ekonomis. Maka, selanjutnya akan dilakukan penentuan strategis mengenai umur ekonomis dari aset PMT secara keseluruhan, yaitu kapan waktu paling optimal untuk melakukan penggantian total aset jika ditinjau dari sisi biaya.

Untuk mengetahui kapan waktu paling optimal untuk melakukan penggantian total aset jika ditinjau dari sisi biaya, maka penelitian ini dilanjutkan dengan menggunakan metode

Equivalent Annual Cost (EAC). Metode EAC dipilih untuk menentukan umur ekonomis aset dengan menghitung titik minimum dari total biaya tahunan yang setara (mencakup biaya modal dan operasional). Dengan demikian, penggabungan strategi perawatan komponen dari RCM dengan analisis umur ekonomis dari EAC akan menghasilkan sebuah rencana pengelolaan aset yang komprehensif.

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

Dalam penelitian ini digunakan nilai MARR sebesar 12% karena angka tersebut umum dipakai dalam studi kelayakan oleh perusahaan BUMN sebagai acuan dalam menilai kelayakan investasi.

4.3.2 Biaya Investasi Awal

Biaya investasi awal dalam penelitian ini dihitung berdasarkan total pengeluaran yang diperlukan dalam proses pengadaan Pemutus Tegangan (PMT) tipe SF6 3P 170KV 4000A. Komponen biaya tersebut meliputi harga pembelian mesin utama, sistem SCADA, panel kontrol, serta biaya tenaga kerja untuk instalasi. Selain itu, turut diperhitungkan pula biaya administrasi dan komponen kontinjensi guna mengantisipasi potensi pengeluaran tak terduga selama proses pengadaan berlangsung. Berdasarkan estimasi yang telah disusun, total biaya investasi awal mencapai sebesar Rp975.996.220.

4.3.3 Perhitungan *Equivalent Annual Cost* Investasi Awal

Tahap pertama dalam menentukan nilai *Equivalent Annual Cost* (EAC) untuk investasi awal Pemutus Tenaga (PMT) adalah mengonversi nilai investasi yang telah diketahui pada tahun 2015 menjadi nilai investasi pada tahun ke-0, yaitu tahun perhitungan (2025). Proses ini dilakukan menggunakan faktor konversi F/P dengan tingkat suku bunga (*i*) sebesar 12% dan periode waktu (*n*) selama 10 tahun. Pemilihan *n* = 10 didasarkan pada selisih tahun antara 2015 dan 2025. Berikut perhitungan mencari EAC investasi awal tahun ke-0:

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

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

$$P_0 = \text{Rp}975.996.220 \times (3,1058)$$

$$P_0 = \text{Rp}3.031.296.112$$

di mana:

P = biaya investasi awal pada tahun 2015,

*P*₀ = 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 diperoleh nilai investasi awal pada tahun ke-0 (P_0), langkah berikutnya adalah menghitung biaya tahunan setara atau *Equivalent Annual Cost* (EAC) untuk setiap tahun umur ekonomis peralatan, yaitu dari tahun ke-1 hingga tahun ke-30. Perhitungan ini menggunakan rumus *Equivalent Annual Cost* (EAC), berikut contoh perhitungan EAC Investasi awal tahun ke-1, ke-15, dan ke-30:

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

Perhitungan untuk mencari EAC tahun ke-1:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{Rp3.031.296.112 \times 12\%}{\left(1 - \frac{1}{(1+12\%)^1}\right)} \\ &= Rp3.395.051.646 \end{aligned}$$

Perhitungan untuk mencari EAC tahun ke-15:

$$\begin{aligned} P_{15} &= \frac{Rp3.031.296.112 \times 12\%}{\left(1 - \frac{1}{(1+12\%)^{15}}\right)} \\ &= Rp445.067.747 \end{aligned}$$

Perhitungan untuk mencari EAC tahun ke-29:

$$\begin{aligned} P_{29} &= \frac{Rp3.031.296.112 \times 12\%}{\left(1 - \frac{1}{(1+12\%)^{29}}\right)} \\ &= Rp377.882.000 \end{aligned}$$

Berikut rekapitulasi seluruh hasil perhitungan EAC investasi awal untuk periode analisis selama 30 tahun:

Tabel 4. 5 Rekapitulasi EAC Investasi Awal

Tahun ke-t	EAC Investasi Awal
1	Rp3.395.051.646
2	Rp1.793.612.190
3	Rp1.262.077.046
4	Rp998.007.067
5	Rp840.911.042
6	Rp737.289.175

Tahun ke-t	EAC Investasi Awal
7	Rp664.210.741
8	Rp610.208.520
9	Rp568.910.286
10	Rp536.491.409
11	Rp510.516.960
12	Rp489.362.767
13	Rp471.903.676
14	Rp457.335.422
15	Rp445.067.747
16	Rp434.657.604
17	Rp425.765.932
18	Rp418.128.836
19	Rp411.537.869
20	Rp405.826.225
21	Rp400.858.875
22	Rp396.525.387
23	Rp392.734.618
24	Rp389.410.732
25	Rp386.490.163
26	Rp383.919.285
27	Rp381.652.590
28	Rp379.651.253
29	Rp377.882.000
30	Rp376.316.186

4.3.4 Perhitungan Biaya Operasional dan Perawatan PMT

Biaya operasional dan perawatan pada analisis ini mencakup keseluruhan pengeluaran yang dikeluarkan selama masa umur teknis peralatan untuk menjaga kinerja dan keandalannya. Komponen biaya operasional terdiri atas biaya perawatan dan perbaikan tahunan, perawatan berkala dua tahunan, perawatan berkala sepuluh tahunan, kegiatan overhaul, perawatan bersifat kondisional, serta biaya pengadaan material pendukung. Seluruh komponen biaya tersebut dihitung berdasarkan jadwal pemeliharaan yang telah ditentukan, kemudian diakumulasikan ke setiap tahun pemakaian. Dengan demikian, nilai biaya operasional pada setiap tahun dapat merepresentasikan total pengeluaran aktual yang diperlukan untuk memastikan peralatan tetap berfungsi optimal. Perhitungan ini juga menggunakan rumus

Equivalent Annual Cost (EAC), berikut contoh perhitungan EAC Biaya Operasional dan Perawatan PMT tahun ke-1, ke-15, dan ke-30:

$$O\&M_t = \frac{O\&M_0 \times r}{(1 - \frac{1}{(1+r)^t})}$$

Perhitungan untuk mencari EAC tahun ke-1:

$$\begin{aligned} O\&M_1 &= \frac{Rp16.238.520 \times 12\%}{(1 - \frac{1}{(1+12\%)^1})} \\ &= Rp18.187.142 \end{aligned}$$

Perhitungan untuk mencari EAC tahun ke-15:

$$\begin{aligned} O\&M_{15} &= \frac{Rp16.238.520 \times 12\%}{(1 - \frac{1}{(1+12\%)^{15}})} \\ &= Rp2.384.208 \end{aligned}$$

Perhitungan untuk mencari EAC tahun ke-29:

$$\begin{aligned} O\&M_{29} &= \frac{Rp16.238.520 \times 12\%}{(1 - \frac{1}{(1+12\%)^{29}})} \\ &= Rp2.024.297 \end{aligned}$$

Setelahnya dicari nilai dari Σ EAC Biaya Operasional & Perawatan yang merupakan total kumulatif yang didapat dari penjumlahan nilai Σ EAC Biaya Operasional & Perawatan tahun sebelumnya dengan nilai EAC Biaya Operasional & Perawatan pada tahun berjalan. Rekapitulasi biaya operasional dan perawatan tahunan dari tahun ke-1 hingga tahun ke-30 ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

Tabel 4. 6 Biaya Operasional dan Perawatan PMT

Tahun ke-t	Biaya Operasional & Perawatan	EAC Biaya Operasional & Perawatan	Σ EAC Biaya Operasional & Perawatan
1	Rp16.238.520	Rp18.187.142	Rp18.187.142
2	Rp40.631.020	Rp24.041.298	Rp42.228.440
3	Rp16.238.520	Rp6.760.891	Rp48.989.332
4	Rp40.631.020	Rp13.377.131	Rp62.366.462
5	Rp16.238.520	Rp4.504.723	Rp66.871.186
6	Rp40.631.020	Rp9.882.509	Rp76.753.695
7	Rp16.238.520	Rp3.558.148	Rp80.311.843

Tahun ke-t	Biaya Operasional & Perawatan	EAC Biaya Operasional & Perawatan	Σ EAC Biaya Operasional & Perawatan
8	Rp40.631.020	Rp8.179.140	Rp88.490.983
9	Rp16.238.520	Rp3.047.627	Rp91.538.610
10	Rp90.631.020	Rp16.040.255	Rp107.578.865
11	Rp16.238.520	Rp2.734.817	Rp110.313.682
12	Rp64.081.614	Rp10.345.131	Rp120.658.813
13	Rp16.238.520	Rp2.527.967	Rp123.186.781
14	Rp40.631.020	Rp6.130.053	Rp129.316.833
15	Rp16.238.520	Rp2.384.208	Rp131.701.042
16	Rp40.631.020	Rp5.826.083	Rp137.527.124
17	Rp16.238.520	Rp2.280.809	Rp139.807.934
18	Rp40.631.020	Rp5.604.534	Rp145.412.467
19	Rp16.238.520	Rp2.204.590	Rp147.617.058
20	Rp90.631.020	Rp12.133.570	Rp159.750.628
21	Rp16.238.520	Rp2.147.383	Rp161.898.011
22	Rp40.631.020	Rp5.314.964	Rp167.212.976
23	Rp16.238.520	Rp2.103.862	Rp169.316.838
24	Rp64.081.614	Rp8.232.145	Rp177.548.982
25	Rp16.238.520	Rp2.070.411	Rp179.619.393
26	Rp40.631.020	Rp5.145.994	Rp184.765.387
27	Rp16.238.520	Rp2.044.496	Rp186.809.884
28	Rp40.631.020	Rp5.088.786	Rp191.898.670
29	Rp16.238.520	Rp2.024.297	Rp193.922.967
30	Rp90.631.020	Rp11.251.266	Rp205.174.233

4.3.5 Penentuan Nilai Equivalent Annual Cost (EAC)

Langkah akhir dalam analisis ekonomi ini adalah melakukan penilaian terhadap *Equivalent Annual Cost* (EAC) dari Pemutus Tegangan (PMT). Penilaian ini bertujuan untuk menentukan umur ekonomis peralatan dengan mempertimbangkan biaya tahunan total yang mencakup seluruh aspek siklus hidup aset, mulai dari investasi awal, hingga biaya operasional dan perawatan pada setiap tahun. Penilaian EAC dilakukan untuk setiap tahun dari tahun ke-1 hingga tahun ke-30 dengan menggunakan data yang telah diperoleh sebelumnya, yaitu EAC investasi awal dan biaya operasional dan perawatan PMT. Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung EAC pada tahun ke-t adalah:

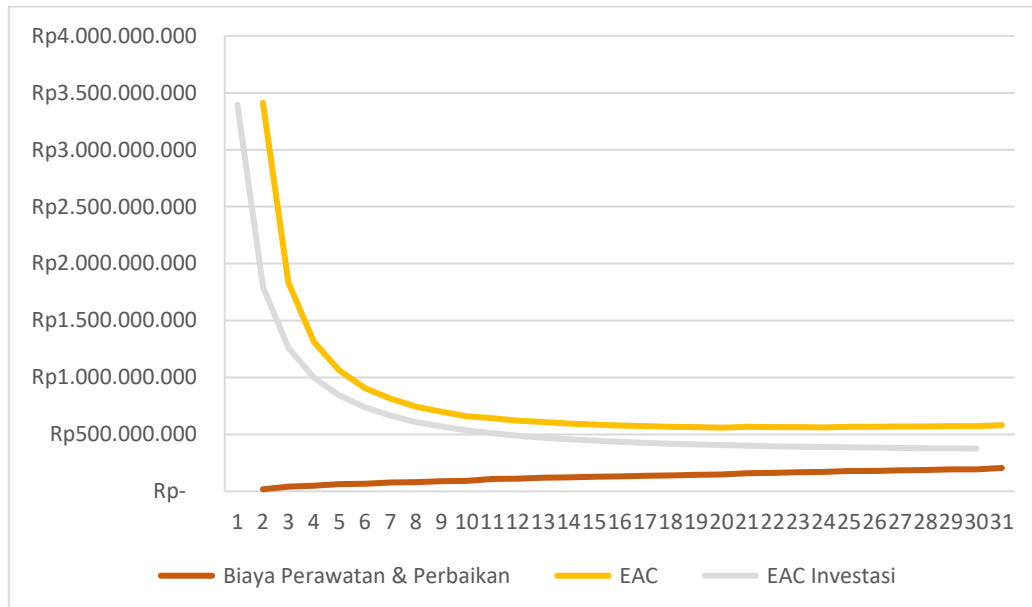
$$EAC_t = EAC \text{ Investasi Awal} + \Sigma \text{ EAC Biaya Operasional \& Perawatan}$$

Perhitungan dilakukan untuk setiap tahun, kemudian dibandingkan nilai EAC-nya. Nilai EAC terkecil menunjukkan titik optimal di mana kombinasi antara biaya investasi, pemeliharaan, dan sisa nilai aset berada pada kondisi paling efisien secara finansial. Berikut disajikan tabel hasil perhitungan EAC dari tahun ke-1 hingga tahun ke-30:

Tabel 4. 7 Perhitungan EAC PMT Selama Umur Ekonomis 30 Tahun

Tahun ke-n	EAC Investasi Awal	Σ EAC Biaya Operasional & Perawatan	EAC
1	Rp3.395.051.646	Rp18.187.142	Rp3.413.238.788
2	Rp1.793.612.190	Rp42.228.440	Rp1.835.840.630
3	Rp1.262.077.046	Rp48.989.332	Rp1.311.066.378
4	Rp998.007.067	Rp62.366.462	Rp1.060.373.529
5	Rp840.911.042	Rp66.871.186	Rp907.782.228
6	Rp737.289.175	Rp76.753.695	Rp814.042.870
7	Rp664.210.741	Rp80.311.843	Rp744.522.584
8	Rp610.208.520	Rp88.490.983	Rp698.699.503
9	Rp568.910.286	Rp91.538.610	Rp660.448.896
10	Rp536.491.409	Rp107.578.865	Rp644.070.274
11	Rp510.516.960	Rp110.313.682	Rp620.830.642
12	Rp489.362.767	Rp120.658.813	Rp610.021.581
13	Rp471.903.676	Rp123.186.781	Rp595.090.457
14	Rp457.335.422	Rp129.316.833	Rp586.652.255
15	Rp445.067.747	Rp131.701.042	Rp576.768.788
16	Rp434.657.604	Rp137.527.124	Rp572.184.728
17	Rp425.765.932	Rp139.807.934	Rp565.573.866
18	Rp418.128.836	Rp145.412.467	Rp563.541.303
19	Rp411.537.869	Rp147.617.058	Rp559.154.927
20	Rp405.826.225	Rp159.750.628	Rp565.576.853
21	Rp400.858.875	Rp161.898.011	Rp562.756.887
22	Rp396.525.387	Rp167.212.976	Rp563.738.363
23	Rp392.734.618	Rp169.316.838	Rp562.051.456
24	Rp389.410.732	Rp177.548.982	Rp566.959.714
25	Rp386.490.163	Rp179.619.393	Rp566.109.556
26	Rp383.919.285	Rp184.765.387	Rp568.684.673
27	Rp381.652.590	Rp186.809.884	Rp568.462.473
28	Rp379.651.253	Rp191.898.670	Rp571.549.923
29	Rp377.882.000	Rp193.922.967	Rp571.804.967
30	Rp376.316.186	Rp205.174.233	Rp581.490.420

Penentuan umur ekonomis dalam penelitian ini didasarkan pada hasil perhitungan *Equivalent Annual Cost* (EAC) yang disajikan pada Tabel 4.29 sebagai rekapitulasi perhitungan menyeluruh, dan divisualisasikan lebih lanjut dalam bentuk grafik berikut:



Gambar 4. 2 Grafik *Equivalent Annual Cost*

Berdasarkan hasil analisis EAC di atas, dapat disimpulkan bahwa nilai EAC terkecil diperoleh pada tahun ke-19, yaitu sebesar Rp559.154.927. Hal ini mengindikasikan bahwa pada tahun ke-19, total biaya tahunan yang harus ditanggung mencapai titik minimum. Oleh karena itu, umur ekonomis yang paling optimal untuk PMT ini adalah 19 tahun, dan disarankan agar peralatan dijual atau digantikan setelah periode tersebut untuk meminimalkan beban biaya total secara tahunan.

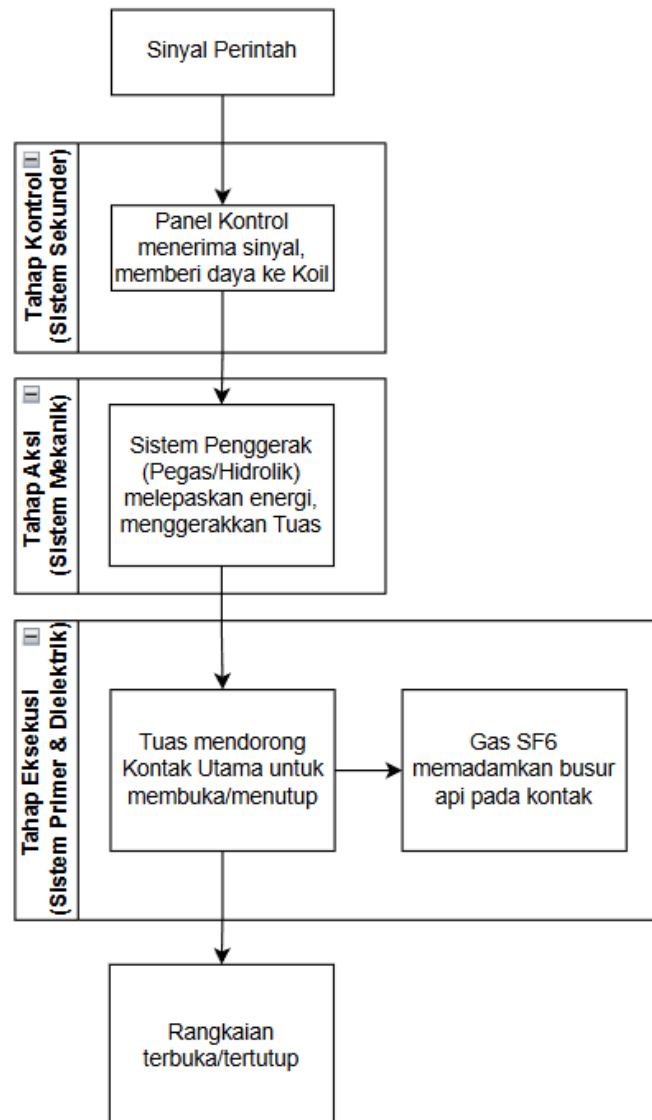
4.4 Pengolahan Data RCM

4.4.1 Penentuan Komponen Kritis

Pengolahan data dalam metode RCM bertujuan untuk mengidentifikasi komponen-komponen kritis dari sistem berdasarkan fungsinya, potensi kegagalannya, serta dampak yang ditimbulkan. Metode yang digunakan dalam tahapan ini antara lain *Functional Block Diagram* (FBD), *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), dan *Logic Tree Analysis* (LTA). Setiap metode memiliki peran penting dalam mendefinisikan peran komponen, mengevaluasi mode kegagalan, dan menilai konsekuensinya terhadap sistem secara menyeluruh.

4.4.2 Functional Block Diagram (FBD)

Hasil *Functional Block Diagram* (FBD) ini didapatkan dari informasi dan analisis berfungsi untuk menjelaskan fungsi dari mesin PMT yang digambarkan berdasarkan *flow proses*. Berikut merupakan FBD dari mesin PMT:



Gambar 4. 3 Function Block Diagram PMT

Functional Block Diagram (FBD) merupakan alat bantu yang digunakan untuk menggambarkan hubungan fungsional antar komponen dalam suatu sistem. Dalam konteks sistem Pemutus Tegangan (PMT) yang digunakan di gardu induk PLN, FBD sangat penting untuk memahami bagaimana aliran logika kerja dan keterkaitan antar subsistem berjalan dalam mendukung fungsi utama PMT, yaitu memutus dan menghubungkan arus listrik secara andal dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan.

Grafik *Function Block Diagram* tersebut menggambarkan alur mekanisme kerja dari Pemutus Tenaga (PMT) tipe SF6 3P 170kV 4000A dalam tiga tahapan utama: kontrol, aksi, dan eksekusi. Proses dimulai dari Sinyal Perintah sebagai input awal yang kemudian diterima oleh Panel Kontrol (tahap kontrol/sistem sekunder), yang memberikan suplai daya menuju koil elektromagnetik. Koil ini memicu mekanisme aktuasi dalam Sistem Penggerak seperti pegas atau aktuator hidrolik (tahap aksi/sistem mekanik), yang melepaskan energi mekanis untuk menggerakkan tuas. Gerakan tuas tersebut diteruskan ke Kontak Utama (tahap eksekusi/sistem primer), untuk membuka atau menutup sirkuit listrik. Dalam proses pembukaan, terjadi busur listrik antar kontak yang kemudian dipadamkan oleh Gas SF6 berkat sifat dielektriknya yang tinggi. Akhir dari keseluruhan proses ini adalah tercapainya kondisi akhir berupa rangkaian terbuka atau tertutup, sesuai dengan kebutuhan sistem proteksi dan pengendalian daya tinggi pada instalasi tegangan ekstra tinggi.

4.4.3 *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*

Analisis *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) digunakan untuk mengenali berbagai jenis kerusakan, faktor penyebab kegagalan, serta konsekuensi yang ditimbulkan. Setelah informasi tersebut diperoleh, dilakukan perhitungan *Risk Priority Number* (RPN) untuk menentukan prioritas komponen yang memiliki risiko kegagalan tertinggi dan berdampak signifikan terhadap penurunan pencapaian target produksi. FMEA membantu dalam mengidentifikasi pola-pola kegagalan pada mesin, mengevaluasi dampaknya, serta menyusun rekomendasi pencegahan guna meminimalkan potensi kegagalan. Berikut ini disajikan hasil analisis FMEA:

Tabel 4. 8 *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) PMT

No.	Sub sistem	Fungsi	<i>Failure Mode</i>	Akibat/Efek Kegagalan	S	O	D	RPN
1	Primer	Sebagai bagian yang berfungsi menyalurkan arus beban dan dengan <i>losses</i> yang minimum	<i>Hot spot</i> terjadi pada terminal utama PMT	Panas berlebih pada sambungan luar, merusak konduktor & klem, kerugian energi.	7	6	3	126

No.	Sub sistem	Fungsi	Failure Mode	Akibat/Efek Kegagalan	S	O	D	RPN
			<i>Hot spot</i> pada kontak PMT (internal)	Panas berlebih internal, merusak kontak & media isolasi, bisa berujung pada kegagalan PMT memutus arus.	9	5	7	315
			Kegagalan fungsi <i>pre-insertion</i> resistor	Gagal meredam tegangan lebih saat PMT menutup (<i>closing</i>), berisiko merusak peralatan lain di sistem.	8	3	8	192
			<i>Controlled capacitor fails</i>	Distribusi tegangan tidak merata pada unit pemutus, menurunkan kemampuan PMT dalam memutus arus gangguan.	8	3	8	192
2	Dielektrik (Gas SF6)	Memadamkan busur api pada saat proses pelepasan PMT dan mengisolasi bagian- bagian bertegangan tinggi.	Tekanan Gas SF6 Rendah	Kemampuan isolasi & pemadaman busur api menurun. Berisiko tinggi terjadi tembus tegangan (<i>flashover</i>) yang dapat menyebabkan ledakan.	10	4	2	80
			Kualitas Gas SF6 Buruk (Terkontaminasi)	Terbentuk senyawa korosif & konduktif, menurunkan kekuatan dielektrik. Berisiko terjadi tembus tegangan (<i>flashover</i>) saat kondisi kritis.	9	4	9	324
3	Sekunder	Penggerak	Rangkaian kabel kontrol terputus	Sinyal perintah tidak sampai, PMT tidak merespons perintah kerja.	10	3	6	180

No.	Sub sistem	Fungsi	Failure Mode	Akibat/Efek Kegagalan	S	O	D	RPN
4	Mekanis (<i>Driving Mechanism</i>)	Merubah energi penggerak untuk mengerjakan kontak utama primer	Koil atau <i>relay</i> bantu rusak	Perintah tidak dapat dieksekusi, PMT gagal membuka atau menutup.	10	4	5	200
			Kabel lepas dari terminal kabel	Koneksi sinyal hilang secara tiba-tiba, PMT tidak merespons perintah kerja.	10	5	7	350
			Kesalahan <i>wiring</i> (pemasangan kabel)	PMT beroperasi tidak semestinya atau tidak berfungsi, berisiko tinggi menimbulkan bahaya.	10	4	2	80
			<i>Short circuit</i> pada terminal kabel	Merusak sumber tegangan DC, sekring putus, berisiko kebakaran pada panel kontrol.	8	2	4	64
			Tekanan hidrolik kurang/kosong	Tenaga tidak cukup/hilang. PMT gagal membuka/menutup atau gerakannya sangat lambat.	10	7	3	210
			Kualitas minyak hidrolik buruk	Gerakan PMT melambat, mempercepat keausan komponen internal (pompa, katup).	10	6	8	480

Penentuan skor untuk *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) dalam analisis FMEA ini didasarkan pada hasil wawancara mendalam dengan teknisi ahli dari PT PLN UIP3B Sumatera, yang dikombinasikan dengan standar keandalan industri. Justifikasi untuk setiap skor dirinci sebagai berikut:

1. Skor **Severity** (S) dievaluasi berdasarkan dampak terburuk dari suatu kegagalan. Mengingat fungsi krusial PMT sebagai perangkat proteksi, mode kegagalan yang menyebabkan hilangnya fungsi proteksi total seperti kegagalan pada mekanisme penggerak diberi skor tertinggi (9-10) karena berpotensi katastropik. Sebaliknya,

mode kegagalan yang dampaknya lebih bersifat operasional, seperti *hot spot* pada terminal, diberi skor yang lebih rendah (7-8). Kriteria detail untuk tiap skor pada FMEA ditampilkan dalam tabel berikut ini:

Tabel 4. 9 Kriteria *Severity* FMEA

Skor	Kategori	Kriteria Spesifik untuk PMT
1-2	Tidak Signifikan	Kegagalan tidak berdampak pada fungsi utama PMT sama sekali (misal: cat tergores, baut non-kritis berkarat).
3-4	Minor	Terjadi penurunan performa minor, namun tidak memerlukan pemadaman segera. Perbaikan dapat dijadwalkan saat ada kesempatan.
5-6	Moderat	Menyebabkan PMT harus dipadamkan secara terencana (<i>planned outage</i>) untuk perbaikan guna mencegah kerusakan lebih lanjut.
7-8	Major	Menyebabkan PMT padam seketika (<i>forced outage</i>) atau kehilangan fungsi sekunder/redundansi.
9-10	Katastropik	Kegagalan fungsi

Skor	Kategori	Kriteria Spesifik untuk PMT
		proteksi utama (gagal membuka saat ada gangguan), berpotensi menyebabkan ledakan, kebakaran, kerusakan aset lain, dan mengancam keselamatan personel.

2. Selanjutnya, skor ***Occurrence (O)*** merepresentasikan frekuensi kegagalan, yang estimasinya diperoleh dari data historis perawatan dan sifat inheren komponen. Komponen mekanis yang mengalami gesekan konstan, seperti pada sistem hidrolik, diasumsikan memiliki frekuensi kegagalan yang lebih tinggi (skor O: 5-7) dibandingkan komponen elektrik statis seperti *coil* yang cenderung lebih andal (skor O: 3-4). Kriteria detail untuk tiap skor pada FMEA ditampilkan dalam tabel berikut ini:

Tabel 4. 10 Kriteria *Occurrence* FMEA

Skor	Kategori	Kriteria Spesifik untuk PMT (Berdasarkan Waktu)
1-2	Sangat Jarang	Diperkirakan terjadi kurang dari sekali dalam 8-10 tahun.
3-4	Jarang	Diperkirakan terjadi sekali dalam 5-8 tahun.
5-6	Sedang	Diperkirakan terjadi sekali dalam 2-4 tahun (misal: sesuai siklus

Skor	Kategori	Kriteria Spesifik untuk PMT (Berdasarkan Waktu)
		perawatan 2 tahunan).
7-8	Sering	Diperkirakan terjadi setidaknya sekali dalam setahun.
9-10	Sangat Sering	Diperkirakan terjadi beberapa kali dalam setahun.

3. Untuk skor **Detection (D)**, digunakan skala terbalik di mana skor yang **tinggi** menandakan kegagalan yang **sulit** dideteksi. Mode kegagalan internal yang tidak menunjukkan gejala fisik, seperti “kualitas minyak buru”, memerlukan pengujian khusus saat kondisi padam sehingga diberi skor D yang tinggi (7-9). Sebaliknya, kegagalan yang dapat diidentifikasi secara langsung oleh operator melalui alarm atau indikator visual, seperti “tekanan hidrolik turun”, diberi skor D yang sangat rendah (2-3). Kriteria detail untuk tiap skor pada FMEA ditampilkan dalam tabel berikut ini:

Tabel 4. 11 Kriteria *Detection* FMEA

Skor	Kategori	Kriteria Spesifik untuk PMT
1-2	Sangat Mudah	Kegagalan terdeteksi secara otomatis oleh sistem alarm di ruang kontrol (misal: alarm tekanan gas rendah).
3-4	Mudah	Dapat dideteksi dengan mudah melalui inspeksi visual harian/mingguan

Skor	Kategori	Kriteria Spesifik untuk PMT
		oleh operator tanpa alat.
5-6	Sedang	Dapat dideteksi dengan alat bantu ukur standar saat kondisi online (misal: kamera thermovisi, multimeter).
7-8	Sulit	Hanya dapat dideteksi saat kondisi PMT padam (<i>shutdown</i>) melalui pengujian khusus (misal: pengukuran tahanan kontak).
9-10	Sangat Sulit	Tidak ada metode deteksi yang efektif. Kegagalan bersifat tersembunyi (<i>hidden</i>) dan hanya diketahui setelah terjadi kegagalan fungsi.

4.4.4 *Logic Tree Analysis (LTA)*

Logic Tree Analysis (LTA) digunakan untuk menentukan jenis tindakan perawatan yang paling tepat dan efisien dalam menangani setiap mode kegagalan yang teridentifikasi. Melalui analisis ini, dapat dipetakan konsekuensi dari setiap kegagalan terhadap aspek *eviden* (terlihat/tidaknya gejala kegagalan), keselamatan (*safety*), *outage* (penghentian operasi), dan kategori kritikalitas dari masing-masing kegagalan. Penentuan kategori ini sangat penting untuk menyusun prioritas dalam program perawatan preventif maupun prediktif.

Tabel 4. 12 *Logic Tree Analysis* (LTA) PMT

No.	Equipment / Sub-Sistem	Function	Functional Failure	Evident?	Safety?	Outage?	Category
1	Kontak Utama (Primer)	Menyalurkan & memutus arus	Timbul hot spot (panas berlebih) pada kontak internal.	Y	N	Y	B
2	Gas SF6 (Dielektrik)	Mengisolasi & memadamkan busur api	Kualitas gas menurun (terkontaminasi).	N	-	-	D
3	Mekanisme Penggerak	Menyediakan tenaga untuk membuka/menutup kontak	Kualitas minyak hidrolik buruk	Y	Y	-	A
4	Terminal Kabel (Sekunder)	Menghubungkan sinyal kontrol	Kabel terlepas dari terminal.	Y	Y	-	A

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.

4.5 Pengolahan Data Kualitatif (Penentuan Tindakan Perawatan)

Pengolahan data kualitatif merupakan tahap penentuan tindakan perawatan berdasarkan hasil identifikasi kegagalan yang telah dilakukan sebelumnya. Salah satu langkah penting dalam tahapan ini adalah proses *Task Selection* atau pemilihan jenis tindakan perawatan.

4.5.1 Task Selection (Pemilihan Tindakan)

Task selection digunakan dalam penelitian ini untuk menentukan tindakan perawatan yang paling tepat dan efisien terhadap setiap mode kegagalan yang telah diidentifikasi. Tindakan ini mempertimbangkan tingkat kritikalitas suatu kegagalan baik dari sisi keselamatan, *downtime*, maupun keandalan operasional.

Jika tindakan pencegahan dianggap belum efektif atau belum tersedia, maka akan dipilih tindakan standar sesuai dengan dampaknya, seperti penggantian terjadwal (*scheduled discard*), pemulihan terjadwal (*scheduled restoration*), atau pemantauan kondisi (*on-condition task*). Pemilihan tugas ini didasarkan pada hasil analisis sebelumnya melalui metode *Logic Tree Analysis* (LTA) dan FMEA. Berikut adalah hasil dari proses *task selection* untuk komponen pada PMT:

Tabel 4. 13 *Task Selection*

No.	Sub-Sistem	Mode Kegagalan Kritis (Berdasarkan RPN Tertinggi)	Kategori LTA	Rekomendasi Tugas Perawatan	Jenis Tugas
1	<i>Driving Mechanism</i>	Kualitas minyak hidrolik buruk (RPN: 480)	A	Melakukan analisis sampel minyak hidrolik secara berkala di laboratorium untuk memeriksa kontaminasi dan viskositas.	CD
2	Sekunder	Kabel lepas dari terminal kabel (RPN: 350)	A	Melakukan pemeriksaan dan pengencangan (<i>torque check</i>) baut-baut terminal di lemari kontrol secara periodik.	TD
3	Primer	<i>Hot spot</i> pada kontak PMT (internal) (RPN: 315)	B	Melakukan pengukuran tahanan kontak saat PMT dalam kondisi padam (<i>shutdown</i>) untuk memonitor degradasi kontak.	CD
4	Dielektrik	Kualitas Gas SF6 Buruk (RPN: 243)	D	Melakukan pengujian kualitas gas SF6 (uji kemurnian, titik embun, dll.) secara berkala menggunakan alat khusus.	CD

Selection Task:

- *Time Directed* (TD) / Preventif: Melakukan perbaikan atau penggantian berdasarkan jadwal waktu/usia pakai yang tetap.
- *Condition Directed* (CD) / Prediktif: Melakukan pengecekan kondisi secara rutin, dan hanya bertindak jika ditemukan gejala kerusakan.
- *Failure Finding* (FF) / Pencarian Kegagalan: Melakukan tes rutin untuk memastikan fungsi yang tersembunyi (seperti alarm atau sistem proteksi) masih bekerja.

4.6 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.

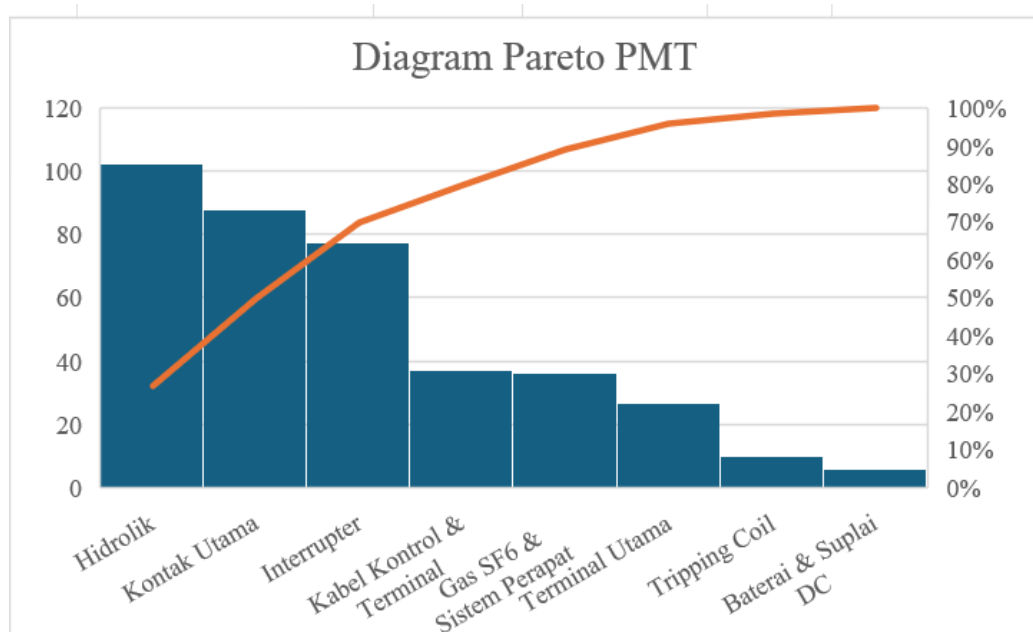
4.6.1 Penentuan Komponen Kritis

Penentuan komponen kritis diawali dengan mengidentifikasi komponen yang memiliki *downtime* tertinggi, dilanjutkan dengan penyusunan diagram pareto untuk mengukur kontribusi kumulatif setiap komponen terhadap total *downtime* sistem. Komponen yang berada dalam rentang kumulatif 80% pertama biasanya dianggap komponen paling kritis, karena berkontribusi signifikan terhadap kerugian produksi dan operasional. Tabel berikut menunjukkan data *downtime* komponen pada PMT berdasarkan catatan kerusakan lima tahun terakhir.

Tabel 4. 14 Data *Downtime* Komponen PMT

No.	Komponen Mesin	Frekuensi Kerusakan	<i>Downtime</i>	Kumulatif DT	% DT	%DT Kumulatif
1	Hidrolik	13	102,5	102,5	26,7%	26,7%
2	Kontak Utama	23	88	190,5	22,9%	49,7%
3	<i>Interrupter</i>	10	77,5	268	20,2%	69,9%
4	Kabel Kontrol & Terminal	21	37	305	9,6%	79,5%
5	Gas SF6 & Sistem Perapat	7	36	341	9,4%	88,9%
6	Terminal Utama	7	26,5	367,5	6,9%	95,8%
7	<i>Tripping Coil</i>	2	10	377,5	2,6%	98,4%

No.	Komponen Mesin	Frekuensi Kerusakan	Downtime	Kumulatif DT	% DT	%DT Kumulatif
8	Baterai & Suplai DC	2	6	383,5	1,6%	100,0%



Gambar 4. 4 Diagram Pareto Data *Downtime*

Berdasarkan hasil analisis menggunakan Diagram Pareto terhadap data downtime pada komponen-komponen Pemutus Tenaga (PMT), diketahui bahwa terdapat tiga komponen utama yang memberikan kontribusi signifikan terhadap total waktu henti, yakni sistem hidrolik, kontak utama, dan *interrupter*. Sesuai dengan prinsip Pareto (80/20), yang menyatakan bahwa sekitar 80% dari akibat sering kali berasal dari sekitar 20% penyebab, ketiga komponen tersebut secara kumulatif mencakup lebih dari 80% dari total frekuensi gangguan yang tercatat. Oleh karena itu, ketiganya dapat diklasifikasikan sebagai komponen kritis dalam sistem PMT.

Meskipun demikian, dalam penelitian ini fokus diarahkan secara khusus pada sistem hidrolik. Pemilihan fokus ini dilatarbelakangi oleh hasil temuan bahwa sistem hidrolik merupakan komponen dengan kontribusi *downtime* terbesar dibandingkan komponen lainnya serta memiliki nilai RPN tertinggi pada analisis FMEA yang telah dilakukan sebelumnya. Dengan memusatkan perhatian pada aspek tersebut, diharapkan penelitian ini dapat memberikan rekomendasi yang berdampak langsung terhadap peningkatan keandalan dan efisiensi operasional PMT.

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

Setelah mengetahui komponen kritis maka selanjutnya akan ditentukan jarak antar kerusakan pada komponen Hidrolik.

Tabel 4. 15 *Time to Failure* Komponen Hidrolik

No	Mulai <i>Downtime</i>	Selesai <i>Downtime</i>	ti
1	05/02/2015 09.00	05/02/2015 11.00	0
2	11/08/2017 10.00	11/08/2017 12.30	1321860
3	19/11/2018 08.30	19/11/2018 16.30	669360
4	03/10/2019 08.00	04/10/2019 12.00	457410
5	21/05/2020 11.00	21/05/2020 12.30	331140
6	08/12/2020 13.30	08/12/2020 15.30	289500
7	25/05/2021 08.00	25/05/2021 16.00	241470
8	10/11/2021 09.30	10/11/2021 12.00	242970
9	28/03/2022 08.00	29/03/2022 19.00	198480
10	15/07/2022 10.00	15/07/2022 16.00	154980
11	19/11/2022 09.00	19/11/2022 10.30	182460
12	27/02/2023 08.30	27/02/2023 11.30	143880
13	18/05/2023 09.00	18/05/2023 11.30	115050

Pada pengujian ini menggunakan metode *Least Square Curve Fitting* dimana adanya pemilihan nilai IOF atau *Index of Fit* terbesar. Terdapat 4 distribusi untuk menghitung waktu kerusakan yaitu Distribusi Eksponensial, Distribusi Normal, Distribusi *Lognormal* dan Distribusi *Weibull*.

1. Distribusi Normal

Berikut merupakan contoh perhitungan distribusi Normal ($i = 2$)

$$Xi = ti$$

$$= 143880$$

$$Xi^2 = 143880^2$$

$$= 20701454400$$

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

$$= \frac{(2 - 0,3)}{(12 + 0,4)} = 0,137096774$$

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

$$\begin{aligned}
&= z_i = \Phi^{-1}[0,137096774] = -1,093456203 \\
Y_i^2 &= -1,093456203^2 \\
&= 1,195646469 \\
XiY_i &= 143880 \cdot -1,093456203 \\
&= -157326,4785
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
r_{normal} &= \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \\
r_{normal} &= \frac{12(-157326,4785) - (143880)(-1,093456203)}{\sqrt{[12(20701454400) - (143880)^2][12(1,195646469) - (-1,093456203)^2]}} \\
&= 0,81896
\end{aligned}$$

Tabel 4. 16 *Time to Failure* Distribusi Normal

No.	ti	Xi = ti	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	XiYi
1	115050	115050	1,32E+10	0,056451	-	2,513105	-
			0	6	1,5852778	8	182386,2134
2	143880	143880	2,07E+10	0,137096	-	1,195646	-
			0	8	1,0934562	5	157326,4785
3	154980	154980	2,40E+10	0,217741	-0,779842	0,608153	-
			0	9		6	120859,9159
4	182460	182460	3,33E+10	0,298387	-	0,279888	-
			0	1	0,5290450	7	96529,56124
5	198480	198480	3,94E+10	0,379032	-	0,094878	-
			0	3	0,3080234	4	61136,48722
6	241470	241470	5,83E+10	0,459677	-	0,010251	-
			0	4	0,1012464		24447,97592
7	242970	242970	5,90E+10	0,540322	0,1012464	0,010251	24599,84557
			0	6			
8	289500	289500	8,38E+10	0,620967	0,3080234	0,094878	89172,77836
			0	7		4	
9	331140	331140	1,10E+11	0,701612	0,5290451	0,279888	175187,9804
			1	9		7	
10	457410	457410	2,09E+11	0,782258	0,779842	0,608153	356707,5372
			1	1		6	
11	669360	669360	4,48E+11	0,862903	1,0934562	1,195646	731915,8443
			1	2		5	
12	132186	132186	1,75E+11	0,943548	1,5852778	2,513105	2095515,341
	0	0	2	4		8	
Tota	434856	434856	2,85E+11	6	-1,776E-15	9,403847	1251167,151
l	0	0	2			5	

2. Distribusi *Lognormal*

Berikut ini adalah contoh perhitungan distribusi *Lognormal* ($i = 2$):

$$\begin{aligned} Xi &= \ln ti \\ &= \ln(143880) = 11,8767349 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} xi^2 &= 11,8767349^2 \\ &= 141,0568318 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F(ti) &= \frac{(i - 0,3)}{(n + 0,4)} \\ &= \frac{(2 - 0,3)}{(12 + 0,4)} = 0,137096774 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Yi &= zi = \Phi^{-1}[F(ti)] \\ &= zi = \Phi^{-1}[0,137096774] = -1,093456203 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Yi^2 &= -1,093456203^2 \\ &= 1,195646469 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} XiYi &= 11,8767349 \cdot -1,093456203 \\ &= -12,98668945 \end{aligned}$$

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

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

$r \text{ Lognormal}$

$$\begin{aligned} &= \frac{12(-12,98668945) - (11,8767349)(-1,093456203)}{\sqrt{[12(141,0568318) - (11,8767349)^2][12(1,195646469) - (-1,093456203)^2]}} \\ &= 0,9612 \end{aligned}$$

Tabel 4. 17 *Time to Failure* Distribusi *Lognormal*

No.	ti	Xi = ln(ti)	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	XiYi
1	115050	11,6531	135,7953	0,0565	-1,5853	2,5131	-18,4734
2	143880	11,8767	141,0568	0,1371	-1,0935	1,1956	-12,9867
3	154980	11,9511	142,8276	0,2177	-0,7798	0,6082	-9,3199
4	182460	12,1143	146,7559	0,2984	-0,5290	0,2799	-6,4090
5	198480	12,1984	148,8020	0,3790	-0,3080	0,0949	-3,7574
6	241470	12,3945	153,6236	0,4597	-0,1012	0,0103	-1,2549
7	242970	12,4007	153,7772	0,5403	0,1012	0,0103	1,2555
8	289500	12,5759	158,1535	0,6210	0,3080	0,0949	3,8737
9	331140	12,7103	161,5516	0,7016	0,5290	0,2799	6,7243

No.	ti	Xi = ln(ti)	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	XiYi
10	457410	13,0333	169,8678	0,7823	0,7798	0,6082	10,1639
11	669360	13,4141	179,9375	0,8629	1,0935	1,1956	14,6677
12	1321860	14,0946	198,6564	0,9435	1,5853	2,5131	22,3438
Total	4348560	150,4170	1890,8053	6	-1,7764E-15	9,4038	6,6587

3. Distribusi Eksponensial

Berikut merupakan contoh perhitungan distribusi Eksponensial (i = 2):

$$Xi = ti$$

$$= 143880$$

$$Xi^2 = 143880^2$$

$$= 20701454400$$

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

$$= \frac{(2 - 0,3)}{(12 + 0,4)} = 0,137096774$$

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

$$= \ln \left[\frac{1}{\{1 - 0,137096774\}} \right] = 0,147452731$$

$$Yi^2 = 0,147452731^2$$

$$= 0,021742308$$

$$XiYi = 143880 \cdot 0,147452731$$

$$= 21215,49896$$

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

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

r Eksponensial

$$= \frac{12(21215,49896) - (143880)(0,147452731)}{\sqrt{[12(20701454400) - (143880)^2][12(0,021742308) - (0,147452731)^2]}}$$

$$= 0,9505$$

Tabel 4. 18 *Time to Failure* Distribusi Eksponensial

No.	ti	Xi = ti	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	XiYi
1	115050	115050	1,32E+10	0,05645	0,05811	0,00338	6685,28292
2	143880	143880	2,07E+10	0,13710	0,14745	0,02174	21215,49896

No.	ti	Xi = ti	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	XiYi
3	154980	154980	2,40E+10	0,21774	0,24557	0,06030	38058,52959
4	182460	182460	3,33E+10	0,29839	0,35437	0,12558	64658,97913
5	198480	198480	3,94E+10	0,37903	0,47648	0,22703	94570,98501
6	241470	241470	5,83E+10	0,45968	0,61559	0,37895	148646,26280
7	242970	242970	5,90E+10	0,54032	0,77723	0,60409	188843,64540
8	289500	289500	8,38E+10	0,62097	0,97013	0,94116	280853,78250
9	331140	331140	1,10E+11	0,70161	1,20936	1,46256	400468,68000
10	457410	457410	2,09E+11	0,78226	1,52444	2,32393	697296,25000
11	669360	669360	4,48E+11	0,86290	1,98707	3,94844	1330063,98500
12	1321860	1321860	1,75E+12	0,94355	2,87437	8,26201	3799516,60100
Total	4348560	4348560	2,85E+12	6	11,24018	18,35917	7070878,48200

4. Distribusi *Weibull*

Berikut merupakan contoh perhitungan distribusi *Weibull* ($i = 2$):

$$Xi = \ln ti$$

$$= \ln(143880) = 11,8767349$$

$$Xi^2 = 11,8767349^2$$

$$= 141,0568318$$

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

$$= \frac{(2 - 0,3)}{(12 + 0,4)} = 0,137096774$$

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

$$= \ln | \ln \left[\frac{1}{\{1 - 0,137096774\}} \right] = -1,914247621$$

$$Yi^2 = -1,914247621^2$$

$$= 3,664343956$$

$$XiYi = 11,8767349 \cdot -1,914247621$$

$$= -22,73501153$$

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

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

r Weibull

$$= \frac{12(-22,73501153) - (11,8767349)(-1,914247621)}{\sqrt{[12(141,0568318) - (11,8767349)^2][12(3,664343956) - (-1,914247621)^2]}}$$

$$= 0,9048$$

Tabel 4. 19 *Time to Failure* Distribusi *Weibull*

No.	ti	Xi = ln(ti)	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	XiYi
1	115050	11,6531	135,7953	0,0565	-2,8455	8,0966	-33,1585
2	143880	11,8767	141,0568	0,1371	-1,9142	3,6643	-22,7350
3	154980	11,9511	142,8276	0,2177	-1,4042	1,9717	-16,7813
4	182460	12,1143	146,7559	0,2984	-1,0374	1,0762	-12,5674
5	198480	12,1984	148,8020	0,3790	-0,7413	0,5496	-9,0432
6	241470	12,3945	153,6236	0,4597	-0,4852	0,2354	-6,0135
7	242970	12,4007	153,7772	0,5403	-0,2520	0,0635	-3,1252
8	289500	12,5759	158,1535	0,6210	-0,0303	0,0009	-0,3813
9	331140	12,7103	161,5516	0,7016	0,1901	0,0361	2,4162
10	457410	13,0333	169,8678	0,7823	0,4216	0,1778	5,4952
11	669360	13,4141	179,9375	0,8629	0,6867	0,4715	9,2109
12	1321860	14,0946	198,6564	0,9435	1,0558	1,1148	14,8815
Total	4348560	150,4170	1890,8053	6	-6,3559	17,4585	-71,8016

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

Tabel 4. 20 *Index of Fit Time to Failure*

No.	Distribusi	Indeks Of Fit	%IOF
1	Normal	0,818957	81,90%
2	Log Normal	0,961164	96,12%
3	Ekspensial	0,950488	95,05%
4	Weibull	0,904844	90,48%

Dari tabel berikut dipilih distribusi Lognormal karena memiliki nilai *index of fit* tertinggi yaitu 96,12%.

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

Selanjutnya ketika komponen kritis sudah diketahui maka menentukan jarak antar perbaikan pada komponen Hidrolik sebagai berikut:

Tabel 4. 21 *Time to Repair* Komponen Hidrolik

No	Mulai <i>Downtime</i>	Selesai <i>Downtime</i>	Dti
1	05/02/2015 09.00	05/02/2015 11.00	120
2	11/08/2017 10.00	11/08/2017 12.30	150
3	19/11/2018 08.30	19/11/2018 16.30	480
4	03/10/2019 08.00	04/10/2019 12.00	1680
5	21/05/2020 11.00	21/05/2020 12.30	90
6	08/12/2020 13.30	08/12/2020 15.30	120
7	25/05/2021 08.00	25/05/2021 16.00	480
8	10/11/2021 09.30	10/11/2021 12.00	150
9	28/03/2022 08.00	29/03/2022 19.00	2100
10	15/07/2022 10.00	15/07/2022 16.00	360
11	19/11/2022 09.00	19/11/2022 10.30	90
12	27/02/2023 08.30	27/02/2023 11.30	180
13	18/05/2023 09.00	18/05/2023 11.30	150

Pada pengujian ini menggunakan metode *Least Square Curve Fitting* dimana adanya pemilihan nilai IOF atau *Index of Fit* terbesar. Terdapat 4 distribusi untuk menghitung waktu kerusakan yaitu Distribusi Eksponensial, Distribusi Normal, Distribusi *Lognormal* dan Distribusi *Weibull*.

1. Distribusi Normal

Berikut merupakan contoh perhitungan distribusi Normal ($i = 2$)

$$Xi = dti$$

$$= 90$$

$$Xi^2 = 90^2$$

$$= 8100$$

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

$$= \frac{(2 - 0,3)}{(13 + 0,4)} = 0,089552239$$

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

$$= zi = \Phi^{-1}[0,089552239] = -1,343517456$$

$$Yi^2 = -1,343517456^2$$

$$= 1,805039154$$

$$XiYi = 90 \cdot (-1,343517456)$$

$$= -120,916571$$

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

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

$$r \text{ normal} = \frac{13(-120,916571) - (90)(-1,343517456)}{\sqrt{[13(8100) - (90)^2][13(1,805039154) - (-1,343517456)^2]}}$$

$$= 0,79555$$

Tabel 4. 22 *Time to Repair* Distribusi Normal

No.	Dti	Xi = Dti	Xi^2	F(Dti)	Yi	Yi^2	XiYi
1	90	90	8100	0,08955223 9	- 1,343517456	1,80503915 4	-120,916571
2	90	90	8100	0,08955223 9	- 1,343517456	1,80503915 4	-120,916571
3	120	120	14400	0,23880597	- 0,710148682	0,50431115 1	- 85,21784184
4	120	120	14400	0,23880597	- 0,710148682	0,50431115 1	- 85,21784184
5	150	150	22500	0,38805970 1	- 0,284379715	0,08087182 2	- 42,65695718
6	150	150	22500	0,38805970 1	- 0,284379715	0,08087182 2	- 42,65695718
7	150	150	22500	0,5	0	0	0
8	180	180	32400	0,57462686 6	0,188166326	0,03540656 6	33,86993874
9	360	360	129600	0,64925373 1	0,383306477	0,14692385 5	137,9903318
10	480	480	230400	0,72388059 7	0,594408678	0,35332167 6	285,3161652
11	480	480	230400	0,79850746 3	0,836301918	0,69940089 7	401,4249205
12	168 0	1680	282240 0	0,87313432 8	1,141333075	1,30264118 8	1917,439566
13	210 0	2100	441000 0	0,94776119 4	1,623523182	2,63582752 1	3409,398681
Total 1	615 0	6150	796770 0	6,5	0,09094795	9,95396595 8	5687,856863

2. Distribusi Lognormal

Berikut ini adalah contoh perhitungan distribusi *Lognormal* (i = 2):

$$Xi = \ln dti$$

$$= \ln(90) = 4,4998097$$

$$xi^2 = 4,4998097^2$$

$$= 20,24828707$$

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

$$= \frac{(i - 0,3)}{(13 + 0,4)} = 0,089552239$$

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

$$= zi = \Phi^{-1}[0,089552239] = -1,343517456$$

$$Yi^2 = -1,343517456^2$$

$$= 1,805039154$$

$$XiYi = 4,4998097 \cdot (-1,343517456)$$

$$= -6,04557284$$

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

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

$$r_{Lognormal} = \frac{13(-6,04557284) - (4,4998097)(-1,343517456)}{\sqrt{[13(20,24828707) - (4,4998097)^2][13(1,805039154) - (-1,343517456)^2]}}$$

$$= 0,9353$$

Tabel 4. 23 *Time to Repair* Distribusi *Lognormal*

No.	Dti	Xi = ln(Dti)	Xi^2	F(Dti)	Yi	Yi^2	XiYi
1	90	4,499810	20,248287	0,089552	-1,343517	1,805039	-6,045573
2	90	4,499810	20,248287	0,089552	-1,343517	1,805039	-6,045573
3	120	4,787492	22,920077	0,238806	-0,710149	0,504311	-3,399831
4	120	4,787492	22,920077	0,238806	-0,710149	0,504311	-3,399831
5	150	5,010635	25,106466	0,388060	-0,284380	0,080872	-1,424923
6	150	5,010635	25,106466	0,388060	-0,284380	0,080872	-1,424923
7	150	5,01064	25,10647	0,5	0	0	0
8	180	5,19296	26,96680	0,57463	0,18817	0,03541	0,97714
9	360	5,88610	34,64622	0,64925	0,38331	0,14692	2,25618
10	480	6,17379	38,11563	0,72388	0,59441	0,35332	3,66975
11	480	6,17379	38,11563	0,79851	0,83630	0,69940	5,16315
12	1680	7,42655	55,15363	0,87313	1,14133	1,30264	8,47617
13	2100	7,64969	58,51780	0,94776	1,62352	2,63583	12,41945
Total	6150	72,109383	413,171846	6,5	0,090948	9,953966	11,221188

3. Distribusi Eksponensial

Berikut merupakan contoh perhitungan distribusi Eksponensial (i = 2):

$$Xi = dti$$

$$= 90$$

$$Xi^2 = 90^2$$

$$= 8100$$

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

$$= \frac{(i - 0,3)}{(13 + 0,4)} = 0,089552239$$

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

$$= \ln \left[\frac{1}{\{1 - 0,089552239\}} \right] = 0,093818755$$

$$Yi^2 = 0,093818755^2$$

$$= 0,008801959$$

$$XiYi = 90 \cdot 0,093818755$$

$$= 8,44368797$$

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

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

$$r \text{ Eksponensial} = \frac{13(8,44368797) - (90)(0,093818755)}{\sqrt{[13(8100) - (90)^2][13(0,008801959) - (0,093818755)^2]}}$$

$$= 0,9268$$

Tabel 4. 24 *Time to Repair* Distribusi Eksponensial

No.	Dti	Xi = Dti	Xi^2	F(Dti)	Yi	Yi^2	XiYi
1	90	90	8100	0,089552	0,093819	0,008802	8,443688
2	90	90	8100	0,089552	0,093819	0,008802	8,443688
3	120	120	14400	0,238806	0,272867	0,074456	32,744038
4	120	120	14400	0,238806	0,272867	0,074456	32,744038
5	150	150	22500	0,388060	0,491121	0,241199	73,668083
6	150	150	22500	0,388060	0,491121	0,241199	73,668083
7	150	150	22500	0,5	0,693147	0,480453	103,972077
8	180	180	32400	0,574627	0,854789	0,730663	153,861936
9	360	360	129600	0,649254	1,047692	1,097659	377,169191
10	480	480	230400	0,723881	1,286922	1,656168	617,722506
11	480	480	230400	0,798507	1,602003	2,566413	768,961408
12	1680	1680	2822400	0,873134	2,064626	4,262682	3468,572446

No.	Dti	Xi = Dti	Xi^2	F(Dti)	Yi	Yi^2	XiYi
13	2100	2100	4410000	0,947761	2,951930	8,713889	6199,052267
Total	6150	6150	7967700	6,5	12,21672	20,15684	11919,02345

4. Distribusi *Weibull*

Berikut merupakan contoh perhitungan distribusi *Weibull* ($i = 2$):

$$Xi = \ln dti$$

$$= \ln(90) = 4,4998097$$

$$Xi^2 = 4,4998097^2$$

$$= 20,24828707$$

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

$$= \frac{(2 - 0,3)}{(13 + 0,4)} = 0,089552239$$

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

$$= \ln | \ln \left[\frac{1}{\{1 - 0,089552239\}} \right] = -2,366390494$$

$$Yi^2 = -2,366390494^2$$

$$= 5,59980397$$

$$XiYi = 4,4998097 \cdot (-2,366390494)$$

$$= -10,64830683$$

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

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

$$r_{\text{Weibull}}$$

$$= \frac{13(-10,64830683) - (4,4998097)(-2,366390494)}{\sqrt{[13(20,24828707) - (4,4998097)^2][13(5,59980397) - (-2,366390494)^2]}}$$

$$= 0,8782$$

Tabel 4. 25 *Time to Repair* Distribusi *Weibull*

No.	Dti	Xi = ln(ti)	Xi^2	F(ti)	Yi	Yi^2	XiYi
1	90	4,499810	20,24829	0,089552	-2,366390	5,599804	-10,648307
2	90	4,499810	20,24829	0,089552	-2,366390	5,599804	-10,648307
3	120	4,787492	22,92008	0,238806	-1,298771	1,686806	-6,217855
4	120	4,787492	22,92008	0,238806	-1,298771	1,686806	-6,217855
5	150	5,010635	25,10647	0,388060	-0,711066	0,505614	-3,562891

No.	Dti	$X_i = \ln(t_i)$	X_i^2	F(t _i)	Y _i	Y_i^2	$X_i Y_i$
6	150	5,010635	25,10647	0,388060	-0,711066	0,505614	-3,562891
7	150	5,010635	25,10647	0,5	-0,366513	0,134332	-1,836463
8	180	5,192957	26,96680	0,574627	-0,156901	0,024618	-0,814781
9	360	5,886104	34,64622	0,649254	0,046590	0,002171	0,274233
10	480	6,173786	38,11563	0,723881	0,252253	0,063632	1,557358
11	480	6,173786	38,11563	0,798507	0,471255	0,222081	2,909426
12	1680	7,426549	55,15363	0,873134	0,724949	0,525552	5,383872
13	2100	7,649693	58,51780	0,947761	1,082459	1,171718	8,280479
Total	6150	72,109383	413,171846	6,5	-6,698362	17,728550	-25,103981

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

Tabel 4. 26 *Index of Fit Time to Repair*

No.	Distribusi	Indeks Of Fit	%IOF
1	Normal	0,795546	79,55%
2	Log Normal	0,935306	93,53%
3	Eksponensial	0,926770	92,68%
4	Weibull	0,878170	87,82%

Dari tabel berikut dipilih distribusi Log Normal karena memiliki nilai *index of fit* tertinggi yaitu 93,53%.

4.6.4 Uji Goodness of Fit Pada Distribusi Data Waktu Kerusakan (*Time to Failure*)

Goodness of Fit digunakan untuk menguji hipotesis terhadap distribusi yang dipilih, dalam hal ini distribusi Lognormal, yang telah ditentukan berdasarkan karakteristik awal data kerusakan. Pengujian distribusi waktu antar kerusakan dilakukan menggunakan metode *Kolmogorov-Smirnov*.

Tabel 4. 27 *Uji Goodness of Fit Time to Failure*

No	Ti	$\ln(t_i)$	Zti	Fti	D1	D2
1	115050	11,65312	-1,31844	0,09368	0,09368	-0,01035
2	143880	11,87673	-0,98403	0,16255	0,07922	0,00412
3	154980	11,95105	-0,87290	0,19136	0,02469	0,05864
4	182460	12,11429	-0,62879	0,26474	0,01474	0,06859
5	198480	12,19844	-0,50293	0,30751	-0,02583	0,10916
6	241470	12,39450	-0,20974	0,41694	0,00027	0,08306
7	242970	12,40069	-0,20048	0,42055	-0,07945	0,16278
8	289500	12,57591	0,06155	0,52454	-0,05879	0,14213
9	331140	12,71030	0,26252	0,60354	-0,06313	0,14646
10	457410	13,03334	0,74561	0,77205	0,02205	0,06128
11	669360	13,41408	1,31500	0,90574	0,07241	0,01092
12	1321860	14,09455	2,33262	0,99017	0,07350	0,00983
TOTAL	4348560	150,4170022			Dn Max	0,162779358

Dari tabel berikut diketahui bahwa:

Dhitung dapat diperoleh dari nilai terbesar antara D1 dan D2, maka Dhitung = 0,392598

Hipotesa untuk melakukan Uji *Kolmogorov-Smirnov* test adalah:

H0 = Data *Time Failure* berdistribusi Log Normal

H1 = Data *Time Failure* tidak berdistribusi Log Normal

$\alpha = 0,05$

Dtabel = Dilihat pada tabel *Kolmogorov-Smirnov*, dengan nilai Dcrit 12;0,05 = 0,392598

Wilayah kritis: $D_n < D_{crit}$ maka tidak cukup bukti untuk menolak H0.

Bahwa keputusannya $D_n < D_{crit}$, $D_n = 0,162779358 < D_{crit} = 0,392598$, yaitu tidak cukup bukti untuk menolak H0.

4.6.5 Uji *Goodness of Fit* Pada Distribusi Data Waktu Perbaikan (*Time to Repair*)

Uji *Goodness of Fit* digunakan untuk melakukan uji hipotesis yang diberikan pada distribusi terpilih yang diuji yaitu distribusi Log Normal dimana sesuai dengan data yang dipilih sesuai dengan proses pemilihan distribusi awal data perbaikan. Berikut merupakan Uji *Goodness of Fit* pada distribusi data waktu antar kerusakan menggunakan Uji *Kolmogorov-Smirnov*.

Tabel 4. 28 Uji *Goodness of Fit Time to Repair*

No	Dti	ln(ti)	Zti	Fti	D1	D2
1	90	4,49980967	- 1,039494747	0,14928735	0,14928735	- 0,072364273
2	90	4,49980967	- 1,039494747	0,14928735	0,072364273	0,004558804
3	120	4,78749174 3	- 0,753892876	0,22545677 4	0,07161062	0,005312457
4	120	4,78749174 3	- 0,753892876	0,22545677 4	- 0,005312457	0,082235533
5	150	5,01063529 4	- 0,532362855	0,29723735 3	- 0,010454955	0,087378031
6	150	5,01063529 4	- 0,532362855	0,29723735 3	- 0,087378031	0,164301108
7	150	5,01063529 4	- 0,532362855	0,29723735 3	- 0,164301108	0,241224185
8	180	5,19295685 1	- 0,351359649	0,36265927 5	- 0,175802263	0,25272534
9	360	5,88610403 1	0,336775449	0,63185690 9	0,016472294	0,060450783
10	480	6,17378610 4	0,622377319	0,73315310 5	0,040845412	0,036077664
11	480	6,17378610 4	0,622377319	0,73315310 5	- 0,036077664	0,113000741
12	168 0	7,42654907 2	1,866081676	0,96898503	0,122831184	- 0,045908107
13	210	7,64969262	2,087611697	0,98158356	0,058506639	0,018416438

No	Dti	ln(ti)	Zti	Fti	D1	D2
	0	4		2		
TOTA	615	72,1093834			Dn Max	0,25272534
L	0	9				

Dari tabel berikut diketahui bahwa:

Dhitung dapat diperoleh dari nilai terbesar antara D1 dan D2, maka Dhitung = 0,377196

Hipotesa untuk melakukan Uji *Kolmogorov-Smirnov* test adalah:

H0 = Data *Time Repair* berdistribusi Log Normal

H1 = Data *Time Repair* tidak berdistribusi Log Normal

$\alpha = 0,05$

Dtabel = Dilihat pada tabel *Kolmogorov-Smirnov*, dengan nilai Dcrit 13;0,05 = 0,377196

Wilayah kritis: Dn < Dcrit maka tidak cukup bukti untuk menolak H0.

Bahwa keputusannya Dn < Dcrit, Dn = 0,25272534 < Dcrit = 0,377196, yaitu tidak cukup bukti untuk menolak H0.

4.6.6 Perhitungan Parameter Dari Distribusi Waktu Kerusakan (*Time to Failure*)

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

T_{med} (parameter lokasi)

$$N = 12$$

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

$$\mu = \frac{150,4170022}{12}$$

$$\mu = 12,53475019$$

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

$$= e^{12,53475019}$$

$$= 277825,9689$$

s (parameter bentuk)

$$s = \sqrt{\frac{\sum \ln^2(ti)}{N}}$$

$$s = \sqrt{\frac{150,4170022}{12}}$$

$$s = 0,668691546$$

4.6.7 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:

1. T_{med} (parameter lokasi)

$$N = 13$$

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

$$\mu = \frac{72,10938349}{13}$$

$$\mu = 5,546875653$$

$$\begin{aligned} T_{med} &= e^{\mu} \\ &= e^{5,546875653} \\ &= 256,4351108 \end{aligned}$$

2. s (parameter bentuk)

$$s = \sqrt{\frac{\sum \ln(Dti)}{N}}$$

$$s = \sqrt{\frac{72,10938349}{13}}$$

$$s = 1,007283574$$

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

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

$$\begin{aligned}
 MTTF &= T_{med} * e^{\frac{s^2}{2}} \\
 &= 277825,9689 * e^{\frac{0,668691546^2}{2}} \\
 &= 347432,0472
 \end{aligned}$$

4.6.9 Penentuan Nilai Tengah Dari Distribusi Data Waktu Perbaikan (*Mean Time to Repair*)

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

$$\begin{aligned}
 MTTR &= T_{med} * e^{\frac{s^2}{2}} \\
 &= 256,4351108 * e^{\frac{1,007283574^2}{2}} \\
 &= 425,8919827
 \end{aligned}$$

4.6.10 Perhitungan Interval 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:

Data waktu kerusakan berdistribusi Lognormal

$$\begin{aligned}
 MTTF &= 347432,0472 \\
 T_{med} &= 277825,9689 \\
 s &= 0,668691546
 \end{aligned}$$

Waktu untuk melakukan penggantian kerusakan komponen

$$Tf = 425,8919827$$

Waktu untuk melakukan penggantian *preventive*

$$Tp = 425,8919827$$

Di bawah ini merupakan data-data untuk perhitungan interval waktu penggantian pencegahan dengan minimasi *downtime* sebagai berikut:

Tabel 4. 29 Interval Waktu Penggantian Pencegahan

tp	Rtp	Ftp	tp + Tp	Mtp	MTTF/Ftp + Tf	Dtp
1	1	1,06E-78	426,8920	3,28E+83	3,28E+83	0,001224324

tp	Rtp	Ftp	tp + Tp	Mtp	MTTF/Ftp + Tf	Dtp
34743,2047 2	0,999 1	0,0009	35169,0967	3,70E+08	3,70E+08	0,001113244
69486,4094 5	0,980 9	0,0191	69912,3014	18.181.227,0 3	1,82E+07	0,001023738
138972,818 9	0,849 9	0,1501	139398,710 9	2.314.396,36	2.314.822,25	0,000913993
208459,228 3	0,666 2	0,3338	208885,120 3	1.040.984,42	1.041.410,31	0,000874983
277945,637 8	0,499 7	0,5003	278371,529 8	694.507,23	694.933,12	0,000874954
295317,240 1	0,463 6	0,5364	295743,132 1	647.740,82	648.166,71	0,000878537
312688,842 5	0,429 8	0,5702	313114,734 5	609.358,00	609.783,90	0,00088311
330060,444 9	0,398 3	0,6017	330486,336 9	577.458,51	577.884,40	0,000888506
347432,047 2	0,369 1	0,6309	347857,939 2	550.657,24	551.083,13	0,000894579
364803,649 6	0,341 9	0,6581	365229,541 6	527.924,28	528.350,17	0,000901205
382175,252	0,316 7	0,6833	382601,143 9	508.480,14	508.906,04	0,000908275
399546,854 3	0,293 4	0,7066	399972,746 3	491.725,50	492.151,39	0,000915695
416918,456 7	0,271 9	0,7281	417344,348 7	477.192,97	477.618,86	0,000923386
451661,661 4	0,233 7	0,7663	452087,553 4	453.391,88	453.817,77	0,000939302
486404,866 1	0,201 1	0,7989	486830,758 1	434.914,45	435.340,35	0,000955563
521148,070 8	0,173 4	0,8266	521573,962 8	420.329,28	420.755,17	0,000971823
Min Dtp =						0,000874954
						4

Berikut merupakan contoh perhitungan interval waktu penggantian pencegahan pada mesin PMT di komponen Hidrolik dengan distribusi Log Normal untuk $tp = 277945,6378$

$$F(277945,6378) = \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{t}{t_{med}}\right)$$

$$= 0,500256921$$

$$R(277945,6378) = 1 - F_{tp}$$

$$= 0,499743$$

$$\begin{aligned}
M(277945,6378) &= \frac{MTTF}{1 - R_{tp}} \\
&= \frac{347432,0472}{1 - 0,499743} \\
&= 694.507,23 \\
D_{tp} &= \frac{Tp * R_{tp} + Tf(1 - R_{tp})}{(t_p + Tp)R_{tp} + (M_{tp} + Tf)(1 - R_{tp})} \\
&= 0,000874954
\end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas didapat nilai D_{tp} yang paling minimum adalah pada $t_p = 277945,6378$ menit. Sehingga waktu interval penggantian komponen hidrolik dengan kriteria minimasi *downtime* pada menit ke 277945,6378 atau 193 hari atau 6,43 bulan selama periode 10 tahun.

4.6.11 Analisis Keandalan Dengan dan Tanpa *Preventive Maintenance*

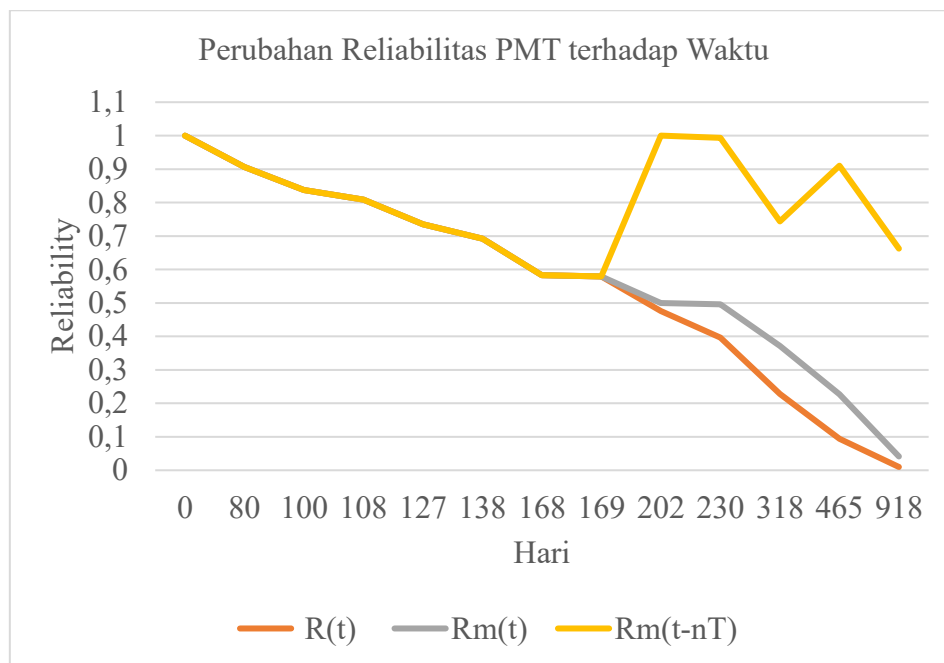
Analisis keandalan dilakukan untuk membandingkan performa komponen Pemutus Tenaga (PMT) dalam kondisi tanpa *preventive maintenance* dan dengan penerapan jadwal *preventive maintenance* sesuai hasil interval penggantian komponen hidrolik dengan kriteria minimasi *downtime* yaitu 193 hari. Nilai $R(t)$ merepresentasikan peluang suatu komponen tetap berfungsi pada waktu t sejak awal operasi tanpa adanya intervensi perawatan. Sementara itu, $R(t - nT)$ menunjukkan peluang bertahanya komponen setelah *preventive maintenance* terakhir, dengan asumsi bahwa PM mengembalikan kondisi komponen menjadi “as good as new”. Adapun $R_m(t)$ menggambarkan peluang komponen tetap berfungsi pada waktu t ketika *preventive maintenance* dilakukan secara berkala setiap interval T . Tabel berikut menunjukkan hasil perhitungan $R(t)$, $R_m(t)$, dan $R(t - nT)$ untuk setiap titik waktu pengamatan:

Tabel 4. 30 Hasil Perhitungan $R(t)$, $R_m(t)$, dan $R(t - nT)$

ti (hari)	$R(t)$	$R_m(t)$	$R_m(t - nT)$
0	1	1	1
79,896	0,906	0,906	0,906
99,917	0,837	0,837	0,837
107,625	0,809	0,809	0,809
126,708	0,735	0,735	0,735
137,833	0,692	0,692	0,692
167,688	0,583	0,583	0,583
168,729	0,579	0,579	0,579

t_i (hari)	$R(t)$	$R_m(t)$	$R_m(t - nT)$
201,042	0,475	0,500	1
229,958	0,396	0,496	0,993
317,646	0,228	0,371	0,743
464,833	0,094	0,227	0,910
917,958	0,010	0,041	0,662

Berdasarkan tabel tersebut, dilakukan pemetaan ke dalam bentuk grafik untuk memvisualisasikan perbedaan keandalan antara kondisi tanpa preventive maintenance dan dengan *preventive maintenance*.



Gambar 4. 5 Hasil Perhitungan $R(t)$, $R_m(t)$, dan $R(t-nT)$

Berdasarkan grafik yang dihasilkan, terlihat bahwa kurva $R(t)$ pada kondisi tanpa *preventive maintenance* menurun secara kontinu seiring bertambahnya waktu operasi, menunjukkan berkurangnya peluang komponen untuk tetap berfungsi. Pada kurva $R(t - nT)$, reliabilitas kembali ke nilai awal setelah setiap jadwal *preventive maintenance*, mencerminkan kondisi komponen yang diasumsikan “*as good as new*” setelah perawatan. Sementara itu, kurva $R_m(t)$ menunjukkan pola penurunan yang disertai kenaikan kembali pada setiap interval *preventive maintenance*, namun kenaikannya tidak mencapai nilai awal 100% karena dalam populasi terdapat komponen yang mengalami kegagalan sebelum jadwal *preventive maintenance* dan tidak dapat dipulihkan dalam perhitungan keandalan. Pola ini menggambarkan efek nyata dari *preventive maintenance* dalam memperlambat penurunan reliabilitas populasi sekaligus menegaskan bahwa efektivitas PM sangat bergantung pada pemilihan interval waktu yang optimal.

4.6.12 Perhitungan Interval Waktu Pemeriksaan

Berikut ini adalah perhitungan interval waktu pemeriksaan pada komponen Hidrolik:

1. Waktu yang dibutuhkan perusahaan untuk pemeriksaan Hidrolik 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 komponen Hidrolik selama 10 tahun = 13 kali

D. $K = \frac{13}{120} = 0,108$

3. Waktu rata-rata yang dibutuhkan untuk perbaikan

A. $MTTR = 425,892 \text{ menit} = 7,098 \text{ jam}$

B. $t = 208 \text{ jam/bulan}$

C. $\frac{1}{\mu} = \frac{MTTR}{t}$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{7,098}{208}$$

$$\mu = 29,303$$

4. Waktu rata-rata melakukan pemeriksaan

A. Waktu untuk melakukan pemeriksaan $ti = 2 \text{ jam}$

B. $t = 208 \text{ jam/bulan}$

C. $\frac{1}{i} = \frac{Ti}{t}$

$$\frac{1}{i} = \frac{Ti}{208}$$

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

5. Perhitungan frekuensi pemeriksaan

$$N = \sqrt{\frac{K * i}{\mu}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,108 * 208}{29,303}}$$

$$= 0,8769$$

6. Interval Waktu Pemeriksaan

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

$$= \frac{208}{0,8769}$$

$$= 237,1964444 \text{ jam} \approx 10 \text{ hari}$$

4.6.13 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 preventif.

1. Biaya Tenaga Kerja (Teknisi)

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

Harga tenaga kerja (Teknisi)	= Rp262.500
Konsumsi & <i>extra voeding</i>	= Rp40.500
Total tenaga kerja	= 1 orang
Total biaya tenaga kerja	= (Rp262.500+Rp40.500) x 1
	= Rp303.000

2. Biaya Material

Biaya material merupakan biaya pembelian bahan baku dan perlengkapan yang digunakan dalam melakukan perawatan. Berikut merupakan rincian biaya untuk setiap perawatan mesin:

<i>Contact lubricant</i> 500g	= Rp1.573.000
Estimasi per perawatan	= 100gr
Total biaya <i>contact lubricant</i> 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	= Rp314.600+Rp9.570
	= 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 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Biaya kerugian per jam} &= \text{Rp}178.000 \\
 \text{Waktu rata-rata penggantian kerusakan} &= 425,892 \text{ menit} \\
 &= 7,0982 \text{ jam} \\
 \text{Total biaya kerugian selama kerusakan} &= \text{Rp}178.000 \times 7,0982 \text{ jam} \\
 &= \text{Rp}1.263.480
 \end{aligned}$$

4. Biaya penggantian terencana/penggantian pencegahan (Cp)

$$\begin{aligned}
 C_p &= (\text{biaya tenaga kerja} + \text{biaya material}) \\
 &= (\text{Rp}303.000 + \text{Rp}324.170) \\
 &= \text{Rp}627.170
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 C_f &= (\text{Biaya tenaga kerja} + \text{biaya material} + \text{biaya kerugian selama kerusakan}) \\
 &= (\text{Rp}303.000 + \text{Rp}324.170 + \text{Rp}1.263.480) \\
 &= \text{Rp}1.890.650
 \end{aligned}$$

6. Biaya penggantian komponen sebelum adanya usulan perawatan pencegahan

$$\begin{aligned}
 \text{Frekuensi kerusakan} &= 13 \text{ kali} \\
 \text{Biaya Penggantian} &= 13 \times \text{Biaya tidak terencana (Failure Cost)} \\
 &= 13 \times \text{Rp}1.890.650 \\
 &= \text{Rp}24.578.444
 \end{aligned}$$

7. Biaya *preventive maintenance* menggunakan *Age Replacement*

$$\begin{aligned}
 C_{tp} &= \frac{C_p * T_{(tp)} + C_f(1 - R_{tp})}{(t_p + T_p)R_{tp} + (M_{tp} + T_f)(1 - R_{tp})} \\
 &= \frac{\text{Rp}627.170 * 277946 + \text{Rp}914.647(0,500257)}{(278372)0,4997 + (694933,1)(0,500257)} \\
 &= \text{Rp}358.123
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut dapat diketahui biaya perawatan komponen sebesar Rp358.123/sekali perawatan.

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

$$\begin{aligned}
 \text{Periode data kerusakan} &= 10 \text{ tahun} \\
 &= 120 \text{ bulan} \\
 \text{waktu interval penggantian komponen} &= 277945,638 \text{ menit}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 6,434 \text{ Bulan} \\
 \text{Total frekuensi perawatan komponen} &= 120/6 \\
 &= 18,651 \text{ kali} \\
 &\approx 19 \text{ kali} \\
 \text{Total biaya penggantian} &= \text{Frekuensi Perawatan} \times \text{Ctp} \\
 &= 19 \times \text{Rp}358.123 \\
 &= \text{Rp}6.804.333
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, dapat diketahui biaya yang dikeluarkan sebelum menggunakan *preventif maintenance* selama periode 10 tahun dengan total 13 kali kerusakan adalah sebesar Rp24.578.444. Sedangkan biaya penggantian usulan yang didapatkan setelah menggunakan *preventif maintenance* adalah sebesar Rp6.804.333, sehingga selisih antara *preventif maintenance* awal dengan yang baru sebesar Rp17.774.111 dengan frekuensi perawatan selama periode 10 tahun adalah sebanyak 19 kali.

4.6.14 Hasil Analisa RCM Untuk Seluruh Komponen Kritis

Melanjutkan analisis *Reliability-Centered Maintenance* (RCM), strategi perawatan preventif yang optimal juga berhasil diidentifikasi untuk komponen kritis lainnya dari Pemutus Tenaga (PMT). Untuk komponen Kontak Utama, direkomendasikan interval waktu *maintenance* setiap 115,86 hari dengan interval inspeksi setiap 9 hari. Strategi ini diestimasi dapat menurunkan biaya perawatan secara signifikan dari Rp32.548.947 menjadi Rp10.031.518, sehingga menghasilkan penghematan sebesar Rp22.517.429. Sementara itu, pada komponen *Interrupter*, jadwal perawatan preventif yang diusulkan adalah setiap 326,93 hari dengan inspeksi setiap 11 hari, yang berpotensi menekan biaya dari Rp20.041.539 menjadi Rp3.344.609 atau setara dengan efisiensi sebesar Rp16.696.930. Fokus analisis yang diprioritaskan hanya pada komponen-komponen kritis ini didasarkan pada prinsip fundamental RCM, di mana tidak semua komponen memiliki dampak yang sama terhadap kegagalan sistem; komponen-komponen terpilih ini memiliki pengaruh dominan terhadap keandalan operasional PMT, sehingga alokasi sumber daya perawatan secara intensif pada elemen-elemen tersebut merupakan pendekatan yang paling efektif dan efisien secara biaya untuk menjamin performa sistem secara keseluruhan.

Sebagai rekomendasi akhir untuk mempermudah implementasi dan efisiensi penjadwalan di lapangan, interval waktu *preventive maintenance* dapat disederhanakan. Untuk komponen Hidrolik dan Kontak Utama, jadwal perawatannya dapat disinkronkan

menjadi setiap 4 bulan sekali, dimana estimasi biaya perawatannya akan turun menjadi Rp4.230.283 untuk Hidrolik dan Rp10.390.154 untuk Kontak Utama. Konsekuensinya, perawatan untuk komponen *Interrupter* dapat dijadwalkan setiap 1 tahun sekali, dengan penurunan biaya perawatan menjadi Rp3.734.125. Dengan penerapan jadwal perawatan yang disederhanakan dan tersinkronisasi ini, maka keseluruhan penghematan biaya yang bisa dicapai dalam periode 10 tahun diestimasi sebesar Rp58.814.367.

BAB V PEMBAHASAN

5.1 Pengolahan Data EAC

Pengolahan data EAC bertujuan untuk menentukan umur ekonomis optimal PMT, dengan memperhitungkan biaya investasi, operasional, dan pemeliharaan. Nilai MARR sebesar 12% adalah parameter kunci yang mencerminkan tingkat pengembalian minimum yang diharapkan.

Analisis EAC menunjukkan bahwa umur ekonomis optimal PMT adalah 19 tahun, dengan nilai EAC terkecil sebesar Rp559.154.927. Ini menyiratkan bahwa secara finansial, akan lebih efisien bagi PLN untuk mengganti atau menjual PMT setelah 19 tahun, meskipun aset tersebut mungkin masih fungsional. Meneruskan penggunaan PMT setelah tahun ke-19 akan mengakibatkan peningkatan beban biaya tahunan, yang disebabkan oleh kombinasi biaya pemeliharaan yang meningkat dan penurunan nilai aset.

5.2 Penentuan Komponen Kritis

Penentuan komponen kritis merupakan tahapan fundamental dalam penerapan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM). Tahapan ini bertujuan untuk mengidentifikasi komponen-komponen dalam sistem Pemutus Tegangan (PMT) yang memiliki potensi risiko tertinggi dalam menyebabkan gangguan sistem secara keseluruhan. Dalam penelitian ini, proses identifikasi dilakukan secara bertahap melalui pendekatan diagram fungsional (FBD), analisis mode dan dampak kegagalan (FMEA), serta analisis logika pohon (LTA).

5.2.1 *Functional Block Diagram* (FBD)

Functional Block Diagram (FBD) berfungsi sebagai alat visual untuk memetakan aliran fungsi dan hubungan antar subsistem dalam PMT. Dengan membagi PMT ke dalam sistem kontrol (sekunder), mekanik (aksi), dan eksekusi (primer), FBD membantu mengidentifikasi titik-titik kritis dari input sinyal hingga pemutusan arus listrik. Hasil pemetaan menunjukkan bahwa kegagalan di subsistem kontrol dapat menyebabkan sistem gagal melakukan *switching*, yang berdampak langsung pada kontinuitas pasokan listrik. FBD memberikan pemahaman menyeluruh terhadap peran masing-masing komponen, serta membantu menilai dampak kegagalan fungsional secara sistemik. Seluruh subsistem dalam PMT saling berhubungan dan bekerja secara integratif; apabila satu subsistem mengalami gangguan atau tidak berfungsi sebagaimana mestinya, maka sistem PMT secara keseluruhan akan kehilangan

kemampuannya untuk beroperasi dengan baik, bahkan bisa menyebabkan sistem tidak berfungsi sama sekali.

Namun, FBD tidak menunjukkan kemungkinan kegagalan atau tingkat keparahannya. Oleh karena itu, FBD lebih tepat digunakan sebagai fondasi awal sebelum memasuki analisis risiko yang lebih detail seperti FMEA dan LTA.

5.2.2 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

FMEA adalah alat analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi potensi mode kegagalan dari setiap komponen, menilai dampaknya terhadap sistem, dan memberikan prioritas berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN). Dalam penelitian ini, FMEA menunjukkan bahwa sistem hidrolik memiliki nilai RPN tertinggi, yaitu 480, disebabkan oleh buruknya kualitas minyak hidrolik yang berdampak pada lambatnya gerakan PMT atau bahkan kegagalan *switching* total. Komponen kabel kontrol dan kontak utama juga menempati posisi risiko tinggi dengan RPN masing-masing 350 dan 315.

RPN diperoleh dari kombinasi antara tingkat keparahan (*Severity*), frekuensi kejadian (*Occurrence*), dan kemampuan deteksi (*Detection*). Skor-skor ini berdasarkan wawancara dengan teknisi, data historis kerusakan, dan manual teknis PMT. FMEA memberikan wawasan penting untuk menentukan komponen mana yang membutuhkan perhatian khusus dalam perawatan.

Tingginya nilai *Severity* pada FMEA di sebagian besar komponen adalah hal yang wajar mengingat fungsi utama PMT adalah untuk memutus arus gangguan. Jika PMT gagal menjalankan fungsinya, maka dapat terjadi kerusakan berat pada peralatan lain di sistem kelistrikan serta membahayakan lingkungan sekitarnya. Berdasarkan FBD yang telah dibuat sebelumnya, terlihat bahwa seluruh subsistem PMT saling berhubungan erat. Artinya, kerusakan atau cacat pada satu komponen saja dapat memengaruhi performa sistem selanjutnya secara langsung. Akibatnya, PMT tidak dapat menjalankan tugasnya secara maksimal, yang berpotensi menyebabkan ledakan atau kerusakan sistem lain. Hal inilah yang mendasari skor *Severity* yang tinggi pada banyak komponen dalam tabel FMEA.

Namun, metode ini tidak lepas dari keterbatasan. Skoring dapat bersifat subjektif, sehingga perlu dilakukan validasi silang dengan data kuantitatif maupun metode lain seperti *Root Cause Analysis* (RCA) untuk memperkuat hasil.

5.2.3 *Logic Tree Analysis (LTA)*

Logic Tree Analysis (LTA) digunakan untuk mengklasifikasikan mode kegagalan berdasarkan tingkat keterlihatan gejala (*evident*), risiko terhadap keselamatan (*safety*), dan potensi menyebabkan *outage*. Berdasarkan hasil LTA, diketahui bahwa kegagalan pada sistem hidrolik dan terminal kabel termasuk dalam kategori A, karena dapat mengganggu operasi dan membahayakan sistem.

Kelebihan LTA adalah kemampuannya dalam mengidentifikasi kegagalan tersembunyi (*hidden failure*) yang tidak langsung terlihat namun dapat berdampak besar, seperti pada penurunan kualitas gas SF₆. LTA juga mendukung keputusan dalam *task selection* karena memberikan pemahaman terhadap tingkat urgensi dan jenis perawatan yang dibutuhkan.

5.3 *Pengolahan Data Kualitatif RCM*

Setelah komponen kritis diidentifikasi, langkah selanjutnya adalah menentukan jenis tindakan perawatan yang sesuai dengan karakteristik kegagalan yang telah ditemukan. Pengolahan data kualitatif dalam konteks RCM ini mengarah pada proses pemilihan tugas (*task selection*).

5.3.1 *Task Selection*

Task selection dilakukan berdasarkan kombinasi hasil FMEA dan LTA. Penelitian ini mengelompokkan tindakan perawatan ke dalam tiga jenis utama: *time directed* (TD), *condition directed* (CD), dan *failure finding* (FF). Untuk komponen hidrolik, dengan RPN tertinggi dan risiko kritis, direkomendasikan tindakan CD berupa pengujian kualitas minyak secara berkala untuk mendeteksi penurunan viskositas atau kontaminasi. Sedangkan untuk komponen kabel kontrol, tindakan TD lebih sesuai berupa inspeksi dan pengencangan koneksi secara rutin.

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.

5.4 *Pengolahan Data Kuantitatif RCM*

Pengolahan data kuantitatif bertujuan untuk menentukan interval optimal pemeriksaan atau penggantian komponen berdasarkan distribusi statistik dari waktu antar kerusakan (*Time to*

Failure) dan waktu perbaikan (*Time to Repair*). Dalam penelitian ini, fokus diarahkan pada sistem hidrolik sebagai komponen paling kritis berdasarkan downtime dan nilai RPN.

Distribusi probabilitas diuji menggunakan metode *Least Square Curve Fitting* terhadap empat jenis distribusi: normal, lognormal, eksponensial, dan Weibull. Keempat distribusi ini dipilih karena secara umum mampu merepresentasikan berbagai pola distribusi data kegagalan dalam konteks keandalan sistem teknik. Distribusi normal digunakan untuk pola kegagalan yang simetris, lognormal untuk kegagalan yang meningkat seiring waktu, eksponensial untuk kegagalan yang terjadi secara acak dengan laju konstan, dan Weibull karena fleksibilitasnya dalam merepresentasikan berbagai bentuk distribusi kegagalan.

Penentuan distribusi terbaik dilakukan berdasarkan nilai *Index of Fit* (IOF), yaitu ukuran kecocokan antara data aktual dan kurva distribusi. Dalam penelitian ini, distribusi lognormal memberikan IOF tertinggi, yaitu 96,12%, untuk TTF dan hasil yang konsisten pada TTR. IOF yang tinggi menunjukkan bahwa data waktu kegagalan paling sesuai dimodelkan dengan distribusi lognormal. Namun karena IOF hanya mempertimbangkan persentase kesesuaian dan bersifat subjektif terhadap bentuk kurva, maka untuk memperkuat validitas, dilakukan pula uji statistik *Goodness of Fit*. Uji *Goodness of Fit* yang digunakan dalam penelitian ini adalah uji *Kolmogorov-Smirnov*. Hasil uji menunjukkan bahwa distribusi lognormal memiliki nilai signifikansi di atas nilai *alpha* 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan signifikan antara distribusi lognormal dengan data aktual, dan model tersebut dapat diterima secara statistik.

Berdasarkan hasil distribusi ini, perhitungan interval waktu penggantian pencegahan dengan pendekatan minimasi *downtime* dilakukan menggunakan metode *Age Replacement*. Metode ini menghasilkan waktu optimal penggantian komponen sistem hidrolik sebesar 277945,6378 menit atau 6,43 bulan dengan tujuan perawatan pencegahan untuk bertindak sebelum kegagalan terjadi. Meskipun ini dapat meminimalkan *downtime* yang tidak terencana, peningkatan frekuensi perawatan perlu diimbangi dengan ketersediaan sumber daya, jadwal, dan potensi gangguan operasional yang lebih sering. Sebagai pelengkap, dilakukan juga analisis biaya untuk membandingkan total biaya perawatan aktual dengan biaya usulan berdasarkan interval yang diperoleh. Total biaya perawatan aktual tercatat sebesar Rp24.578.444 dengan total 13 kerusakan, sedangkan biaya perawatan usulan berdasarkan metode RCM dan *Age Replacement* diperkirakan sebesar Rp6.804.333. Perbandingan ini menunjukkan adanya penurunan biaya sebesar Rp20.348.161 atau sekitar

72%, yang mengindikasikan bahwa pendekatan ini tidak hanya meningkatkan keandalan tetapi juga efisiensi biaya operasional.

Melalui penerapan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) juga dapat dilakukan analisis perbandingan tingkat keandalan Pemutus Tenaga (PMT) terhadap waktu pada berbagai kondisi pemeliharaan. Analisis ini memberikan gambaran perubahan reliabilitas baik tanpa perawatan, dengan perawatan preventif berkala, maupun dengan pemulihan keandalan setiap interval pemeliharaan. Hasil perbandingan tersebut ditampilkan pada grafik pada Gambar 4.4 yang menggambarkan perubahan reliabilitas Pemutus Tenaga (PMT) terhadap waktu pada tiga kondisi, yaitu tanpa *preventive maintenance* $R(t)$, dengan *preventive maintenance* kumulatif $R_m(t)$, dan *preventive maintenance* setiap interval T hari $R(t - nT)$. Kurva $R(t)$ menunjukkan penurunan keandalan yang tajam, sedangkan $R_m(t)$ menurun lebih lambat karena adanya perawatan berkala. Sementara itu, $R(t - nT)$ memperlihatkan lonjakan reliabilitas setiap kali *preventive maintenance* dilakukan. Sebagai contoh, pada hari ke-202 reliabilitas $R(t)$ berada di sekitar 0,50, sementara $R(t - nT)$ meningkat kembali hingga sekitar 0,9 setelah perawatan. Hal ini menunjukkan bahwa *preventive maintenance* efektif mempertahankan reliabilitas sistem mendekati kondisi awal dan memperpanjang umur pakai PMT.

Sebagai rekomendasi akhir dan melanjutkan analisis *Reliability-Centered Maintenance* (RCM), untuk efisiensi implementasi, jadwal *preventive maintenance* disederhanakan: komponen Hidrolik dan Kontak Utama disinkronkan untuk perawatan setiap 4 bulan sekali, dengan estimasi biaya masing-masing Rp4.230.283 dan Rp10.390.154. Selanjutnya, komponen *Interrupter* dijadwalkan setiap 1 tahun sekali dengan biaya Rp3.734.125. Jadwal praktis ini menghasilkan total estimasi penghematan biaya selama 10 tahun sebesar Rp58.814.367.

BAB VI PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini, beberapa kesimpulan penting dapat ditarik sesuai dengan tujuan penelitian:

1. Penerapan metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) menunjukkan bahwa umur ekonomis optimal untuk Pemutus Tegangan (PMT) adalah 19 tahun. Pada tahun ke-19, nilai EAC mencapai titik terendah sebesar Rp559.154.927. Temuan ini mengindikasikan bahwa penjualan atau penggantian PMT setelah periode 19 tahun akan meminimalkan total beban biaya tahunan, sehingga mendukung efisiensi biaya dan pengambilan keputusan penggantian aset yang strategis bagi PT PLN UIP3B Sumatera.
2. Berdasarkan analisis *downtime* aktual dan metode FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) di PT PLN UIP3B Sumatera, tiga komponen utama yang teridentifikasi sebagai komponen kritis pada Pemutus Tegangan (PMT) adalah sistem Hidrolik, Kontak Utama, dan *Interrupter*. Dari ketiganya, sistem hidrolik memiliki kontribusi *downtime* terbesar (26.7%) dan nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi (480). Hal ini menunjukkan ketiga komponen kritis tersebut merupakan prioritas utama dalam upaya peningkatan keandalan PMT.
3. Hasil penerapan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dan penyesuaian berdasarkan jadwal lapangan menghasilkan rekomendasi jadwal perawatan untuk komponen kritis adalah sebagai berikut. Komponen Hidrolik dan Kontak Utama direkomendasikan untuk dirawat secara sinkron setiap 4 bulan, dengan interval inspeksi masing-masing 10 dan 9 hari, yang memberikan potensi penghematan biaya sebesar Rp20.348.161 dan Rp22.158.793. Sementara itu, komponen *Interrupter* dijadwalkan untuk perawatan setiap 1 tahun dengan interval inspeksi 11 hari, yang menghasilkan penghematan sebesar Rp16.307.414.

6.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan di atas dan hasil pembahasan, berikut adalah beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya dan implementasi di PT PLN UIP3B Sumatera:

1. Ekspansi analisis komponen kritis, meskipun penelitian ini berfokus pada sistem hidrolik, disarankan untuk memperluas analisis RCM ke komponen-komponen kritis lain yang juga memiliki RPN tinggi dan dampak signifikan pada sistem, seperti Kontak Utama dan

Kabel Kontrol & Terminal. Ini akan memberikan program perawatan preventif yang lebih komprehensif untuk seluruh PMT.

2. Analisis sensitivitas parameter, penelitian selanjutnya dapat melakukan analisis sensitivitas yang lebih mendalam terhadap parameter-parameter kunci dalam perhitungan EAC seperti MARR. Hal ini akan membantu dalam memahami bagaimana fluktuasi nilai-nilai tersebut memengaruhi umur ekonomis optimal PMT.
3. Integrasi faktor non-moneter, dalam menentukan keputusan penggantian aset, disarankan untuk tidak hanya mempertimbangkan aspek biaya (EAC), tetapi juga faktor-faktor non-moneter seperti kemudahan operasional, ketersediaan suku cadang, dan biaya pelatihan ulang teknisi untuk peralatan baru.
4. Pengumpulan data yang lebih detail dan konsisten, untuk meningkatkan akurasi analisis keandalan, PT PLN UIP3B Sumatera disarankan untuk terus mengumpulkan data historis *downtime* dan *repair time* yang lebih detail, termasuk penyebab akar kegagalan spesifik dan kondisi operasional terkait. Data yang lebih kaya akan memungkinkan permodelan keandalan yang lebih presisi di masa mendatang.
5. Optimalisasi jadwal perawatan berdasarkan ketersediaan sumber daya, meskipun interval perawatan yang optimal telah ditentukan, implementasinya harus mempertimbangkan ketersediaan tenaga kerja, suku cadang, dan jadwal operasional PLN. Optimalisasi jadwal dapat dilakukan dengan mempertimbangkan batasan sumber daya dan meminimalkan gangguan pada pasokan listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- 99 Admin. (2025, March 26). *Daftar Harga Besi Bekas per Kg Berbagai Jenis Terbaru 2024, Alternatif Besi Baru!* 99 PANDUAN PROPERTI.
- Afris, W. H., Katili, C. A. M., & Nurvadillah. (2023). PENENTUAN INTERVAL WAKTU PERAWATAN MESIN ALAT ANGKUT CRANE DENGAN METODE RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM) (STUDI KASUS : PT. XYZ). *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri X*.
- Alrifae, M., Hong, T. S., As'array, A., Supeni, E. E., & Ang, C. K. (2020). Optimization and selection of maintenance policies in an electrical gas turbine generator based on the hybrid reliability-centered maintenance (RCM) model. *Processes*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/PR8060670>
- Anestesia Purba, A., Sunani, A., & Prabowo, I. P. D. A. S. (2022). Analisis Penggantian Mesin Hot Press dengan Menggunakan Metode Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC) di PT Xyz. *Jurnal Teknik Industri*, 8(2).
- Apriani, Y., & Kenotariatan, M. (2023). Permasalahan Dan Upaya Dalam Pengelolaan Aset Tanah BUMN (Studi Kasus Pt PLN (Persero)). *Jurnal Ilmu Sosial Dan Pendidikan (JISIP)*, 7(1), 2598–9944. <https://doi.org/10.58258/jisip.v7i1.4142/http>
- Cahyo, W. N. (2019). *Engineering Asset Management (Pengantar Manajemen Aset) Industri berbasis ISO 55000* (Vol. 1). Universitas Islam Indonesia.
- Cahyo, W. N. (2020). *Framework Peningkatan Kinerja Sistem manajemen Aset Berbasis ISO 55001 & ISO 31000* (Vol. 1). Universitas Islam Indonesia.
- Devani, V., & Maidila, C. N. (2021). Optimasi Penjadwalan dan Usulan Preventive Maintenance pada Mesin Turbin menggunakan Model Age Replacement. *Seminar Nasional Teknologi Informasi Komunikasi Dan Industri*, 217.
- Ebeling, C. E. (1997). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. McGraw-Hill.
- Farid, D. A., Budiasih, E., & Alhilman, J. (2020). USULAN INTERVAL PERAWATAN OPTIMAL MESIN MILLING MENGGUNAKAN METODE RISK BASED MAINTENANCE DAN ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS DI PT INDO INTEGRAL SEKAWAN. *E-Proceeding of Engineering*, 7(2).
- Fauliyadi, F., Nalhadi, A., Cahyadi, D., Sucipto, E. H., & Supriyadi, S. (2021). PERENCANAAN SISTEM PERAWATAN MESIN DUST COLLECTOR PECS ID FAN MENGGUNAKAN METODE RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE. *JENIUS : Jurnal Terapan Teknik Industri*, 2(1), 33. <https://doi.org/10.37373/jenius.v2i1.102>

- Fitriono, Almayrobby, A. A., & Kurniawan, T. (2022). Analisa Kemampuan Kerja Tripping Coil pada Pemutus Tenaga (Pmt) 150 KV di Bay Kapasitor Gardu Induk Kotabumi PT.PLN (Persero). *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro UML (JITRO-UML)*, 5(1), 14–23.
- Geisbush, J., & Ariaratnam, S. T. (2023). Failure Prevention in Large-Diameter Water Pipelines Using Reliability-Centered Maintenance. *Water (Switzerland)*, 15(24), 2. <https://doi.org/10.3390/w15244283>
- Goenaga-Pérez, A., Álvarez-Sanz, M., Terés-Zubiaga, J., & Campos-Celador, A. (2023). Cost-effectiveness and minimum requirements of nZEB for residential buildings under the new Spanish Technical Building Code. *Energy and Buildings*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112986>
- Han, D., Qi, H., & Xie, A. (2022). Research on the Application of EAA and EAC. *Proceedings of the 2022 International Conference on Mathematical Statistics and Economic Analysis (MSEA 2022)*, 54. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-042-8_112
- Hidayat, U., ikhsan, S., Risnaningsih, I., & Pratomo.SP, T. A. (2021). IMPLEMENTASI MANAJEMEN ASET TETAP PADA KOPERASI FUNGSIONAL DALAM UPAYA OPTIMALISASI PEMANFAATAN ASET TETAP. *JURNAL ILMIAH MULTI DISIPLIN INDONESIA*, 1(2).
- Iskandar, N., Sulardjaka, & Pradyta, A. (2021). Studi dan Aplikasi Reliability Centered Maintenance pada Hoist Crane. *ROTASI*, 23(4), 52–53.
- Kautsar Ilmi, R., Sukrawan, Y., & Permana, T. (2024). CONDITION BASED MONITORING IMPROVES COMPONENT DURABILITY IN HEAVY EQUIPMENT MAINTENANCE. *Journal of Automotive Engineering Education*, 2(1).
- Koamri, A., Salsabillah, V. K., Indrasari, L. D., Pradana, J. A., & Tripariyanto, A. Y. (2023). PERENCANAAN PENGGANTIAN MESIN CUTTING MENGGUNAKAN METODE REPLACEMENT ANALYSIS DALAM PENDEKATAN EKONOMI TEKNIK PADA CV. MUSTA'IM. *JURNAL HEURISTIC*, 20(1), 57–70.
- Maryam, U., Somayasa, W., Gubu, L., & Jufra. (2022). ESTIMASI PARAMETER DAN UJI GOODNESS OF FIT UNTUK DATA BINER BERPASANGAN. *Jurnal Matematika, Komputasi Dan Statistika*, 2(1), 2.
- Muhtadi, A., & Puspitasari, D. E. (2021). PENENTUAN INTERVAL WAKTU PERAWATAN MESIN INJECTION MOULDING MENGGUNAKAN METODE RCM DI PT “X.” *INFO TEKNIK*, 22(2), 141–156.
- Nevada, F. S., Utomo, E. B., Darojah, Z., & Kusumawati, E. (2024). Perhitungan Risk Priority Number Menggunakan Metode Failure Mode and Effect Analysis pada Modular Production System. *SNESTIK*, 4, 436. <https://doi.org/10.31284/p.snestik.2024.5569>
- Nyoman Widyastuti, L. (2014). ANALISIS GANGGUAN SISTEM TRANSMISI LISTRIK MENGGUNAKAN METODE ROOT CAUSE ANALYSIS (RCA). *Industrial Engineering Online Jurnal*.

- Pangestuti, D. C., Nastiti, H., & Husniaty, R. (2022). Analisis Risiko Operasional Dengan Metode FMEA. *Jurnal Akuntansi, Ekonomi Dan Manajemen Bisnis*, 10(2), 178.
- Pardiyono, R., & Suryani, P. (2020). MENINGKATKAN KEANDALAN KOMPONEN MESIN DAN MINIMASI DOWNTIME PADA MESIN PICANOL GTX SERI 22844. *Jurnal Ilmiah Nasional Bidang Ilmu Teknik*, 08(1), 3.
- Pioneer Lithium Ltd. (2025, June 11). *PLN Cost of Equity*. ALPHA SPREAD.
- Pranata, S. E., & Tjahjaningsih, Y. S. (2023). *Analisis Perbandingan Nilai Ekonomis Mobil Listrik dan Mobil Konvensional Dengan Pendekatan Total Cost of Ownership (TCO) / JISE* (Vol. 2, Issue 2).
- Purba, S., Parinduri, L., & Harahap, B. (2021). PENENTUAN INTERVAL WAKTU PREVENTIF MAINTENANCE PADA MESIN OPEN TOP ROLLER MENGGUNAKAN METODE RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE DI UNIT PABRIK TEH KEBUN TOBASARI PT. PERKEBUNAN NUSANTARA IV. *Buletin Utama Teknik*, 16(2), 1410–4520.
- Qurratulaini, N. F., Khairansyah, M. D., & Amrullah, H. N. (2025). Penilaian Risiko Kegagalan Gantry Crane Menggunakan Failure Mode Effect and Analysis (FMEA) dan Fishbone Diagram. *Journal of Safety, Health, and Environmental Engineering*, 3, 34. <https://doi.org/10.35991/jshee.v3i1.56>
- Saidah, S., Rahayui, K. D., & Hedra, J. (2024). Time Value of Money Versus Economic Value of Time dalam Keuangan Syari'ah. *Indonesian Research Journal on Education*, 4, 2921. <https://irje.org/index.php/irje>
- Satrijo, D., Suprihanto, A., Kurdi, O., Wibowo, D. B., Haryadi, G. D., Umardani, Y., Rozi, K., & Pratomo, M. F. A. (2021). Penggunaan metode Reliability-Centered Maintenance untuk menjaga keandalan material belt conveyor. *Jurnal Material Teknologi Proses: Warta Kemajuan Bidang Material Teknik Teknologi Proses*, 2(1), 4. <https://doi.org/10.22146/jmtp.66163>
- Siagian, P., Kuswandi, S., Mukrim, M. I., Tongeng, A. B., Alyah, R., Ameati, H. S., Widarman, A., Siagian, L., & Rosytha, A. (2023). *Ekonomi Teknik* (M. J. F. Sirait & D. D. Pratama, Eds.; 1st ed.). Yayasan Kita Menulis.
- Simbolon, R., Simbolon, D., Paris, D., & Ginting, J. (2020). PERANCANGAN INTERVAL PERAWATAN MESIN SECARA PREVENTIVE MAINTENANCE DENGAN METODE RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE II (RCM II). *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, 1(3).
- Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R. (2004). *RCM-GATEWAY TO WORLD CLASS MAINTENANCE*. Elsevier Butterworth-Heinemann. www.bh.com
- Tjakra, G. P. K. J., Langi, J. E. Ch., & Malingkas, G. Y. (2013). ANALISIS LIFE CYCLE COST PADA PEMBANGUNAN GEDUNG (Studi Kasus : Proyek Bangunan Rukan Bahu Mall Manado). *Jurnal Sipil Statik*, 1(8), 550.

- Wibowo, T. J., Syarif Hidayatullah, T., Nalhadi, A., & Teknik, F. (2021). Analisa Perawatan pada Mesin Bubut dengan Pendekatan Reliability Centered Maintenance (RCM). *Jurnal Rekayasa Industri (JRI)*, 3(2).
- Yusuf, M., & Budiawan, W. (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, 6.

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
							63/81	70/90	70/99	75/108
								70/100	60/110	66/120
								80/100	77/110	80/120
									77/121	72/132
									88/121	86/132
										96/144
										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, $D_\alpha = 1.63 \sqrt{\frac{15+28}{15 \cdot 28}} = 0.522$.

B-Tabel Faktor Bunga Majemuk ($i = 12\%$)

Tabel H-17
12 % Faktor Bunga Majemuk

n	Pembayaran Tunggal		Seri Kesamaan				n
	Faktor Jumlah Majemuk	Faktor Nilai Sekarang	Faktor Penyimpasan dana	Faktor Pengembalian Modal	Faktor Jumlah Majemuk	Faktor Nilai Sekarang	
	F/P	P/F	A/F	A/P	F/A	P/A	
1	1,1200	0,8929	1,00000	1,12000	1,000	0,893	1
2	1,2544	0,7972	0,47170	0,59170	2,120	1,690	2
3	1,4049	0,7118	0,29835	0,41635	3,374	2,402	3
4	1,5735	0,6355	0,20923	0,32923	4,779	3,037	4
5	1,7623	0,5674	0,15741	0,27741	6,353	3,605	5
6	1,9738	0,5066	0,12323	0,24323	8,115	4,111	6
7	2,2107	0,4523	0,09912	0,21912	10,089	4,564	7
8	2,4760	0,4039	0,08130	0,20130	12,300	4,968	8
9	2,7731	0,3606	0,06768	0,18768	14,776	5,328	9
10	3,1058	0,3220	0,05698	0,17698	17,549	5,650	10
11	3,4785	0,2875	0,04842	0,16842	20,655	5,938	11
12	3,8960	0,2567	0,04144	0,16144	24,133	6,194	12
13	4,3635	0,2292	0,03568	0,15568	28,029	6,424	13
14	4,8871	0,2046	0,03087	0,15087	32,393	6,628	14
15	5,4736	0,1827	0,02682	0,14682	37,280	6,811	15
16	6,1304	0,1631	0,02339	0,14339	42,753	6,974	16
17	6,8660	0,1456	0,02046	0,14046	48,884	7,120	17
18	7,6900	0,1300	0,01794	0,13794	55,750	7,250	18
19	8,6128	0,1161	0,01576	0,13576	63,440	7,366	19
20	9,6463	0,1037	0,01388	0,13388	72,052	7,469	20
21	10,8038	0,0926	0,01224	0,13224	81,699	7,562	21
22	12,1003	0,0826	0,01081	0,13081	92,503	7,645	22
23	13,5523	0,0738	0,00956	0,12956	104,603	7,718	23
24	15,1786	0,0659	0,00846	0,12846	118,155	7,784	24
25	17,0001	0,0588	0,00750	0,12750	133,334	7,843	25
26	19,0401	0,0525	0,00665	0,12665	150,334	7,896	26
27	21,3249	0,0469	0,00590	0,12590	169,374	7,943	27
28	23,8839	0,0419	0,00524	0,12524	190,699	7,984	28
29	26,7499	0,0374	0,00466	0,12466	214,583	8,022	29
30	29,9599	0,0334	0,00414	0,12414	241,333	8,055	30
31	33,5551	0,0298	0,00369	0,12369	271,293	8,085	31
32	37,5817	0,0266	0,00328	0,12328	304,848	8,112	32
33	42,0915	0,0238	0,00292	0,12292	342,429	8,135	33
34	47,1425	0,0212	0,00260	0,12260	384,521	8,157	34
35	52,7996	0,0189	0,00232	0,12232	431,663	8,176	35
40	93,0510	0,0107	0,00130	0,12130	767,091	8,244	40
45	163,9876	0,0061	0,00074	0,12074	1358,230	8,283	45
50	289,0022	0,0035	0,00042	0,12042	2400,018	8,304	50
∞				0,12000		8,333	∞

C-1 *Template* Excel Perhitungan RCM

Link Perhitungan RCM dengan Software EXCEL: [Perhitungan RCM 2.0.xlsx](#)

C-2 *Template* Excel Perhitungan EAC

Link Perhitungan EAC dengan Software EXCEL: [PERHITUNGAN EAC.xlsx](#)