

**PENENTUAN UMUR EKONOMIS *EQUIPMENT AIR COMPRESSOR SYSTEM*
BERBASIS *LIFE CYCLE COST ANALYSIS (LCCA)* MENGGUNAKAN
PENDEKATAN *EQUIVALENT ANNUAL COST (EAC)* DI PT. XYZ**

TUGAS AKHIR

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



Nama : Syafa Alan Darma Saputra
No. Mahasiswa : 22522138

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2026**

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, 28 April 2026



Syafa Alan Darma Saputra

22522138

SURAT BUKTI PENELITIAN



**FAKULTAS
TEKNOLOGI INDUSTRI**

Gedung XII, Mas Mansur
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kalirejo km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext. 4100, 4101
F. (0274) 895007
E. ti@uii.ac.id
W. ti.uii.ac.id

SURAT KETERANGAN PENELITIAN

Nomor: 017/Ka.Lab.Datmin/70/Lab.Datmin/V/2026

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Kami yang bertanda tangan dibawah ini, menerangkan bahwa mahasiswa dengan keterangan sebagai berikut :

Nama : Syafa Alan Darma Saputra
No. Mhs : 22522138
Dosen Pembimbing : Ir. Winda Nur Cahyo, S.T., M.T., Ph.D., IPM., ASEAN Eng., APEC Eng.

Telah selesai melaksanakan penelitian yang berjudul " PENENTUAN UMUR EKONOMIS EQUIPMENT AIR COMPRESSOR SYSTEM BERBASIS LIFE CYCLE COST ANALYSIS (LCCA) MENGGUNAKAN PENDEKATAN EQUIVALENT ANNUAL COST (EAC) DI PT. XYZ" di Laboratorium Data Mining, Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia tercatat mulai tanggal 20 Maret 2026 sampai dengan tanggal 21 April 2026.

Demikian surat keterangan kami keluarkan, agar dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, 19 Mei 2026

Kepala Laboratorium
Data Mining

Dr. Dwi Adi Purnama, S.T.

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING
PENENTUAN UMUR EKONOMIS *EQUIPMENT AIR COMPRESSOR SYSTEM*
BERBASIS *LIFE CYCLE COST ANALYSIS (LCCA)* MENGGUNAKAN
PENDEKATAN *EQUIVALENT ANNUAL COST (EAC)* DI PT. XYZ



TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Syafa Alan Darma Saputra

No. Mahasiswa : 22522138

Yogyakarta, 28 April 2026

Dosen Pembimbing



Ir. Winda Nur Cahyo, S. T., Ph.D, IPM., ASEAN.Eng.,APEC.Eng.

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

PENENTUAN UMUR EKONOMIS *EQUIPMENT AIR COMPRESSOR SYSTEM* BERBASIS *LIFE CYCLE COST ANALYSIS (LCCA)* MENGGUNAKAN PENDEKATAN *EQUIVALENT ANNUAL COST (EAC)* DI PT. XYZ

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Syafa Alan Darma Saputra

No. Mahasiswa : 22522138

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

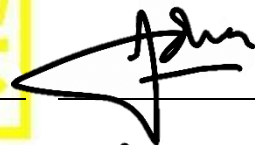
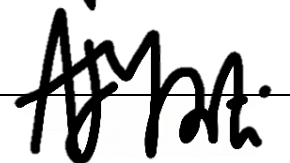
Yogyakarta, 5 Juni 2026

Tim Penguji

Ir. Winda Nur Cahyo, S. T., Ph.D, IPM., ASEAN.Eng.,APEC Eng
Ketua

Dr. Joko Sulistio, S.T., M.Sc., M.T.
Anggota I

Atyanti Dyah Prabaswari, S.T., M.Sc.
Anggota II

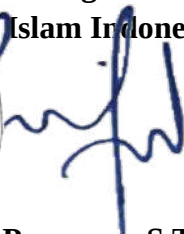




Mengetahui,

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.

NIK. 01522010

HALAMAN PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmanirrahim

Alhamdulillah, dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT, Tugas Akhir ini saya persembahkan kepada kedua orang tua saya tercinta yang selalu memberikan doa, kasih sayang, serta dukungan tanpa henti dalam setiap langkah saya, serta kepada Bapak Ir. Winda Nur Cahyo, S. T., Ph.D, IPM., ASEAN.Eng.,APEC Eng. Selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberi arahan, bimbingan, dan ilmu yang sangat berarti hingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

MOTTO

"Dan bahwasanya seorang manusia tiada memperoleh selain apa yang telah diusahakannya."

(QS. An-Najm: 39)

"Sepi ing pamrih, rame ing gawe."

(K.G.P.A.A Mangkunegaran I)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, atas segala rahmat, hidayah, dan karunia nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan baik. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat, dan seluruh umatnya yang istiqomah menebar ilmu dan kebaikan. Laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Sarjana (S1) di Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia. Selama proses penyusunan laporan Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan bimbingan, arahan, serta dukungan yang sangat berarti dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu, di antaranya:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Hari Purnomo, M.T., IPU., ASEAN.Eng. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
2. Bapak Dr. Drs. Imam Djadi Widodo, M.Eng.Sc. selaku Ketua Jurusan Teknik Industri, Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM. Selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Ir. Winda Nur Cahyo, S.T., M.T., Ph.D., IPM., ASEAN.Eng., APEC Eng. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang memberikan arahan, bimbingan, dan ilmu yang sangat berarti sehingga penulis menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini.
5. Segenap Dosen Teknik Industri Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan keilmuan melalui pengajaran yang dapat diimplementasikan pada dunia praktik.
6. Kedua Orang tua yang selalu memberikan doa, kasih sayang, dan dukungan kepada penulis.
7. Seluruh keluarga yang selalu memberikan doa dan dukungan dalam melaksanakan Tugas Akhir dan dukungan dalam melaksanakan Tugas Akhir dan dalam mengerjakan laporan ini.
8. Teman - teman penulis yang selalu memberikan dukungan, bantuan, serta motivasi selama melaksanakan Tugas Akhir dan mengerjakan laporan.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan laporan ini di masa mendatang.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Yogyakarta, 28 April 2026



Syafa Alan Darma Saputra
NIM 22522138

ABSTRAK

Keandalan dan ketersediaan peralatan operasional sangat penting dalam industri Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi guna menjaga stabilitas pasokan listrik nasional. PT. XYZ menghadapi tantangan terkait tingginya frekuensi kerusakan pada peralatan kritis penunjang operasional, yaitu *equipment Air Compressor System*. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan umur ekonomis *Air Compressor System* berdasarkan perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dengan pendekatan *Equivalent Annual Cost* (EAC) sebagai dasar pengambilan keputusan perbaikan atau pergantian peralatan di PT. XYZ. Penelitian ini menggunakan data historis pemeliharaan yang meliputi *Corrective*, *Preventive*, dan *Predictive Maintenance* dari sistem SAP IW39 periode 2016 - 2023. Pengolahan data diawali dengan penentuan parameter keandalan, di mana pengujian kesesuaian distribusi menunjukkan bahwa *Mean Time Between Failure* (MTBF) menggunakan distribusi Eksponensial dan *Mean Time To Repair* (MTTR) menggunakan distribusi Lognormal. Selanjutnya, Simulasi Monte Carlo diaplikasikan untuk memproyeksikan ketidakpastian frekuensi kegagalan sistem di masa depan secara probabilistik berdasarkan data *Corrective Maintenance*. Proyeksi tersebut kemudian diintegrasikan ke dalam perhitungan LCCA untuk mengestimasi total biaya siklus hidup, yang mencakup biaya investasi awal, pemeliharaan rutin, serta kerugian produksi akibat berhentinya operasi (*opportunity lost*). Terakhir, metode EAC digunakan untuk mengonversi akumulasi biaya kumulatif tersebut menjadi nilai biaya tahunan ekuivalen guna mempermudah evaluasi ekonomi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tren biaya perawatan terus meningkat seiring bertambahnya umur peralatan. Berdasarkan kalkulasi, total biaya EAC terendah tercapai pada tahun operasional tahun ke 34, yaitu pada proyeksi tahun 2049. Pada titik tersebut, nilai EAC tercatat sebesar Rp154.263.116.692,35. Titik biaya terendah ini ditetapkan sebagai umur ekonomis dari *Air Compressor System* karena merepresentasikan beban biaya tahunan yang paling efisien. Temuan ini memberikan landasan strategis berbasis data bagi pihak manajemen PT. XYZ untuk melakukan penggantian atau perbaikan besar (*overhaul*) sistem pada tahun tersebut.

Kata Kunci: Manajemen Aset, *Air Compressor System*, Simulasi Monte Carlo, *Life Cycle Cost Analysis*, *Equivalent Annual Cost*, Umur Ekonomis.

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	ii
SURAT BUKTI PENELITIAN.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING.....	iv
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
MOTTO.....	vii
KATA PENGANTAR	viii
ABSTRAK.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Kajian Literatur.....	7
2.2 Landasan Teori	10
2.2.1 Manajemen Aset.....	10
2.2.2 Perawatan (<i>Maintenance</i>).....	10
2.2.3 Jenis-jenis Perawatan.....	11
2.2.4 Distribusi	11
2.2.5 Simulasi	13
2.2.6 Simulasi Monte Carlo.....	13
2.2.7 <i>Mean Time Between Failure</i> (MTBF).....	13
2.2.9 <i>Life Cycle Cost Analysis</i> (LCCA)	14
2.2.10 Ekonomi Teknik	15
2.2.11 <i>Equivalent Annual Cost</i> (EAC)	15
2.2.12 <i>Minimum Attractive Rate of Return</i> (MARR)	15
BAB III METODE PENELITIAN	17
3.1 Objek Penelitian	17
3.2 Subjek Penelitian	17
3.3 Metode Pengumpulan Data	17
3.4 Diagram Alur Penelitian.....	18
3.4.1 Mulai.....	20
3.4.2 Identifikasi Masalah	20
3.4.3 Rumusan Masalah dan Tujuan Penelitian	21
3.4.4 Menentukan Batasan Penelitian	21
3.4.5 Penentuan Metode	22
3.4.6 Pengumpulan Data.....	22
3.4.7 Pengolahan Data Kuantitatif (Distribusi)	22
3.4.8 Pengolahan Data Kuantitatif (Simulasi Monte Carlo).....	22

3.4.9	Pengolahan Data Kuantitatif Life Cycle Cost Analysis (LCCA)	23
3.4.10	Pengolahan Data Kuantitatif Equivalent Annual Cost (EAC)	23
3.4.11	Analisis dan Pembahasan	24
3.4.12	Kesimpulan dan Saran	24
3.4.13	Selesai	24
BAB IV	PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA	25
4.1	Pengumpulan Data	25
4.1.1	Sumber dan Karakteristik Data	25
4.1.2	Review Kelengkapan Data	25
4.1.3	Data Jenis Perawatan Corrective Maintenance (CM)	27
4.1.4	Data Jenis Perawatan Preventive Maintenance (PM)	28
4.1.5	Data Jenis Perawatan Predictive Maintenance (PdM)	29
4.2	Pengolahan Data	30
4.2.1	Penentuan Distribusi Antar Waktu Kerusakan (Time Between Failure)	30
4.2.2	Penentuan Distribusi Antar Waktu Perbaikan (Time to Repair)	33
4.3	Pengolahan Data Kuantitatif (Monte Carlo)	35
4.3.1	Penentuan Parameter Distribusi (MTBF & MTTR)	35
4.3.2	Mekanisme Pembangkitan Bilangan Acak (Probabilistik)	36
4.3.3	Garis Waktu dan Penentuan Frekuensi Kerusakan	37
4.4	Pengolahan Data Kuantitatif <i>Life Cycle Cost Analysis</i> (LCCA)	37
4.4.1	Perhitungan Biaya Corrective Maintenance	38
4.4.2	Perhitungan Biaya Preventive Maintenance	40
4.4.3	Perhitungan Biaya Predictive Maintenance	43
4.4.4	Perhitungan Total Maintenance Cost	45
4.4.5	Perhitungan Opportunity Lost	47
4.5	Pengolahan Data Kuantitatif <i>Equivalent Annual Cost</i> (EAC)	52
4.5.1	Konsep EAC dan Investasi Awal	52
4.5.2	Hasil Perhitungan EAC	53
BAB V	PEMBAHASAN	57
5.1	Hasil Analisis Simulasi Monte Carlo	57
5.2	Hasil Analisis <i>Life Cycle Cost Analysis</i> (LCCA)	57
5.3	Hasil Analisis <i>Equivalent Annual Cost</i> (EAC)	58
BAB VI	PENUTUP	60
6.1	Kesimpulan	60
6.2	Saran	60
DAFTAR PUSTAKA		62
LAMPIRAN		A-1

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Posisi Penelitian	8
Tabel 4. 1 <i>Field</i> Informasi SAP IW39	26
Tabel 4. 2 <i>Corrective Maintenance</i>	28
Tabel 4. 3 <i>Preventive Maintenance</i>	29
Tabel 4. 4 <i>Predictive Maintenance</i>	29
Tabel 4. 5 <i>Time Between Failure</i>	31
Tabel 4. 11 <i>Time to Repair</i>	33
Tabel 4. 17 Parameter JASP	36
Tabel 4. 18 perhitungan biaya <i>Corrective Maintenance</i>	39
Tabel 4. 19 perhitungan biaya <i>Preventive Maintenance</i>	41
Tabel 4. 20 perhitungan biaya <i>Predictive Maintenance</i>	43
Tabel 4. 21 <i>Total Maintenance Cost</i>	46
Tabel 4. 22 Perhitungan <i>Oppurtunity Lost</i>	49
Tabel 4. 23 Hasil Perhitungan <i>Equivalent Annual Cost</i>	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Grafik Distribusi Lognormal	12
Gambar 2. 2 Grafik Distribusi Eksponensial.....	12
Gambar 3. 1 Diagram Alur Penelitian.....	20
Gambar 4. 1 Histogram TBF.....	32
Gambar 4. 2 Histogram TTR.....	34
Gambar 4. 3 Grafik total biaya EAC.....	56

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan energi listrik yang andal dan berkelanjutan merupakan landasan penting bagi perkembangan industri modern dan kesejahteraan masyarakat. Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), energi baru dan terbarukan merupakan sumber energi yang berasal dari proses alam yang berkelanjutan dan memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan energi fosil. Sektor produksi energi sedang beralih dari energi fosil ke energi terbarukan guna mengurangi emisi gas rumah kaca dan risiko lingkungan. Potensi geotermal yang ada di Indonesia sangat besar, namun pemanfaatannya belum optimal untuk produksi listrik, padahal energi ini bersih dan berkelanjutan karena karakteristik sumber geotermal yang stabil dan rendah emisi (Khasmadin M. F., 2021). Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia adalah energi panas bumi (*geothermal*), energi *geothermal* merupakan energi yang berasal dari panas alami di dalam perut bumi yang dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik melalui proses konversi panas ke energi mekanik dan kemudian energi listrik (Sauni, 2022). Energi panas bumi dapat dimanfaatkan langsung maupun tidak langsung, salah satunya adalah untuk pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) yang mampu menghasilkan listrik tanpa bergantung pada kondisi cuaca seperti halnya energi surya atau angin (Gunawan, 2021).

PT.XYZ merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang pembangkit listrik tenaga panas bumi dan berperan penting dalam menjaga keseimbangan pasokan listrik nasional. Dalam operasionalnya, PT.XYZ mengandalkan berbagai sistem dan peralatan penunjang untuk memastikan proses produksi energi berjalan secara keandalan (*reliability*) dan ketersediaan (*availability*) yang tinggi guna memenuhi target produksi dan menjaga stabilitas sistem kelistrikan. Beberapa tantangan utama yang dihadapi oleh PT. XYZ adalah menjaga keandalan (*reliability*) dan ketersediaan (*availability*) unit pembangkit listrik.

Manajemen aset didefinisikan sebagai pendekatan sistematis dan terkoordinasi untuk mengelola aset fisik agar mampu memberikan nilai optimal sepanjang umur pakainya dengan mempertimbangkan aspek kinerja, risiko, dan biaya (Nabella, 2022). Menurut ISO 55000, manajemen aset bertujuan untuk menyeimbangkan antara kinerja aset, biaya yang dikeluarkan serta risiko kegagalan yang mungkin terjadi, sehingga dapat tercapai tujuan strategisnya secara

berkelanjutan. Dalam industri pembangkit listrik, manajemen aset menjadi sangat penting karena aset memiliki nilai investasi yang tinggi, umur teknis yang panjang, serta konsekuensi besar apabila terjadi kegagalan peralatan terhadap kontinuitas pasokan listrik dan keselamatan operasi (Aisya, 2025). Salah satu peralatan penting dalam sistem pembangkit listrik panas bumi di PT.XYZ adalah *Air Compressor System* yang berfungsi sebagai penyedia udara bertekanan untuk kebutuhan instrumen, kontrol pneumatik, serta aktivitas pemeliharaan peralatan di area pembangkit. Sistem kompresor udara merupakan komponen kritis dalam fasilitas industri dan pembangkit listrik karena kegagalannya dapat menyebabkan gangguan operasi secara keseluruhan dan meningkatkan biaya pemeliharaan tidak terencana (Andriyuda, 2024).

Untuk mendukung pengelolaan pemeliharaan, PT.XYZ menggunakan sistem SAP (*System, Applications, and Products in Data Processing*) sebagai *system Enterprise Resource Planning* dalam pencatatan data pemeliharaan. SAP secara luas digunakan di industri energi untuk mengintegrasikan data teknis, waktu, dan biaya pemeliharaan (Melati, 2025). Berdasarkan dokumentasi SAP, transaksi IW39 digunakan untuk menampilkan daftar notifikasi dan order pemeliharaan berdasarkan berbagai parameter, termasuk waktu kejadian gangguan dan realisasi perbaikan. Data IW39 mencakup *basic start date* sebagai tanggal awal gangguan dicatat, *schedule start* sebagai waktu perbaikan yang direncanakan, serta *actual start* sebagai waktu aktual dimulainya perbaikan (Hodkiewicz, 2022). Selisih antara jadwal dan realisasi perbaikan mencerminkan potensi ketidakefisienan dalam sistem pemeliharaan yang berdampak pada keandalan dan biaya operasional.

Berdasarkan data historis pemeliharaan dari SAP IW39, teridentifikasi beberapa permasalahan yang terjadi pada *Air Compressor System* di PT. XYZ. Permasalahan pertama adalah tingginya frekuensi aktivitas pemeliharaan pada peralatan *Air Compressor*, baik pada *Air Compressor A* maupun *Air Compressor B*, yang menunjukkan bahwa peralatan tersebut memerlukan penanganan secara berulang. Permasalahan kedua adalah dominasi pekerjaan pemeliharaan pada aspek mekanikal yang ditunjukkan oleh keterlibatan *planner group* mekanik (P-MEK), sehingga mengindikasikan bahwa gangguan yang terjadi banyak berkaitan dengan komponen mekanis. Permasalahan ketiga adalah tingginya ketergantungan terhadap aktivitas pemeliharaan terencana (*preventive maintenance*) yang ditunjukkan oleh banyaknya *work order* dengan tipe ZM12, sehingga mengindikasikan perlunya evaluasi efektivitas strategi pemeliharaan yang diterapkan.

Berdasarkan dari berbagai penelitian menekankan pentingnya evaluasi biaya pemeliharaan dan pengelolaan peralatan berdasarkan pendekatan jangka panjang. Metode yang digunakan seperti Simulasi Monte Carlo yang digunakan untuk memodelkan ketidakpastian waktu kerusakan dan biaya pemeliharaan secara probabilistik, sehingga menghasilkan estimasi biaya yang lebih realistis (Hutabarat, 2025). *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) digunakan untuk menghitung total biaya asset sejak tahap pengadaan, operasi, pemeliharaan, hingga akhir masa pakai (Damanik, 2024). Selain itu Metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) digunakan untuk mengonversi biaya siklus hidup menjadi biaya tahunan ekuivalen sehingga memudahkan evaluasi alternatif kebijakan pemeliharaan (Yusuf, 2024).

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas penerapan evaluasi biaya siklus hidup dan pemeliharaan pada pembangkit energi, meskipun masih jarang yang secara spesifik memadukan data pemeliharaan dengan pendekatan aktual untuk komponen seperti *Air Compressor System*. Sebagai contoh, penelitian oleh Istiqamah, Sasongko, dan Boedoyo (2023) yang berjudul “Analisis dampak lingkungan dan *life cycle cost* pembangkit listrik tenaga panas bumi” meninjau komponen biaya siklus hidup pembangkit listrik tenaga panas bumi secara komprehensif berdasarkan studi literatur berbagai proyek panas bumi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fase operasi dan pemeliharaan merupakan komponen penting dalam *life cycle cost*, dan bahwa evaluasi biaya yang holistik sangat diperlukan untuk memahami kontribusi biaya operasional terhadap total biaya siklus hidup pembangkit seperti PLTP (Istiqamah, 2023).

Penelitian lain yang relevan adalah studi oleh Sahid dan Yuwono (2024) yang mengevaluasi efektivitas penerapan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dalam strategi perbaikan komponen vital pembangkit listrik tenaga panas bumi, khususnya *cooling tower*. Hasil studi ini menunjukkan bahwa metode LCCA dapat digunakan untuk membandingkan alternatif perbaikan dan menentukan pilihan yang memberikan efisiensi biaya lebih tinggi selama umur pakai komponen, serta menyediakan dasar keputusan yang lebih kuat untuk manajemen pemeliharaan. Hal ini menguatkan peran LCCA bukan hanya dalam perencanaan investasi awal, tetapi juga dalam strategi pemeliharaan operasional pada komponen pembangkit panas bumi (Sahid, 2025).

Berdasarkan permasalahan di atas, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi biaya siklus hidup serta menyusun strategi pemeliharaan yang optimal pada *Air Compressor System*

di PT. XYZ dengan mengintegrasikan metode *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA), *Equivalent Annual Cost* (EAC), dan simulasi *Monte Carlo* berdasarkan data historis pemeliharaan SAP IW39. Dengan penerapan metode ini, diharapkan dapat diperoleh estimasi biaya pemeliharaan yang lebih akurat, penentuan umur ekonomis peralatan yang optimal, serta rekomendasi kebijakan pemeliharaan yang mendukung peningkatan keandalan, ketersediaan, dan efisiensi biaya operasional pembangkit listrik tenaga panas bumi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan hasil perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* dengan pendekatan *Equivalent Annual Cost* (EAC) terhadap data historis perawatan *equipment Air Compressor System*, berapa umur ekonomis *equipment* tersebut untuk mendukung pengambilan keputusan dalam perbaikan atau penggantian *equipment* pada PT.XYZ?

1.3 Tujuan Penelitian

Menentukan umur ekonomis *Air Compressor System* berdasarkan perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* dengan pendekatan *Equivalent Annual Cost* (EAC) dari data historis perawatan sebagai dasar pengambilan keputusan perbaikan atau penggantian *equipment* pada PT.XYZ.

1.4 Manfaat Penelitian

Berikut merupakan manfaat penelitian yang didapatkan dari penelitian ini:

1. Manfaat Bagi Perusahaan

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi PT. XYZ dalam mengidentifikasi komponen kritis pada *Air Compressor System* serta mengevaluasi biaya pemeliharaan berdasarkan pendekatan siklus hidup aset. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan dan pemeliharaan *Air Compressor System*, khususnya dalam menentukan umur ekonomis peralatan dan strategi pemeliharaan yang lebih efisien. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi awal dalam penerapan manajemen aset di PT.XYZ guna meningkatkan keandalan, ketersediaan, dan efisiensi biaya operasional pembangkit listrik tenaga panas bumi.

2. Manfaat Bagi Peneliti

Penelitian ini memberikan kesempatan bagi peneliti untuk mengaplikasikan dan mengembangkan pengetahuan di bidang manajemen aset dan manajemen pemeliharaan, khususnya melalui penerapan simulasi Monte Carlo, metode *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA), dan *Equivalent Annual Cost* (EAC), dan. Selain itu, penelitian ini menjadi sarana bagi peneliti untuk memahami secara langsung pengelolaan data pemeliharaan berbasis sistem SAP IW39 serta menganalisis permasalahan pemeliharaan peralatan industri pada lingkungan pembangkit listrik tenaga panas bumi.

3. Manfaat Akademis

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang manajemen aset dan pemeliharaan peralatan industri. Penelitian ini juga dapat dijadikan referensi dan bahan pembandingan bagi penelitian selanjutnya yang membahas evaluasi biaya siklus hidup. Penentuan umur ekonomis peralatan, serta penerapan simulasi Monte Carlo pada sistem utilitas industri dan sektor ketenagalistrikan, terutama pada pembangkit listrik berbasis energi terbarukan.

1.5 Batasan Penelitian

Agar penelitian ini terfokus dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka batasan penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya difokuskan pada *Air Compressor System* yang digunakan sebagai peralatan penunjang operasional pada pembangkit listrik tenaga panas bumi di PT. XYZ, dan tidak mencakup peralatan utama pembangkit lainnya.
2. Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data historis pemeliharaan *Air Compressor System* yang diperoleh dari sistem SAP, khususnya melalui transaksi IW39, yang mencakup informasi *basic start date*, *schedule start*, dan *actual start*.
3. Jenis aktivitas pemeliharaan yang dianalisis dalam penelitian ini dibatasi pada pemeliharaan *corrective*, *preventive*, dan *predictive*, sesuai dengan data pemeliharaan yang tersedia di PT. XYZ.
4. Simulasi Monte Carlo dalam penelitian ini digunakan untuk memodelkan ketidakpastian waktu kerusakan dan biaya pemeliharaan *Air Compressor System* berdasarkan data historis yang tersedia, sehingga hasil simulasi bersifat estimatif dan bergantung pada kualitas serta kelengkapan data yang digunakan.

5. Analisis biaya siklus hidup peralatan dalam penelitian ini dilakukan menggunakan metode *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dan *Equivalent Annual Cost* (EAC), dengan asumsi biaya dan parameter ekonomi yang berlaku selama periode pengamatan, tanpa mempertimbangkan perubahan kebijakan eksternal seperti fluktuasi harga energi atau regulasi pemerintah.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Literatur

Pada kajian literatur didalamnya berisi mengenai jurnal-jurnal yang terkait dengan penelitian sebelumnya yang terkait pada penelitian yang sedang dilakukan. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai kerangka penelitian yang akan dilakukan. Dibawah ini merupakan analisis dari 15 jurnal yang berasal dari penelitian sebelumnya.

Rangkaian literatur ini diawali oleh (Bautista, 2022) yang memberikan landasan mengenai pentingnya strategi inspeksi pemeliharaan pada sistem multikomponen yang kompleks guna mencapai efisiensi biaya. Konsep efisiensi kelayakan ini, kemudian diimplementasikan secara nyata pada sektor infrastruktur publik oleh (Abaza, 2024) yang memanfaatkan kurva kinerja perkerasan jalan untuk menentukan waktu perbaikan yang paling optimal secara ekonomi. Dukungan terhadap pendekatan tersebut terlihat jelas dalam studi bibliometric, (Martinho, 2023) yang membuktikan bahwa metode *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) kini telah menjadi instrumen evaluasi finansial yang diandalkan secara global di berbagai sektor pembangunan. Beralih ke sektor industri, konsep keandalan diuji secara spesifik oleh (Bastari, 2024) pada peralatan rig di sektor migas. Mereka menggunakan parameter MTBF dan MTTR untuk memetakan potensi kerusakan alat agar ketersediaan operasional tetap terjaga. Pendekatan serupa diterapkan oleh (Novarika, 2025) dalam menyusun jadwal pemeliharaan preventif pada armada logistik seperti forklift guna menghindari terhentinya rantai distribusi. Lebih jauh, evaluasi pemeliharaan tidak hanya berfokus pada durasi kerusakan, tetapi juga efisiensi finansial. Hal ini ditunjukkan oleh (Sahid, 2025), di mana analisis LCCA membuktikan bahwa metode pelapisan (*coating*) pada perbaikan komponen *cooling tower* memberikan penghematan yang signifikan dibandingkan dengan pembelian unit baru.

Terkait dengan evaluasi aset jangka panjang, metode LCCA juga terbukti sangat relevan untuk memprediksi kerusakan struktural. (Sacconi, 2021) memanfaatkannya untuk memperkirakan biaya pemeliharaan jembatan baja yang rentan terhadap beban kelelahan (*fatigue*). Sejalan dengan tren keberlanjutan saat ini, (Renne, 2022) menggabungkan analisis kelayakan ekonomi tersebut dengan dampak lingkungan pada proyek perbaikan struktur beton. Menariknya, metode evaluasi ini tidak hanya eksklusif untuk material modern. (Albuja-Sánchez, 2024) membuktikan bahwa material bangunan tradisional seperti tanah liat (*adobe*) juga membutuhkan analisis siklus hidup untuk

memastikan penggunaannya tetap efisien sebagai alternatif konstruksi. Dalam menghadapi ketidakpastian kapan suatu komponen akan rusak (Caballé, 2024) menawarkan solusi melalui simulasi Monte Carlo untuk memodelkan biaya pemeliharaan akibat kegagalan sistem yang terjadi secara acak. Kemampuan pemodelan tingkat lanjut semacam ini juga semakin meluas ke ranah komputasi dan kecerdasan buatan. Sebagai contoh, (Wu, 2023) mengaplikasikannya untuk meningkatkan presisi segmentasi citra medis pada perangkat rontgen, sementara (Shang, 2021) menggunakan model jaringan saraf (*Neural Network*) untuk menjaga akurasi dan meredam getaran pada lengan robotik di lini produksi.

Pada akhirnya, seluruh inovasi teknis tersebut membutuhkan tata kelola yang baik agar dapat berjalan optimal. (Lacan, 2022) menegaskan bahwa manajemen organisasi yang berbasis nilai merupakan fondasi utama dari peningkatan performa secara keseluruhan. Di ranah praktis, upaya menjaga performa ini tercermin dalam penelitian (Larsen, 2024) yang berfokus pada minimalisasi kerugian produksi pada mesin mill dengan mengidentifikasi akar penyebab *downtime* melalui metode OEE dan FMECA. Sebagai penutup dari rangkaian evaluasi performa dan biaya ini, (Purba, 2022) memberikan pendekatan keputusan yang sangat rasional; mereka membuktikan melalui metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) bahwa mengganti mesin industri yang sudah melewati umur ekonomisnya jauh lebih menguntungkan dibandingkan terus menanggung beban operasional akibat kerusakan yang berulang.

Tabel 2. 1 Posisi Penelitian

No	Penulis	Objek			Metode			Tujuan	
		Sistem Industri	Infrastruktur	Sistem Kompleks	Simulasi Monte Carlo	MTBF & MTTR	LCCA	EAC	Optimalisasi Perawatan
									Analisis Biaya Siklus Hidup
									Evaluasi Kinerja
1	(Bautista, 2022)			✓	✓				
2	(Abaza, 2024)		✓				✓		✓

No	Penulis	Objek			Metode			Tujuan			
		Sistem Industri	Infrastruktur	Sistem Kompleks	Simulasi Monte Carlo	MTBF & MTTR	LCCA	EAC	Optimalisasi Perawatan	Analisis Biaya Siklus Hidup	Evaluasi Kinerja
3	(Martinho, 2023)			✓			✓			✓	
4	(Bastari, 2024)	✓				✓			✓		
5	(Novarika, 2025)	✓				✓			✓		
6	(Sahid, 2025)	✓					✓			✓	
7	(Sacconi, 2021)		✓				✓			✓	
8	(Renne, 2022)		✓				✓			✓	
9	(Albuja-Sánchez, 2024)		✓				✓			✓	
10	(Caballé, 2024)			✓	✓						✓
11	(Wu, 2023)			✓	✓						✓
12	(Shang, 2021)	✓			✓						✓
13	(Lacan, 2022)			✓				✓		✓	

No	Penulis	Objek			Metode			Tujuan		
		Sistem Industri	Infrastruktur	Sistem Kompleks	Simulasi Monte Carlo	MTBF & MTTR	LCCA	EAC	Optimalisasi Perawatan	Analisis Biaya Siklus Hidup
14	(Larsen, 2024)	✓				✓			✓	
15	(Purba, 2022)	✓						✓		✓
16	Usulan	✓			✓	✓	✓	✓		✓

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Manajemen Aset

Manajemen Aset adalah pendekatan sistematis yang digunakan oleh suatu organisasi untuk mengelola aset fisiknya secara efektif dan efisien sepanjang siklus hidupnya, dengan tujuan memaksimalkan nilai yang dihasilkan oleh aset tersebut sambil menyeimbangkan kinerja, biaya, dan risiko yang terkait. Dalam konteks industri manufaktur dan pemeliharaan, manajemen aset mencakup pengumpulan, pemrosesan, dan penggunaan informasi, perencanaan, pengendalian, dan pengambilan keputusan yang memungkinkan organisasi mengoptimalkan penggunaan aset fisik untuk mendukung kelangsungan operasi dan pencapaian tujuan strategis perusahaan. Implementasi manajemen aset yang efektif tidak hanya berfokus pada pemeliharaan dan perawatan rutin, tetapi juga pada pengorganisasian informasi, teknologi pendukung, dan integrasi aspek teknis dan manajerial agar aset tetap beroperasi secara andal sepanjang masa pakainya (Polenghi, 2022).

2.2.2 Perawatan (*Maintenance*)

Perawatan adalah seluruh aktivitas teknis dan manajerial yang bertujuan untuk mempertahankan atau mengembalikan kondisi peralatan agar dapat berfungsi sesuai dengan standar operasional yang ditetapkan. Perawatan memiliki peran strategis dalam menjaga

keandalan, keselamatan, dan efisiensi operasi sistem industri, termasuk pada pembangkit listrik. Menurut standar industri, perawatan tidak hanya berfokus pada perbaikan kerusakan, tetapi juga mencakup aktivitas perencanaan, pengendalian, dan evaluasi kinerja peralatan sepanjang siklus hidup aset (Nasution, 2021). Perawatan yang tidak terencana dapat meningkatkan *downtime*, biaya operasional, serta risiko kegagalan sistem.

2.2.3 Jenis-jenis Perawatan

Jenis - jenis pemeliharaan dalam sistem industri dapat diklasifikasikan menjadi beberapa, yaitu sebagai berikut:

1. *Corrective Maintenance*

Corrective Maintenance merupakan pemeliharaan yang dilakukan setelah terjadi kegagalan maupun kerusakan yang dialami oleh peralatan dengan sebagai pengembalian ke fungsi operasionalnya.

2. *Preventive Maintenance*

Preventive Maintenance merupakan pemeliharaan yang dilakukan secara berkala ataupun rutin yang dilakukan berdasarkan interval waktu maupun jam operasi untuk mencegah terjadinya kegagalan.

3. *Predictive Maintenance*

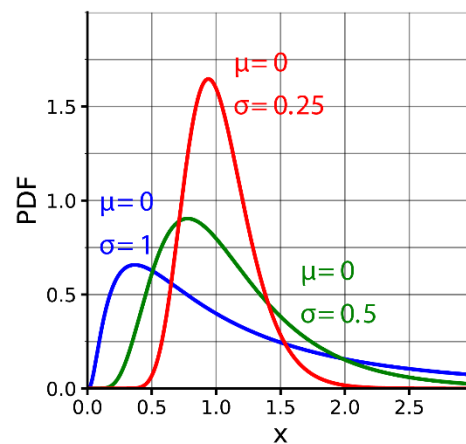
Predictive Maintenance merupakan pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan kondisi dengan melakukan pemantauan parameter tertentu seperti getaran, suhu, maupun dari tekanan.

2.2.4 Distribusi

Distribusi merupakan model yang menggambarkan kemungkinan terjadinya nilai-nilai dari suatu variabel acak. Distribusi Probabilitas digunakan untuk memodelkan waktu kegagalan, waktu perbaikan, dan variabel acak yang lain untuk mendapatkan informasi tentang pola kegagalan atau keberlanjutan komponen atau sistem. Distribusi ini dilakukan sebagai dasar dalam melakukan simulasi, meramal risiko, dan perencanaan pemeliharaan (Juliantho, 2024). Berikut ini merupakan Distribusi yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Distribusi Lognormal

Distribusi lognormal adalah distribusi di mana logaritma dari variabel acak mengikuti distribusi normal. Ini sering muncul pada data yang mengalami pertumbuhan *multiplicative* atau fenomena alamiah yang tidak simetris, dan sering digunakan untuk analisis reliabilitas.

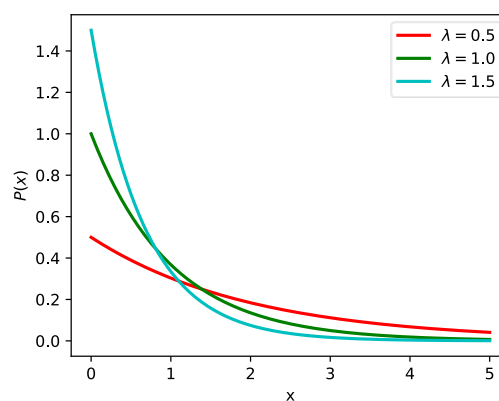


Gambar 2. 1 Grafik Distribusi Lognormal

Berdasarkan Gambar diatas, distribusi lognormal memiliki bentuk yang tidak simetris (*skewed* ke kanan), dimana sebagian besar data berada pada nilai yang relatif kecil dan diikuti oleh beberapa nilai yang jauh lebih besar. Parameter μ (mu) menunjukkan rata - rata dari data setelah dilakukan transformasi logaritma natural, sedangkan parameter σ (sigma) menunjukkan tingkat penyebaran data. Semakin besar nilai σ , maka kurva distribusi akan semakin melebar dan memiliki ekor kanan yang lebih panjang.

2. Distribusi Exponensial

Distribusi ini sering digunakan untuk memodelkan waktu hingga kegagalan acak jika laju kegagalan per unit waktu dianggap konstan, sehingga kegagalan tidak bergantung pada umur komponen. Ini berarti bahwa di distribusi ini kegagalan komponen berikutnya tidak dipengaruhi lama komponen tersebut beroperasi.



Gambar 2. 2 Grafik Distribusi Eksponensial

Berdasarkan Gambar diatas, bentuk kurva distribusi eksponensial menunjukkan bahwa probabilitas kejadian akan semakin menurun seiring bertambahnya waktu. Parameter λ (lambda) merupakan laju kegagalan (*failure rate*) yang menentukan bentuk kurva distribusi. Semakin besar nilai λ , maka semakin tinggi peluang kegagalan terjadi dalam waktu yang lebih singkat sehingga kurva akan menurun lebih cepat. Sebaliknya, semakin kecil nilai λ , maka waktu antar kegagalan cenderung lebih panjang (Taketomi, 2022).

2.2.5 Simulasi

Simulasi merupakan metode analisis yang digunakan untuk menggambarkan situasi nyata kedalam suatu model yang berbasis komputer untuk mengetahui karakteristik, kinerja, dan respon sistem terhadap berbagai kondisi tanpa melakukan aktivitas yang ada di situasi nyata (Syafitri, 2024).

2.2.6 Simulasi Monte Carlo

Simulasi Monte carlo merupakan metode analisis yang digunakan sebagai alat untuk memperkirakan hasil dari sebuah sistem yang melibatkan ketidakpastian dan variabilitas. Metode ini bekerja dengan cara menjalankan simulasi berulang - ulang menggunakan angka acak dari distribusi, untuk variabel - variabel yang berpengaruh, kemudian mengamati berbagai kemungkinan hasil yang muncul. Hal ini sering dipakai dalam permasalahan pemeliharaan dan realibilitas untuk memperkirakan waktu kegagalan, biaya pemeliharaan, atau jadwal perawatan. Ketika data bersifat *deterministic* atau sulit diprediksi secara langsung (Kosasih, 2021).

Dalam pemeliharaan *asset industry*, simulasi Monte Carlo membantu memodelkan berbagai skenario biaya dan waktu kegagala dengan mempertimbangkan distribusi yang relevan, sehingga memberikan gambaran risiko dan biaya yang lebih realistis dibandingkan model biasa. Simulasi Monte Carlo dapat digunakan untuk menemukan jadwal pemeliharaan yang lebih optimal dan meminimalkan biaya pemeliharaan dengan memodelkan variable biaya dan kegagalan komponen secara statistic.

2.2.7 Mean Time Between Failure (MTBF)

Mean Time Between Failure (MTBF) merupakan ukuran yang digunakan untuk mengetahui rata-rata waktu antar terjadinya kerusakan pada sistem atau peralatan, MTBF menunjukkan seberapa lama sebuah mesin dapat beroperasi sebelum mengalami gangguan. Perhitungan MTBF didasari pada waktu operasi sistem dibandingkan dengan jumlah kerusakan yang terjadi.

Data yang digunakan umumnya berasal dari catatan historis perawatan, khususnya pada *corrective maintenance* (Fahri, 2025). Rumus MTBF adalah sebagai berikut:

$$MTBF = \frac{Total Waktu Operasi}{Jumlah Kegagalan}$$

2.2.8 Mean Time To Repair (MTTR)

Mean Time To Repair (MTTR) merupakan satuan yang digunakan untuk mengetahui rata-rata waktu yang dibutuhkan dalam melakukan perbaikan setelah terjadi kerusakan pada suatu sistem atau peralatan. MTTR berkaitan dengan kemampuan sistem pemeliharaan dalam menangani gangguan dan mengembalikan kondisi mesin agar dapat berfungsi Kembali (Apriyanto, 2024). Berikut merupakan rumus dari MTTR:

$$MTTR = \frac{Total Waktu Perbaikan}{Jumlah kegagalan}$$

2.2.9 Life Cycle Cost Analysis (LCCA)

Life Cycle Cost Analysis adalah sebuah metode yang berfungsi guna menghitung total keseluruhan dari biaya yang akan dikeluarkan selama umur sebuah *asset*, *system*, maupun *equipment* yang dimulai dari biaya awal pembelian, biaya operasi serta *maintenance* hingga biaya akhir dari masa pakai nya. Metode ini membantu bagi orang yang akan melakukan pengambilan keputusan untuk mengetahui berapa besar biaya awal yang dibutuhkan dari waktu ke waktu, bukan hanya saat biaya awal pembelian saja. LCCA banyak digunakan untuk pengelolaan asset industry karena dapat membantu pengambilan keputusan dalam pemilihan alternatif pemeliharaan atau penggantian asset/equipment yang paling efisien secara ekonomi dalam jangka Panjang (Utari, 2023).

LCCA dinyatakan sebagai penjumlahan seluruh komponen biaya nilai sekarang dari seluruh komponen biaya selama umur ekonomis suatu sistem terhadap waktu, yang dirumuskan sebagai berikut ini:

$$LCCA = C_{inv} + C_{op} + C_{maint} + C_{failure} + C_{disposal}$$

Dimana :

- C_{inv} = biaya investasi awal
- C_{op} = biaya operasional
- C_{maint} = biaya perawatan (CM, PM, PdM)
- $C_{failure}$ = biaya kegagalan

- $C_{disposal} = \text{biaya akhir}$

2.2.10 Ekonomi Teknik

Ekonomi Teknik merupakan ilmu yang digunakan untuk mengevaluasi dan membandingkan berbagai alternatif keputusan teknis berdasarkan aspek ekonomi. Metode ini menggabungkan konsep Teknik dengan prinsip ekonomi, seperti *time value of money*, tingkat bunga, dan analisis biaya sehingga setiap alternatif dapat dinilai secara rasional dari sisi ekonomi. Tujuan dari adanya ekonomi Teknik ini yaitu memberikan hasil paling efisien dengan mempertimbangkan biaya dan nilai uang terhadap waktu (Paramesti, 2024).

2.2.11 Equivalent Annual Cost (EAC)

Equivalent Annual Cost (EAC) merupakan metode analisis ekonomi yang digunakan untuk mengkonversi total biaya suatu alternatif selama umur ekonomisnya menjadi biaya tahunan yang ekuivalen. Konsep EAC bertujuan untuk menyederhanakan perbandingan biaya antar alternatif dengan umur ekonomis yang berbeda, dengan cara menyatakan seluruh biaya yang terjadi selama periode analisis ke dalam nilai biaya tahunan yang seragam. Dengan metode ini, pengambilan keputusan dapat dilakukan secara lebih objektif karena setiap alternatif dinilai berdasarkan beban biaya rata - rata per tahun yang setara (Yusuf, 2024). Secara perhitungan, nilai EAC diperoleh dengan mengubah NPV dari seluruh arus kas biaya menjadi biaya tahunan menggunakan faktor anuitas. Rumus EAC adalah sebagai berikut:

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

Diketahui bahwa:

- NPV : nilai kini bersih dari keseluruhan arus kas selama umur *equipment*
- R : tingkat diskonto
- t : umur ekonomis aset

2.2.12 Minimum Attractive Rate of Return (MARR)

Minimum Attractive Rate of Return (MARR) adalah tingkat pengembalian minimum yang harus diperoleh agar suatu investasi dianggap layak untuk dijalankan. Nilai ini digunakan sebagai acuan dalam pengambilan keputusan ekonomi. MARR biasanya ditentukan berdasarkan biaya modal, tingkat suku bunga, inflasi, serta risiko investasi. Dalam analisis seperti LCCA dan

EAC, MARR digunakan sebagai tingkat diskonto untuk memperhitungkan nilai waktu uang sehingga hasil perhitungan menjadi lebih akurat (Suharlina, 2024).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Objek dalam penelitian ini adalah *equipment Air Compressor System* yang digunakan di PT.XYZ sebagai perusahaan pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) yang berlokasi di Patuha, Jawa Barat. Pembangkit listrik tenaga panas bumi merupakan sistem yang memanfaatkan panas alami dari dalam bumi untuk menghasilkan energi listrik. Dalam prosesnya, pembangkit ini tidak hanya bergantung pada peralatan utama, tetapi juga didukung oleh berbagai sistem pendukung agar proses produksi listrik dapat berjalan dengan lancar. Salah satu sistem pendukung tersebut adalah *Air Compressor System* yang berfungsi menyediakan udara bertekanan untuk menunjang berbagai aktivitas operasional di dalam pembangkit.

Air Compressor System merupakan sistem yang bekerja dengan cara mengubah udara dari tekanan normal menjadi udara bertekanan melalui proses bertekanan. Sistem ini terdiri dari beberapa bagian seperti unit kompresor, tangki penampung udara, sistem pengering udara, serta kelompok saluran pipa yang menyalurkan udara ke berbagai peralatan. Maka dari itu, dengan adanya *Air Compressor System* cukup penting dalam menjaga kelancaran operasional pembangkit, karena jika terjadi gangguan pada sistem ini, maka dapat mempengaruhi kinerja peralatan lain yang bergantung pada pemasok udara bertekanan tersebut.

3.2 Subjek Penelitian

Subjek dalam penelitian ini adalah pihak-pihak yang terlibat langsung dalam kegiatan operasional dan pemeliharaan di PT.XYZ sebagai perusahaan pembangkit listrik tenaga panas bumi. Subjek penelitian meliputi teknisi *maintenance, engineer*, serta pihak manajemen yang bertanggung jawab terhadap sistem pemeliharaan peralatan, serta pengelolaan data historis peralatan melalui sistem *Enterprise Resource Planning (ERP)* yaitu sistem SAP.

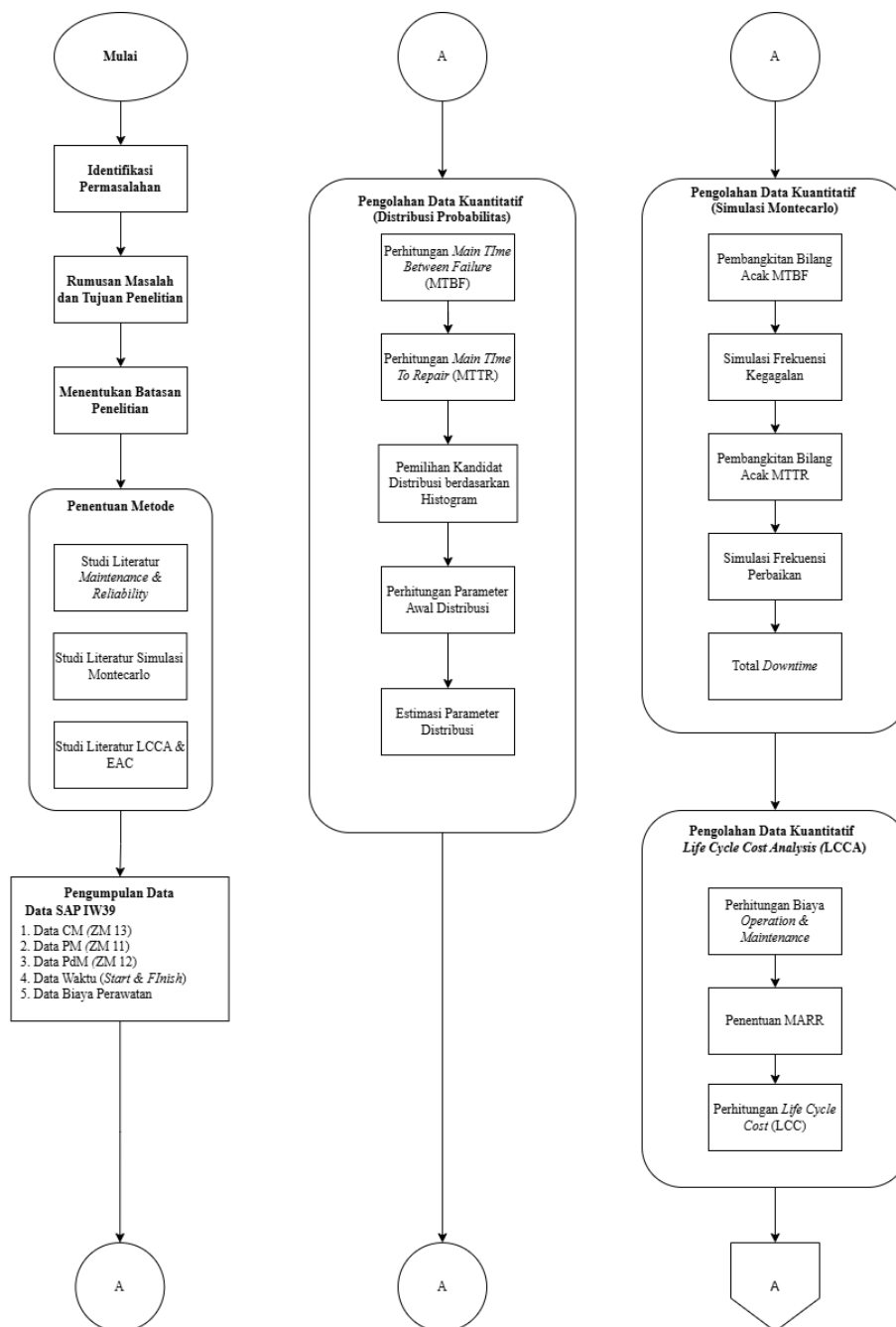
3.3 Metode Pengumpulan Data

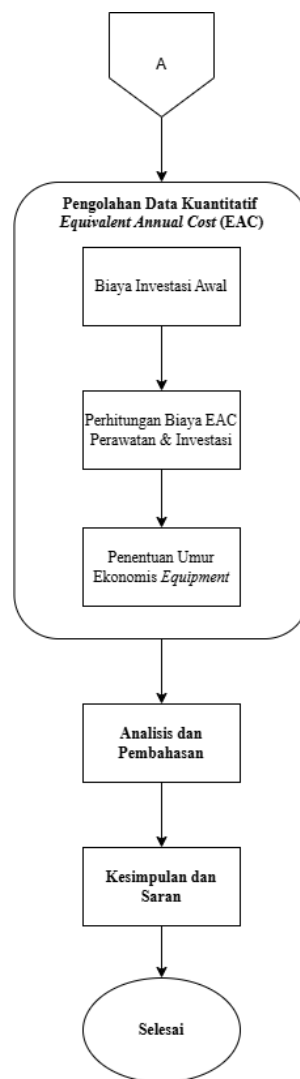
Pada penelitian ini dilakukan pengumpulan data yang berkaitan dengan aktivitas pemeliharaan sistem *air compressor*. Data yang digunakan selama periode 2016 - 2023. Pengumpulan data dilakukan melalui studi dokumentasi dengan memanfaatkan data yang berasal dari sistem pencatatan *maintenance* perusahaan, khususnya pada bagian *Air Compressor System*. Data

tersebut mencakup Data yang digunakan meliputi data *Corrective Maintenance* (CM), *Preventive Maintenance* (PM), dan *Predictive Maintenance* (PdM). Pengumpulan data juga dilakukan melalui komunikasi dan diskusi dengan pihak internal perusahaan yang terkait dengan kegiatan operasional dan pemeliharaan, guna memastikan kesesuai dan pemahaman terhadap data yang digunakan dalam penelitian.

3.4 Diagram Alur Penelitian

Dibawah ini merupakan Diagram Alur penelitian dari awal pembuatan hingga akhir pembuatan pada penelitian, adalah sebagai berikut:





Gambar 3. 1 Diagram Alur Penelitian

3.4.1 Mulai

Tahap awal dari seluruh rangkaian penelitian yang dilakukan secara sistematis. Di tahap ini ditetapkan ruang lingkup penelitian yang berfokus pada evaluasi keandalan dan biaya pemeliharaan *Air Compressor System* di PT.XYZ.

3.4.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan hasil pengamatan dan data historis pemeliharaan dari sistem SAP IW39 pada PT. XYZ, teridentifikasi beberapa permasalahan yang berkaitan dengan kinerja *Air Compressor System* sebagai salah satu komponen penting dalam pembangkit listrik tenaga panas bumi di Dieng. Permasalahan pertama adalah tingginya frekuensi aktivitas pemeliharaan yang terjadi pada *Air Compressor A* dan *Air Compressor B*, yang menunjukkan adanya kecenderungan kegagalan berulang pada sistem tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa tingkat mampu dari

peralatan masih belum optimal. Permasalahan kedua adalah dominasi gangguan yang bersifat mekanikal, yang ditunjukkan oleh keterlibatan *planner group* mekanik dalam sebagian besar aktivitas pemeliharaan. Kondisi ini menunjukkan bahwa komponen mekanis menjadi sumber utama kegagalan pada sistem kompresor udara.

Permasalahan ketiga adalah tingginya aktivitas pemeliharaan terencana (*preventive maintenance*), yang menunjukkan adanya ketergantungan terhadap tindakan pemeliharaan rutin, namun belum tentu mencerminkan efektivitas strategi pemeliharaan yang diterapkan. Selain itu, adanya selisih antara jadwal dan realisasi waktu perbaikan mengindikasikan potensi ketidakefisienan dalam pelaksanaan pemeliharaan yang dapat berdampak pada meningkatnya *downtime* dan biaya operasional. Permasalahan-permasalahan tersebut menunjukkan perlunya analisis lebih lanjut untuk mengevaluasi keandalan sistem serta implikasi biaya pemeliharaan secara menyeluruh.

3.4.3 Rumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Rumusan masalah dalam penelitian ini berdasarkan hasil perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* dengan pendekatan *Equivalent Annual Cost* (EAC) terhadap data historis perawatan *equipment Air Compressor System*, berapa umur ekonomis *equipment* tersebut untuk mendukung pengambilan keputusan dalam perbaikan atau penggantian *equipment* pada PT.XYZ. Adapun untuk tujuan penelitian ini menentukan umur ekonomis *Air Compressor System* berdasarkan perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* dengan pendekatan *Equivalent Annual Cost* (EAC) dari data historis perawatan sebagai dasar pengambilan keputusan perbaikan atau penggantian *equipment* pada PT.XYZ.

3.4.4 Menentukan Batasan Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data historis *maintenance Air Compressor System* di PT. XYZ yang diperoleh dari sistem SAP melalui transaksi IW39. Data yang dikumpulkan mencakup informasi waktu kejadian gangguan dan perbaikan, seperti *basic start date*, *schedule start*, dan *actual start*, serta jenis aktivitas pemeliharaan yang meliputi *corrective*, *preventive*, *predictive*. Penelitian ini difokuskan pada *Air Compressor System* sebagai peralatan penunjang operasional, sehingga tidak mencakup peralatan utama lainnya. Data yang diperoleh kemudian digunakan sebagai dasar dalam analisis keandalan, simulasi Monte Carlo, serta analisis biaya menggunakan metode LCCA dan EAC, dengan

mempertimbangkan bahwa hasil analisis bergantung pada kualitas dan kelengkapan data historis yang tersedia.

3.4.5 Penentuan Metode

Untuk menyelesaikan permasalahan yang telah diidentifikasi, digunakan metode kuantitatif yang meliputi analisis keandalan sistem, pemodelan distribusi, serta simulasi Monte Carlo untuk memodelkan ketidakpastian kegagalan. Selain itu, dilakukan analisis ekonomi menggunakan metode *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) untuk menghitung total biaya siklus hidup peralatan, serta metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) untuk menentukan biaya tahunan ekuivalen dan umur ekonomis peralatan.

3.4.6 Pengumpulan Data

Data yang akan digunakan pada penelitian ini didapatkan dari sistem SAP IW39 yang mencatat aktivitas pemeliharaan peralatan. Data yang dikumpulkan meliputi waktu terjadinya kegagalan, waktu perbaikan, serta interval antar kegagalan/kerusakan. Selain itu, dikumpulkan pula data biaya yang mencakup biaya investasi awal, biaya operasional, serta biaya pemeliharaan. Data yang telah diperoleh kemudian dilakukan proses pembersihan dan validasi untuk memastikan bahwa data yang digunakan akurat, konsisten, dan siap untuk dianalisis lebih lanjut.

3.4.7 Pengolahan Data Kuantitatif (Distribusi)

Pada bagian ini dilakukan pengolahan data untuk menganalisis keandalan sistem berdasarkan data historis pemeliharaan. Data yang telah dikumpulkan digunakan untuk menghitung nilai *Mean Time Between Failure* (MTBF) dan *Mean Time to Repair* (MTTR) sebagai indikator utama dalam mengevaluasi performa sistem. Setelah parameter dasar diperoleh, dilakukan pemodelan distribusi untuk menggambarkan pola kegagalan sistem. Distribusi teoritis yang diujikan dibatasi pada dua jenis distribusi utama, yaitu Eksponensial, dan Lognormal. Pemilihan kedua distribusi ini didasarkan pada bentuk histogram dari data TBF dan TTR.

3.4.8 Pengolahan Data Kuantitatif (Simulasi Monte Carlo)

Pada tahap ini dilakukan simulasi Monte Carlo untuk memodelkan perilaku kegagalan sistem secara probabilistik berdasarkan distribusi yang telah ditentukan pada bagian sebelumnya. Metode ini digunakan karena mampu menangkap ketidakpastian yang terdapat pada data kegagalan, sehingga memberikan gambaran yang lebih realistis dibandingkan pendekatan deterministik. Simulasi dilakukan dengan membangkitkan bilangan acak yang mengikuti distribusi yang telah diperoleh. Proses ini dilakukan secara berulang untuk menghasilkan

sejumlah skenario kemungkinan kejadian kegagalan dalam periode operasional tertentu. Dari hasil simulasi tersebut, dapat diperoleh estimasi frekuensi kegagalan, jumlah aktivitas pemeliharaan korektif, serta total *downtime* yang mungkin terjadi pada sistem.

3.4.9 Pengolahan Data Kuantitatif *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA)

Pada bagian ini dilakukan analisis biaya siklus hidup peralatan dengan mempertimbangkan seluruh komponen biaya yang relevan selama masa operasional. Pendekatan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) digunakan untuk menghitung total biaya yang dikeluarkan sejak tahap investasi awal hingga akhir umur penggunaan peralatan. Komponen biaya yang dianalisis meliputi biaya operasional, serta biaya pemeliharaan yang diperoleh dari hasil simulasi Monte Carlo. Dengan mengintegrasikan hasil simulasi ke dalam analisis biaya, perhitungan yang dilakukan menjadi lebih representatif terhadap kondisi nyata dari sistem.

Perhitungan *Life Cycle Cost* (LCC) dilakukan untuk mengetahui total biaya kumulatif selama umur penggunaan peralatan. Selain itu, digunakan metode *Net Present Value* (NPV) untuk memperhitungkan nilai waktu dari uang, sehingga seluruh biaya yang terjadi pada waktu yang berbeda dapat dikonversi ke nilai saat ini. Hal ini ditujukan untuk semua data terasa adil saat akan dilakukan perhitungan.

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

Nilai biaya siklus hidup yang telah diperoleh menjadi EAC, yaitu biaya tahunan ekuivalen yang mencerminkan besarnya biaya yang harus ditanggung setiap tahun selama umur penggunaan peralatan. Metode EAC digunakan untuk mempermudah proses evaluasi dan perbandingan antar alternatif umur penggunaan atau kebijakan pengelolaan aset. Dengan mengubah total biaya menjadi bentuk tahunan, maka analisis menjadi lebih sederhana dan mudah diinterpretasikan.

Setelah didapatkan perhitungan EAC, akan dilakukan evaluasi untuk menentukan umur ekonomis peralatan, yaitu umur yang menghasilkan biaya tahunan minimum. Penentuan umur ekonomis peralatan, yaitu umur yang menghasilkan biaya tahunan minimum. Penentuan umur ekonomis ini sangat penting dalam mendukung pengambilan keputusan terkait penggantian peralatan maupun strategi pengelolaan aset, sehingga dapat dicapai efisiensi biaya yang optimal.

3.4.11 Analisis dan Pembahasan

Tahap ini merupakan proses interpretasi terhadap seluruh hasil pengolahan data yang telah dilakukan, baik dari aspek keandalan maupun aspek ekonomi. Analisis dilakukan dengan mengkaji hasil perhitungan nilai MTBF dan MTTR untuk mengetahui tingkat keandalan sistem. Selain itu, hasil pemodelan distribusi dan simulasi Monte Carlo dianalisis untuk memahami pola kegagalan sistem, frekuensi *downtime*, serta implikasi biaya pemeliharaan yang ditimbulkan.

Hasil analisis ekonomi yang meliputi *Life Cycle Cost* (LCC), *Net Present Value* (NPV), dan *Equivalent Annual Cost* (EAC) juga dibahas untuk mengevaluasi efisiensi biaya selama umur penggunaan peralatan. Seluruh hasil tersebut kemudian dikaitkan dengan kondisi operasional aktual di PT. XYZ, sehingga dapat diperoleh gambaran yang komprehensif mengenai hubungan antara keandalan sistem dan biaya yang ditimbulkan. Tahap ini menjadi dasar dalam memberikan rekomendasi yang relevan bagi pengelolaan aset.

3.4.12 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan disusun dengan merangkum hasil dari penelitian, baik dari analisis keandalan maupun analisis ekonomi. Kesimpulan yang dihasilkan diharapkan mampu menjawab rumusan masalah serta tujuan penelitian yang telah ditetapkan sebelumnya. Selain itu, ada saran yang bersifat aplikatif sebagai rekomendasi bagi pihak perusahaan dalam meningkatkan efisiensi biaya operasional di masa mendatang.

3.4.13 Selesai

Pada tahap ini menandai berakhirnya seluruh rangkaian proses penelitian yang telah dilakukan secara sistematis dan terstruktur, mulai dari identifikasi masalah hingga didapatkan kesimpulan.

BAB IV

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Pengumpulan Data

Pada bagian ini berisikan tentang data IW39 mengenai perbaikan dari setiap *equipment Air Compressor System*.

4.1.1 Sumber dan Karakteristik Data

Data yang digunakan merupakan data aktual aktivitas *maintenance Air Compressor System* selama periode tahun 2016 - 2023. Data diperoleh dari sistem SAP perusahaan melalui IW39 yang digunakan untuk menampilkan histori *work order maintenance*. Data IW39 mencakup seluruh pekerjaan perawatan yang tercatat pada *equipment* yang menjadi objek penelitian dalam rentang waktu 8 tahun pengamatan. Sebelum melakukan pengolahan data tentu perlu dilakukan review kelengkapan, tahap ini bertujuan untuk memastikan bahwa data benar benar sesuai kebutuhan untuk dilakukan analisis. Proses dilakukan dengan mengecek periode 2016 - 2023, dan dipastikan tidak ada duplikasi *work order*, serta memverifikasi bahwa setiap data memuat informasi penting seperti tanggal pekerjaan, kode jenis perawatan, dan *equipment* yang ditangani.

Penelitian ini, data perawatan diklasifikasi berdasarkan dengan kode *maintenance* yang tercatat dalam sistem SAP, yaitu *Corrective Maintenance* (ZM13), *Preventive Maintenance* (ZM11), dan *Predictive Maintenance* (ZM12). *Corrective Maintenance* (ZM13) merupakan perawatan yang dilakukan setelah terjadi kerusakan atau gangguan pada peralatan. *Preventive Maintenance* (ZM11) adalah perawatan terjadwal yang dilakukan secara berkala untuk mencegah terjadinya kerusakan. Sedangkan *Predictive Maintenance* (ZM12) merupakan perawatan berbasis kondisi yang dilakukan berdasarkan hasil monitoring atau indikasi teknis tertentu sebelum terjadi kegagalan.

4.1.2 Review Kelengkapan Data

Kelengkapan data berguna memberikan masukan, apakah data yang didapatkan dari berbagai sumber dan apakah data tersebut sudah mencukupi untuk dilakukan proses perhitungan. Yang Berdasarkan hasil review dari data histori perawatan yang diperoleh dari SAP melalui IW39, data secara umum telah tercatat dengan lengkap dan sesuai dengan kebutuhan. Seluruh *work order* yang relevan berhasil diklasifikasikan berdasarkan jenis perawatan, yaitu *Preventive*

Maintenance (ZM11), *Predictive Maintenance* (ZM12), dan *Corrective Maintenance* (ZM13), sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam tahap pengolahan data untuk peramalan selanjutnya. Dari data IW39 didapatkan *field-field* (kolom - kolom) seperti gambar berikut ini:

Tabel 4. 1 *Field* Informasi SAP IW39

No	Nama Kolom	Deskripsi	No	Nama Kolom	Deskripsi	No	Nama Kolom	Deskripsi
1	Order Type		13	Actual Finish		25	TotalPlnndCosts	
2	Order		14	Actual finish time		26	Total act.costs	
3	Bas. start date		15	WBS element		27	Entered by	
4	Bas. start time		16	Description		28	User status	
5	Basic fin. date		17	Notification		29	MaintenancePlan	
6	Bas. fin. time		18	System status		30	Group	
7	Sched. start		19	FunctLocation		31	Group Counter	
8	SchedStartTime		20	Description		32	PGrp Task List	
9	Sched. finish		21	Equipment		33	Cost Center	
10	SchedFinishTime		22	Priority		34	MaintActivType	
11	Actual start		23	Planner group				
12	ActualStart time		24	Main WorkCtr				

Tabel diatas menunjukkan *field - field* yang terdapat pada data hasil transformasi SAP melalui IW39 yang kemudian diolah menjadi *excel*. *Field* tersebut berisi informasi terkait identitas *work order*, waktu pelaksanaan, jenis aktivitas *maintenance*, lokasi *equipment*, hingga komponen biaya yang dikeluarkan, Data inilah yang menjadi dasar dalam proses klasifikasi jenis perawatan (ZM11,ZM12, dan ZM13).

Review Kelengkapan dilakukan di input data, dari proses ini dilakukan dengan membandingkan antara data yang ada dengan kebutuhan data. Dibawah ini merupakan perbandingan untuk data yang didapat dengan 6 kriteria yaitu:

1. Akurasi

Mengacu sejauh mana data yang dikumpulkan benar - benar mencerminkan kondisi aktual di lapangan. Data yang akurat harus sesuai dengan fakta dan bebas dari kesalahan pencatatan maupun manipulasi. Ketidaktepatan data dapat menyebabkan hasil analisis menjadi bias dan berpotensi menghasilkan keputusan yang kurang tepat. Maka dari itu, keakuratan menjadi pondasi utama dalam proses pengolahan data.

2. Ketepatan Waktu

Berkaitan dengan ketersediaan data pada saat dibutuhkan untuk mendukung proses analisis dan pengambilan keputusan. Data yang tepat waktu berarti telah dikumpulkan, diperbarui, dan disajikan sesuai dengan periode yang relevan. Dalam konteks pemeliharaan aset, ketepatan waktu memungkinkan identifikasi potensi gangguan secara lebih dini sehingga dapat mencegah terjadinya kegagalan yang lebih besar.

3. Validitas

Menunjukkan tingkat kesesuaian data terhadap tujuan penggunaannya. Data yang valid harus mengikuti definisi, format, dan standar pencatatan yang telah ditetapkan. Ketidaksesuaian satuan atau metode pencatatan dapat menurunkan tingkat validitas dan mempengaruhi hasil analisis. Maka dari itu, keseragaman format dan definisi menjadi bagian penting dalam menjaga kualitas data.

4. Keunikan

Memastikan bahwa setiap data yang bersifat tunggal dan tidak terjadi duplikasi yang tak diperlukan. Duplikasi data dapat menimbulkan distorsi dalam perhitungan maupun dalam menunjukkan hasil. Dengan menjaga keunikan setiap data, analisis yang dilakukan akan lebih akurat serta representatif.

5. Kelengkapan

Mengacu pada terpenuhinya seluruh elemen informasi yang dibutuhkan dalam analisis. Data yang tidak lengkap, seperti informasi yang hilang atau parameter yang tidak tercantum, dapat mempengaruhi kualitas hasil perhitungan dan kesimpulan. Maka, setiap *field* yang relevan harus diisi dengan benar.

6. Konsistensi

Menggambarkan keseragaman data dalam periode waktu tertentu maupun antara sumber data. Data yang konsisten tidak menunjukkan adanya perbedaan atau konflik informasi untuk entitas yang sama. Ketidak konsistenan dapat mengurangi tingkat kepercayaan terhadap hasil analisis yang telah dilakukan,

Dengan hasil review yang telah dilakukan, kesimpulan dari kelengkapan data yaitu data historis *maintenance* yang didapat dari SAP melalui IW39 telah melengkapi kebutuhan dan dapat dilakukan analisis yang lebih lanjut. Data dapat diklasifikasikan dengan jelas berdasarkan jenis perawatan serta periode pelaksanaannya.

4.1.3 Data Jenis Perawatan *Corrective Maintenance* (CM)

Pada bagian ini didapati data jenis perawatan *Corrective Maintenance* (CM) pada *equipment Air Compressor System*, yaitu perbaikan yang dilakukan setelah terjadi kerusakan atau gangguan pada peralatan yang ada di *equipment* tersebut. *Corrective Maintenance* merupakan Tindakan yang bersifat tidak pasti atau dadakan, karena *maintenance* ini dilakukan saat *equipment* mengalami *failure* atau penurunan fungsi operasional. Data CM didapat dari SAP

melalui IW39 dengan kode yaitu ZM13 yang terkhusus untuk mengidentifikasi perbaikan akibat kerusakan.

Field yang digunakan dalam pengumpulan data ini yaitu *work order*, *actual start date time*, dan *actual finish date time*. Informasi ini didapat dari realita perbaikan serta selesai diperbaiki setiap *work order* yang dikerjakan. Berikut merupakan tabel yang berisi informasi *Corrective Maintenance* sebagai berikut:

Tabel 4. 2 *Corrective Maintenance*

Work Order	Actual Start Date Time	Actual Finish Date Time
130100000157	05/01/2017 08:00	05/01/2017 08:00
130100000145	18/05/2017 09:00	18/05/2017 12:22
130100000175	31/07/2017 09:00	31/07/2017 09:00
130100000173	01/09/2017 09:00	01/09/2017 09:00
130100000271	07/05/2018 08:12	03/01/2019 09:24
-	-	-
-	-	-
-	-	-
130100001164	22/06/2022 09:30	22/06/2022 10:30
130100001524	06/06/2023 09:30	06/06/2023 14:00
130100001587	26/07/2023 08:00	26/07/2023 09:00
130100001586	26/07/2023 08:00	26/07/2023 09:00
130100001655	21/09/2023 08:30	21/09/2023 15:30

4.1.4 Data Jenis Perawatan *Preventive Maintenance* (PM)

Pengumpulan data dari *Preventive Maintenance* (PM) pada *equipment Air Compressor System* adalah sebagai berikut, namun sebelumnya *Preventive Maintenance* merupakan perawatan yang dilakukan secara terjadwal sebagai upaya pencegahan terhadap potensi kerusakan serta untuk menjaga kenadalan serta performa peralatan. Perawatan ini dilakukan berdasarkan jadwal yang sudah ditetapkan sebelumnya dan bersifat terencana dan sistematis. Data *Preventive Maintenance* diperoleh dari SAP melalui IW39 dengan kode ZM11. Data tersebut berisi perawatan rutin yang dilakukan di *Air Compressor System*. *Field* yang digunakan meliputi *work order*, *actual start date time*, dan *actual finish date time*. Berikut merupakan isi dari perawatan *Preventive Maintenance*:

Tabel 4. 3 *Preventive Maintenance*

<i>Work Order</i>	<i>Actual Start Date Time</i>	<i>Actual Finish Date Time</i>
110100000950	04/01/2016 08:00	04/01/2016 09:52
110100000946	04/01/2016 08:00	04/01/2016 09:35
110100000701	04/01/2016 08:00	04/01/2016 09:35
110100000945	04/01/2016 08:00	04/01/2016 09:35
110100000947	04/01/2016 08:00	04/01/2016 09:35
-	-	-
-	-	-
-	-	-
110100093848	20/12/2023 08:00	20/12/2023 08:33
110100093321	20/12/2023 08:30	20/12/2023 09:00
110100092825	20/12/2023 11:00	20/12/2023 11:30
110100093714	27/12/2023 08:00	27/12/2023 09:07
110100084365	11/01/2024 08:00	12/01/2024 16:14

4.1.5 Data Jenis Perawatan *Predictive Maintenance* (PdM)

Selain *Corrective* dan *Preventive Maintenance*, penelitian ini juga mengidentifikasi data *Predictive Maintenance* (PDM) pada *equipment Air Compressor System*. *Predictive Maintenance* merupakan perawatan yang dilakukan berdasarkan kondisi actual peralatan, sehingga perbaikan dilakukan dengan memprediksi peralatan untuk dilakukan perbaikan maupun penggantian komponen sebelum terjadi kerusakan yang makin serius, hal tersebut dilakukan supaya meningkatkan efektivitas perawatan dan meminimalkan risiko *downtime* yang tak direncana. *Predictive Maintenance* diperoleh dari SAP melalui IW39 dengan kode ZM12. Sama seperti sebelumnya, untuk *field* yang didapat yaitu *work order*, *actual start date time*, dan *actual finish date time*. Berikut merupakan data perawatan *Predictive Maintenance*:

Tabel 4. 4 *Predictive Maintenance*

<i>Work Order</i>	<i>Actual Start Date Time</i>	<i>Actual Finish Date Time</i>
120100000337	04/01/2016 08:00	04/01/2016 10:20
120100000338	04/01/2016 08:00	04/01/2016 10:37
120100000491	04/01/2016 08:00	04/01/2016 10:37
120100000490	04/01/2016 08:00	04/01/2016 10:20

<i>Work Order</i>	<i>Actual Start Date Time</i>	<i>Actual Finish Date Time</i>
120100000179	04/01/2016 08:00	04/01/2016 10:37
-	-	-
-	-	-
-	-	-
120100044773	18/12/2023 09:00	18/12/2023 10:00
120100045244	20/12/2023 08:00	20/12/2023 10:15
120100045245	20/12/2023 08:00	20/12/2023 10:15
120100044632	20/12/2023 11:30	28/12/2023 15:53
120100045114	27/12/2023 08:00	27/12/2023 08:33

4.2 Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan untuk mengestimasi biaya total perawatan, selanjutnya dapat diestimasi biaya total per tahun untuk masing - masing jenis perawatan, terkhusus *Corrective Maintenance* akan dilakukan permodelan dan simulasi data terlebih dahulu untuk mendapatkan estimasi cacah pelerkaan *Corrective Maintenance* per tahun hingga yang ditentukan. Tahap pengolahan ini diawali dengan perhitungan parameter keandalan, yaitu *Main Time Between Failure* (MTBF) dan *Main Time To Repair* (MTTR), yang diperoleh dari data historis kerusakan. Nilai MTBF digunakan untuk menggambarkan rata - rata interval antar kerusakan di setiap tahunnya, sedangkan MTTR menunjukkan rata - rata waktu yang dibutuhkan untuk melakukan perbaikan. Kedua parameter tersebut menjadi dasar dalam melakukan simulasi serta menentukan estimasi frekuensi kegagalan di masa mendatang. Data MTBF digunakan sebagai dasar dalam pelaksanaan simulasi untuk *Corrective Maintenance*, karena parameter ini merepresentasikan pola dan interval terjadinya kerusakan pada *equipment*.

4.2.1 Penentuan Distribusi Antar Waktu Kerusakan (*Time Between Failure*)

Penentuan distribusi data antar waktu kerusakan dilakukan untuk mengetahui pola kemungkinan terjadinya kegagalan pada *equipment Air Compressor System*. Data yang digunakan berupa *Time Between Failure* (TBF), yaitu merupakan selisih waktu antar kejadian kerusakan berdasarkan *history work order Corrective Maintenance*. Selanjutnya dilakukan identifikasi distribusi yang sesuai dengan karakteristik data TBF. Distribusi yang terpilih digunakan untuk menjadi model matematis sehingga yang akan dilakukan simulasi *Monte*

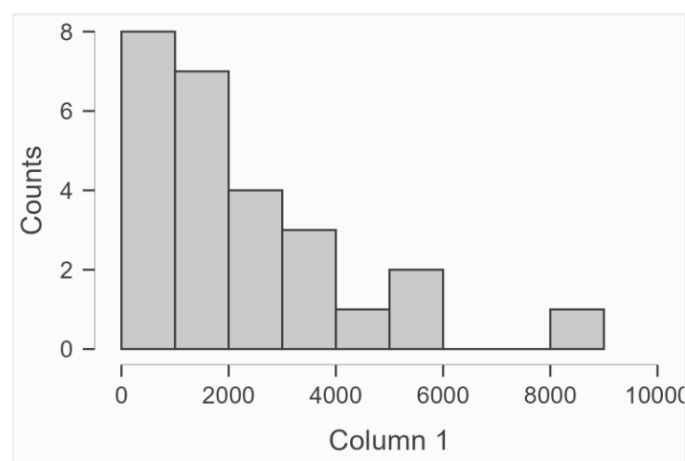
Carlo untuk estimasi frekuensi *Corrective Maintenance*. Berikut merupakan jarak antar kerusakan pada *equipment Air Compressor System* untuk perbaikan *Corrective Maintenance* adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 5 *Time Between Failure*

No	Work Order	Mulai Downtime	Selesai Downtime	TBF
1	130100000157	05/01/2017 08:00	05/01/2017 08:00	0
2	130100000145	18/05/2017 09:00	18/05/2017 12:22	3193
3	130100000175	31/07/2017 09:00	31/07/2017 09:00	1776
4	130100000173	01/09/2017 09:00	01/09/2017 09:00	768
5	130100000271	07/05/2018 08:12	03/01/2019 09:24	5951,2
6	130100000285	05/06/2018 08:00	05/06/2018 08:00	695,8
7	130100000341	11/09/2018 08:00	03/01/2019 09:22	2352
8	130100000363	17/10/2018 09:09	17/10/2018 09:09	865,15
9	130100000388	12/12/2018 10:05	12/12/2018 10:05	1344,93333
10	130100000482	17/01/2019 08:00	17/01/2019 09:00	861,916667
11	130100000481	17/01/2019 08:00	17/01/2019 09:00	0
12	130100000416	17/01/2019 08:30	17/01/2019 15:30	0,5
13	130100000414	17/01/2019 08:33	17/01/2019 16:03	0,05
14	130100000415	17/01/2019 08:45	17/01/2019 16:30	0,2
15	130100000502	05/04/2019 08:00	05/04/2019 12:25	1871,25
16	130100000615	15/11/2019 15:50	19/11/2019 10:36	5383,83333
17	130100000706	28/02/2020 09:00	28/02/2020 12:00	2513,16667
18	130100000761	19/06/2020 08:37	19/06/2020 08:37	2687,61667
19	130100000799	18/08/2020 08:00	18/08/2020 08:00	1439,38333
20	130100000805	28/09/2020 08:00	28/09/2020 08:00	984
21	130100000875	05/04/2021 09:00	06/04/2021 16:00	4537
22	130100000962	23/08/2021 09:11	23/08/2021 14:11	3360,18333
23	130100001049	06/12/2021 08:30	06/12/2021 10:00	2519,31667
24	130100001125	28/04/2022 12:30	03/05/2022 13:30	3436
25	130100001164	22/06/2022 09:30	22/06/2022 10:30	1317
26	130100001524	06/06/2023 09:30	06/06/2023 14:00	8376

No	Work Order	Mulai Downtime	Selesai Downtime	TBF
27	130100001587	26/07/2023 08:00	26/07/2023 09:00	1198,5
28	130100001586	26/07/2023 08:00	26/07/2023 09:00	0
29	130100001655	21/09/2023 08:30	21/09/2023 15:30	1368,5

Berdasarkan hasil nilai TBF yang telah diperoleh, langkah selanjutnya adalah melakukan identifikasi pola distribusi dari data untuk mengetahui distribusi yang paling sesuai dalam memvisualkan karakteristik kerusakan pada *Equipment Air Compressor System*. Visualisasi grafik data TBF dapat dilihat melalui histogram dibawah ini:



Gambar 4. 1 Histogram TBF

Dari visualisasi Histogram diatas, terlihat bahwa sebagian besar data berada direntang waktu kerusakan yang relatif rendah dan membentuk pola menurun ke arah kanan. Pola tersebut menunjukkan karakteristik distribusi eksponensial, dimana frekuensi kejadian kerusakan lebih banyak terjadi pada interval waktu tertentu dan kemudian semakin menurun pada interval waktu yang lebih besar. Selanjutnya dilakukan pengujian *goodness of fit* untuk memastikan tingkat kecocokan distribusi eksponensial terhadap data historis TBF. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai *p-value* sebesar 0,794. Nilai tersebut lebih besar dari batas minimal yaitu 0,05 ($0,794 > 0,05$) sehingga distribusi Eksponensial dapat diterima sebagai model distribusi yang mewakili data *Time Between Failure* (TBF). Maka, distribusi Eksponensial digunakan sebagai dasar dalam proses simulasi Monte Carlo untuk pembangkitan MTBF di tahap selanjutnya.

4.2.2 Penentuan Distribusi Antar Waktu Perbaikan (*Time to Repair*)

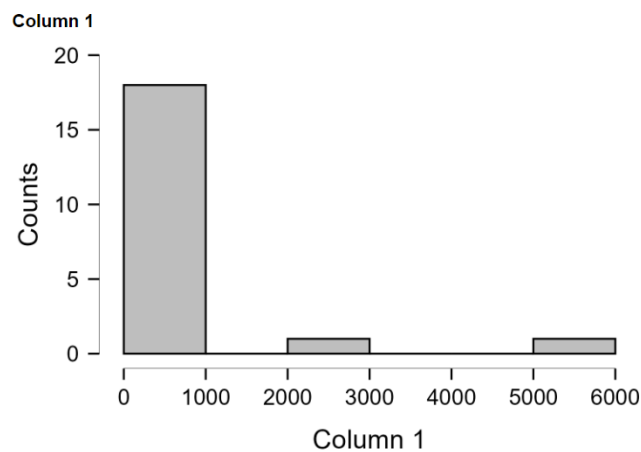
Setelah diperoleh distribusi yang sesuai untuk data antar waktu kerusakan , tahap selanjutnya adalah melakukan analisis terhadap data antar waktu perbaikan atau *Time to Repair*. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik durasi perbaikan pada *equipment Air Compressor System* berdasarkan histori *work order Corrective Maintenance*. Data TTR diperoleh dari selisih antara *actual start date time* dan *actual finish date time* pada setiap pekerjaan perbaikan. Selisih waktu tersebut merepresentasikan lamanya proses perbaikan sejak pekerjaan dimulai hingga dinyatakan selesai. Nilai - nilai waktu perbaikan inilah yang selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penentuan distribusi probabilitas yang sesuai. Berikut ini merupakan tabel untuk menentukan distribusi yang layak digunakan untuk menentukan distribusi antar waktu perbaikan:

Tabel 4. 6 *Time to Repair*

No	Work Order	Mulai Downtime	Selesai Downtime	TTR
1	130100000157	05/01/2017 08:00	05/01/2017 08:00	0
2	130100000145	18/05/2017 09:00	18/05/2017 12:22	3,375
3	130100000175	31/07/2017 09:00	31/07/2017 09:00	0
4	130100000173	01/09/2017 09:00	01/09/2017 09:00	0
5	130100000271	07/05/2018 08:12	03/01/2019 09:24	5785,2075
6	130100000285	05/06/2018 08:00	05/06/2018 08:00	0
7	130100000341	11/09/2018 08:00	03/01/2019 09:22	2737,36667
8	130100000363	17/10/2018 09:09	17/10/2018 09:09	0
9	130100000388	12/12/2018 10:05	12/12/2018 10:05	0
10	130100000482	17/01/2019 08:00	17/01/2019 09:00	1,0125
11	130100000481	17/01/2019 08:00	17/01/2019 09:00	1,01444444
12	130100000416	17/01/2019 08:30	17/01/2019 15:30	7
13	130100000414	17/01/2019 08:33	17/01/2019 16:03	7,515
14	130100000415	17/01/2019 08:45	17/01/2019 16:30	7,75388889
15	130100000502	05/04/2019 08:00	05/04/2019 12:25	4,42638889
16	130100000615	15/11/2019 15:50	19/11/2019 10:36	90,7694444
17	130100000706	28/02/2020 09:00	28/02/2020 12:00	3,01027778
18	130100000761	19/06/2020 08:37	19/06/2020 08:37	0
19	130100000799	18/08/2020 08:00	18/08/2020 08:00	0
20	130100000805	28/09/2020 08:00	28/09/2020 08:00	0

No	Work Order	Mulai Downtime	Selesai Downtime	TTR
21	130100000875	05/04/2021 09:00	06/04/2021 16:00	31
22	130100000962	23/08/2021 09:11	23/08/2021 14:11	5,01277778
23	130100001049	06/12/2021 08:30	06/12/2021 10:00	1,5
24	130100001125	28/04/2022 12:30	03/05/2022 13:30	121
25	130100001164	22/06/2022 09:30	22/06/2022 10:30	1
26	130100001524	06/06/2023 09:30	06/06/2023 14:00	4,5
27	130100001587	26/07/2023 08:00	26/07/2023 09:00	1,00805556
28	130100001586	26/07/2023 08:00	26/07/2023 09:00	1,01444444
29	130100001655	21/09/2023 08:30	21/09/2023 15:30	7

Berdasarkan hasil nilai TTR yang telah diperoleh, langkah selanjutnya adalah melakukan identifikasi pola distribusi dari data untuk mengetahui distribusi yang paling sesuai dalam memvisualkan karakteristik kerusakan pada *Equipment Air Compressor System*. Visualisasi grafik data TTR dapat dilihat melalui histogram dibawah ini:



Gambar 4. 2 Histogram TTR

Dari visualisasi Histogram TTR tersebut, terlihat bahwa sebagian besar data perbaikan berada di rentang waktu yang rendah dengan beberapa data memiliki nilai perbaikan yang cukup tinggi. Pola distribusi tersebut menunjukkan karakteristik distribusi Lognormal, dimana data cenderung menyebar tidak simetris dan membentuk kemiringan ke arah kanan. Selanjutnya dilakukan pengujian *Goodness of Fit* untuk mengetahui tingkat kecocokan distribusi terhadap data historis TTR. Berdasarkan hasil pengujian diperoleh nilai *p-value* sebesar 0,087. Nilai tersebut lebih besar dari 0,05 ($0,087 > 0,05$) sehingga distribusi Lognormal dinyatakan Fit dan dapat digunakan sebagai model probabilitas dalam simulasi Monte Carlo.

4.3 Pengolahan Data Kuantitatif (Monte Carlo)

Bagian ini menjelaskan bahwa simulasi Monte Carlo sebagai pengolahan utama dalam memodelkan ketidakpastian kegagalan pada sistem *Air Compressor System* di PT.XYZ. Simulasi Monte Carlo didefinisikan sebagai teknik matematis yang mengandalkan pembangkitan bilangan acak berulang (*repeated random sampling*) untuk memperoleh hasil numerik yang merepresentasikan distribusi dari suatu sistem yang bersifat stokastik atau tidak pasti. Dalam sistem pemeliharaan, simulasi ini berperan penting untuk mengubah parameter distribusi teoritis (Ekspensial dan Lognormal) menjadi proyeksi kejadian nyata di masa depan. Penggunaan ini berguna untuk membangkitkan bilangan acak mengenai waktu antar kerusakan (*Time Between Failure*) dan durasi perbaikan (*Time To Repair*) secara berulang hingga ribuan data. Penggunaan simulasi Monte Carlo di PT.XYZ menjadi penting untuk mengantisipasi risiko kegagalan dadakan pada komponen pembangkit listrik tenaga panas bumi, sehingga perusahaan dapat menjaga kontribusi stabilnya terhadap pemenuhan kebutuhan energi nasional Indonesia.

Tujuan utama dari pengolahan data kuantitatif ini adalah untuk menghasilkan estimasi frekuensi kerusakan tahunan yang lebih akurat dan terukur. Hasil dari simulasi ini nantinya akan diintegrasikan ke dalam *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA), yang berfungsi sebagai landasan pengambilan keputusan strategis dalam menentukan jadwal penggantian optimal.

4.3.1 Penentuan Parameter Distribusi (MTBF & MTTR)

Berdasarkan hasil pengujian kecocokan distribusi yang telah diuraikan secara komprehensif pada Sub bab sebelumnya, telah ditetapkan model distribusi yang paling representatif untuk mewakili data historis operasional mesin *Air Compressor System*. Hasil pengujian tersebut menyimpulkan bahwa data waktu antar kerusakan (*Mean Time Between Failure*/MTBF) mengikuti pola distribusi Ekspensial, sedangkan data durasi perbaikan (*Mean Time To Repair*/MTTR) paling sesuai dengan pola distribusi Lognormal. Selanjutnya untuk penetapan model tersebut, tahapan awal dalam pengolahan simulasi Monte Carlo adalah mendapatkan nilai parameter dari masing - masing distribusi.

Hasil nilai parameter ini didapatkan secara presisi menggunakan *software* JASP. Nilai parameter yang dihasilkan sangat penting karena akan berfungsi sebagai variabel masukan utama (*input parameters*) dalam mekanisme algoritma pembangkitan bilangan acak di tahap

simulasi selanjutnya. Dibawah ini merupakan parameter yang dihasilkan dari *software* JASP adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 7 Parameter JASP

Variabel Keandalan	Jenis Distribusi Terpilih	Nilai Parameter (JASP)
<i>Mean Time Between Failure</i>	Ekspensial	$\lambda = 0,0003753$
<i>Mean Time To Repair</i>	Lognormal	$\mu = 0,0002232$ $\sigma = 0,0002438$

Penggunaan *software* JASP pada tahapan ini memastikan bahwa parameter untuk MTBF dan parameter variabilitas durasi perbaikan untuk MTTR dihitung dengan tingkat akurasi matematis yang tinggi. Penetapan parameter yang tervalidasi ini sangat efektif agar model simulasi stokastik yang dibangun tidak menyimpang dari karakteristik asli mesin, sehingga mampu memproyeksikan probabilitas kejadian aktual di lapangan secara realistis dan dapat diandalkan.

4.3.2 Mekanisme Pembangkitan Bilangan Acak (Probabilistik)

Mekanisme saat membangkitkan simulasi Monte Carlo adalah proses transformasi stokastik, yaitu mengubah bilangan acak menjadi nilai variabel waktu yang mengikuti distribusi tertentu. Bilangan acak T yang berada pada rentang 0 sampai 1 digunakan sebagai dasar untuk membangkitkan data simulasi agar memiliki karakteristik yang seragam sesuai dengan model distribusi yang telah ditentukan. Proses konversi ini dilakukan dengan memetakan bilangan acak ke dalam fungsi distribusi.

Pada penelitian ini, distribusi yang digunakan adalah distribusi Ekspensial untuk *Mean Time Between Failure* (MTBF) dan distribusi Lognormal untuk *Mean Time To Repair* (MTTR). Dalam implementasi di *Microsoft Excel*, pembangkitan nilai simulasi dilakukan menggunakan rumus sebagai berikut::

$$MTBF = \frac{LN(1-RAND())}{(\lambda)}$$

$$MTTR = \exp(\mu + \sigma \cdot NORM.S.INV(RAND()))$$

Keterangan:

λ = Nilai parameter JASP Ekspensial

μ, σ = Nilai parameter JASP Lognormal

$RAND()$ = Fungsi pembangkit bilangan acak (0-1) pada excel

LN = Logaritma natural

$\exp$ = Fungsi ekspensial

NORM.S.INV = Fungsi distribusi Lognormal standar terbalik

Mekanisme ini memungkinkan pembangkitan ribuan data yang secara statistik selaras dengan perilaku historis mesin, namun memiliki variasi stokastik yang merepresentasikan ketidakpastian hasil angka acak.

4.3.3 Garis Waktu dan Penentuan Frekuensi Kerusakan

Tahapan selanjutnya dalam proses simulasi Monte Carlo adalah menyusun garis waktu kejadian kegagalan berdasarkan data hasil pembangkitan variabel waktu yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya. Untuk rumus yang digunakan pada excel adalah:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{jika } x \leq T \\ 0, & \text{jika } x > T \end{cases}$$

Keterangan:

x = Nilai MTBF/MTTR

T = Batas waktu

Frekuensi kerusakan dihitung dengan cara menghitung jumlah kejadian kegagalan yang terjadi sebelum melewati batas waktu tersebut. Dengan demikian, jumlah total kerusakan dalam satu periode dapat dirumuskan menggunakan excel sebagai berikut:

$$MTBF = IF(TBF \leq 8760; 1;)$$

$$MTTR = IF(TTR \leq 8760; 1;)$$

Melalui pendekatan ini, setiap hasil simulasi tidak hanya menghasilkan nilai acak secara terpisah, tetapi membentuk pola kejadian yang menyerupai kondisi operasional nyata. Selanjutnya, untuk mengetahui jumlah frekuensi kerusakan dalam periode tertentu, digunakan batas waktu operasional yang telah ditentukan, yaitu selama 20 tahun atau setara dengan 7.300 hari atau 8.760 jam per tahun.

4.4 Pengolahan Data Kuantitatif *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA)

Setelah dilakukan perhitungan frekuensi kegagalan (*Failure*) dan estimasi lama waktu perbaikan pada bagian sebelumnya, tahap selanjutnya yaitu melakukan pengolahan data menggunakan pendekatan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA). Data hasil estimasi tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam menghitung biaya yang timbul selama umur operasional perawatan. Pada tahap ini, seluruh komponen biaya yang berkaitan dengan aktivitas pemeliharaan dihitung secara bertahap. Perhitungan dilakukan untuk mengetahui besarnya biaya yang muncul akibat kegiatan *Corrective Maintenance*, *Preventive Maintenance*, dan

Predictive Maintenance. Selain itu, biaya investasi awal serta kerugian akibat kehilangan waktu juga diperhitungkan agar total biaya yang dihasilkan dapat menggambarkan kondisi yang sebenarnya. Hasil dari pengolahan data ini akan menunjukkan besarnya total biaya yang harus ditanggung selama periode analisis. Maka, dapat diketahui kontribusi masing-masing jenis biaya terhadap keseluruhan biaya siklus hidup peralatan. Berikut akan dijelaskan rincian setiap komponen biaya.

4.4.1 Perhitungan Biaya *Corrective Maintenance*

Perhitungan untuk biaya *Corrective Maintenance* (CM) dilakukan dengan mengacu ke jumlah kerusakan tahunan serta biaya yang dikeluarkan untuk setiap satu kali perbaikan. Periode analisis yang dilakukan dipenelitian ini yaitu selama 40 tahun yang dimulai dari tahun 2016 - 2055. Data dari tahun 2016 - 2023 merupakan data aktual yang berasal dari data histori kerusakan, sedangkan untuk 2024 - 2055 merupakan hasil prediksi tahunan yang diperoleh dari hasil perhitungan sebelumnya. Dari data aktual diketahui terjadi 26 kerusakan yang tercatat. Karena analisis biaya dilakukan dengan menggunakan perspektif tahun 2024 sebagai tahun dasar, maka seluruh biaya historis periode 2016 - 2023 perlu disetarkan terlebih dahulu ke nilai tahun 2024. Penyetaraan dilakukan menggunakan konsep nilai masa depan (*future value*) dengan persamaan:

$$FV = PV (1 + r)^n$$

Dimana:

- FV merupakan biaya pada tahun 2024
- PV merupakan nilai biaya pada tahun terjadinya pengeluaran
- r adalah tingkat suku bunga atau MURR yang digunakan (12%)
- n adalah selisih tahun antara tahun kejadian dan tahun 2024

Melalui persamaan tersebut, setiap biaya CM pada tahun 2016 - 2023 dikonversikan ke nilai ekuivalen tahun 2024. Hasil konversi inilah yang ditampilkan di kolom biaya CM Tahun 2024. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa biaya rata - rata satu kali perbaikan adalah sebesar Rp13.148.074,44. Karena periode tersebut sudah berada dalam perspektif tahun 2024, maka tidak diperlukan lagi proses konversi nilai. Berikut merupakan rumus yang digunakan untuk mendapatkan biaya *maintenance* 1 kali perbaikan:

$$\text{Biaya maintenance dalam 1 perbaikan} = \frac{\sum \text{Biaya CM 2024 (2017 - 2023)}}{\sum \text{Jumlah kerusakan (2016 - 2023)}}$$

Selanjutnya untuk periode prediksi tahun 2024 - 2055, biaya CM dihitung dengan mengalikan jumlah prediksi tahun 2024 - 2055 dengan Biaya *Maintenance* 1 kali perbaikan, biaya CM dihitung dengan jumlah prediksi kejadian kerusakan pada masing - masing tahun yang didapatkan dari simulasi *montecarlo* untuk mendapatkan berapa kali jumlah kerusakan yang dialami. Dan berikut merupakan tabel perhitungan biaya *Corrective Maintenance*:

Tabel 4. 8 perhitungan biaya *Corrective Maintenance*

Tahun ke-	Tahun	Prediksi	Biaya			Biaya Maintenance 1 kali perbaikan
		CM per tahun (kejadian)	Biaya CM per tahun (Rp)	Biaya CM Tahun 2024		
1	2016	0	-			Rp13.148.074,44
2	2017	4	Rp 54.790.000	Rp 121.123.244,40		
3	2018	3	Rp -	Rp 8,12		
4	2019	9	Rp 120.000.025	Rp 211.481.052,40		
5	2020	4	Rp 5.872.000	Rp 9.239.710,46		
6	2021	3	Rp -	Rp 3,37		
7	2022	2	Rp 4.715	Rp 5.916,62		
8	2023	4	Rp 24.400,00	Rp 27.329,00		
9	2024	4	Rp -	Rp 52.592.297,75		
10	2025	5	Rp -	Rp 65.740.372,19		
11	2026	3	Rp -	Rp 39.444.223,31		
12	2027	3	Rp -	Rp 39.444.223,31		
13	2028	3	Rp -	Rp 39.444.223,31		
14	2029	3	Rp -	Rp 39.444.223,31		
15	2030	3	Rp -	Rp 39.444.223,31		
16	2031	4	Rp -	Rp 52.592.297,75		
17	2032	3	Rp -	Rp 39.444.223,31		
18	2033	3	Rp -	Rp 39.444.223,31		
19	2034	2	Rp -	Rp 26.296.148,87		
20	2035	1	Rp -	Rp 13.148.074,44		
21	2036	4	Rp -	Rp 52.592.297,75		
22	2037	1	Rp -	Rp 13.148.074,44		
23	2038	5	Rp -	Rp 65.740.372,19		

Tahun ke-	Tahun	Prediksi CM per tahun (kejadian)	Biaya CM per tahun (Rp)		Biaya CM Tahun 2024		Biaya <i>Maintenance</i> 1 kali perbaikan
24	2039	3	Rp	-	Rp	39.444.223,31	
25	2040	2	Rp	-	Rp	26.296.148,87	
26	2041	4	Rp	-	Rp	52.592.297,75	
27	2042	2	Rp	-	Rp	26.296.148,87	
28	2043	5	Rp	-	Rp	65.740.372,19	
29	2044	4	Rp	-	Rp	52.592.297,75	
30	2045	3	Rp	-	Rp	39.444.223,31	
31	2046	1	Rp	-	Rp	13.148.074,44	
32	2047	3	Rp	-	Rp	39.444.223,31	
33	2048	2	Rp	-	Rp	26.296.148,87	
34	2049	1	Rp	-	Rp	13.148.074,44	
35	2050	4	Rp	-	Rp	52.592.297,75	
36	2051	3	Rp	-	Rp	39.444.223,31	
37	2052	2	Rp	-	Rp	26.296.148,87	
38	2053	3	Rp	-	Rp	39.444.223,31	
39	2054	6	Rp	-	Rp	78.888.446,62	
40	2055	4	Rp	-	Rp	52.592.297,75	

4.4.2 Perhitungan Biaya *Preventive Maintenance*

Biaya *Preventive Maintenance* merupakan biaya yang dikeluarkan secara terjadwal untuk menjaga kondisi peralatan agar tetap berada pada tingkat kinerja yang tetap optimal serta meminimalkan potensi terjadinya kerusakan mendadak. Berbeda dengan *Corrective Maintenance* yang bersifat reaktif, biaya *preventive maintenance* bersifat terencana dan dilakukan secara rutin sesuai jadwal perawatan yang telah ditetapkan perusahaan. Pada penelitian ini dilakukan dari periode 2016 - 2055. Biaya data PM tersedia dari 2018 - 2023, sedangkan 2016 - 2017 belum terdapat pengeluaran biaya karena mungkin belum tersedia program perawatan terjadwal secara sistematis. Untuk analisis ekonomi, seluruh biaya historis dikonversi kedalam nilai ekuivalen tahun dasar 2024 menggunakan suku bunga sebesar 12%,

sehingga seluruh nilai berada di satuan yang sama agar tetap konsisten, dan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$FV = PV(1 + r)^n$$

Dimana:

- FV nilai biaya tahun 2024
- PV biaya aktual pada tahun terjadinya pengeluaran
- r tingkat suku bunga 12%
- n selisih tahun menuju 2024

Perhitungan tersebut dilakukan dari tahun 2018 - 2023. Selanjutnya, untuk menentukan esitmasi biaya PM mulai tahun 2024, menggunakan rata rata biaya aktual selama periode 2016 - 2023 perhitungan menggunakan rumus:

$$Biaya\ rata - rata = \frac{\sum Biaya\ PM\ 2024}{8\ (data\ aktual\ 2016 - 2023)}$$

Nilai ini kemudian diasumsikan sebagai biaya PM tahunan yang konstan untuk periode 2024 - 2055, sehingga mencerminkan estimasi kebutuhan biaya rutin berdasarkan kinerja histori perusahaan. Berikut merupakan tabel perhitungan biaya *Preventive Maintenance*:

Tabel 4. 9 perhitungan biaya *Preventive Maintenance*

Tahun ke-	Tahun	Biaya PM per tahun (Rp)	Biaya PM Tahun 2024
1	2016	Rp -	
2	2017	Rp -	
3	2018	Rp 99.606.622,00	Rp 196.605.818,21
4	2019	Rp 20.401.789,00	Rp 35.954.929,52
5	2020	Rp 198.866.325,00	Rp 312.920.017,22
6	2021	Rp 112.947.636,00	Rp 158.683.299,72
7	2022	Rp 128.077.978,00	Rp 160.661.017,72
8	2023	Rp 71.460.000,00	Rp 80.035.201,00
9	2024		Rp 118.107.535,42
10	2025		Rp 118.107.535,42
11	2026		Rp 118.107.535,42
12	2027		Rp 118.107.535,42
13	2028		Rp 118.107.535,42

Tahun ke-	Tahun	Biaya PM per tahun (Rp)	Biaya PM Tahun 2024
14	2029		Rp 118.107.535,42
15	2030		Rp 118.107.535,42
16	2031		Rp 118.107.535,42
17	2032		Rp 118.107.535,42
18	2033		Rp 118.107.535,42
19	2034		Rp 118.107.535,42
20	2035		Rp 118.107.535,42
21	2036		Rp 118.107.535,42
22	2037		Rp 118.107.535,42
23	2038		Rp 118.107.535,42
24	2039		Rp 118.107.535,42
25	2040		Rp 118.107.535,42
26	2041		Rp 118.107.535,42
27	2042		Rp 118.107.535,42
28	2043		Rp 118.107.535,42
29	2044		Rp 118.107.535,42
30	2045		Rp 118.107.535,42
31	2046		Rp 118.107.535,42
32	2047		Rp 118.107.535,42
33	2048		Rp 118.107.535,42
34	2049		Rp 118.107.535,42
35	2050		Rp 118.107.535,42
36	2051		Rp 118.107.535,42
37	2052		Rp 118.107.535,42
38	2053		Rp 118.107.535,42
39	2054		Rp 118.107.535,42
40	2055		Rp 118.107.535,42

4.4.3 Perhitungan Biaya *Predictive Maintenance*

Biaya *Predictive Maintenance* (PdM) merupakan biaya perawatan berbasis kondisi, dimana Tindakan pemeliharaan dilakukan berdasarkan hasil pemantauan parameter operasional dan kondisi aktual peralatan. Tujuannya yaitu untuk mengurangi potensi kerusakan mendadak sekaligus mengoptimalkan waktu penggantian komponen sehingga lebih efisien dibandingkan perawatan reaktif. Dari data historis, biaya aktual *Predictive Maintenance* hanya terjadi di tahun 2020 sebesar Rp113.794.500, sedangkan tahun 2016 - 2019 dan 2021 - 2023 tidak ada pengeluaran biaya PdM. Berikut ini rumus untuk melakukan analisis ekonomi dengan tingkat suku bunga sebesar 12% yang merupakan ketentuan dari perusahaan yang dituju adalah sebagai berikut:

$$FV = PV(1 + r)^n$$

Dimana:

- FV nilai biaya tahun 2024
- PV biaya aktual pada tahun terjadinya pengeluaran
- r tingkat suku bunga 12%
- n selisih tahun menuju 2024

Selanjutnya, menentukan estimasi biaya tahunan PdM di periode yang direncanakan dari tahun 2024 - 2055, digunakan rata-rata biaya historis periode 2016 - 2023. Karena hanya terdapat satu pengeluaran aktual, maka rata-rata biaya historis periode 2016 - 2023, maka rumus perhitungannya:

$$\text{Biaya rata - rata} = \frac{\sum \text{Biaya PdM 2024}}{8 (\text{data aktual 2016} - 2023)}$$

Nilai tersebut merupakan nilai prediksi yang dimulai dari 2024 dan menjadi prediksi hingga tahun 2055 yang dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 4. 10 perhitungan biaya *Predictive Maintenance*

Tahun ke-	Tahun	Biaya PdM per tahun (Rp)	Biaya PdM Tahun 2024
1	2016	Rp	-
2	2017	Rp	-
3	2018	Rp	-
4	2019	Rp	-
5	2020	Rp	113.794.500
			Rp 179.057.853,59

Tahun ke-	Tahun	Biaya PdM per tahun (Rp)		Biaya PdM Tahun 2024	
6	2021	Rp	-	Rp	3,37
7	2022	Rp	-	Rp	2,12
8	2023	Rp	-	Rp	1,00
9	2024			Rp	22.382.232,51
10	2025			Rp	22.382.232,51
11	2026			Rp	22.382.232,51
12	2027			Rp	22.382.232,51
13	2028			Rp	22.382.232,51
14	2029			Rp	22.382.232,51
15	2030			Rp	22.382.232,51
16	2031			Rp	22.382.232,51
17	2032			Rp	22.382.232,51
18	2033			Rp	22.382.232,51
19	2034			Rp	22.382.232,51
20	2035			Rp	22.382.232,51
21	2036			Rp	22.382.232,51
22	2037			Rp	22.382.232,51
23	2038			Rp	22.382.232,51
24	2039			Rp	22.382.232,51
25	2040			Rp	22.382.232,51
26	2041			Rp	22.382.232,51
27	2042			Rp	22.382.232,51
28	2043			Rp	22.382.232,51
29	2044			Rp	22.382.232,51
30	2045			Rp	22.382.232,51
31	2046			Rp	22.382.232,51
32	2047			Rp	22.382.232,51
33	2048			Rp	22.382.232,51
34	2049			Rp	22.382.232,51
35	2050			Rp	22.382.232,51

Tahun ke-	Tahun	Biaya PdM per tahun (Rp)	Biaya PdM Tahun 2024
36	2051	Rp	22.382.232,51
37	2052	Rp	22.382.232,51
38	2053	Rp	22.382.232,51
39	2054	Rp	22.382.232,51
40	2055	Rp	22.382.232,51

4.4.4 Perhitungan Total Maintenance Cost

Setelah dilakukan perhitungan biaya *Corrective Maintenance*, *Preventive Maintenance*, dan *Predictive Maintenance* pada subbab sebelumnya, tahap berikutnya adalah menyatukan seluruh komponen biaya tersebut dalam satu rekapitulasi untuk melihat struktur biaya pemeliharaan sistem secara menyeluruh selama periode 2016 - 2055. Perhitungan *Maintenance Cost* ini bertujuan untuk mengidentifikasi kontribusi masing-masing strategi pemeliharaan terhadap total biaya tahunan serta melihat pola perubahan biaya dari periode proyeksi jangka panjang. Kolom pertama yang dianalisis adalah *Corrective Maintenance Cost*, yaitu biaya yang timbul akibat kerusakan actual peralatan. Nilai ini bersifat tidak pasti karena bergantung pada frekuensi dan tingkat keparahan kegagalan sistem. Ditahun awal khususnya 2017 dan 2019 biaya menunjukkan nilai yang tinggi, memasuki periode 2024 - 2055, biaya tetap berfluktuasi mengikuti pola estimasi kerusakan tahunan.

Selanjutnya bagian *Preventive Maintenance Cost* mempresentasikan biaya perawatan terjadwal yang telah dikonversi ke nilai 2024, menggunakan tingkat suku bunga sebesar 12% untuk data historis. Bagian PM ini menjadi komponen terbesar dan paling stabil dalam struktur biaya tahunan, mencerminkan dominasi strategi perawatan terjadwal dalam sistem pemeliharaan. Selanjutnya yaitu *Predictive Maintenance Cost*, yang dihitung untuk dirata rata ratakan selama periode historis. Secara nominal, komponen ini lebih kecil dibandingkan PM, namun berfungsi untuk mengurangi kegagalan yang terjadi secara mendadak. Dan yang terakhir yaitu *Total Maintenance Cost* pada setiap tahun yang diperoleh dari penjumlahan ketiga komponen tersebut. Nilai total ini memberikan gambaran beban biaya pemeliharaan sistem secara keseluruhan dalam satu tahun operasional yang dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 4. 11 Total *Maintenance Cost*

Tahun Ke-	Tahun Ke	<i>Corrective Maintenance Cost (Rp)</i>	<i>Preventive Maintenance Cost (Rp)</i>	<i>Predictive Maintenance Cost (Rp)</i>	<i>Total Maintenance Cost (Rp)</i>
1	2016	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -
2	2017	Rp121.123.244	Rp -	Rp -	Rp 121.123.244
3	2018	Rp 8	Rp196.605.818,21	Rp -	Rp 196.605.826
4	2019	Rp211.481.052	Rp 35.954.929,52	Rp -	Rp 247.435.982
5	2020	Rp 9.239.710	Rp312.920.017,22	Rp 179.057.853,59	Rp 501.217.581
6	2021	Rp 3	Rp158.683.299,72	Rp 3,37	Rp 158.683.306
7	2022	Rp 5.917	Rp160.661.017,72	Rp 2,12	Rp 160.666.936
8	2023	Rp 27.329	Rp 80.035.201,00	Rp 1,00	Rp 80.062.531
9	2024	Rp 52.592.298	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 193.082.066
10	2025	Rp 65.740.372	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 206.230.140
11	2026	Rp 39.444.223	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 179.933.991
12	2027	Rp 39.444.223	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 179.933.991
13	2028	Rp 39.444.223	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 179.933.991
14	2029	Rp 39.444.223	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 179.933.991
15	2030	Rp 39.444.223	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 179.933.991
16	2031	Rp 52.592.298	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 193.082.066
17	2032	Rp 39.444.223	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 179.933.991
18	2033	Rp 39.444.223	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 179.933.991
19	2034	Rp 26.296.149	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 166.785.917
20	2035	Rp 13.148.074	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 153.637.842
21	2036	Rp 52.592.298	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 193.082.066
22	2037	Rp 13.148.074	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 153.637.842
23	2038	Rp 65.740.372	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 206.230.140
24	2039	Rp 39.444.223	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 179.933.991
25	2040	Rp 26.296.149	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 166.785.917
26	2041	Rp 52.592.298	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 193.082.066
27	2042	Rp 26.296.149	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 166.785.917
28	2043	Rp 65.740.372	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 206.230.140
29	2044	Rp 52.592.298	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 193.082.066
30	2045	Rp 39.444.223	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 179.933.991

Tahun Ke-	Tahun Ke	Corrective Maintenance Cost (Rp)	Preventive Maintenance Cost (Rp)	Predictive Maintenance Cost (Rp)	Total Maintenance Cost (Rp)
31	2046	Rp 13.148.074	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 153.637.842
32	2047	Rp 39.444.223	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 179.933.991
33	2048	Rp 26.296.149	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 166.785.917
34	2049	Rp 13.148.074	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 153.637.842
35	2050	Rp 52.592.298	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 193.082.066
36	2051	Rp 39.444.223	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 179.933.991
37	2052	Rp 26.296.149	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 166.785.917
38	2053	Rp 39.444.223	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 179.933.991
39	2054	Rp 78.888.447	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 219.378.215
40	2055	Rp 52.592.298	Rp118.107.535,42	Rp 22.382.232,51	Rp 193.082.066
Rata-rata		Rp 41.088.416	Rp 118.107.535	Rp 22.382.233	Rp 181.578.184

4.4.5 Perhitungan *Oppurtunity Lost*

Pada bagian ini dilakukan analisis terhadap *Oppurtunity Lost* atau potensi pendapatan yang hilang akibat terjadinya *downtime* mesin selama periode pengamatan tahun 2016 - 2055. Berbeda dengan subbab sebelumnya yang berfokus pada biaya pemeliharaan (CM, PM, dan PdM), bagian ini tidak membahas biaya perawatan secara langsung, melainkan kerugian produksi yang timbul akibat mesin tidak beroperasi. Data frekuensi failure tahun 2016 - 2023 diperoleh dari data aktual kerusakan pada sistem *Corrective Maintenance* (CM). Sementara itu, untuk periode proyeksi 2024 - 2055, frekuensi kegagalan ditentukan dari data historis CM sebelumnya dari selisih antara selesai *downtime* dengan downtime sebelumnya selanjutnya dilakukan simulasi berbasis pola keandalan mesin dan mendapatkan data frekuensi *failure* setiap tahunnya. Adapun durasi *failure* per tahun (jam) diperoleh dari selisih antara selesai *downtime* dengan mulai *downtime* yang juga dihitung berdasarkan data historis *Corrective Maintenance* (CM). Data tersebut merepresentasikan rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk melakukan perbaikan setiap kali terjadi kerusakan. Maka dari itu yang dibutuhkan untuk melakukan perbaikan setiap kali terjadi kegagalan. Oleh karena itu, frekuensi *failure* maupun durasi *failure* sama-sama bersumber dari data kerusakan aktual CM.

Total *Downtime* dihitung dengan cara:

$$\text{Total Downtime} = \text{Frekuensi failure} \times \text{Durasi failure}$$

Nilai downtime ini yang menjadi dasar untuk mengetahui kerugian saat proses produksi. Pada kolom kapasitas (MWh - kWh), sistem diasumsikan memiliki kapasitas produksi sebesar 60 MWh atau 60.000 kWh per jam operasi. Harga listrik yang digunakan dalam perhitungan adalah sebesar Rp 1.269 per kWh, yang diperoleh dari konversi harga listrik sebesar \$0,08 dengan kurs Rp15.866. Kapasitas ini merepresentasikan jumlah energi yang seharusnya dapat diproduksi

dalam kondisi normal tanpa gangguan. Dari parameter tersebut, maka cara untuk mengetahui *Oppurtunity Lost* yaitu dengan cara:

$$\text{Oppurtunity Lost} = \text{Total downtime} \times \text{Kapasitas (kWh)} \times \text{Harga}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa semakin besar frekuensi dan durasi kerusakan, maka total *downtime* meningkat dan berdampak langsung pada kenaikan nilai *opportunity lost*. Sebagai contoh, pada tahun 2054 dengan total *downtime* sebesar 120 jam, kerugian mencapai Rp9.138.816.000, yang merupakan salah satu nilai tertinggi dalam periode analisis. Pada tahun - tahun dengan *downtime* rendah seperti 2047, nilai kerugian hanya Rp456.940.800. Untuk selebihnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 4. 12 Perhitungan *Oppurtunity Lost*

Tahun Ke	Frekuensi <i>Failure</i>	Durasi <i>Failure/Tahun</i> (Jam)	Total Downtime (Jam)	Kapasitas (Mwh - Kwh)	Harga Listrik \$		<i>Oppurtunity Lost</i>
				60	\$	0,08	
				1000	Rp	15.866	
2016	0	0	0	60000	Rp	1.269	Rp -
2017	4	6	24	60000	Rp	1.269	Rp 1.827.763.200
2018	3	20	60	60000	Rp	1.269	Rp 4.569.408.000
2019	9	10	90	60000	Rp	1.269	Rp 6.854.112.000
2020	4	20	80	60000	Rp	1.269	Rp 6.092.544.000
2021	3	9	27	60000	Rp	1.269	Rp 2.056.233.600
2022	2	20	40	60000	Rp	1.269	Rp 3.046.272.000
2023	4	8	32	60000	Rp	1.269	Rp 2.437.017.600
2024	4	20	80	60000	Rp	1.269	Rp 6.092.544.000

Tahun Ke	Frekuensi <i>Failure</i>	Durasi <i>Failure/Tahun</i> (Jam)	Total Downtime (Jam)	Kapasitas (Mwh - Kwh)	Harga Listrik \$		<i>Oppurtunity Lost</i>
				60	\$	0,08	
				1000	Rp	15.866	
2025	5	8	40	60000	Rp	1.269	Rp 3.046.272.000
2026	3	20	60	60000	Rp	1.269	Rp 4.569.408.000
2027	3	8	24	60000	Rp	1.269	Rp 1.827.763.200
2028	3	9	27	60000	Rp	1.269	Rp 2.056.233.600
2029	3	20	60	60000	Rp	1.269	Rp 4.569.408.000
2030	3	20	60	60000	Rp	1.269	Rp 4.569.408.000
2031	4	17	68	60000	Rp	1.269	Rp 5.178.662.400
2032	3	20	60	60000	Rp	1.269	Rp 4.569.408.000
2033	3	5	15	60000	Rp	1.269	Rp 1.142.352.000
2034	2	20	40	60000	Rp	1.269	Rp 3.046.272.000
2035	1	12	12	60000	Rp	1.269	Rp 913.881.600
2036	4	20	80	60000	Rp	1.269	Rp 6.092.544.000
2037	1	20	20	60000	Rp	1.269	Rp 1.523.136.000
2038	5	12	60	60000	Rp	1.269	Rp 4.569.408.000
2039	3	20	60	60000	Rp	1.269	Rp 4.569.408.000
2040	2	20	40	60000	Rp	1.269	Rp 3.046.272.000

Tahun Ke	Frekuensi <i>Failure</i>	Durasi <i>Failure/Tahun</i> (Jam)	Total Downtime (Jam)	Kapasitas (Mwh - Kwh)	Harga Listrik \$		<i>Oppurtunity Lost</i>
				60	\$	0,08	
				1000	Rp	15.866	
2041	4	12	48	60000	Rp	1.269	Rp 3.655.526.400
2042	2	20	40	60000	Rp	1.269	Rp 3.046.272.000
2043	5	12	60	60000	Rp	1.269	Rp 4.569.408.000
2044	4	20	80	60000	Rp	1.269	Rp 6.092.544.000
2045	3	20	60	60000	Rp	1.269	Rp 4.569.408.000
2046	1	20	20	60000	Rp	1.269	Rp 1.523.136.000
2047	3	2	6	60000	Rp	1.269	Rp 456.940.800
2048	2	19	38	60000	Rp	1.269	Rp 2.893.958.400
2049	1	20	20	60000	Rp	1.269	Rp 1.523.136.000
2050	4	9	36	60000	Rp	1.269	Rp 2.741.644.800
2051	3	20	60	60000	Rp	1.269	Rp 4.569.408.000
2052	2	20	40	60000	Rp	1.269	Rp 3.046.272.000
2053	3	11	33	60000	Rp	1.269	Rp 2.513.174.400
2054	6	20	120	60000	Rp	1.269	Rp 9.138.816.000
2055	4	20	80	60000	Rp	1.269	Rp 6.092.544.000

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

Pada tahap ini dilakukan pengolahan data kuantitatif menggunakan metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) untuk mengonversi total biaya perawatan kumulatif menjadi nilai tahunan ekuivalen.

4.5.1 Konsep EAC dan Investasi Awal

Pada tahap ini dilakukan pengolahan data menggunakan metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) untuk mengubah total biaya yang terjadi selama umur peralatan menjadi biaya tahunan yang ekuivalen. Metode ini digunakan agar seluruh komponen biaya, baik investasi maupun perawatan, dapat dibandingkan dalam satuan yang sama yaitu biaya per tahun. Dalam penelitian ini, digunakan tingkat suku bunga sebesar 12% yang merepresentasikan *Minimum Attractive Rate of Return* (MARR). Nilai MARR tersebut merupakan ketentuan dari perusahaan yang digunakan sebagai standar dalam mengevaluasi kelayakan ekonomi suatu aset atau keputusan pemeliharaan. Penggunaan MARR ini bertujuan untuk mempertimbangkan nilai waktu uang (*time value of money*), sehingga biaya yang terjadi pada waktu yang berbeda dapat dianalisis secara setara dalam periode tahunan. Komponen biaya yang dianalisis terdiri dari biaya investasi awal dan biaya perawatan.

Biaya investasi awal merupakan biaya yang dikeluarkan pada awal pengadaan *Air Compressor System* berdasarkan dari data IW39 pada tahun 2016 - 2023 diperoleh sebesar Rp458.621.542.586. dan nilai asset yang sudah dilakukan perhitungan *Future Value* (FV) menjadi tahun 2024 adalah sebesar Rp1.135.530.051.310,76. Sedangkan biaya perawatan merupakan akumulasi dari biaya *corrective maintenance*, *preventive maintenance*, dan *predictive maintenance* yang terus bertambah setiap tahun berdasarkan data historis. Rumus *Equivalent Annual Cost* yang digunakan adalah:

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

Diketahui bahwa:

- NPV : nilai kini bersih dari keseluruhan arus kas selama umur equipment
- R : tingkat diskonto
- t : umur ekonomis aset

Berdasarkan hasil pengolahan data, nilai EAC Biaya Perawatan menunjukkan pola yang fluktuatif mengikuti pertambahan akumulasi biaya tahunan.

4.5.2 Hasil Perhitungan EAC

Hasil perhitungan *Equivalent Annual Cost* (EAC) menunjukkan adanya perbedaan karakteristik nilai EAC biaya perawatan dan EAC investasi. EAC biaya perawatan dihitung dari akumulasi biaya yang terus meningkat setiap tahun. Sebaliknya, EAC investasi dihitung dari biaya investasi awal yang tetap. Pada periode awal, nilai EAC relatif tinggi karena faktor pembagi (n) masih kecil. Seiring bertambahnya tahun analisis, nilai EAC cenderung lebih stabil karena efek penyebaran biaya kumulatif terhadap periode waktu yang lebih panjang. Berikut merupakan biaya EAC dari tahun 2016 - 2055 adalah sebagai berikut:

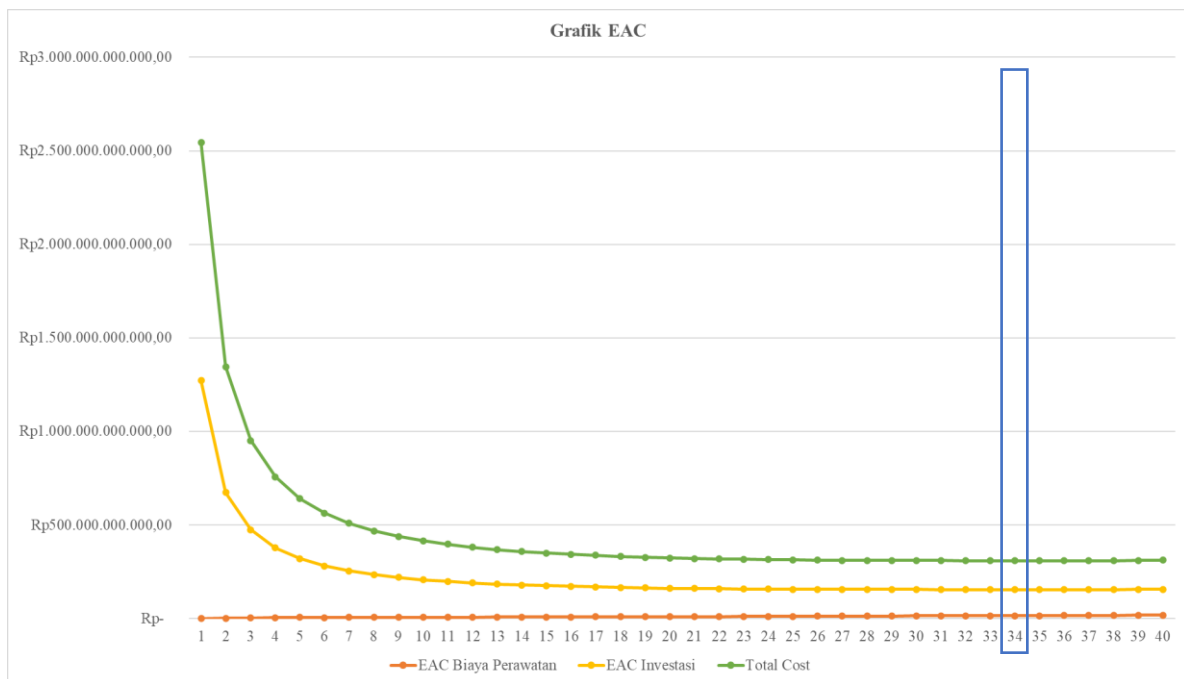
Tabel 4. 13 Hasil Perhitungan *Equivalent Annual Cost*

Tahun Ke-	Tahun	Total Biaya <i>Operation and Maintenance</i>	Akumulasi biaya Perawatan	EAC Biaya Perawatan	EAC Investasi	Total Cost
1	2016	Rp -	Rp -	Rp -	Rp 1.271.793.657.468	Rp 1.271.793.657.468
2	2017	Rp 1.948.886.444	Rp 1.948.886.444	Rp 1.153.152.432	Rp 671.890.988.851	Rp 673.044.141.283
3	2018	Rp 4.766.013.826	Rp 6.714.900.271	Rp 2.795.741.882	Rp 472.776.779.258	Rp 475.572.521.140
4	2019	Rp 7.101.547.982	Rp 13.816.448.253	Rp 4.548.850.552	Rp 373.855.596.351	Rp 378.404.446.904
5	2020	Rp 6.593.761.581	Rp 20.410.209.834	Rp 5.661.990.839	Rp 315.007.087.145	Rp 320.669.077.984
6	2021	Rp 2.214.916.906	Rp 22.625.126.740	Rp 5.503.012.706	Rp 276.190.112.523	Rp 281.693.125.229
7	2022	Rp 3.206.938.936	Rp 25.832.065.677	Rp 5.660.263.745	Rp 248.814.773.891	Rp 254.475.037.636
8	2023	Rp 2.517.080.131	Rp 28.349.145.808	Rp 5.706.763.602	Rp 228.585.425.797	Rp 234.292.189.399

Tahun Ke-	Tahun	Total Biaya Operation and Maintenance	Akumulasi biaya Perawatan	EAC Biaya Perawatan	EAC Investasi	Total Cost
9	2024	Rp 6.285.626.066	Rp 34.634.771.874	Rp 6.500.215.498	Rp 213.115.018.191	Rp 219.615.233.689
10	2025	Rp 3.252.502.140	Rp 37.887.274.014	Rp 6.705.447.524	Rp 200.970.837.010	Rp 207.676.284.533
11	2026	Rp 4.749.341.991	Rp 42.636.616.005	Rp 7.180.662.922	Rp 191.240.752.684	Rp 198.421.415.606
12	2027	Rp 2.007.697.191	Rp 44.644.313.196	Rp 7.207.235.400	Rp 183.316.346.411	Rp 190.523.581.810
13	2028	Rp 2.236.167.591	Rp 46.880.480.787	Rp 7.298.221.754	Rp 176.776.133.353	Rp 184.074.355.107
14	2029	Rp 4.749.341.991	Rp 51.629.822.779	Rp 7.789.455.699	Rp 171.318.833.834	Rp 179.108.289.533
15	2030	Rp 4.749.341.991	Rp 56.379.164.770	Rp 8.277.827.999	Rp 166.723.336.379	Rp 175.001.164.379
16	2031	Rp 5.371.744.466	Rp 61.750.909.236	Rp 8.854.463.989	Rp 162.823.674.535	Rp 171.678.138.524
17	2032	Rp 4.749.341.991	Rp 66.500.251.227	Rp 9.340.407.666	Rp 159.492.834.993	Rp 168.833.242.659
18	2033	Rp 1.322.285.991	Rp 67.822.537.218	Rp 9.355.258.439	Rp 156.631.962.339	Rp 165.987.220.778
19	2034	Rp 3.213.057.917	Rp 71.035.595.135	Rp 9.644.005.852	Rp 154.162.971.946	Rp 163.806.977.798
20	2035	Rp 1.067.519.442	Rp 72.103.114.577	Rp 9.653.077.017	Rp 152.023.377.968	Rp 161.676.454.985
21	2036	Rp 6.285.626.066	Rp 78.388.740.643	Rp 10.366.134.237	Rp 150.162.597.908	Rp 160.528.732.145
22	2037	Rp 1.676.773.842	Rp 80.065.514.485	Rp 10.473.410.690	Rp 148.539.263.816	Rp 159.012.674.507
23	2038	Rp 4.775.638.140	Rp 84.841.152.625	Rp 10.992.016.761	Rp 147.119.233.659	Rp 158.111.250.420
24	2039	Rp 4.749.341.991	Rp 89.590.494.617	Rp 11.509.103.286	Rp 145.874.098.595	Rp 157.383.201.881
25	2040	Rp 3.213.057.917	Rp 92.803.552.533	Rp 11.832.450.146	Rp 144.780.047.260	Rp 156.612.497.406
26	2041	Rp 3.848.608.466	Rp 96.652.160.999	Rp 12.241.175.780	Rp 143.816.990.929	Rp 156.058.166.710

Tahun Ke-	Tahun	Total Biaya Operation and Maintenance	Akumulasi biaya Perawatan	EAC Biaya Perawatan	EAC Investasi	Total Cost
27	2042	Rp 3.213.057.917	Rp 99.865.218.916	Rp 12.573.439.877	Rp 142.967.881.944	Rp 155.541.321.821
28	2043	Rp 4.775.638.140	Rp 104.640.857.056	Rp 13.105.625.802	Rp 142.218.177.088	Rp 155.323.802.890
29	2044	Rp 6.285.626.066	Rp 110.926.483.122	Rp 13.828.118.321	Rp 141.555.410.978	Rp 155.383.529.299
30	2045	Rp 4.749.341.991	Rp 115.675.825.113	Rp 14.360.420.020	Rp 140.968.853.830	Rp 155.329.273.850
31	2046	Rp 1.676.773.842	Rp 117.352.598.955	Rp 14.514.880.239	Rp 140.449.234.605	Rp 154.964.114.844
32	2047	Rp 636.874.791	Rp 117.989.473.747	Rp 14.545.780.827	Rp 139.988.515.283	Rp 154.534.296.110
33	2048	Rp 3.060.744.317	Rp 121.050.218.063	Rp 14.879.530.283	Rp 139.579.705.477	Rp 154.459.235.759
34	2049	Rp 1.676.773.842	Rp 122.726.991.906	Rp 15.046.407.549	Rp 139.216.709.143	Rp 154.263.116.692
35	2050	Rp 2.934.726.866	Rp 125.661.718.772	Rp 15.370.516.619	Rp 138.894.197.024	Rp 154.264.713.643
36	2051	Rp 4.749.341.991	Rp 130.411.060.763	Rp 15.918.514.060	Rp 138.607.499.869	Rp 154.526.013.929
37	2052	Rp 3.213.057.917	Rp 133.624.118.680	Rp 16.280.708.150	Rp 138.352.518.570	Rp 154.633.226.721
38	2053	Rp 2.693.108.391	Rp 136.317.227.071	Rp 16.581.600.213	Rp 138.125.648.135	Rp 154.707.248.348
39	2054	Rp 9.358.194.215	Rp 145.675.421.285	Rp 17.694.023.141	Rp 137.923.713.063	Rp 155.617.736.205
40	2055	Rp 6.285.626.066	Rp 151.961.047.351	Rp 18.433.425.991	Rp 137.743.912.182	Rp 156.177.338.173

Dari tabel diatas, terlihat bahwa biaya perawatan meningkat secara signifikan seiring bertambahnya umur peralatan. Hal ini menyebabkan nilai EAC biaya perawatan pada awal periode relatif tinggi kemudian cenderung stabil di periode selanjutnya karena biaya yang didapat tersebar ke dalam periode waktu yang lebih panjang. Dan berikut merupakan grafik dari Total biaya EAC sebagai berikut:



Gambar 4. 3 Grafik total biaya EAC

Berdasarkan grafik, terlihat bahwa EAC investasi mengalami penurunan yang cukup signifikan pada tahun - tahun awal. Hal ini terjadi karena biaya investasi awal didistribusikan ke periode waktu yang semakin panjang, sehingga beban tahunan menjadi lebih kecil. Sebaliknya, EAC biaya perawatan menunjukkan tren yang cenderung meningkat akibat bertambahnya akumulasi biaya pemeliharaan dari waktu ke waktu. *Total cost* yang merupakan penjumlahan antara EAC investasi dan EAC biaya perawatan menunjukkan pola penurunan pada periode awal dan kemudian cenderung stabil. Kondisi ini menunjukkan adanya pergeseran dominasi biaya dari investasi ke biaya perawatan seiring bertambahnya umur peralatan.

Dari perhitungan yang didapatkan, Total biaya EAC terendah didapatkan pada tahun ke 34 atau pada tahun 2049 dengan biaya sebesar Rp154.263.116.692,35. Nilai ini menunjukkan bahwa *total cost* tersebut merupakan biaya terendah dari periode tahun 2016 hingga 2055, sehingga dapat menjadi dasar untuk dilakukan perbaikan maupun penggantian *Equipment Air Compressor System*.

BAB V

PEMBAHASAN

5.1 Hasil Analisis Simulasi Monte Carlo

Berdasarkan hasil simulasi Monte Carlo yang telah dilakukan, diperoleh gambaran distribusi kejadian kerusakan dan durasi perbaikan pada *Air Compressor System* di PT. XYZ. Simulasi ini menggunakan parameter distribusi yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu distribusi eksponensial untuk waktu antar kerusakan (MTBF) dan distribusi lognormal untuk waktu perbaikan (MTTR). Pemilihan distribusi ini didasarkan pada hasil pengujian kesesuaian distribusi (*goodness of fit*) yang menunjukkan bahwa kedua distribusi tersebut yang memiliki hasil terbesar dalam menggambarkan karakteristik data historis.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa frekuensi kerusakan yang dihasilkan bersifat fluktuatif pada setiap waktu rusak, namun masih berada dalam rentang yang konsisten dengan data historis. Hal ini menunjukkan bahwa analisis simulasi Monte Carlo mampu merepresentasikan ketidakpastian sistem secara realistis. Selain itu, variasi nilai waktu perbaikan yang dihasilkan dari distribusi lognormal menunjukkan adanya ketidakaturan durasi perbaikan, yang dapat dipengaruhi oleh faktor teknis, kesiapan tenaga kerja, maupun ketersediaan suku cadang. Secara umum, hasil simulasi ini memberikan pemahaman bahwa sistem *Air Compressor System* memiliki karakteristik kegagalan yang tidak sepenuhnya dapat diprediksi secara deterministik (acak). Oleh karena itu, penggunaan pendekatan probabilistik seperti Monte Carlo menjadi relevan untuk mendukung perencanaan pemeliharaan yang lebih adaptif. Namun demikian, hasil simulasi ini sangat bergantung pada kualitas data historis yang digunakan, sehingga apabila terdapat data yang kurang lengkap atau tidak konsisten, maka hasil simulasi juga dapat mengalami penyimpangan.

5.2 Hasil Analisis Life Cycle Cost Analysis (LCCA)

Dari hasil perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA), diperoleh total biaya yang dikeluarkan selama siklus umur operasional *Air Compressor System* yang terdiri dari biaya investasi awal, biaya operasional, biaya pemeliharaan, serta biaya akibat kegagalan. Analisis ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai beban biaya yang harus ditanggung perusahaan dalam jangka panjang, sehingga tidak hanya berfokus pada biaya awal saja. Dari hasil analisis, terlihat bahwa komponen biaya pemeliharaan dan biaya kegagalan memberikan kontribusi yang cukup

signifikan terhadap total biaya siklus hidup. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi kerusakan dan aktivitas pemeliharaan yang tinggi memiliki dampak langsung terhadap peningkatan biaya secara keseluruhan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa strategi perawatan yang diterapkan saat ini masih memiliki ruang untuk dioptimalkan, khususnya dalam mengurangi kejadian kerusakan berulang.

Selain itu, integrasi hasil simulasi Monte Carlo ke dalam perhitungan LCCA memberikan pendekatan yang lebih realistis dalam mengestimasi biaya. Hal ini dikarenakan nilai biaya yang digunakan tidak bersifat tetap, melainkan mempertimbangkan variasi yang mungkin terjadi di masa mendatang. Dengan demikian, hasil LCCA yang diperoleh dapat dijadikan dasar dalam pengambilan keputusan yang lebih akurat terkait pengelolaan aset dan perencanaan pemeliharaan jangka panjang.

5.3 Hasil Analisis *Equivalent Annual Cost* (EAC)

Hasil analisis menunjukkan bahwa total biaya EAC terendah diperoleh pada tahun ke - 34 atau tahun 2049 dengan nilai sebesar Rp154.263.116.692. Nilai tersebut merupakan biaya tahunan ekuivalen terendah selama periode analisis tahun 2016 - 2055, sehingga tahun 2049 dapat ditetapkan sebagai umur ekonomis *Air Compressor System* dan menjadi dasar dalam pengambilan keputusan terkait perbaikan maupun penggantian equipment. Jika dibandingkan dengan umur pakai teoritis *air compressor* industri, hasil penelitian ini masih berada dalam rentang yang wajar. Menurut Atlas Copco, *air compressor* industri yang mendapatkan pemeliharaan secara baik dapat beroperasi lebih dari 20 tahun bahkan mencapai lebih dari 30 tahun, sehingga umur ekonomis hasil penelitian yang mencapai sekitar 33 tahun masih relevan dengan karakteristik operasional peralatan industri.

Pada tahun 2049 diperoleh komposisi biaya berupa EAC biaya perawatan sebesar Rp15.046.407.549,03 atau sekitar 9,75% dari total biaya, sedangkan EAC investasi sebesar Rp139.216.709.143,32 atau sekitar 90,25% dari total biaya. Namun demikian, hasil penelitian ini merupakan hasil peramalan berdasarkan data historis yang digunakan dalam simulasi Monte Carlo, LCCA, dan EAC, sehingga berfungsi sebagai rekomendasi ekonomi dan bukan keputusan yang bersifat mutlak. Oleh karena itu, tahun 2049 dapat dijadikan sebagai acuan bagi perusahaan untuk mengevaluasi kondisi *Air Compressor System*. Apabila perusahaan memilih melakukan penggantian equipment pada tahun tersebut, maka keputusan tersebut sesuai dengan

hasil analisis yang menunjukkan titik biaya minimum. Sebaliknya, apabila perusahaan memilih strategi lain seperti *overhaul*, *refurbishment*, atau peningkatan program pemeliharaan, maka umur ekonomis *equipment* dapat bergeser dan biaya siklus hidup yang dihasilkan juga akan berubah. Kondisi ini sejalan dengan prinsip manajemen aset yang menekankan bahwa keputusan pengelolaan aset harus mempertimbangkan keseimbangan antara biaya, risiko, dan kinerja aset, sehingga hasil analisis ekonomi digunakan sebagai alat pendukung pengambilan keputusan perusahaan (ISO 55000:2014).

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan yaitu, disimpulkan bahwa analisis biaya siklus hidup menggunakan metode *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dan *Equivalent Annual Cost* (EAC) mampu digunakan untuk menentukan umur ekonomis *Air Compressor System* di PT. XYZ secara lebih terukur dan berbasis data. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai *Equivalent Annual Cost* (EAC) biaya perawatan mengalami perubahan sepanjang periode analisis yang mencerminkan kondisi dan kinerja peralatan.

Penentuan umur ekonomis dalam penelitian ini ditunjukkan pada tahun 2049, dimana nilai EAC biaya perawatan sebesar Rp154.263.116.692,35. Nilai ini menunjukkan bahwa beban biaya tahunan berada pada kondisi yang relatif lebih efisien dibandingkan periode sebelumnya dan sesudahnya, sehingga pada titik tersebut dapat dijadikan dasar dalam pengambilan keputusan untuk melakukan pergantian maupun perbaikan *Air Compressor System*. Dengan demikian, tujuan penelitian untuk menganalisis biaya siklus hidup serta menentukan umur ekonomis *Air Compressor System* telah tercapai melalui penerapan metode LCCA dan EAC, yang dapat digunakan sebagai acuan dalam perencanaan pemeliharaan dan pengelolaan aset secara lebih efektif.

6.2 Saran

Berikut merupakan saran dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi Perusahaan (PT. XYZ)

Perusahaan disarankan untuk menggunakan hasil analisis LCCA dan EAC sebagai dasar dalam pengambilan keputusan terkait pengelolaan *Air Compressor System*, khususnya dalam menentukan waktu yang tepat untuk melakukan pergantian atau perbaikan peralatan. Selain itu, perusahaan juga dapat mulai mengoptimalkan strategi pemeliharaan dengan mengarah pada pendekatan yang lebih preventif dan berbasis kondisi guna menekan biaya pemeliharaan dalam jangka panjang.

2. Bagi Peneliti

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada data dan asumsi yang digunakan, sehingga peneliti menyadari bahwa hasil yang diperoleh masih dapat dikembangkan lebih lanjut. Ke

depannya, peneliti dapat memperluas cakupan analisis dengan menggunakan data yang lebih lengkap serta mempertimbangkan variabel lain yang berpengaruh terhadap biaya dan keandalan sistem.

3. Bagi Pengembangan Akademis

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan pembelajaran terkait manajemen pemeliharaan dan analisis biaya siklus hidup pada industri pembangkit listrik. Ke depan, metode yang digunakan dalam penelitian ini dapat dikombinasikan dengan pendekatan lain seperti optimasi atau pemodelan berbasis kecerdasan buatan untuk menghasilkan analisis yang lebih komprehensif dan aplikatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Abaza, K. A. (2024). A novel life-cycle analysis approach using pavement performance curves with cost and performance considerations. *International Journal of Sustainable Engineering*, 17(1), 778-792.
- Aisya, u. M. (2025). Analisis risiko operasional (studi kasus pada pt pln ulp kolaka). *Jurnal intelek insan cendikia*, 2(2), 3127-3132.
- Albuja-Sánchez, J. &.C. (2024). Leveraging life cycle cost analysis (LCCA) for optimized decision making in adobe construction materials. *Applied Sciences*, 14(5), 1760.
- Andriyuda, F. &. (2024). Evaluasi Kondensor Berpendingin Udara dan Air pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *Jurnal Tekno Insentif*, 18(2), 89-103.
- Apriyanto, J. (2024). Perancangan dan Penerapan Sistem Informasi Maintenance di PT. XYZ untuk Mengukur Kinerja Mesin. *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, 3(4), 399-411.
- Bastari, A. S. (2024). Analisis Performance Maintenance Pada Blowout Preventer Menggunakan Metode Reability MTBF MTTR Dan Degradation Test Rubber Packing Element. *Jurnal Teknik & Teknologi Terapan*, 2(1), 31-35.
- Bautista, L. C. (2022). Maintenance cost assessment for heterogeneous multi-component systems incorporating perfect inspections and waiting time to maintenance. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, . Part O: *Journal of Risk and Reliability*, 236(5), 797-815.
- Caballé, N. &. (2024). Assessment of the maintenance cost and analysis of availability measures in a finite life cycle for a system subject to competing failures. *arXiv preprint arXiv:2401*, 12265.
- Damanik, D. Y. (2024). Implementation Of Life Cycle Cost in The Bus Station Building. *Jurnal Teknik Sipil*, 20(2), 255-270.
- Fahri, F. H. (2025). Analisis Efektivitas Preventive Maintenance dengan Metode Periodic Inspection untuk Meningkatkan Kinerja pada Unit WA800-3. *Blend Sains Jurnal Teknik*, 3(3), 246-267.
- Gunawan, I. W. (2021). Overview potensi panas bumi di Provinsi Jawa Barat. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 2(2), 60-73.
- Hasti, H. S. (2024). Estimasi Parameter Distribusi Log-Normal Berdasarkan Sampel Tersensor Tipe Ii. . *Jurnal Matematika Komputasi Dan Statistika*, 4(3), 801-812.
- Hidayat, M. S. (2022). Sistem Monitoring Air Compressor pada Sistem Pendistribusian Udara Berbasis IoT. . *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro*, 12(02), 126-140.
- Hodkiewicz, M. B. (2022). RelOps—A Whole-of-Organisation Approach for Reliability Analytics. In World Congress on Engineering Asset Management. Cham: Springer International Publishing., 45-55.

- Hutabarat, F. A. (2025). Analisis Dan Penggunaan Simulasi Monte Carlo Dalam Pengambilan Keputusan: The Analysis And Use Of Monte Carlo Simulation In Decision Making. *Buletin Ekonomi*, 25(2), 20-36.
- Istiqamah, D. A. (2023). Analisis dampak lingkungan dan life cycle cost pembangkit listrik tenaga panas bumi. *e-Jurnal Ekonomi Sumberdaya dan Lingkungan*, 12(1), 39-48.
- Juliantho, D. A. (2024). Simulasi Metode Monte Carlo untuk Mengatur Sistem Antrian Truk. *Jurnal KomtekInfo*, , 149-156.
- Khasmadin, M. F. (2021). Kajian Potensi dan Pemanfaatan Energi Panas Bumi di Wilayah Kerja Panas Bumi Patuha Ciwidey. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 2(2), 101-113.
- Khoironi, D. S. (2025). Panas Bumi Sebagai Solusi Energi Berkelanjutan: Potensi, Teknologi, dan Pengembangan Global. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 6(2), , 30-40.
- Kosasih, W. S. (2021). Simulasi Monte Carlo Dalam Optimasi Biaya Pemeliharaan. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 9(2), 139-147.
- Lacan, A. (2022). Value-Based Governance as a Performance Element in Social and Solidarity Economy Organizations: A French Sustainable Post-Modern Proposal. . *Sustainability*, 14(4), 2153.
- Larsen, H. S. (2024). Penjadwalan Preventive Maintenance Mesin Mill Dengan Menggunakan Metode Oee, Six Big Losses Dan Fmeca. . *Jurnal Mitra Teknik Industri*, 3(2), , 143-150.
- Martinho, V. J. (2023). Life-cycle cost analysis (LCCA): comparing outputs for bibliographic coupling and citation links. *Heliyon*, 9(11), 1-17.
- Melati, A. H. (2025). efisiensi produksi dan skala ekonomi pada pt. sinar alam permai (kunjungan industri tahun 2024/2025 pt. sinar alam permai). *J-ABDI: Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat*, 5(1), 139-144.
- Nabella, L. S. (2022). Analisis Pengaruh Manajemen Aset Dalam Optimalisasi Aset Tetap Di Pt Semen Baturaja (Persero) Tbk. *AT TARIIZ: Jurnal Ekonomi Dan Bisnis Islam*, 1(03), 132-141.
- Nasution, M. (2021). Manfaat perlunya manajemen perawatan untuk bengkel maupun industri. . *Buletin Utama Teknik*.
- Novarika, W. P. (2025). Analisis Preventif Maintenance pada Forklift dan Reach Truck dengan Metode Menghitung Mean Time Between Failure (MTBF) dan Mean Time to Repair (MTTR) di PT Medan Distribusindo Raya. *Journal Of Industrial And Manufacture Engineering*, 9(2), 117-128.
- Paramesti, R. N. (2024). Analisa kelayakan usaha angkringan Cah Enom dengan pendekatan ekonomi teknik (Studi kasus angkringan, Surabaya, Jawa Timur). *In Prosiding SENASTITAN: Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan (Vol. 4)*, 1-8.
- Pardiyono, R. (2021). Usulan Preventive Maintenance Komponen Kritis Pada Mesin. *Infomatek*, 1=10.

- Polenghi, A. R. (2022). Information as a key dimension to develop industrial asset management in manufacturing. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 28(3), 567-583.
- Purba, A. A. (2022). Analisis Penggantian Mesin Hot Press dengan Menggunakan Metode Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC) di PT Xyz. *Jurnal Teknik Industri: Jurnal Hasil Penelitian dan Karya Ilmiah dalam Bidang Teknik Industri*, 8(2), 132-139.
- Qi, Y. J. (2024). Reliability analysis of normal, lognormal, and weibull distributions on mechanical behavior of wood scrimber. *Forests*, 15(9), 1674.
- Renne, N. K. (2022). Sustainable assessment of concrete repairs through life cycle assessment (LCA) and life cycle cost analysis (LCCA). *Infrastructures*, 7(10), 128.
- Ritonga, A. S. (2025). Penerapan Distribusi Normal Dalam Pengukuran Tinggi Badan Mahasiswa FMIPA Universitas Negeri Medan 2024. *Bilangan: Jurnal Ilmiah Matematika, Kebumihan dan Angkasa*, 3(2), 39-53.
- Sacconi, S. I. (2021). Life-cycle cost analysis of bridges subjected to fatigue damage. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 2(1), 25.
- Sahid, D. I. (2025). Implementasi Metode LCCA dalam Strategi Perbaikan Blade Cooling Tower di PLTP. *JIMU: Jurnal Ilmiah Multidisipliner*, 3(02), 1109-1117.
- Sauni, H. F. (2022). Energi geothermal dalam aturan, masalah lingkungan hidup dan solusi penyelesaian konflik di Masyarakat (geothermal energy in rules, environmental problems and community conflict solutions). *Jurnal Rechts Vinding: Media Pembinaan Hukum Nasional*, 11(3), 1-18.
- Shang, D. L. (2021). Control method of flexible manipulator servo system based on a combination of RBF neural network and pole placement strategy. *Mathematics*, 9(8), 896.
- Suharlina, S. (2024). Studi Kelayakan Investasi Pembelian Truck dan Pick-up dengan Metode NPV, RoR dan MARR Pada PT. ABC. *Journal of Economic Management and Business Technology Innovation*, 1(01), 26-35.
- Syafitri, I. &. (2024). Penerapan Metode Monte Carlo Pada Simulasi Prediksi Permintaan Mobil. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 8(4), 5820-5826.
- Taketomi, N. Y. (2022). Parametric distributions for survival and reliability analyses, a review and historical sketch. *Mathematics*, 10(20), 3907.
- Utari, R. P. (2023). Analisis Biaya Konstruksi Menggunakan Metode Life Cycle Cost pada Gedung Cordova Edupartment Semarang. *Media Teknik Sipil*, 21(2), 77-83.
- Wu, X. L. (2023). A Segmentation Method Based on PDNet for Chest X-rays with Targets in Different Positions and Directions. *Applied Sciences*, 13(8), 5000.
- Yusuf, M. &. (2024). Penetapan Umur Ekonomis Mesin Penggiling Kedelai Menggunakan Metode Equivalent Uniform Annual Cost (Studi Kasus: Usaha Mikro Produk Tahu Handayani). *Industrial Engineering Online Journal*, 14(1), 1-15.

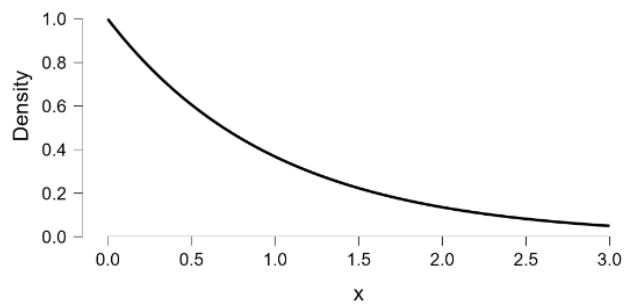
LAMPIRAN

A-Grafik JASP MTBF Exponensial

Exponential ▾

Probability Density Function

Density Plot



Overview - Column 1

Descriptives

Variable	n	Mean	Variance	Std. deviation	Minimum	25% Quantile	Median	75% Quantile	Maximum
Column 1	26	2262	4.000×10^9	2000	0	895	1608	3067	8376

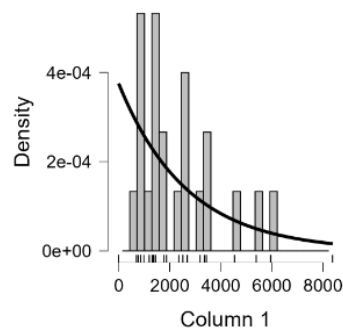
Maximum likelihood ▾

Estimated Parameters

Parameter	Estimate
λ	3.753×10^{-4}

Fit Assessment

Histogram vs. Theoretical PDF

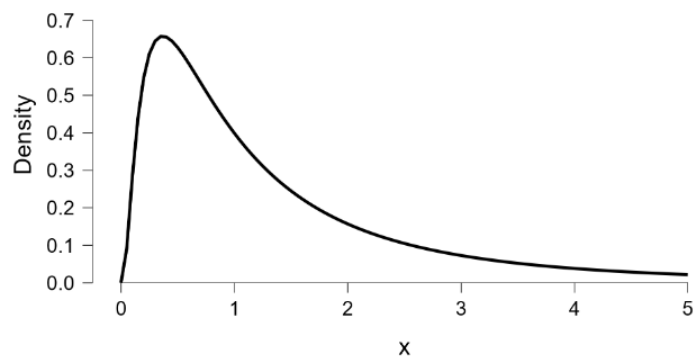


B-Grafik JASP MTTR Lognormal

Log-normal ▼

Probability Density Function ▼

Density Plot



Overview - Column 1

Descriptives

Variable	n	Mean	Variance	Std. deviation	Minimum	25% Quantile	Median	75% Quantile	Maximum
Column 1	20	441	1.952×10^6	1397	1	1	5	14	5785

Maximum likelihood

Estimated Parameters

Parameter	Estimate
μ	2.232
σ	2.438

Fit Assessment

Histogram vs. Theoretical PDF

