

**PENENTUAN UMUR EKONOMIS PADA SISTEM *POWER TRANSMISSION AND  
AUXILIARY POWER SUPPLY* BERBASIS *LIFE CYCLE COST ANALYSIS (LCCA)*  
MENGUNAKAN METODE *EQUIVALENT ANNUAL COST (EAC)* PADA 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 : Andina Zhafirah  
No. Mahasiswa : 22522151

**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



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Andina'.

Andina Zhafirah

22522151

## SURAT BUKTI PENELITIAN



FAKULTAS  
TEKNOLOGI INDUSTRI

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

## SURAT KETERANGAN PENELITIAN

Nomor: 016/Ka.Lab.Datamin/70/Lab.Datamin/V/2026

### ***Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh***

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

Nama : Andina Zhafirah  
No. Mhs : 22522151  
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 PADA SISTEM POWER TRANSMISSION AND AUXILIARY POWER SUPPLY BERBASIS LIFE CYCLE COST ANALYSIS (LCCA) MENGGUNAKAN METODE EQUIVALENT ANNUAL COST (EAC) PADA 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 PADA SISTEM *POWER TRANSMISSION AND AUXILIARY POWER SUPPLY* BERBASIS *LIFE CYCLE COST ANALYSIS (LCCA)* MENGGUNAKAN METODE *EQUIVALENT ANNUAL COST (EAC)* PADA PT.XYZ**



**TUGAS AKHIR**

**Disusun Oleh :**

**Nama : Andina Zhafirah**

**No. Mahasiswa : 22522151**

**Yogyakarta, 28 April 2026**

**Dosen Pembimbing**



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

## LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

**PENENTUAN UMUR EKONOMIS PADA SISTEM *POWER TRANSMISSION AND AUXILIARY POWER SUPPLY* BERBASIS *LIFE CYCLE COST ANALYSIS (LCCA)* MENGGUNAKAN METODE *EQUIVALENT ANNUAL COST (EAC)* PADA PT.XYZ**

### TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Andina Zhafirah

No. Mahasiswa : 22522151

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

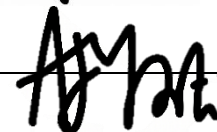
Ir. Winda Nur Cahyo, S.T., M.T., Ph.D., IPM., ASEAN Eng., APEC Eng.  
Ketua



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



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

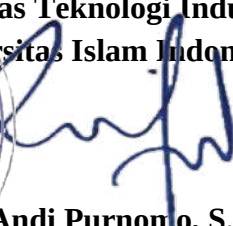


Mengetahui,

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.0152201



## HALAMAN PERSEMBAHAN

*Bismillahirrahmanirrahim*

*Alhamdullilahirrabill'alam*, Segala puji bagi Allah SWT, penulis mengucapkan rasa syukur atas limpahan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. kepada kedua orang tua yang telah memberikan doa, kasih sayang, semangat, nasehat, serta dukungan kepada penulis.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Bapak Bapak Ir. Winda Nur Cahyo, S.T., M.T., Ph.D., IPM., ASEAN Eng., APEC Eng. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan arahan, motivasi, dan ilmu yang telah beliau berikan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

## **MOTTO**

*“orang-orang yang berusaha dengan sungguh-sungguh untuk (mencari keridaan) Kami benar-benar akan Kami tunjukkan kepada mereka jalan-jalan Kami. Sesungguhnya Allah benar-benar bersama orang-orang yang berbuat kebaikan.”*

(Q.S. Al-Ankabut: 69)

*“Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan”*

(Q.S. Al-Insyirah: 6)

## KATA PENGANTAR

***Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,***

*Alhamdullilahi robbil'alamiin*, Segala puji bagi Allah SWT, penulis mengucapkan rasa syukur atas limpahan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat, dan para pengikutnya, yang telah membawa kita dari masa jahiliah menuju era penuh ilmu pengetahuan. Tugas Akhir ini dibuat disusun sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar Strata Satu (S1) di Jurusan Teknik Industri Program Sarjana Universitas Islam Indonesia. Penulis mendapat banyak bimbingan, arahan dukungan, dan bantuan dari berbagai pihak, yang sangat membantu dalam kelancaran proses penyusunan bantuan dari berbagai pihak, yang sangat membantu dalam kelancaran proses penyusunan laporan. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada:

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 telah memberikan bimbingan serta arahan, motivasi, dan ilmu yang telah beliau berikan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Segenap Dosen Teknik Industri Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan keilmuan melalui pengajaran yang dapat diimplementasikan pada dunia praktik.
6. Cinta pertama, panutanku dan pintu surgaku, Papa dan Mama yang telah memberikan doa, kasih sayang, semangat, nasehat, serta dukungan kepada penulis.
7. Kepada saudara kandungku, yang telah memberikan dukungan dan kasih sayang selama pelaksanaan Laporan Tugas Akhir.
8. Seluruh keluarga yang selalu memberikan doa, kasih sayang, dan dukungan kepada penulis.
9. Teman-teman seperjuangan yang telah memberikan semangat, dukungan, menghibur, serta arahan selama pelaksanaan dan pengerjaan Laporan Tugas Akhir.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang terkait dan mendukung dalam penyelesaian Laporan Tugas Akhir ini. Semoga kebaikan yang diberikan oleh semua pihak kepada penulis menjadi amal shaleh yang senantiasa mendapat balasan dan kebaikan yang berlipat dari Allah SWT. Aamiin.

***Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.***

Yogyakarta, 28 April 2026



Andina Zhafirah  
NIM 22522151

## ABSTRAK

Keandalan (*reliability*) dan ketersediaan (*availability*) sistem pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi sangat penting untuk dijaga untuk memastikan stabilitas pasokan energi secara kontinu. Salah satu sistem utama yang memiliki peran strategis dalam operasional di PT.XYZ adalah Sistem *Power Transmission and Auxiliary Power Supply*. Kerusakan pada komponen sistem ini dapat menyebabkan *downtime* yang tidak terencana dan memicu kerugian ekonomi yang berimbas pada terganggunya operasional secara keseluruhan. Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk menentukan umur ekonomis berdasarkan data historis perawatan dari sistem *Power Transmission and Auxiliary Power Supply* sebagai dasar pengambilan keputusan perbaikan atau penggantian komponen di PT.XYZ. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi Simulasi Monte Carlo untuk memodelkan frekuensi kegagalan sistem serta durasi perbaikan. Evaluasi estimasi pembiayaan selama umur siklus hidup aset dihitung menggunakan metode *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA). Selanjutnya, penentuan titik umur ekonomis peralatan dianalisis menggunakan pendekatan metode *Equivalent Annual Cost* (EAC). Berdasarkan hasil pengolahan data, model Simulasi Monte Carlo menunjukkan bahwa waktu antar kerusakan (*Time to Failure*) paling merepresentasikan distribusi Eksponensial, sedangkan waktu antar perbaikan (*Time to Repair*) mengikuti distribusi Lognormal. Melalui perhitungan komprehensif menggunakan LCCA dan EAC, didapatkan bahwa nilai ekuivalensi biaya total minimum terjadi pada tahun ke-30 atau pada tahun 2045, yakni sebesar Rp.155.135.533.779. Dengan ini dalam menentukan umur ekonomis yang paling optimal untuk sistem ini jatuh pada tahun ke-30. Penerapan strategi perawatan atau penggantian aset pada umur ekonomis tersebut diharapkan efektif menekan pengeluaran total perusahaan, sekaligus mampu memperpanjang kinerja serta keberlanjutan operasional aset di masa mendatang.

**Kata Kunci:** Manajemen Aset, *Power Transmission and Auxiliary Power Supply*, Simulasi Monte Carlo, , *Life Cycle Cost Analysis*, *Equivalent Annual Cost*, Umur Ekonomis.

## DAFTAR ISI

|                                                              |             |
|--------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>PERNYATAAN KEASLIAN .....</b>                             | <b>ii</b>   |
| <b>SURAT BUKTI PENELITIAN.....</b>                           | <b>iii</b>  |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING .....</b>                    | <b>iv</b>   |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI .....</b>                 | <b>v</b>    |
| <b>HALAMAN PERSEMBAHAN.....</b>                              | <b>vi</b>   |
| <b>MOTTO.....</b>                                            | <b>vii</b>  |
| <b>KATA PENGANTAR .....</b>                                  | <b>viii</b> |
| <b>ABSTRAK.....</b>                                          | <b>ix</b>   |
| <b>DAFTAR ISI.....</b>                                       | <b>x</b>    |
| <b>DAFTAR TABEL.....</b>                                     | <b>xii</b>  |
| <b>DAFTAR GAMBAR .....</b>                                   | <b>xiii</b> |
| <b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>                               | <b>1</b>    |
| <b>1.1 Latar Belakang .....</b>                              | <b>1</b>    |
| <b>1.2 Rumusan Masalah .....</b>                             | <b>5</b>    |
| <b>1.3 Tujuan Penelitian .....</b>                           | <b>5</b>    |
| <b>1.4 Manfaat Penelitian .....</b>                          | <b>5</b>    |
| <b>1.5 Batasan Penelitian .....</b>                          | <b>6</b>    |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>                          | <b>7</b>    |
| <b>2.1 Kajian Literatur .....</b>                            | <b>7</b>    |
| <b>2.2 Landasan Teori.....</b>                               | <b>9</b>    |
| 2.2.1 Manajemen Aset .....                                   | 9           |
| 2.2.2 Perawatan ( <i>Maintenance</i> ) .....                 | 10          |
| 2.2.3 Distribusi .....                                       | 11          |
| 2.2.4 Parameter Estimasi Distribusi .....                    | 13          |
| 2.2.5 Simulasi .....                                         | 13          |
| 2.2.6 Simulasi Monte Carlo.....                              | 14          |
| 2.2.7 <i>Mean Time Between Failure (MTBF)</i> .....          | 14          |
| 2.2.8 <i>Mean Time To Repair (MTTR)</i> .....                | 14          |
| 2.2.9 <i>Life Cycle Cost Analysis (LCCA)</i> .....           | 15          |
| 2.2.10 Perhitungan <i>Life Cycle Cost</i> .....              | 15          |
| 2.2.11 Ekonomi Teknik .....                                  | 16          |
| 2.2.12 <i>Equivalent Annual Cost (EAC)</i> .....             | 16          |
| 2.2.13 <i>Minimum Attractive Rate of Return (MARR)</i> ..... | 16          |
| <b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>                       | <b>17</b>   |
| <b>3.1 Objek Penelitian .....</b>                            | <b>17</b>   |
| <b>3.2 Subjek Penelitian .....</b>                           | <b>17</b>   |
| <b>3.3 Metode Pengumpulan Data .....</b>                     | <b>18</b>   |
| <b>3.4 Alur Penelitian .....</b>                             | <b>18</b>   |
| 3.4.1 Identifikasi Masalah .....                             | 19          |
| 3.4.2 Identifikasi Rumusan dan Tujuan penelitian .....       | 20          |
| 3.4.3 Penentuan Batasan Penelitian .....                     | 20          |
| 3.4.4 Studi Literatur.....                                   | 20          |
| 3.4.5 Pengumpulan Data.....                                  | 21          |
| 3.4.6 Pengolahan Data Kuantitatif (Distribusi) .....         | 21          |

|                                                     |                                                                                 |            |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.4.7                                               | Pengolahan Data Kuantitatif (Simulasi Monte Carlo).....                         | 21         |
| 3.4.8                                               | Pengolahan Data Kuantitatif <i>Life Cycle Cost Analysis</i> (LCCA) .....        | 22         |
| 3.4.9                                               | Pengolahan Data Kuantitatif <i>Equivalent Annual Cost</i> (EAC).....            | 22         |
| 3.4.10                                              | Analisis dan Pembahasan .....                                                   | 22         |
| 3.4.11                                              | Kesimpulan dan Saran .....                                                      | 22         |
| <b>BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA .....</b> |                                                                                 | <b>23</b>  |
| <b>4.1</b>                                          | <b>Pengumpulan Data .....</b>                                                   | <b>23</b>  |
| 4.1.1                                               | Sumber dan Karakteristik Data.....                                              | 23         |
| 4.1.2                                               | Review Kelengkapan Data .....                                                   | 23         |
| 4.1.3                                               | Data Waktu Antar Kerusakan Komponen ( <i>Corrective Maintenance</i> ) .....     | 25         |
| 4.1.4                                               | Data Waktu Antar Kerusakan Komponen ( <i>Preventive Maintenance</i> ) .....     | 26         |
| 4.1.5                                               | Data Waktu Antar Kerusakan Komponen ( <i>Predictive Maintenance</i> ) .....     | 27         |
| <b>4.2</b>                                          | <b>Pengolahan Data .....</b>                                                    | <b>27</b>  |
| 4.2.1                                               | Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Kerusakan ( <i>Time to Failure</i> )..... | 28         |
| 4.2.2                                               | Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Kerusakan ( <i>Time to Repair</i> ).....  | 31         |
| <b>4.3</b>                                          | <b>Pengolahan Data Kuantitatif (Simulasi Monte Carlo).....</b>                  | <b>35</b>  |
| 4.3.1                                               | Penentuan Parameter Waktu Antar Kerusakan .....                                 | 35         |
| 4.3.2                                               | Penentuan Parameter Waktu Perbaikan.....                                        | 36         |
| 4.3.3                                               | Representasi Ketidakpastian Kegagalan dan Durasi Perbaikan .....                | 36         |
| <b>4.4</b>                                          | <b>Pengolahan Data Kuantitatif <i>Life Cycle Cost Analysis</i> (LCCA) .....</b> | <b>39</b>  |
| 4.4.1.                                              | Perhitungan Biaya <i>Corrective Maintenance</i> .....                           | 39         |
| 4.4.2.                                              | Perhitungan Biaya <i>Preventive Maintenance</i> (PM) .....                      | 42         |
| 4.4.3.                                              | Perhitungan Biaya <i>Predictive Maintenance</i> (PdM).....                      | 44         |
| 4.4.4.                                              | Perhitungan Total <i>Maintenance Cost</i> .....                                 | 47         |
| 4.4.5.                                              | Perhitungan <i>Oppurtunity Lost</i> .....                                       | 49         |
| <b>4.5</b>                                          | <b>Pengolahan Data Kuantitatif <i>Equivalent Annual Cost</i> (EAC) .....</b>    | <b>54</b>  |
| 4.5.1                                               | Perhitungan Nilai MARR ( <i>Minimum Attractive Rate of Return</i> ) .....       | 54         |
| 4.5.2                                               | Biaya Investasi Awal .....                                                      | 54         |
| 4.5.3                                               | Perhitungan Nilai Investasi Awal pada Tahun Dasar ( <i>Future Value</i> ) ..... | 54         |
| 4.5.4                                               | Perhitungan Biaya EAC Investasi .....                                           | 55         |
| 4.5.5                                               | Perhitungan Biaya EAC Perawatan.....                                            | 55         |
| <b>4.6</b>                                          | <b>Hasil dan Analisis Perhitungan EAC dan <i>Maintenance Cost</i>.....</b>      | <b>56</b>  |
| <b>BAB V PEMBAHASAN .....</b>                       |                                                                                 | <b>62</b>  |
| <b>5.1</b>                                          | <b>Hasil Analisis Simulasi Monte Carlo .....</b>                                | <b>62</b>  |
| <b>5.2</b>                                          | <b>Hasil Analisis <i>Life Cycle Cost Analysis</i> (LCCA).....</b>               | <b>62</b>  |
| <b>5.3</b>                                          | <b>Hasil Analisis <i>Equivalent Annual Cost</i> (EAC).....</b>                  | <b>63</b>  |
| <b>BAB VI PENUTUP .....</b>                         |                                                                                 | <b>65</b>  |
| <b>6.1</b>                                          | <b>Kesimpulan.....</b>                                                          | <b>65</b>  |
| <b>6.2</b>                                          | <b>Saran .....</b>                                                              | <b>65</b>  |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>                         |                                                                                 | <b>67</b>  |
| <b>LAMPIRAN .....</b>                               |                                                                                 | <b>A-1</b> |

## DAFTAR TABEL

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2. 1 Posisi Penelitian .....                                                            | 8  |
| Tabel 4. 1 Nama <i>field-field</i> pada data SAP Historical .....                             | 24 |
| Tabel 4. 2 Data Waktu Antar Kerusakan Komponen <i>Corrective Maintenance</i> .....            | 25 |
| Tabel 4. 3 Data Waktu Antar Kerusakan Komponen <i>Preventive Maintenance</i> .....            | 26 |
| Tabel 4. 4 Data Waktu Antar Kerusakan Komponen <i>Predictive Maintenance</i> .....            | 27 |
| Tabel 4. 5 <i>Time to Failure</i> .....                                                       | 28 |
| Tabel 4. 11 <i>Time to Repair</i> .....                                                       | 32 |
| Tabel 4. 17 Tabel Perhitungan Biaya <i>Corrective Maintenance</i> .....                       | 40 |
| Tabel 4. 18 Tabel Perhitungan Biaya <i>Preventive Maintenance</i> (PM).....                   | 43 |
| Tabel 4. 19 Tabel Perhitungan Biaya <i>Predictive Maintenance</i> (PdM) .....                 | 45 |
| Tabel 4. 20 Tabel Perhitungan <i>Maintenance Cost</i> .....                                   | 47 |
| Tabel 4. 21 Tabel Perhitungan <i>Opportunity Lost</i> .....                                   | 51 |
| Tabel 4. 22 Total Cost pada Sistem <i>Power Transmission And Auxiliary Power Supply</i> ..... | 56 |

**DAFTAR GAMBAR**

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| Gambar 2. 1 Grafik Distribusi Lognormal .....   | 12 |
| Gambar 2. 2 Grafik Distribusi Exponensial ..... | 13 |
| Gambar 3. 1 Alur Penelitian.....                | 19 |
| Gambar 4. 3 Histogram TBF .....                 | 31 |
| Gambar 4. 4 Histogram TTR.....                  | 34 |

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Energi panas bumi merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki peran strategis dalam mendukung pemenuhan kebutuhan listrik nasional secara berkelanjutan dan ramah lingkungan. Sebagai pembangkit yang beroperasi secara kontinu, sistem pembangkit listrik panas bumi dituntut memiliki tingkat keandalan (*reliability*) dan ketersediaan (*availability*) unit pembangkit listrik agar mampu menjaga stabilitas pasokan listrik ke sistem nasional (Siregar, 2022). Dalam upaya menjaga keandalan dan ketersediaan tersebut, perusahaan yang bergerak di bidang energi perlu mengelola aset yang dimilikinya secara optimal. Menurut Internasional Standard (ISO) pada ISO 55000:2014, aset merupakan objek, barang atau entitas yang memiliki nilai tertentu bagi suatu organisasi dan memiliki potensi. Nilai yang diberikan dapat bervariasi tergantung pada penggunaannya. Nilai dapat berupa finansial ataupun non-finansial, dan dapat berupa berwujud atau tidak berwujud (Samodro, 2025). Tanpa aset yang dikelola dengan baik, proses operasional tidak dapat berjalan secara efektif dan berkelanjutan. Aset yang dimiliki perusahaan mencakup berbagai bentuk, mulai dari kas hingga aset fisik seperti tanah, bangunan, peralatan, dan perlengkapan produksi. Diantara aset tersebut, peralatan produksi memiliki peran yang sangat penting karena berkaitan langsung dengan proses pembangkit listrik.

Sebagai perusahaan yang bergerak dibidang pembangkit listrik tenaga panas bumi, PT.XYZ merupakan salah satu perusahaan badan usaha yang mengelola dan mengoperasikan pembangkit listrik dengan sistem operasi kontinu. Tantangan yang dihadapi tentunya dalam menjaga keandalan (*reliability*) dan ketersediaan (*availability*), khususnya pada *equipment* utama yang berperan langsung dalam proses pembangkit listrik. Dalam kondisi tersebut, kegagalan peralatan utama tidak berdampak pada terganggunya kontinuitas pasokan listrik, tetapi juga menimbulkan kerugian ekonomi akibat *downtime* yang tidak terencana, serta efisiensi pemeliharaan yang belum optimal dapat mengganggu proses produksi. Dalam menghadapi tantangan tersebut, penerapan manajemen aset menjadi aspek penting dalam mendukung keberlangsungan operasi pembangkit listrik.

Manajemen aset adalah suatu tindakan mengelola aset agar aset tersebut bisa memberikan manfaat yang sebesar besarnya dengan biaya sekecil mungkin dan aset tersebut

jangan sampai punah, kecuali memang sebaiknya harus dimusnakan atau dihapuskan (Waskita, 2024). Manajemen aset juga berperan dalam memastikan bahwa seluruh aset, khususnya aset fisik berupa *equipment* dikelola secara sistematis dan berkelanjutan agar dapat berfungsi secara optimal sepanjang umur pakainya. Penting untuk dicatat bahwa aspek-aspek ini harus diseimbangkan dalam semua proses pengambilan keputusan terkait aset dan memastikan bahwa aset tersebut mampu memenuhi fungsinya dalam mencapai strategi kompetitif organisasi.

Peralatan produksi pada pembangkit listrik panas bumi umumnya beroperasi secara kontinu dan berada pada kondisi kerja yang berat, sehingga berpotensi mengalami penurunan kinerja seiring bertambah umur pakai. Penurunan kinerja tersebut ditandai dengan meningkatkan frekuensi gangguan dan kebutuhan perawatan, yang pada akhirnya berdampak pada meningkatnya biaya operasi dan pemeliharaan serta menurunnya keandalan sistem pembangkit secara keseluruhan. Salah satu sistem utama yang memiliki peran strategis dalam perusahaan yaitu Sistem *Power Transmission and Auxiliary Power Supply*. *Power Transmission* yang menyalurkan energi listrik bertegangan tinggi dari pembangkit ke gardu induk atau pusat beban agar kehilangan daya selama penyaluran jarak jauh dapat dikurangi (Sumiyati, 2024). Sementara *Auxiliary Power Supply* menyediakan daya listrik peralatan pendukung, seperti sistem *supply* menyediakan daya listrik bagi peralatan pendukung, seperti sistem kontrol, proteksi, pencahayaan, pendingin, dan komunikasi, sehingga keberlangsungan operasional pembangkit tetap terjaga.

Maka dari itu, diperlukan pengelolaan perawatan sistem menjadi aspek yang penting dalam menjaga keandalan (*reliability*) dan ketersediaan (*availability*) untuk Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi. Seperti halnya sistem peralatan lainnya, memiliki batas umur pakai serta rentan dalam kerusakan akibat faktor usia serta kondisi operasional, dan bisa menyebabkan gangguan besar yang berdampak pada pelanggan dan berpotensi menimbulkan kerugian finansial bagi perusahaan, contohnya beberapa permasalahan utama pada Sistem *Power Transmission and Auxiliary Power* meliputi gangguan seperti *overheating*, sambungan yang longgar akibatnya peralatan yang menggunakan listrik dari panel tersebut terganggu, kemudian *supply* listrik cadangan untuk sistem kontrol dan proteksi tidak stabil biasanya karena baterai lemah atau charger tidak bekerja dengan baik, dan alat pengaman listrik seperti circuit breaker tidak bekerja dengan baik akibatnya peralatan bisa berisiko tinggi. Dampak yang dihasilkan tidak hanya mencakup gangguan pasokan listrik kepada pelanggan, tetapi juga

potensi kerugian finansial yang signifikan akibat biaya perbaikan, kehilangan produksi, dan penurunan kinerja operasional. Menurut Tempo.co, pemadaman listrik di Indonesia umumnya disebabkan oleh gangguan pada jaringan distribusi listrik serta kerusakan pada peralatan utama kelistrikan. Oleh karena itu, strategi pemeliharaan yang tepat sangat penting untuk meminimalkan waktu henti dan memastikan sistem terus beroperasi secara optimal.

Pada manajemen aset diperlukan pendekatan sistematis yang didasarkan pada tata kelola aset (*asset management*) yang baik dan bahwa integrasi antara strategi pemeliharaan dan analisis biaya siklus hidup aset diperlukan untuk menghasilkan keputusan pengelolaan aset yang lebih efisien dan berkelanjutan (Ngantung, 2025). Pada penelitian ini, data pemeliharaan historis diperoleh dari sistem SAP (*System, Applications, and Products in Data Processing*) sebagai sistem *Enterprise Resource Planning* (ERP) merupakan sistem yang mengintegrasikan berbagai fungsi bisnis dalam suatu organisasi kedalam satu sistem informasi terpusat (Saepullah, 2024). Khususnya data notifikasi dan *work order* yang tercatat dalam transaksi IW39. Data IW39 terdiri dari *basic start date* sebagai tanggal awal gangguan dicatat, *schedule start* sebagai waktu perbaikan yang direncanakan, serta *actual start* sebagai waktu aktual dimulainya perbaikan. Sehingga dapat digunakan untuk menelusuri riwayat kegagalan peralatan secara sistematis dan ketidaksesuaian antara jadwal yang telah ditetapkan dan pelaksanaan aktual perbaikan menjadi indikator bahwa sistem pemeliharaan belum berjalan secara optimal, sehingga mempengaruhi keandalan peralatan dan efisiensi biaya operasional.

Data Historis tersebut merupakan komponen penting dalam memahami karakteristik kegagalan pada sistem. Salah satu parameter yang digunakan adalah *time to failure*, yaitu selang waktu antar terjadinya kegagalan peralatan. Namun, karakteristik kegagalan pada sistem ini bersifat tidak pasti dan dipengaruhi oleh berbagai faktor operasional, sehingga diperlukan pendekatan yang dapat merepresentasikan ketidakpastian tersebut secara lebih realistis. Salah satu metodenya Simulasi Monte Carlo adalah *tools* yang digunakan untuk memperkirakan perilaku sistem dalam berbagai kondisi tidak pasti, seperti variasi waktu kegagalan atau perubahan beban operasi. Pendekatan ini banyak dimanfaatkan dalam perencanaan pemeliharaan dalam mengevaluasi dampak terhadap keandalan dan kinerja sistem secara keseluruhan (Afdal, 2023). Meskipun analisis keandalan dan simulasi kegagalan dapat memberikan gambaran kondisi teknis peralatan, pengambilan keputusan dalam manajemen aset tidak hanya mempertimbangkan aspek teknis, tetapi juga aspek ekonomis yang diperlukan

pendekatan yang mampu mengintegrasikan analisis keandalan dengan evaluasi biaya selama siklus hidup aset.

Pada penelitian ini menggunakan metode *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA), yaitu metode yang mempertimbangkan seluruh komponen biaya sepanjang siklus hidup aset, mulai dari biaya investasi awal, biaya operasional, biaya pemeliharaan, hingga biaya akibat kegagalan (Sahid, 2025). Melalui metode ini, perusahaan data mengidentifikasi alternatif strategi pemeliharaan yang paling efisien berdasarkan total biaya yang dikeluarkan selama umur pakai aset. Berdasarkan penelitian sebelumnya dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas pengelolaan aset pada perusahaan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi menunjukkan bahwa penerapan dengan metode LCCA menjadi keputusan yang lebih rasional dalam menentukan strategi perbaikan komponen kritis. Kondisi awal perawatan cenderung menimbulkan biaya tinggi akibat *downtime* dan *loss opportunity*. Melalui analisis LCCA yang mencakup biaya, operasional, pemeliharaan, dan penggantian dengan pendekatan nilai kini (*present value*), diperoleh hasil bahwa metode ini efektif dalam membantu pemeliharaan strategi perbaikan yang lebih ekonomis, efisien, dan berkelanjutan.

Selain metode LCCA, untuk mendukung penentuan waktu penggantian aset pada sistem ini, metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) digunakan sebagai bagian dari analisis biaya siklus hidup. Metode EAC atau EUAC merupakan metode evaluasi ekonomi untuk membandingkan biaya tahunan rata-rata dari berbagai alternatif investasi dengan periode operasi yang berbeda. Pendekatan ini mengubah komponen biaya dan pendapat selama masa proyek menjadi nilai tahunan tetap, sehingga menyederhanakan analisis dan perbandingan antara opsi investasi dengan periode operasi yang berbeda (Yusuf, 2024). Metode ini digunakan untuk memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih sistematis dalam menunjukkan waktu penggantian aset, khususnya pada sistem yang memiliki umur pakai panjang dan biaya operasional yang cenderung meningkat seiring waktu. Dengan mengoversi seluruh komponen biaya selama masa pemakaian aset ke dalam satuan biaya tahunan ekuivalen.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keandalan Sistem *Power Transmission and Auxiliary Power Supply* berbasis data historis pemeliharaan di sistem SAP IW39. Melakukan pemodelan kegagalan menggunakan Simulasi Monte Carlo, serta mengevaluasi biaya siklus hidup menggunakan metode *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA). Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan umur ekonomis

aset menggunakan metode *Equivalent Annual Cost* (EAC). Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih optimal dalam pengelolaan aset guna meningkatkan keandalan, ketersediaan, serta efisiensi biaya operasional pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan hasil perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dengan pendekatan *Equivalent Annual Cost* (EAC) terhadap data historis perawatan Sistem *Power Transmisson and Auxiliary Power Supply*, berapa umur ekonomis pada sistem untuk mendukung pengambilan keputusan dalam perbaikan atau pergantian pada sistem di PT.XYZ?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Menentukan umur ekonomis Sistem *Power Transmisson and Auxiliary Power Supply* berdasarkan perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dengan pendekatan *Equivalent Annual Cost* (EAC) dari data historis perawatan sebagai dasar pengambilan keputusan perbaikan atau pergantian pada sistem di PT.XYZ.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Berikut merupakan manfaat dari penelitian ini yaitu:

### 1. Manfaat bagi perusahaan

Penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi PT.XYZ sebagai bahan pertimbangan dalam pengambilan keputusan manajemen aset, khususnya pengelolaan Sistem *Power Transmisson and Auxiliary Power Supply* pada perusahaan pembangkit listrik tenaga panas bumi. Hasil penelitian ini digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik keandalan dan pola kegagalan Sistem *Power Transmisson and Auxiliary Power Supply* berdasarkan data historis pemeliharaan SAP IW39, serta memperdalam pemahaman praktis terkait pengelolaan aset perusahaan.

### 2. Manfaat bagi Peneliti

Penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi peneliti sebagai sarana untuk mengaplikasikan dan mengembangkan pengetahuan dibidang manajemen aset, penelitian ini juga memberikan kesempatan kepada peneliti untuk mengeksplorasi variabel-variabel

yang mempengaruhi keberhasilan penerapan manajemen aset, terutama dalam konteks operasional di PT.XYZ.

### 3. Manfaat bagi akademis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan manajemen aset, khususnya pada sektor Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi.

## 1.5 Batasan Penelitian

Berikut merupakan batasan pada penelitian ini yaitu:

1. Penelitian ini berfokus hanya pada Sistem *Power Transmisson and Auxiliary Power Supply* pada perusahaan pembangkit listrik tenaga panas bumi di PT.XYZ.
2. Data yang digunakan pada penelitian ini data historis pemeliharaan Sistem *Power Transmisson and Auxiliary Power Supply* yang didapatkan dari sistem SAP, khususnya pada Data IW39.
3. Data *downtime* pada Sistem *Power Transmisson and Auxiliary Power Supply* pada periode 2016 hingga 2023.
4. Jenis aktivitas pemeliharaan yang dianalisis dalam penelitian ini dibatasi pada *Corrective maintenance, Preventive maintenance, Predictive maintenance*,
5. Metode yang dilakukan menggunakan pada penelitian ini yaitu metode Simulasi Monte Carlo, *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) serta menentukan umur ekonomis menggunakan data *Equivalent Annual Cost* (EAC).

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Kajian Literatur**

Kajian literatur memuat informasi yang bersumber dari berbagai penelitian sebelumnya serta landasan teori yang relevan dengan topik yang akan diteliti. Bagian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan memperkuat dasar teoritis pada penelitian. Dalam penelitian ini menyajikan beberapa penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi dalam mendukung pelaksanaan penelitian melalui beberapa *platform* seperti *google scholar* dan internet. Proses ini dilakukan kesesuaian topik serta relevansi terhadap penelitian yang dilakukan.

Pengelolaan aset fisik dalam skala industri besar menuntut adanya strategi yang mampu menyeimbangkan antara performa operasional dan efisiensi finansial sepanjang masa pakai aset tersebut. (Albany, 2025) menekankan bahwa efektivitas pemeliharaan komponen sangat penting pada identifikasi interval perawatan yang tepat untuk meminimalkan akumulasi biaya jangka panjang. Pandangan serupa mengenai pentingnya evaluasi ekonomi yang komprehensif disampaikan oleh (Damiri, 2021) serta (Khan, 2023) yang menyatakan bahwa penilaian terhadap biaya kepemilikan aset tidak boleh hanya terpaku pada investasi awal, melainkan harus mencakup seluruh elemen biaya operasional guna mendukung keberlanjutan sistem. (Sahid D. I., 2025) juga membuktikan bahwa pengambilan keputusan dalam memilih strategi perbaikan komponen kritis di sektor pembangkit listrik menjadi lebih rasional apabila didasarkan pada perbandingan biaya siklus hidup dari berbagai alternatif solusi yang tersedia. Hal ini penelitian yang dilakukan (Jati D. , 2022) yang menyatakan bahwa perencanaan anggaran perlu diteliti lebih dalam berdasarkan kebutuhan yang akan datang. Hal ini dilakukan melalui metode *Life Cycle Cost* (LCC) yang mengevaluasi seluruh komponen biaya selama umur ekonomis.

Aspek teknis mengenai keandalan peralatan merupakan parameter yang penting dalam menentukan kelancaran proses produksi. (Kamble S. N., 2022) menjelaskan bahwa pemantauan kesehatan mesin melalui analisis biaya sangat penting untuk meningkatkan angka kelangsungan perusahaan terutama pada aset sektor industri. Penelitian yang dilakukan oleh (Habibi, 2025) yang menunjukkan bahwa pengukuran rata-rata waktu kegagalan (MTBF) dan pengukuran waktu perbaikan (MTTR) merupakan indikator yang penting dalam mengevaluasi kesiapan

operasional pada sistem. Melalui pemahaman mendalam terhadap riwayat gangguan teknis, perusahaan dapat menyusun program pemeliharaan yang lebih baik dan menghindari potensi kerugian akibat berhentinya proses produksi secara mendadak.

Tantangan utama dalam manajemen aset muncul ketika perusahaan harus mengambil keputusan di tengah ketidakpastian kondisi operasional dan fluktuasi biaya masa depan. (Huang, 2021) memperkenalkan model analisis biaya siklus hidup yang mampu menangani variabel acak untuk memprediksi waktu penggantian peralatan secara lebih akurat pada sektor manufaktur. (Almobarek, 2021) serta (Purba A. A., 2022) berpendapat bahwa mengonversi seluruh beban biaya menjadi nilai tahunan yang setara metode EAC adalah metode paling objektif untuk menentukan titik penggantian aset yang paling ekonomis. Pendekatan ini juga diterapkan oleh (Li, 2022) dan (Rahmawati, 2025) dalam menentukan strategi penggantian peralatan energi dan trafo distribusi untuk menjaga stabilitas operasional. Sementara itu, (Manurung, 2025), (Afdal Z. A., 2023) serta (Suryadi, 2023) menunjukkan bahwa pemodelan berbasis data historis dengan Simulasi Monte Carlo sangat efektif dalam merancang berbagai skenario risiko dan prediksi kebutuhan di masa depan

Tabel 2. 1 Posisi Penelitian

| No | Penulis             | Objek Penelitian              |                |            |      | Metode    |     |                      |
|----|---------------------|-------------------------------|----------------|------------|------|-----------|-----|----------------------|
|    |                     | Pembangkit Listrik/<br>Energi | Mesin Industri | Manufaktur | LCCA | MTBF/MTTR | EAC | Simulasi Monte Carlo |
| 1  | (Albany, 2025)      |                               |                |            |      | ✓         |     |                      |
| 2  | (Damiri, 2021)      | ✓                             |                |            | ✓    |           |     |                      |
| 3  | (Khan, 2023)        | ✓                             |                |            | ✓    |           |     |                      |
| 4  | (Sahid D. I., 2025) | ✓                             |                |            | ✓    |           |     |                      |
| 5  | (Jati D. , 2022)    |                               | ✓              |            | ✓    |           |     | ✓                    |

| No | Penulis              | Objek Penelitian              |                |            |      | Metode    |     |                      |
|----|----------------------|-------------------------------|----------------|------------|------|-----------|-----|----------------------|
|    |                      | Pembangkit Listrik/<br>Energi | Mesin Industri | Manufaktur | LCCA | MTBF/MTTR | EAC | Simulasi Monte Carlo |
| 6  | (Kamble S. N., 2022) |                               | ✓              |            | ✓    |           |     |                      |
| 7  | (Habibi, 2025)       |                               | ✓              |            |      | ✓         |     |                      |
| 8  | (Huang, 2021)        |                               |                | ✓          | ✓    |           |     | ✓                    |
| 9  | (Almobarek, 2021)    |                               | ✓              |            |      |           | ✓   |                      |
| 10 | (Purba A. A., 2022)  |                               |                | ✓          |      |           | ✓   |                      |
| 11 | (Li, 2022)           | ✓                             |                |            | ✓    |           | ✓   |                      |
| 12 | (Rahmawati, 2025)    | ✓                             |                |            | ✓    |           | ✓   |                      |
| 13 | (Manurung, 2025)     |                               | ✓              |            |      | ✓         |     | ✓                    |
| 14 | (Afdal Z. A., 2023)  |                               |                | ✓          |      | ✓         |     | ✓                    |
| 15 | (Suryadi, 2023)      | ✓                             |                |            |      |           |     | ✓                    |
| 16 | <b>Peneliti</b>      | ✓                             |                |            | ✓    | ✓         | ✓   | ✓                    |

## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Manajemen Aset

Aset dapat diartikan sebagai bagian dari nilai ekonomi yang dimiliki oleh individu atau perusahaan. Menurut Standar Internasional (ISO) ISO 55000:2014), aset adalah objek, barang, atau entitas yang memiliki nilai spesifik bagi suatu organisasi dan memiliki potensi didalamnya.

Manajemen aset merupakan suatu pendekatan sistematis dan terintegrasi yang bertujuan untuk mengelola aset organisasi secara optimal agar mampu memberikan nilai maksimum sepanjang siklus hidupnya. Aset yang dikelola tidak hanya mencakup aset fisik seperti peralatan, mesin, dan infrastruktur, tetapi juga aset finansial dan pendukung lainnya yang berkontribusi terhadap pencapaian tujuan organisasi. Dalam konteks industri, manajemen aset berfokus pada pengambilan keputusan yang seimbang antara kinerja aset, biaya yang dikeluarkan, serta tingkat resiko yang dapat diterima (Waskita, 2024).

Manajemen Aset berfungsi untuk memantau dan mengendalikan penggunaan sumber daya di dalam perusahaan. Jika pengawasan ini kurang, sistem manajemen akan mengalami gangguan, termasuk keterlambatan dalam mengalami gangguan, termasuk keterlambatan dalam pelaporan pengeluaran dan pelacakan penggunaan aset. Dalam pelaksanaannya, manajemen aset bertanggung jawab atas pengendalian dan pencatatan aset di setiap unit kerja di berbagai fasilitas, serta pengawasan terhadap proses pengadaan dan distribusi aset baru. Dengan pengelolaan aset sedemikian rupa sehingga dapat memberikan manfaat maksimal dengan biaya minimal dan tidak hilang kecuali jika rusak atau dihapus.

### **2.2.2 Perawatan (*Maintenance*)**

Perawatan merupakan serangkaian kegiatan teknis yang bertujuan untuk menjaga, memulihkan, dan meningkatkan kondisi mesin agar tetap berfungsi sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan. Dalam lingkungan industri modern yang didominasi oleh sistem otomasi dan tuntutan peningkatan kapasitas produksi, perawatan menjadi faktor penting untuk memastikan keandalan dan kinerja peralatan secara berkelanjutan. Tanpa pengelolaan perawatan yang memadai, risiko gangguan operasi dan penurunan produktivitas akan semakin meningkat. Pemeliharaan memiliki peran yang signifikan dalam proses produksi pada perusahaan karena berpengaruh terhadap kelancaran proses produksi, jumlah *output* yang dihasilkan, serta ketepatan waktu dalam pemenuhan kebutuhan pelanggan. Langkah ini bertujuan untuk menjaga performa peralatan dan mencegah kerusakan yang dapat mengganggu kelancaran proses produksi (Muhaemin, 2022). Berikut merupakan beberapa jenis *maintenance* dalam sistem industri dapat diklasifikasikan menjadi beberapa yaitu:

#### **1. *Corrective Maitenance* (CM)**

*Corrective Maitenance* (CM) merupakan kegiatan perawatan yang dilakukan setelah terjadi kerusakan atau kegagalan pada peralatan. Tindakan ini bersifat reaktif, yaitu perbaikan baru

dilakukan ketika mesin tidak dapat beroperasi sesuai fungsinya. Tujuan utama *corrective maintenance* adalah mengembalikan fungsi peralatan ke kondisi normal secepat mungkin. Meskipun sederhana dalam penerapannya, jenis perawatan ini memiliki kelemahan berupa risiko *downtime* yang tinggi, biaya perbaikan mendadak, serta potensi gangguan terhadap kontinuitas proses produksi.

## 2. Preventive Maintenance (PM)

*Preventive maintenance* (PM) adalah kegiatan perawatan yang dilakukan secara terjadwal dan berkala berdasarkan waktu operasi atau umur pakai komponen, tanpa menunggu terjadinya kerusakan. Jenis perawatan ini bertujuan untuk mencegah kegagalan peralatan dengan melakukan inspeksi rutin, pelumasan, penyetelan, dan penggantian komponen sebelum mencapai batas keausan. *Preventive maintenance* dapat meningkatkan keandalan peralatan, namun berpotensi menyebabkan pemborosan biaya apabila penggantian dilakukan terlalu dini.

## 3. Predictive Maintenance (PdM)

*Predictive maintenance* (PdM) merupakan strategi perawatan berbasis kondisi aktual peralatan (*condition based maintenance*). Perawatan dilakukan berdasarkan hasil pemantauan parameter tertentu, seperti getaran, temperatur, atau tekanan. Dengan pendekatan ini, potensi kerusakan dapat diprediksi sebelum kegagalan terjadi, sehingga tindakan perawatan dapat dilakukan pada waktu yang paling optimal. *Predictive maintenance* mampu mengurangi *downtime* dan biaya perawatan, namun memerlukan investasi awal berupa sistem monitoring dan keahlian analisis data.

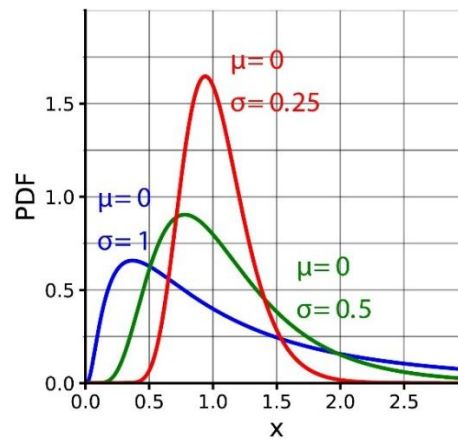
### 2.2.3 Distribusi

Distribusi digunakan untuk menggambarkan pola statistik waktu kegagalan suatu komponen atau sistem berdasarkan data historis yang tersedia. Pemodelan distribusi ini bertujuan untuk memahami karakteristik kegagalan strategi pemeliharaan dan pengelolaan aset. (Akbar, 2022). Setiap distribusi memiliki karakteristik matematis yang berbeda dan dipilih sesuai dengan pola kegagalan yang ditunjukkan oleh data pengamatan.

#### 1. Distribusi Lognormal

Distribusi Lognormal merupakan distribusi yang digunakan ketika data waktu kegagalan bersifat asimetris. Distribusi ini cocok untuk memodelkan kegagalan yang disebabkan oleh akumulasi kerusakan pada komponen yang masa pakainya dipengaruhi oleh banyak faktor

non linear. Distribusi ini sebagian besar data berada pada nilai yang rendah, sementara beberapa data memiliki nilai jauh lebih tinggi. Karena waktu kegagalan tidak mungkin negatif, distribusi lognormal dianggap realistis dalam banyak kasus praktis.



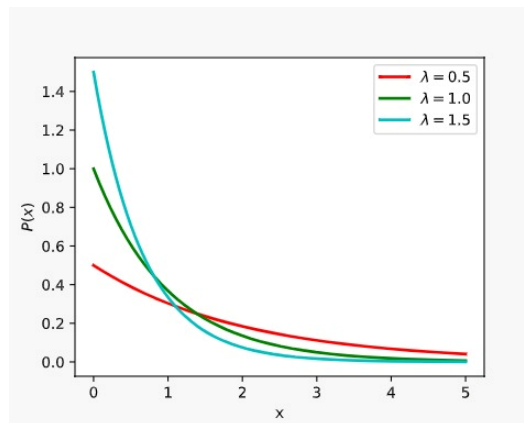
Gambar 2. 1 Grafik Distribusi Lognormal

Sumber: wikipedia

Berdasarkan gambar tersebut, distribusi lognormal memperlihatkan pola yang tidak simetris dengan kecenderungan menceng ke arah kanan (*right skewed*). Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar data terkonsentrasi pada nilai yang lebih rendah, sementara terdapat sejumlah kecil data dengan nilai yang jauh lebih tinggi. Parameter  $\mu$  merepresentasikan nilai rata-rata data yang telah ditransformasikan menggunakan logaritma natural. Sementara itu, parameter  $\sigma$  menggambarkan tingkat variasi atau penyebaran data. Nilai  $\sigma$  yang semakin besar akan menyebabkan kurva distribusi menjadi lebih lebar serta menghasilkan ekor distribusi yang semakin panjang pada sisi kanan.

## 2. Distribusi Eksponensial

Distribusi *Eksponensial* digunakan untuk memodelkan kegagalan bersifat acak dengan laju kegagalan yang konstan sepanjang waktu. Artinya, probabilitas kegagalan pada suatu interval waktu tidak dipengaruhi oleh umur atau lamanya komponen telah beroperasi. Distribusi umumnya merepresentasikan kegagalan yang terjadi akibat kejadian tak terduga. Seperti kesalahan pengoperasian, gangguan eksternal, atau cacat tersembunyi yang muncul secara acak. Distribusi *Eksponensial* banyak digunakan untuk menggambarkan fase umur berguna suatu komponen, di mana tingkat kegagalan relatif stabil.



Gambar 2. 2 Grafik Distribusi Exponensial

Sumber: wikipedia

Berdasarkan gambar tersebut, kurva distribusi eksponensial memperlihatkan bahwa kemungkinan terjadinya suatu kejadian akan berkurang seiring dengan bertambahnya waktu. Parameter  $\lambda$  berfungsi sebagai laju kegagalan (*failure rate*) yang memengaruhi karakteristik bentuk distribusi. Nilai  $\lambda$  yang lebih besar menunjukkan bahwa kegagalan cenderung terjadi lebih cepat, sehingga kurva mengalami penurunan yang lebih tajam. Sebaliknya, apabila nilai  $\lambda$  lebih kecil, interval waktu antar kegagalan menjadi lebih panjang dan kurva menurun dengan laju yang lebih lambat.

#### 2.2.4 Parameter Estimasi Distribusi

Parameter estimasi distribusi merupakan proses penentuan nilai parameter dari distribusi. Estimasi parameter bertujuan untuk memperoleh model statistik yang mampu merepresentasikan karakteristik data secara kuantitatif sehingga dapat digunakan dalam analisis lanjutan, khususnya pada proses Simulasi Monte Carlo. Setelah menentukan distribusi, langkah selanjutnya adalah melakukan estimasi parameter distribusi. Estimasi parameter dilakukan menggunakan perangkat lunak statistik JASP (*Jeffreys's Amazing Statistics Program*). Penggunaan JASP bertujuan untuk memastikan proses estimasi dilakukan secara sistematis dan menghasilkan nilai parameter yang akurat berdasarkan data empiris.

#### 2.2.5 Simulasi

Simulasi merupakan pendekatan pemodelan yang digunakan untuk merepresentasikan perilaku suatu sistem nyata ke dalam bentuk model digital atau matematis. Melalui simulasi, karakteristik dan kinerja sistem dapat dianalisis tanpa harus melakukan intervensi langsung pada sistem sebenarnya. Pendekatan ini digunakan karena memungkinkan pengujian berbagai

alternatif skenario operasi, evaluasi kinerja sistem, serta analisis risiko secara efisien dan aman (Putri, 2025).

### 2.2.6 Simulasi Monte Carlo

Simulasi Monte Carlo merupakan simulasi berbasis statistik yang memanfaatkan bilangan acak untuk merepresentasikan ketidakpastian pada parameter *input* suatu model. Metode ini bekerja dengan melakukan pengulangan perhitungan secara berulang menggunakan nilai *input* yang bervariasi sesuai dengan distribusi probabilitas tertentu, sehingga menghasilkan keluaran dalam bentuk distribusi hasil. Dalam analisis keandalan dan penilaian risiko, Simulasi Monte Carlo digunakan untuk memperkirakan perilaku sistem dalam berbagai kondisi tidak pasti, seperti variasi waktu kegagalan atau perubahan beban operasi. Pendekatan ini banyak dimanfaatkan dalam perencanaan pemeliharaan dalam mengevaluasi dampak terhadap keandalan dan kinerja sistem secara keseluruhan. (Afdal Z. A., 2023)

### 2.2.7 Mean Time Between Failure (MTBF)

*Mean Time Between Failure* (MTBF) merupakan indikator keandalan yang menyatakan rata-rata waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk bekerja tanpa mengalami kegagalan dalam periode tertentu. (Arohman, 2024). Semakin besar nilai MTBF, maka semakin tinggi tingkat keandalan suatu peralatan, karena sistem mampu beroperasi lebih lama sebelum mengalami kegagalan berikutnya. MTBF umumnya digunakan pada peralatan yang dapat diperbaiki dan menjadi dasar dalam perencanaan strategi pemeliharaan. Secara sistematis, MTBF dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$MTBF = \frac{\text{Total Operation Time}}{\text{Breakdown Frequency}} \quad (2.11)$$

#### Keterangan =

|                             |                                            |
|-----------------------------|--------------------------------------------|
| MTBF                        | = <i>Mean Time Between Failure</i>         |
| <i>Total Operation Time</i> | = Total waktu operasional antara kegagalan |
| <i>Breakdown Frequency</i>  | = Jumlah total kegagalan                   |

### 2.2.8 Mean Time To Repair (MTTR)

*Mean Time To Repair* (MTTR) merupakan indikator yang menyatakan rata rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki suatu sistem atau komponen sejak terjadinya kegagalan hingga sistem kembali beroperasi normal (Arohman, 2024). Secara sistematis, MTTR dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$MTTR = \frac{Breakdown\ Time}{Frequency\ Breakdown} \quad (2.11)$$

**Keterangan =**

|                     |                                               |
|---------------------|-----------------------------------------------|
| MTTR                | = Mean Time To Repair                         |
| Breakdown Time      | = Total waktu yang dihabiskan untuk perbaikan |
| Frequency Breakdown | = Jumlah perbaikan                            |

### 2.2.9 Life Cycle Cost Analysis (LCCA)

*Life Cycle Cost Analysis* merupakan pendekatan analisis ekonomi yang digunakan untuk mengevaluasi seluruh biaya yang timbul selama umur pakai suatu aset, sejak tahap perencanaan dan pengadaan hingga aset tersebut tidak lagi digunakan. (Sahid D. I., 2025) Analisis ini tidak hanya berfokus pada biaya investasi awal, tetapi juga mempertimbangkan biaya yang muncul sepanjang siklus aset secara menyeluruh. *Life Cycle Cost Analysis* digunakan sebagai dasar dalam proses pengambilan keputusan terkait pemilihan, pengoperasian, dan pengelolaan aset dengan mempertimbangkan akumulasi biaya yang timbul selama masa pakainya.

Analisis *Life Cycle Cost Analysis* bertujuan untuk menentukan alternatif dengan struktur biaya yang paling efisien dalam jangka panjang dari berbagai pilihan yang tersedia. Melalui pendekatan ini, seluruh elemen biaya yang muncul selama umur produk dievaluasi secara sistematis, dengan mempertimbangkan bahwa setiap aktivitas pada setiap fase siklus hidup akan berkontribusi terhadap hasil finansial akhir yang diperoleh. Dalam Konteks pengelolaan aset pada sektor industri energi, khususnya pembangkit listrik, penerapan *Life Cycle Cost Analysis* menjadi sangat penting karena peralatan utama umumnya memiliki umur pakai yang panjang serta membutuhkan biaya operasional dan pemeliharaan yang signifikan.

### 2.2.10 Perhitungan Life Cycle Cost

Perhitungan *Life Cycle Cost* digunakan untuk mengidentifikasi total biaya yang timbul selama siklus hidup suatu peralatan atau sistem, Berikut merupakan rumusan umum *perhitungan Life Cycle Cost* pada suatu peralatan atau sistem yaitu:

$$LCC = CI + CO + CM + CF + CD \quad (2.12)$$

**Keterangan =**

|    |                                              |
|----|----------------------------------------------|
| CI | = Biaya Investasi ( <i>Investment Cost</i> ) |
| CO | = Biaya Operasi ( <i>Operasional Cost</i> )  |

- CM = Biaya Pemeliharaan (*Maintenance Cost*)  
 CF = Biaya atas Kerusakan (*Failure Cost*)  
 CD = Biaya atas tahap disposal (*Disposal Cost*)

### 2.2.11 Ekonomi Teknik

Ekonomi teknik merupakan bidang yang mengintegrasikan konsep-konsep ekonomi dengan pendekatan keteknikan guna mendukung proses pengambilan keputusan yang rasional dan efisien dalam aktivitas industri maupun bisnis (Puspasari, 2025). Penerapan metode ini memiliki peran penting dalam menilai kelayakan finansial suatu proyek atau investasi, karena melibatkan evaluasi komprehensif dari berbagai faktor ekonomi dan teknik untuk menentukan potensi keuntungan dan risiko yang terkait dengan investasi atau proyek tertentu.

### 2.2.12 *Equivalent Annual Cost (EAC)*

*Equivalent Annual Cost (EAC)* merupakan analisis ekonomi teknik yang digunakan untuk mengkonversi nilai kini bersih (*Net Present Value*) suatu investasi menjadi biaya tahunan yang ekuivalen selama umur ekonomis aset (Cai, 2022). Metode ini sangat bermanfaat dalam membandingkan alternatif investasi yang bersifat saling eksklusif dengan umur ekonomis yang berbeda. Konsep EAC pada dasarnya merupakan transformasi dari NPV menjadi nilai tahunan yang seragam, sehingga arus kas yang tidak merata selama periode tertentu dapat dinyatakan dalam bentuk biaya tahunan konstan. Dengan pendekatan ini, proses evaluasi dan perbandingan alternatif menjadi lebih objektif karena seluruh opsi dinilai dalam satuan biaya per tahun yang setara. Secara sistematis, EAC dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$EAC = \frac{NPV \times r}{1 - \frac{1}{(1+r)^t}} \quad (2.13)$$

#### Keterangan =

- NPV = nilai kini bersih dari seluruh arus kas selama umur aset,  
 r = tingkat diskonto,  
 t = umur ekonomis aset.

### 2.2.13 *Minimum Attractive Rate of Return (MARR)*

*Minimum Attractive Rate of Return (MARR)* merupakan tingkat pengembalian minimum yang disyaratkan oleh suatu organisasi atau investor sebelum menerima suatu proyek investasi. (Nurman, 2024). MARR berfungsi sebagai tingkat diskonto (*discount rate*) dalam analisis ekonomi teknik dan menjadi batas kelayakan finansial suatu alternatif investasi.

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Objek Penelitian**

Penelitian ini dilakukan pada *Power Transmisson and Auxiliary Power Supply* yang berada pada perusahaan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) pada PT.XYZ, di Patuha, (Jawa Barat), wilayah ini memberikan kontribusi besar dalam menyediakan pasokan listrik untuk jaringan nasional. Kawasan ini dikenal memiliki potensi panas bumi yang besar dan berperan penting dalam menyuplai energi listrik ke sistem nasional. Energi panas bumi sendiri berasal dari panas alami di dalam perut bumi yang dimanfaatkan melalui fluida panas untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik. Dalam operasionalnya, PLTP terdiri dari berbagai subsistem yang saling terhubung, sehingga kinerja tiap bagian sangat menentukan stabilitas keseluruhan pembangkit.

*Power Transmission and Auxiliary Power Supply*, yang berfungsi menyalurkan daya listrik ke jaringan sekaligus menyediakan suplai listrik untuk peralatan pendukung seperti sistem kontrol, proteksi, pendingin, dan komunikasi. Berdasarkan klasifikasi KKS, sistem ini termasuk dalam kelompok B yang mencakup peralatan penyaluran daya dan sistem pendukungnya. Pemilihan objek ini didasarkan pada perannya yang penting dalam menjaga keandalan (*reliability*) dan ketersediaan (*availability*) sistem. Gangguan pada sistem ini tidak hanya berpotensi menghambat distribusi energi, tetapi juga dapat memicu kerugian akibat *downtime* yang tidak direncanakan serta menurunkan efisiensi operasional pembangkit secara keseluruhan.

#### **3.2 Subjek Penelitian**

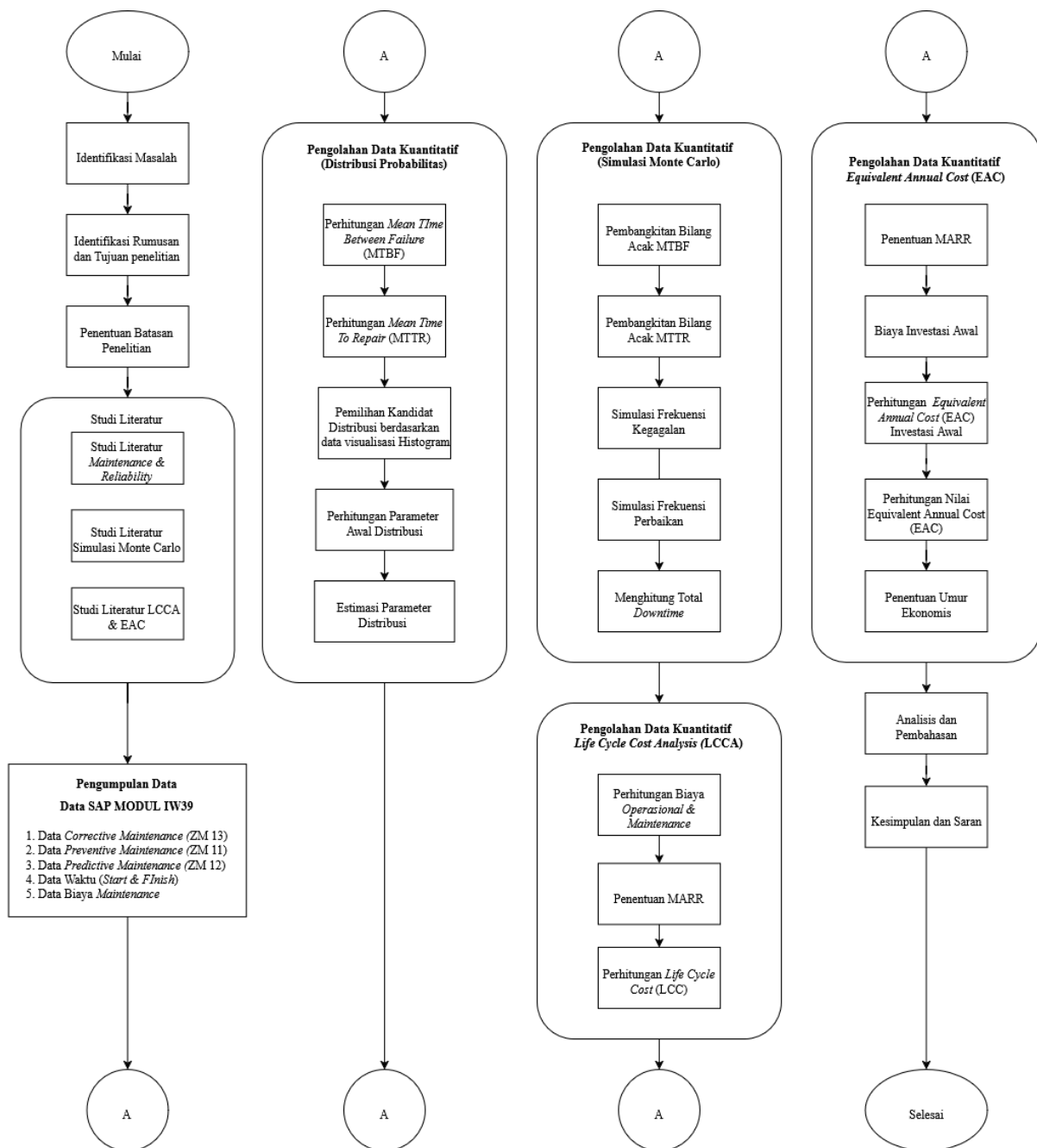
Subjek penelitian ini merupakan pihak-pihak yang terlibat secara langsung maupun tidak langsung dalam pengelolaan aset di PT.XYZ, khususnya pada pemeliharaan dan reliability (*maintenance and reliability*). Subjek tersebut yang bertanggung jawab terhadap perencanaan pemeliharaan, pelaksanaan perawatan, serta pengelolaan data historis peralatan melalui sistem *Enterprice Resource Planning* (ERP) yaitu sistem SAP.

### 3.3 Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data ini dilakukan dengan data primer yang diperoleh secara langsung oleh pihak internal PT.XYZ melalui komunikasi dan diskusi. Data ini digunakan untuk memperoleh informasi terkait kebijakan pemeliharaan, klasifikasi jenis jenis *maintenance*, serta prosedur operasional yang berlaku. Sedangkan, data sekunder diperoleh dari sistem informasi perusahaan, khususnya melalui sistem *Enterprise Resource Planning* (ERP) yaitu sistem SAP modul IW39, yang berisi data historis *work order*, waktu terjadinya gangguan, jenis kerusakan, serta biaya pemeliharaan.

### 3.4 Alur Penelitian

Berikut merupakan alur penelitian yang dilakukan pada penelitian ini yaitu:



Gambar 3. 1 Alur Penelitian

### 3.4.1 Identifikasi Masalah

Tahap identifikasi masalah dilakukan untuk mengetahui kondisi aktual yang terjadi pada penelitian yang ingin dilakukan yaitu pada Sistem *Power Transmisson and Auxiliary Power Supply* berdasarkan data historis perawatan. Permasalahan yang dilakukan untuk menjaga keandalan (*reliability*) dan ketersediaan (*availability*), khususnya pada *equipment* utama yang

berperan langsung dalam proses pembangkit listrik. Kondisi tersebut menyebabkan *downtime* yang bisa berdampak pada terganggunya proses operasi dan meningkatkan biaya operasional perusahaan. Maka dari itu, diperlukan suatu analisis dalam menentukan umur ekonomis peralatan serta strategi pengantian yang optimal.

### **3.4.2 Identifikasi Rumusan dan Tujuan penelitian**

Pada langkah ini mengidentifikasi permasalahan secara sistematis. Rumusan masalah ini berdasarkan hasil perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dengan pendekatan *Equivalent Annual Cost* (EAC) terhadap data historis perawatan Sistem *Power Transmisson and Auxiliary Power Supply*, untuk menentukan berapa umur ekonomis pada sistem untuk mendukung pengambilan keputusan dalam perbaikan atau pergantian pada sistem di PT.XYZ. Adapun untuk tujuan penelitian ini menentukan umur ekonomis Sistem *Power Transmisson and Auxiliary Power Supply* berdasarkan data historis perawatan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam perbaikan atau pergantian sistem di PT.XYZ.

### **3.4.3 Penentuan Batasan Penelitian**

Batasan penelitian ditetapkan agar pembahasan lebih terarah. Penelitian ini didasarkan pada data historis SAP Modul IW39 yaitu data perawatan *Corrective maintenance*, *Preventive maintenance*, *Predictive maintenance*. Data ini dikumpulkan mencakup informasi waktu kejadian gangguan dan perbaikan, seperti *basic start date*, *schedule start*, dan *actual start*, biaya *operasional* dan *maintenance*, serta jenis aktivitas pemeliharaan. Penelitian ini menggunakan metode Simulasi Monte Carlo, *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) serta menentukan umur ekonomis menggunakan data *Equivalent Annual Cost* (EAC).

### **3.4.4 Studi Literatur**

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh landasan teori yang mendukung penelitian. Literatur yang dikaji meliputi konsep *maintenance* dan *reliability*, metode Simulasi Monte Carlo, serta pendekatan *Life Cycle Cost Analysis* dan *Equivalent Annual Cost*. Studi literatur mengenai *reliability* digunakan untuk memahami konsep *Mean Time Between Failure* (MTBF) dan *Mean Time To Repair* (MTTR). Literatur Simulasi Monte Carlo digunakan untuk memodelkan ketidakpastian frekuensi kegagalan. Sedangkan literatur LCCA dan EAC digunakan untuk menentukan biaya siklus hidup dan umur ekonomis peralatan. Hasil studi literatur ini menjadi dasar dalam penyusunan metodologi penelitian.

### 3.4.5 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan mengambil data historis perawatan dari sistem SAP modul IW39. Data yang dikumpulkan meliputi data *Corrective Maintenance*, *Preventive Maintenance*, *Predictive Maintenance*. Data tersebut kemudian diolah untuk memperoleh nilai waktu antar kerusakan dan waktu perbaikan. Selain itu, data biaya digunakan untuk menghitung biaya operasional dan perawatan dalam analisis biaya siklus hidup.

### 3.4.6 Pengolahan Data Kuantitatif (Distribusi)

Pada tahap ini dilakukan pengolahan data historis pemeliharaan untuk menganalisis karakteristik keandalan sistem. Data yang telah dikumpulkan terlebih dahulu digunakan untuk menghitung nilai *Mean Time Between Failure* (MTBF) dan *Mean Time to Repair* (MTTR) sebagai parameter dasar dalam evaluasi performa sistem. Selanjutnya, dilakukan visualisasi data menggunakan histogram melalui aplikasi statistik untuk mengidentifikasi pola sebaran data sebagai dasar pemilihan distribusi probabilitas yang sesuai. Berdasarkan hasil visualisasi tersebut, data MTBF menunjukkan kecenderungan mengikuti distribusi *Ekspensial*, sedangkan data MTTR lebih sesuai dengan distribusi *Lognormal*. Setelah distribusi kandidat ditentukan, dilakukan *Uji Goodness Of Fit* melalui nilai *p-value* untuk menilai tingkat kesesuaian distribusi teoritis terhadap data aktual. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kedua distribusi tersebut dinyatakan fit, sehingga dapat digunakan untuk tahapan analisis berikutnya. Selanjutnya dilakukan estimasi parameter distribusi yang kemudian digunakan sebagai dasar dalam proses pembangkitan bilangan acak pada simulasi.

### 3.4.7 Pengolahan Data Kuantitatif (Simulasi Monte Carlo)

Simulasi Monte Carlo dilakukan untuk memprediksi kondisi operasional peralatan yang tidak pasti. Tahap ini dimulai dengan pembangkitan bilangan acak berdasarkan distribusi MTBF dan MTTR yang telah diperoleh sebelumnya. Bilangan acak tersebut digunakan untuk mensimulasikan frekuensi kegagalan dan frekuensi perbaikan. Proses ini dilakukan secara berulang untuk menghasilkan sejumlah skenario kemungkinan kejadian kegagalan dalam periode operasional tertentu. Dari hasil simulasi kemudian dihitung total *downtime* yang terjadi selama periode tertentu. Hasil simulasi ini digunakan sebagai *input* dalam perhitungan biaya *operational* dan *maintenance* pada analisis biaya siklus hidup.

#### **3.4.8 Pengolahan Data Kuantitatif *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA)**

Analisis *Life Cycle Cost Analysis* dilakukan untuk menghitung total biaya yang dikeluarkan selama umur penggunaan peralatan. Biaya yang dihitung meliputi biaya investasi awal, biaya operasional, serta biaya perawatan. Selanjutnya ditentukan nilai MARR sebagai tingkat diskonto dalam analisis ekonomi. Dengan menggunakan parameter tersebut, dilakukan perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* untuk setiap alternatif umur penggunaan. Hasil LCCA digunakan untuk mengetahui total biaya yang terjadi selama siklus hidup peralatan.

#### **3.4.9 Pengolahan Data Kuantitatif *Equivalent Annual Cost* (EAC)**

Pada tahap ini bertujuan untuk menentukan biaya tahunan ekuivalen dari setiap alternatif umur peralatan. Dengan cara menentukan nilai MARR dan biaya investasi awal. Selanjutnya dihitung *Equivalent Annual Cost* dari biaya siklus hidup yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya. Nilai EAC digunakan untuk membandingkan alternatif umur penggunaan. Umur ekonomis peralatan ditentukan berdasarkan nilai EAC terkecil yang menunjukkan biaya tahunan minimum.

#### **3.4.10 Analisis dan Pembahasan**

Tahap analisis dan pembahasan dilakukan dengan menginterpretasikan hasil pengolahan data yang telah dilakukan. Analisis meliputi evaluasi distribusi yang dipilih, hasil simulasi frekuensi kegagalan, nilai *downtime*, serta perhitungan biaya siklus hidup. Selain itu dilakukan pembahasan terhadap nilai EAC untuk menentukan umur ekonomis peralatan. Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan kondisi aktual untuk memberikan rekomendasi strategi perawatan yang optimal.

#### **3.4.11 Kesimpulan dan Saran**

Tahap terakhir adalah penyusunan kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan. Kesimpulan memuat ringkasan hasil penelitian yang telah dilakukan, serta umur ekonomis peralatan. Selain itu diberikan saran yang dapat digunakan sebagai pertimbangan bagi perusahaan dalam menentukan kebijakan perawatan maupun penggantian peralatan. Saran juga mencakup pengembangan penelitian selanjutnya agar hasil yang diperoleh lebih optimal.

## BAB IV

### PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

#### 4.1 Pengumpulan Data

Berikut merupakan data waktu kerusakan antar komponen berdasarkan data historis IW39 melalui sistem *Enterprise Resource Planning* (ERP) yaitu sistem SAP yaitu:

##### 4.1.1 Sumber dan Karakteristik Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data yang diperoleh dari sistem *Enterprise Resource Planning* perusahaan, yaitu sistem SAP pada modul IW39. Modul IW39 digunakan untuk menampilkan data historis *work order* pemeliharaan yang telah dilaksanakan pada *equipment* di Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply*. Data ini mencakup periode tahun 2016-2023. Pemilihan periode tersebut dilakukan untuk memperoleh data historis sehingga mampu merepresentasikan pola kegagalan dan aktivitas pemeliharaan. Data pemeliharaan yang diperoleh dikelompokkan berdasarkan jenis aktivitas *maintenance* yang tercatat dalam sistem SAP terdiri dari *Corrective Maintenance* (CM) dengan kode *work order* ZM13, *Preventive Maintenance* (PM) dengan kode *work order* ZM 11, dan *Predictive Maintenance* (PdM) dengan kode *work order* ZM12. Pengelompokan berdasarkan kode tersebut bertujuan untuk memisahkan karakteristik data waktu antar kerusakan (*Time to Failure*) dan waktu perbaikan (*Time to Repair*) pada masing masing strategi pemeliharaan.

##### 4.1.2 Review Kelengkapan Data

Pada penelitian ini perlu dilakukan proses *review* kelengkapan data untuk memastikan bahwa data historis yang diperoleh dari sistem SAP IW39 akurat dan relevan. Proses validasi ini mencakup pengumpulan, pemeriksaan, dan verifikasi data operasional dan finansial yang terkait dengan setiap peralatan. Data yang divalidasikan meliputi informasi primer yaitu seperti waktu kegagalan (*failure time*), waktu perbaikan (*repair time*), dan frekuensi kegagalan. Selain itu, data sekunder seperti jenis kerusakan, biaya material dan jasa, seperti *downtime* akibat kegagalan juga harus diperiksa untuk memastikan keakuratannya, Seperti tabel dibawah ini:

Tabel 4. 1 Nama *field-field* pada data SAP Historical

| 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       |           |    |                 |           |

Berdasarkan jenis jenis pekerjaan perawatan yang ada pada data *SAP Historical*, data yang digunakan memiliki beberapa kolom utama sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 4.1.

Berikut merupakan beberapa kriteria data yang berkualitas yaitu:

#### 1. Akurasi (*Accuracy*)

Akurasi data berkaitan dengan ketepatan informasi yang tercatat dalam sistem terhadap kondisi operasional sebenarnya. Pada tahap ini dilakukan pemeriksaan terhadap kesesuaian tanggal kejadian gangguan, tanggal penyelesaian pekerjaan, serta durasi perbaikan. Data yang menunjukkan nilai tidak logis, seperti durasi atau waktu penyelesaian lebih awal dari waktu mulai, dilakukan verifikasi ulang. Akurasi adalah fondasi dari analisis yang dapat dipercaya, karena data yang tidak akurat dapat mengarahkan pada keputusan yang kurang tepat.

#### 2. Ketepatan Waktu (*Timeliness*)

Ketepatan waktu menunjukkan sejauh mana informasi tersedia pada saat dibutuhkan untuk mendukung proses pengambilan keputusan. Data dikatakan tepat waktu apabila proses pengumpulan, pembaruan, dan penyampaiannya dilakukan sesuai dengan kebutuhan periode tertentu. Dalam pengelolaan pemeliharaan aset, ketersediaan data yang tepat waktu memungkinkan pihak terkait melakukan evaluasi secara cepat sehingga potensi gangguan dapat dikenali lebih awal sebelum menyebabkan kegagalan yang lebih besar.

#### 3. Validitas (*Validity*)

Validitas berkaitan dengan tingkat kesesuaian data terhadap tujuan penggunaannya informasi yang valid harus mengikuti definisi operasional, format pencatatan, serta standar yang telah ditentukan sebelumnya. Sebagai contoh, apabila data waktu henti (*Downtime*)

seharusnya dicatat dalam satuan menit namun sebagian dicatat dalam jam tanpa penyesuaian, maka validitas data tersebut diragukan.

#### 4. Keunikan (*Uniqueness*)

Keunikan memastikan bahwa setiap data yang tercatat harus bersifat tunggal dan tidak mengalami pengulangan yang tidak diperlukan. Prinsip ini penting untuk mencegah terjadinya duplikasi informasi yang dapat memicu kekeliruan dalam analisis. Sebagai contoh, data mengenai satu unit peralatan tertentu sebaiknya hanya memiliki satu entri dalam basis data, kecuali terdapat pembaruan yang memang relevan.

#### 5. Kelengkapan (*Completeness*)

Kelengkapan mengacu pada terpenuhinya seluruh unsur informasi yang dibutuhkan untuk keperluan analisis maupun pengambilan keputusan. Data yang tidak lengkap, misalnya karena adanya nilai yang hilang atau parameter penting yang tidak tercatat, dapat mengurangi kualitas hasil evaluasi dan berpotensi menghasilkan keputusan yang kurang tepat.

#### 6. Konsistensi (*Consistency*)

Konsistensi mengacu pada sejauh mana data yang sama tetap seragam di seluruh sistem atau periode waktu tertentu. Data yang konsisten tidak memiliki konflik atau anomali antar sumber. Sebagai contoh, jika data *downtime* pada laporan manual berbeda dengan data di sistem otomatis, maka konsistensi data tersebut diragukan, dan hal ini dapat mengurangi kepercayaan terhadap analisis yang dilakukan.

#### 4.1.3 Data Waktu Antar Kerusakan Komponen (*Corrective Maintenance*)

Pada Data *Corrective Maintenance* merupakan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan setelah terjadi kerusakan atau kegagalan pada peralatan, bersifat reaktif karena perbaikan dilakukan ketika mesin tidak lagi beroperasi sesuai fungsinya. Berikut merupakan data waktu kerusakan antar komponen-komponen pada Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply* yang terdiri dari:

Tabel 4. 2 Data Waktu Antar Kerusakan Komponen *Corrective Maintenance*

| <b>Work Order</b> | <b>Mulai Downtime</b> | <b>Selesai Downtime</b> |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|
| 130100000181      | 05/01/2017 09:30      | 05/01/2017 09:30        |
| 130100000164      | 31/07/2017 09:00      | 31/07/2017 12:22        |
| 130100000168      | 31/07/2017 10:40      | 31/07/2017 10:40        |

| <b>Work Order</b> | <b>Mulai Downtime</b> | <b>Selesai Downtime</b> |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|
| 130100000258      | 15/05/2018 08:31      | 07/09/2018 18:08        |
| 130100000256      | 29/05/2018 08:00      | 29/05/2018 08:00        |
| ...               | ...                   | ...                     |
| ...               | ...                   | ...                     |
| ...               | ...                   | ...                     |
| 130100001502      | 18/05/2023 08:00      | 18/05/2023 12:00        |
| 130100001564      | 24/05/2023 08:00      | 24/05/2023 12:00        |
| 130100001393      | 24/07/2023 08:00      | 24/07/2024 17:00        |
| 130100001668      | 10/10/2023 08:00      | 10/10/2023 14:00        |
| 130100001750      | 27/11/2023 15:23      | 27/11/2023 15:23        |

#### 4.1.4 Data Waktu Antar Kerusakan Komponen (*Preventive Maintenance*)

Pada Data *Preventive Maintenance* merupakan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan secara terjadwal dan berkala berdasarkan waktu operasi atau umur pakai komponen tanpa menunggu terjadinya kerusakan. Berikut merupakan data waktu kerusakan antar komponen-komponen pada Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply* yang terdiri dari:

Tabel 4. 3 Data Waktu Antar Kerusakan Komponen *Preventive Maintenance*

| <b>Work Order</b> | <b>Mulai Downtime</b> | <b>Selesai Downtime</b> |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|
| 110100001791      | 18/10/2016 08:00      | 18/10/2016 08:27        |
| 110100001792      | 18/10/2016 08:00      | 18/10/2016 08:56        |
| 110100001798      | 18/10/2016 08:00      | 18/10/2016 09:07        |
| 110100001799      | 18/10/2016 08:00      | 18/10/2016 09:07        |
| 110100001800      | 18/10/2016 08:00      | 18/10/2016 09:52        |
| ...               | ...                   | ...                     |
| ...               | ...                   | ...                     |
| ...               | ...                   | ...                     |
| 110100092823      | 07/12/2023 10:00      | 07/12/2023 10:30        |
| 110100093209      | 18/12/2023 09:00      | 18/12/2023 09:30        |
| 110100092962      | 18/12/2023 09:30      | 18/12/2023 10:00        |
| 110100093949      | 09/01/2024 08:00      | 18/01/2024 08:20        |

| <b>Work Order</b> | <b>Mulai Downtime</b> | <b>Selesai Downtime</b> |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|
| 110100093950      | 13/01/2024 08:00      | 15/01/2024 08:22        |

#### 4.1.5 Data Waktu Antar Kerusakan Komponen (*Predictive Maintenance*)

Pada Data *Predictive Maintenance* merupakan strategi pemeliharaan berbasis kondisi aktual peralatan yang dilakukan berdasarkan hasil pemantauan parameter, sehingga tindakan perawatan dapat dilakukan pada waktu optimal guna mengurangi *downtime* dan biaya perawatan. Berikut merupakan data waktu kerusakan antar komponen-komponen pada Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply* yang terdiri dari:

Tabel 4. 4 Data Waktu Antar Kerusakan Komponen *Predictive Maintenance*

| <b>Work Order</b> | <b>Mulai Downtime</b> | <b>Selesai Downtime</b> |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|
| 120100005227      | 02/10/2017 08:00      | 02/10/2017 10:43        |
| 120100005228      | 02/10/2017 08:00      | 02/10/2017 10:43        |
| 120100005230      | 02/10/2017 08:00      | 02/10/2017 10:43        |
| 120100005229      | 02/10/2017 08:00      | 02/10/2017 11:05        |
| 120100005231      | 02/10/2017 08:00      | 02/10/2017 10:43        |
| ...               | ...                   | ...                     |
| ...               | ...                   | ...                     |
| ...               | ...                   | ...                     |
| 120100045384      | 15/12/2023 09:30      | 15/12/2023 10:00        |
| 120100045382      | 15/12/2023 10:30      | 15/12/2023 11:00        |
| 120100045383      | 20/12/2023 08:00      | 20/12/2023 08:33        |
| 120100045385      | 20/12/2023 08:00      | 20/12/2023 08:33        |
| 120100045387      | 22/12/2023 08:00      | 22/12/2023 08:33        |

## 4.2 Pengolahan Data

Penelitian ini menggunakan aset sistem pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi, khususnya pada Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply* untuk di lakukan analisis, Setelah ditentukan sistem yang akan dianalisis, langkah selanjutnya adalah memfilter semua data perjenis perawatan untuk menemukan nilai biaya perawatan per tahun per jenis perawatan. Dari hasil pemilihan data dari file yang didapatkan. Maka langkah selanjutnya adalah, melakukan analisis *Corrective Maintenance*, karena CM bersifat tidak terjadwal dan

dipengaruhi oleh ketidakpastian terjadinya kegagalan. Oleh karena itu, diperlukan pemodelan dan simulasi untuk mengestimasi jumlah kejadian CM pertahun hingga akhir usia aset. Tetapi sebelum dilakukan Simulasi Monte Carlo, terlebih dahulu dilakukan penentuan distribusi data waktu antar kerusakan dan waktu perbaikan berdasarkan data historis pemeliharaan. Penentuan distribusi ini bertujuan untuk merepresentasikan pola ketidakpastian terjadinya kegagalan dan durasi perbaikan secara statistik. Distribusi yang telah ditentukan selanjutan digunakan sebagai dasar dalam pembangkitan bilangan acak pada proses simulasi. Berikut merupakan pengolahan data dilakukan secara bertahap sesuai dengan metode penelitian yang telah ditetapkan yaitu:

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

Penentuan distribusi waktu antar kerusakan dilakukan untuk mengetahui pola probabilitas kegagalan pada Sistem *Power Transmission and Auxiliary Power Supply*. Data yang digunakan berupa *Time Between Failure* (TBF), yaitu selisih waktu antar kerusakan berdasarkan riwayat *work order Corrective Maintenance* lalu dikalikan 24 agar satuannya jam. Adapun data waktu antar kerusakan disajikan sebagai berikut. Berikut merupakan data antar waktu kerusakan pada Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply* yaitu:

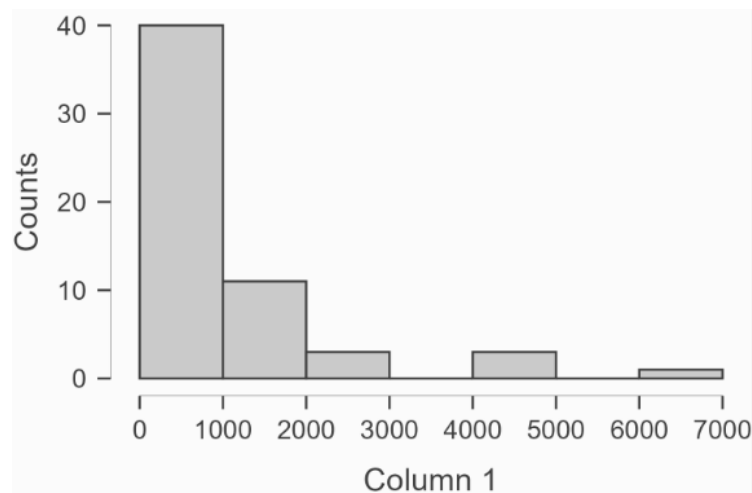
Tabel 4. 5 *Time to Failure*

| <b>Work Order</b> | <b>Mulai Downtime</b> | <b>Selesai Downtime</b> | <b>TBF</b> |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|------------|
| 130100000181      | 05/01/2017 09:30      | 05/01/2017 09:30        | 0          |
| 130100000164      | 31/07/2017 09:00      | 31/07/2017 12:22        | 4967,5     |
| 130100000168      | 31/07/2017 10:40      | 31/07/2017 10:40        | 1,666667   |
| 130100000258      | 15/05/2018 08:31      | 07/09/2018 18:08        | 6909,85    |
| 130100000256      | 29/05/2018 08:00      | 29/05/2018 08:00        | 335,4833   |
| 130100000338      | 10/09/2018 14:02      | 11/10/2018 10:49        | 2502,033   |
| 130100000343      | 10/09/2018 15:01      | 11/10/2018 10:49        | 0,983333   |
| 130100000375      | 29/10/2018 08:03      | 21/12/2018 02:57        | 1169,033   |
| 130100000403      | 09/01/2019 09:01      | 09/01/2019 09:50        | 1728,967   |
| 130100000418      | 18/01/2019 08:00      | 18/01/2019 16:30        | 214,9833   |
| 130100000412      | 01/02/2019 13:30      | 01/02/2019 15:30        | 341,5      |
| 130100000413      | 01/02/2019 13:30      | 01/02/2019 15:30        | 0          |
| 130100000420      | 13/02/2019 08:27      | 10/06/2019 10:57        | 282,95     |
| 130100000508      | 22/04/2019 10:12      | 22/04/2019 10:50        | 1633,75    |

| <b><i>Work Order</i></b> | <b><i>Mulai Downtime</i></b> | <b><i>Selesai Downtime</i></b> | <b><i>TBF</i></b> |
|--------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| 130100000422             | 14/05/2019 08:30             | 17/05/2019 16:30               | 526,3             |
| 130100000540             | 21/05/2019 08:37             | 25/06/2019 09:30               | 168,1167          |
| 130100000549             | 21/06/2019 10:00             | 21/06/2019 12:15               | 745,3833          |
| 130100000511             | 18/07/2019 09:00             | 22/07/2019 16:00               | 647               |
| 130100000560             | 23/07/2019 09:45             | 25/07/2019 14:45               | 120,75            |
| 130100000559             | 21/08/2019 08:00             | 22/07/2020 09:29               | 694,25            |
| 130100000597             | 26/11/2019 08:30             | 26/11/2019 16:00               | 2328,5            |
| 130100000619             | 16/12/2019 08:00             | 16/12/2019 08:00               | 479,5             |
| 130100000546             | 19/12/2019 09:00             | 19/12/2019 12:00               | 73                |
| 130100000629             | 22/01/2020 08:00             | 22/01/2020 08:00               | 815               |
| 130100000625             | 11/05/2020 10:00             | 11/05/2020 11:30               | 2642              |
| 130100000628             | 13/05/2020 10:00             | 13/05/2020 11:30               | 48                |
| 130100000688             | 13/05/2020 11:50             | 13/05/2020 11:50               | 1,833333          |
| 130100000673             | 16/06/2020 10:00             | 22/07/2021 11:00               | 814,1667          |
| 130100000639             | 01/07/2020 09:00             | 07/07/2020 17:00               | 359               |
| 130100000499             | 09/07/2020 11:00             | 10/07/2020 11:00               | 194               |
| 130100000738             | 28/07/2020 08:18             | 28/07/2020 08:18               | 453,3             |
| 130100000671             | 13/08/2020 10:00             | 13/08/2020 11:00               | 385,7             |
| 130100000827             | 18/02/2021 10:00             | 18/02/2021 11:33               | 4536              |
| 130100000844             | 10/03/2021 09:04             | 10/03/2021 12:00               | 479,0667          |
| 130100000872             | 06/04/2021 10:45             | 06/04/2021 12:00               | 649,6833          |
| 130100000821             | 17/06/2021 00:00             | 17/09/2021 15:10               | 1717,25           |
| 130100000852             | 01/07/2021 08:30             | 10/07/2021 13:53               | 344,5             |
| 130100000905             | 09/08/2021 08:30             | 17/09/2021 11:19               | 936               |
| 130100000978             | 23/09/2021 10:02             | 23/09/2021 11:00               | 1081,533          |
| 130100000521             | 18/10/2021 10:04             | 16/11/2021 10:10               | 600,0333          |
| 130100001040             | 23/11/2021 09:45             | 26/11/2021 10:20               | 863,6833          |
| 130100001013             | 30/11/2021 08:00             | 30/11/2021 08:00               | 166,25            |
| 130100001063             | 06/01/2022 09:30             | 06/01/2022 11:00               | 889,5             |
| 130100001088             | 07/03/2022 09:00             | 07/03/2022 10:00               | 1439,5            |

| <b>Work Order</b> | <b>Mulai Downtime</b> | <b>Selesai Downtime</b> | <b>TBF</b> |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|------------|
| 130100001101      | 16/03/2022 11:00      | 16/03/2022 12:00        | 218        |
| 130100001113      | 18/04/2022 09:00      | 18/04/2022 10:00        | 790        |
| 130100001123      | 11/05/2022 08:00      | 11/05/2022 10:00        | 551        |
| 130100001167      | 22/07/2022 09:00      | 31/10/2023 17:00        | 1729       |
| 130100001182      | 04/08/2022 13:00      | 10/08/2022 15:08        | 316        |
| 130100001188      | 10/08/2022 09:00      | 11/08/2022 14:00        | 140,01     |
| 130100001199      | 22/09/2022 10:30      | 22/09/2022 12:00        | 1033,49    |
| 130100001241      | 21/10/2022 10:00      | 21/10/2022 16:00        | 695,5      |
| 130100001186      | 24/10/2022 09:00      | 29/10/2022 16:00        | 71,00639   |
| 130100001246      | 27/10/2022 14:33      | 17/01/2023 09:13        | 77,54361   |
| 130100001394      | 08/05/2023 08:00      | 10/05/2023 15:00        | 4625,45    |
| 130100001502      | 18/05/2023 08:00      | 18/05/2023 12:00        | 240        |
| 130100001564      | 24/05/2023 08:00      | 24/05/2023 12:00        | 144        |
| 130100001393      | 24/07/2023 08:00      | 24/07/2024 17:00        | 1464       |
| 130100001668      | 10/10/2023 08:00      | 10/10/2023 14:00        | 1872       |
| 130100001750      | 27/11/2023 15:23      | 27/11/2023 15:23        | 1159,383   |

Berdasarkan data historis yang diperoleh dari sistem SAP IW39, selanjutnya melakukan identifikasi pola distribusi untuk mengetahui model yang paling sesuai dalam merepresentasikan karakteristik kegagalan pada Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply*. Identifikasi awal dilakukan melalui visualisasi histogram menggunakan aplikasi statistik untuk melihat pola sebaran data TBF. Berikut merupakan visualisasi histogram data TBF dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 4. 1 Histogram TBF

Berdasarkan hasil visualisasi histogram, terlihat bahwa sebagian besar data terkonsentrasi pada rentang waktu kerusakan yang relatif rendah dan menunjukkan pola distribusi yang menurun ke arah kanan. Pada histogram TBF, sumbu horizontal menunjukkan interval waktu antar kerusakan yang dikelompokkan ke dalam beberapa rentang nilai, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan jumlah data (*count*) yang berada pada masing-masing interval tersebut. Sebagai contoh, apabila pada interval 0–1000 jam memiliki count sebesar 10, maka dapat diartikan bahwa terdapat 10 kejadian kerusakan yang terjadi dengan waktu antar kerusakan berada pada rentang 0–1000 jam. Semakin tinggi nilai count pada suatu interval menunjukkan semakin sering data muncul pada rentang tersebut. Berdasarkan histogram yang diperoleh, frekuensi terbesar berada pada interval waktu yang rendah dan terus menurun pada interval yang lebih tinggi, sehingga membentuk pola yang menyerupai distribusi eksponensial.

Pola ini mengindikasikan bahwa data memiliki kecenderungan mengikuti distribusi *Exponensial*, dimana probabilitas terjadinya kegagalan cenderung lebih tinggi pada interval waktu tertentu dan menurun seiring bertambahnya waktu operasi. Untuk memastikan kesesuaian distribusi tersebut, dilakukan pengujian *Uji Goodness of Fit* menggunakan nilai *P-Value* sebesar 0,058, yang dimana nilai tersebut lebih besar dari batas minimal yaitu 0,05 ( $0,058 > 0,05$ ) sehingga distribusi *Eksponensial* dinyatakan sesuai (*fit*) dalam merepresentasikan data TBF pada Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply*.

#### 4.2.2 Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Kerusakan (*Time to Repair*)

Tahap selanjutnya melakukan analisis terhadap data antar waktu perbaikan (*Time to Repair*). Analisis ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik durasi perbaikan pada Sistem *Power*

*Transmission And Auxiliary Power Supply* berdasarkan *work order Corrective Maintenance*. Data ini didapatkan dari selisih antara mulai *downtime* dan selesai *downtime* pada setiap pekerjaan perbaikan lalu dikalikan 24 jam agar satuannya jam. Selisih waktu tersebut merepresentasikan lamanya proses perbaikan sejak pekerjaan dimulai hingga selesai. Berikut merupakan data antar waktu kerusakan pada Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply* yaitu:

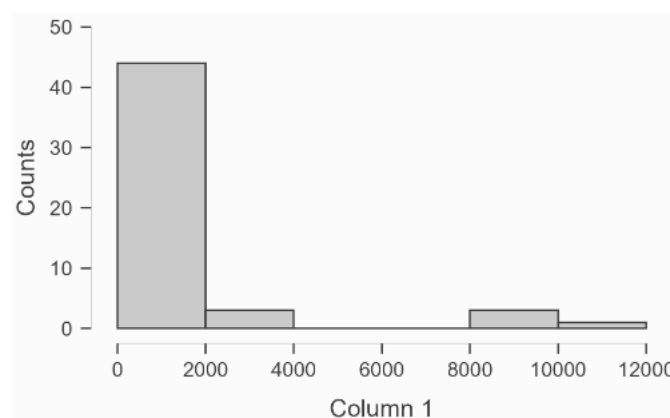
Tabel 4. 6 *Time to Repair*

| <b>Work Order</b> | <b>Mulai Downtime</b> | <b>Selesai Downtime</b> | <b>TTR</b> |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|------------|
| 130100000181      | 05/01/2017 09:30      | 05/01/2017 09:30        | 0          |
| 130100000164      | 31/07/2017 09:00      | 31/07/2017 12:22        | 3,375      |
| 130100000168      | 31/07/2017 10:40      | 31/07/2017 10:40        | 0          |
| 130100000258      | 15/05/2018 08:31      | 07/09/2018 18:08        | 2769,624   |
| 130100000256      | 29/05/2018 08:00      | 29/05/2018 08:00        | 0          |
| 130100000338      | 10/09/2018 14:02      | 11/10/2018 10:49        | 740,7961   |
| 130100000343      | 10/09/2018 15:01      | 11/10/2018 10:49        | 739,815    |
| 130100000375      | 29/10/2018 08:03      | 21/12/2018 02:57        | 1266,915   |
| 130100000403      | 09/01/2019 09:01      | 09/01/2019 09:50        | 0,816667   |
| 130100000418      | 18/01/2019 08:00      | 18/01/2019 16:30        | 8,507778   |
| 130100000412      | 01/02/2019 13:30      | 01/02/2019 15:30        | 2,011389   |
| 130100000413      | 01/02/2019 13:30      | 01/02/2019 15:30        | 2,013056   |
| 130100000420      | 13/02/2019 08:27      | 10/06/2019 10:57        | 2810,513   |
| 130100000508      | 22/04/2019 10:12      | 22/04/2019 10:50        | 0,645556   |
| 130100000422      | 14/05/2019 08:30      | 17/05/2019 16:30        | 80,01444   |
| 130100000540      | 21/05/2019 08:37      | 25/06/2019 09:30        | 840,8992   |
| 130100000549      | 21/06/2019 10:00      | 21/06/2019 12:15        | 2,252222   |
| 130100000511      | 18/07/2019 09:00      | 22/07/2019 16:00        | 103,0044   |
| 130100000560      | 23/07/2019 09:45      | 25/07/2019 14:45        | 53,00472   |
| 130100000559      | 21/08/2019 08:00      | 22/07/2020 09:29        | 8065,485   |
| 130100000597      | 26/11/2019 08:30      | 26/11/2019 16:00        | 7,515833   |
| 130100000619      | 16/12/2019 08:00      | 16/12/2019 08:00        | 0          |
| 130100000546      | 19/12/2019 09:00      | 19/12/2019 12:00        | 3,014167   |

| <i><b>Work Order</b></i> | <i><b>Mulai Downtime</b></i> | <i><b>Selesai Downtime</b></i> | <i><b>TTR</b></i> |
|--------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| 130100000629             | 22/01/2020 08:00             | 22/01/2020 08:00               | 0                 |
| 130100000625             | 11/05/2020 10:00             | 11/05/2020 11:30               | 1,507222          |
| 130100000628             | 13/05/2020 10:00             | 13/05/2020 11:30               | 1,504722          |
| 130100000688             | 13/05/2020 11:50             | 13/05/2020 11:50               | 0                 |
| 130100000673             | 16/06/2020 10:00             | 22/07/2021 11:00               | 9625,004          |
| 130100000639             | 01/07/2020 09:00             | 07/07/2020 17:00               | 152,0036          |
| 130100000499             | 09/07/2020 11:00             | 10/07/2020 11:00               | 24,0025           |
| 130100000738             | 28/07/2020 08:18             | 28/07/2020 08:18               | 0                 |
| 130100000671             | 13/08/2020 10:00             | 13/08/2020 11:00               | 1,013056          |
| 130100000827             | 18/02/2021 10:00             | 18/02/2021 11:33               | 1,56              |
| 130100000844             | 10/03/2021 09:04             | 10/03/2021 12:00               | 2,938056          |
| 130100000872             | 06/04/2021 10:45             | 06/04/2021 12:00               | 1,252778          |
| 130100000821             | 17/06/2021 00:00             | 17/09/2021 15:10               | 2223,182          |
| 130100000852             | 01/07/2021 08:30             | 10/07/2021 13:53               | 221,3908          |
| 130100000905             | 09/08/2021 08:30             | 17/09/2021 11:19               | 938,8308          |
| 130100000978             | 23/09/2021 10:02             | 23/09/2021 11:00               | 0,968611          |
| 130100000521             | 18/10/2021 10:04             | 16/11/2021 10:10               | 696,1111          |
| 130100001040             | 23/11/2021 09:45             | 26/11/2021 10:20               | 72,595            |
| 130100001013             | 30/11/2021 08:00             | 30/11/2021 08:00               | 0                 |
| 130100001063             | 06/01/2022 09:30             | 06/01/2022 11:00               | 1,508611          |
| 130100001088             | 07/03/2022 09:00             | 07/03/2022 10:00               | 1,015833          |
| 130100001101             | 16/03/2022 11:00             | 16/03/2022 12:00               | 1,014444          |
| 130100001113             | 18/04/2022 09:00             | 18/04/2022 10:00               | 1,006111          |
| 130100001123             | 11/05/2022 08:00             | 11/05/2022 10:00               | 2,015833          |
| 130100001167             | 22/07/2022 09:00             | 31/10/2023 17:00               | 11192,01          |
| 130100001182             | 04/08/2022 13:00             | 10/08/2022 15:08               | 146,1464          |
| 130100001188             | 10/08/2022 09:00             | 11/08/2022 14:00               | 28,99583          |
| 130100001199             | 22/09/2022 10:30             | 22/09/2022 12:00               | 1,514722          |
| 130100001241             | 21/10/2022 10:00             | 21/10/2022 16:00               | 6,006944          |
| 130100001186             | 24/10/2022 09:00             | 29/10/2022 16:00               | 126,9975          |

| <b>Work Order</b> | <b>Mulai Downtime</b> | <b>Selesai Downtime</b> | <b>TTR</b> |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|------------|
| 130100001246      | 27/10/2022 14:33      | 17/01/2023 09:13        | 1962,681   |
| 130100001394      | 08/05/2023 08:00      | 10/05/2023 15:00        | 55,00667   |
| 130100001502      | 18/05/2023 08:00      | 18/05/2023 12:00        | 4,011389   |
| 130100001564      | 24/05/2023 08:00      | 24/05/2023 12:00        | 4,005556   |
| 130100001393      | 24/07/2023 08:00      | 24/07/2024 17:00        | 8793,009   |
| 130100001668      | 10/10/2023 08:00      | 10/10/2023 14:00        | 6,009722   |
| 130100001750      | 27/11/2023 15:23      | 27/11/2023 15:23        | 0          |

Berdasarkan data historis yang diperoleh dari sistem SAP IW39, selanjutnya melakukan identifikasi pola distribusi untuk mengetahui model yang paling sesuai dalam merepresentasikan karakteristik kegagalan pada Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply*. Identifikasi awal dilakukan melalui visualisasi histogram menggunakan aplikasi statistik untuk melihat pola sebaran data TBF. Berikut merupakan visualisasi histogram data TBF dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 4. 2 Histogram TTR

Berdasarkan hasil visualisasi histogram, terlihat bahwa sebagian besar data waktu perbaikan terkonsentrasi pada rentang nilai yang relatif rendah, sementara terdapat beberapa data dengan durasi perbaikan yang jauh lebih tinggi sehingga membentuk pola sebaran yang memanjang ke arah kanan. Pada histogram TTR, interval menunjukkan rentang waktu perbaikan sedangkan *count* menunjukkan jumlah kejadian perbaikan yang berada pada rentang tersebut. Sebagian besar data berada pada interval waktu perbaikan yang rendah dengan nilai *count* yang lebih tinggi, sedangkan hanya sedikit data yang berada pada interval waktu perbaikan yang sangat besar. Kondisi ini menyebabkan histogram memiliki ekor yang memanjang ke arah kanan (*right*

*skewed*), Maka dari itu, pemilihan Distribusi Lognormal dilakukan karena bentuk histogram menunjukkan bahwa sebagian besar aktivitas perbaikan terjadi dalam waktu relatif singkat, namun terdapat beberapa kejadian dengan durasi perbaikan yang jauh lebih lama.

Pola ini menunjukkan karakteristik distribusi *Lognormal*, di mana data tersebar secara tidak simetris dengan dominasi frekuensi pada nilai rendah dan adanya beberapa nilai pada rentang yang lebih besar. Untuk memastikan kesesuaian distribusi tersebut, dilakukan pengujian *Uji Goodness of Fit* menggunakan nilai *P-Value* sebesar 0,076, yang dimana nilai tersebut lebih besar dari batas minimal yaitu 0,05 ( $0,076 > 0,05$ ) sehingga distribusi *Ekspensial* dinyatakan sesuai (fit) dalam merepresentasikan data TTR pada Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply*.

### 4.3 Pengolahan Data Kuantitatif (Simulasi Monte Carlo)

Pengolahan data kuantitatif pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode Simulasi Monte Carlo untuk memprediksi jumlah kejadian *Corrective Maintenance* (CM) dan akumulasi *downtime* tahunan hingga akhir usia aset pada Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply*. Metode simulasi ini digunakan karena aktivitas *Corrective Maintenance* bersifat tidak terjadwal dan dipengaruhi oleh ketidakpastian waktu terjadinya kegagalan, sehingga pendekatan deterministik tidak mampu merepresentasikan kondisi operasi sistem secara akurat. Simulasi Monte Carlo memungkinkan pemodelan kejadian kegagalan secara probabilistik dengan memanfaatkan data historis pemeliharaan sebagai dasar perhitungan. Simulasi ini berfungsi untuk menghasilkan prediksi jumlah kejadian CM per tahun, yang selanjutnya digunakan sebagai *input* utama dalam analisis biaya pemeliharaan jangka panjang.

#### 4.3.1 Penentuan Parameter Waktu Antar Kerusakan

Tahap awal dalam Simulasi Monte Carlo adalah menentukan distribusi yang paling sesuai untuk data waktu antar kerusakan (*Time Between Failure*). Data ini diperoleh dari selisih waktu kegagalan antar kejadian *Corrective Maintenance* berdasarkan data historis sistem SAP IW39. Pemilihan distribusi berdasarkan visualisasi data menggunakan histogram melalui aplikasi statistik untuk mengidentifikasi pola sebaran data sebagai dasar pemilihan distribusi probabilitas yang sesuai. Berdasarkan hasilnya distribusi data MTBF menunjukkan kecenderungan mengikuti distribusi *Ekspensial*, hal ini menunjukkan bahwa pola kegagalan ada sistem bersifat acak, sehingga distribusi *Ekspensial* dinilai paling representatif.

Berdasarkan hasil estimasi parameter distribusi *Exponensial* diperoleh dengan *software* JASP nilai laju kegagalan ( $\lambda$ ) sebesar 0,0007816 per jam. Nilai parameter ini digunakan sebagai dasar dalam pembangkit waktu antar kerusakan pada Simulasi Monte Carlo, dengan asumsi waktu operasi sistem sebesar 8760 jam per tahun.

#### 4.3.2 Penentuan Parameter Waktu Perbaikan

Selain waktu antar kerusakan, waktu perbaikan (*Time To Repair*), juga merupakan parameter penting dalam Simulasi Monte Carlo karena berpengaruh langsung terhadap akumulasi *downtime* sistem. Data ini diperoleh dari selisih selesai *downtime* dan mulai *downtime* pada setiap kejadian *Corrective Maintenance*. Pengujian distribusi dilakukan visualisasi data menggunakan histogram melalui aplikasi statistik untuk mengidentifikasi pola sebaran data sebagai dasar pemilihan distribusi, dari hasil pengujiannya distribusi *Lognormal* menunjukkan nilai kecocokan tertinggi dibandingkan distribusi lainnya. Berdasarkan hasil estimasi parameter dengan *software* JASP distribusi *Lognormal* diperoleh nilai parameter dengan  $\mu = 3,428$  dan  $\sigma = 3,108$ . Parameter ini digunakan sebagai dasar dalam pembangkitan nilai waktu perbaikan pada proses Simulasi Monte Carlo. Nilai parameter ini digunakan sebagai dasar dalam pembangkit waktu antar kerusakan pada simulasi Monte Carlo, dengan asumsi waktu operasi sistem sebesar 8760 jam per tahun.

#### 4.3.3 Representasi Ketidakpastian Kegagalan dan Durasi Perbaikan

Dalam melakukan Simulasi Monte Carlo dilakukan menggunakan *Microsoft Excel* dengan memanfaatkan transformasi bilangan acak. Pendekatan ini digunakan untuk merepresentasikan ketidakpastian kegagalan dan durasi perbaikan berdasarkan distribusi yang telah ditentukan sebelumnya. Pada *Time Between Failure* dilakukan menggunakan distribusi *eksponensial*, dengan hasil estimasi parameter, nilai laju kegagalan yang digunakan dalam simulasi adalah  $\lambda$  sebesar 0,0007816, sehingga persamaanya dengan persamaan sebagai berikut :

$$F(x; \lambda) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} & x \geq 0, \\ 0 & x < 0. \end{cases}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0$$

#### Keterangan :

$t$  = kapan mesin itu rusak

$\lambda$  = laju kegagalan (*failure rate*)

Berdasarkan hasil estimasi dari data historis pemeliharaan, diperoleh nilai laju kegagalan ( $\lambda$ ) sebesar 0,0007816 per jam. Fungsi tersebut menyatakan probabilitas bahwa mesin telah

mengalami kegagalan sebelum waktu  $t$ . Dalam Simulasi Monte Carlo, probabilitas kumulatif disamakan dengan bilangan acak yang berdistribusi uniform (0,1) misalkan:

$$P = F(t)$$

Maka :

$$P = 1 - e^{-\lambda t}$$

Tujuan simulasi adalah mencari nilai  $t$  atau untuk mencari tau kapan mesin itu rusak langkah penyelesaian dilakukan sebagai berikut:

$$P = 1 - e^{-\lambda t}$$

Pindah ruas:

$$e^{-\lambda t} = 1 - P$$

Ambil logaritma natural (ln) pada kedua sisi :

$$= \ln(e^{-\lambda t}) - \ln(1 - p)$$

$$\ln(e^x) = x$$

Maka:

$$-\lambda t = \ln(1 - p)$$

Sehingga nilai waktu menuju kegagalan adalah :

$$t = \frac{\ln(1-p)}{-\lambda}$$

Karena dalam Simulasi Monte Carlo probabilitas (P) digantikan oleh bilangan acak yang dihasilkan fungsi RAND () pada *Microsoft Excel*, maka persamaan menjadi :

$$t = \frac{\ln(1-RAND())}{-\lambda}$$

$$t = \frac{\ln(1-RAND())}{-0,007816}$$

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan melalui beberapa kali percobaan, dapat diinterpretasikan jumlah kejadian kerusakan mesin dalam satu tahun operasional. Simulasi ini menggunakan nilai *time to failure*. Nilai *time to failure* ini diperoleh dari hasil perhitungan kemudian dilakukan pembulatan (*rounded*) agar lebih representatif dan mudah diinterpretasikan. Nilai *Time To Failure* menunjukkan pada jam ke berapa mesin mengalami kerusakan saat sedang beroperasi. Setelah mesin rusak, dilakukan perbaikan hingga mesin dapat beroperasi kembali. Selanjutnya, dihitung kembali waktu menuju kerusakan berikutnya.

Setiap tabel dalam simulasi merepresentasikan periode satu tahun operasi. Maka, akumulasi nilai menunjukkan total waktu operasi hingga terjadi beberapa kali kerusakan dalam

satu tahun. Dari hasil tersebut dapat dianalisis berapa kali kerusakan terjadi dalam satu tahun, bahkan dapat diproyeksikan untuk periode yang berkelanjutan, pada penelitian ini dilakukan sebanyak 40 tahun operasi, dengan mengalikan frekuensi tahunan. Satuan waktu yang digunakan adalah jam, maka konversi ke satuan tahun dilakukan dengan menggunakan 365 hari x 24 jam sehingga diperoleh total waktu operasi sebesar 8760 jam per tahun. Nilai ini digunakan sebagai batas akumulasi waktu dalam setiap tabel simulasi tahunan.

Proses simulasi akan terus menjumlahkan nilai *rounded* hingga mendekati atau mencapai 8760 jam. Ketika total akumulasi waktu telah mencapai batas tersebut, maka perhitungan dihentikan karena telah merepresentasikan satu tahun penuh operasi. Jumlah kejadian kerusakan yang tercatat sebelum mencapai batas waktu tersebut merupakan estimasi frekuensi dalam satu tahun. Melalui pendekatan ini, dapat diperoleh estimasi total kerusakan selama umur operasi sistem.

Selanjutnya, pada data *Time to Repair*, dilakukan menggunakan distribusi Lognormal. Nilai MTTR menggunakan fungsi distribusi Lognormal dengan persamaan:

$$X = e^{\mu + \sigma Z}$$

**Keterangan :**

$\mu$  = rata rata logaritmtmik

$\sigma$  = standar deviasi logaritmik

$Z$  = variabel acak normal standar dengan distribusi N (0,1)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa waktu perbaikan didapatkan dengan membangkitkan terlebih dahulu variabel acak Normal Standar Z, kemudian ditransformasikan melalui fungsi Lognormal untuk menghasilkan nilai yang selalu positif. Oleh karena itu, ketidakpastian durasi perbaikan dapat direpresentasikan secara probabilistik dalam kerangka Simulasi Monte Carlo. Hasil estimasi parameter dari data historis, diperoleh nilai  $\mu = 3,428$  dan  $\sigma = 3,108$ , sehingga model matematisnya menjadi:

$$X = e^{3,428 + 3,108 Z}$$

Dalam implementasi menggunakan *Microsoft Excel*, variabel acak Z dibangkitkan dari bilangan acak Uniform (0,1) menggunakan fungsi RAND () yang kemudian ditransformasikan menjadi distribusi Normal standar. Secara langsung, proses tersebut dapat dituliskan menggunakan fungsi bawaan *Excel* untuk distribusi Lognormal yaitu=LOGNORMAL.INV (RAND();3,428;3,108), Hasil simulasi kemudian dibulatkan dan diakumulasikan untuk

memperoleh total waktu perbaikan kumulatif. Untuk menentukan jumlah kejadian perbaikan dalam satu tahun, nilai waktu perbaikan kumulatif dibandingkan dengan total jam operasi tahunan, yaitu 8760 jam. Apabila nilai kumulatif masih berada di bawah batas tersebut, maka kejadian tersebut dihitung sebagai satu kejadian perbaikan. Maka dari itu distribusi yang telah diimplementasikan ini menjadi dasar utama dalam Simulasi Monte Carlo untuk memprediksi jumlah kejadian *Corrective Maintenance* serta akumulasi downtime selama umur operasional aset.

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

Setelah diperoleh frekuensi kegagalan (*Failure*) dan estimasi lama waktu perbaikan. Selanjutnya, Pada bagian ini dilakukan pengolahan data kuantitatif menggunakan pendekatan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) untuk menghitung total biaya yang ada selama umur operasional aset secara menyeluruh. Pada penelitian ini, LCCA difokuskan pada pengolahan data biaya pemeliharaan yang terdiri dari biaya *Corrective Maintenance* (CM), *Preventive Maintenance* (PM), dan *Predictive Maintenance* (PdM). Selain itu, analisis juga mencakup perhitungan total biaya pemeliharaan (*Maintenance Cost*) serta biaya kehilangan kesempatan produksi (*Opportunity Lost*) akibat terjadinya *downtime* sistem. Data biaya dihitung berdasarkan hasil simulasi dan data historis pemeliharaan, sehingga dapat merepresentasikan kondisi operasional sistem secara lebih realistis sepanjang umur aset.

##### **4.4.1. Perhitungan Biaya *Corrective Maintenance***

Pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui besarnya biaya akibat kerusakan peralatan selama umur operasional aset pada Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply*. Biaya CM dihitung berdasarkan data historis pemeliharaan dan hasil prediksi jumlah kejadian kerusakan yang didapatkan dari Simulasi Monte Carlo. Periode analisis biaya CM dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu tahun 2016 hingga 2023 dimana biaya CM diperoleh langsung berdasarkan data aktual sistem SAP IW39. Data ini mencerminkan kondisi riil pemeliharaan yang telah terjadi, baik dari sisi frekuensi kejadian maupun besaran biaya perbaikan dan periode prediksi yaitu tahun 2024 hingga 2055, dimana jumlah kejadian CM diperoleh dari hasil Simulasi Monte Carlo, sementara biaya perbaikan dihitung berdasarkan biaya rata rata satu kali perbaikan yang telah ditetapkan. Biaya CM pertahun (Rp) merupakan biaya yang terjadi menjadi 2 jenis yaitu biaya dari data historis dan biaya dari perspektif tahun sekarang, karena

sekarang adalah tahun 2024 maka semua biaya yang muncul dari tahun pertama (2016) hingga tahun (2023) adalah dari data historis. Maka, biaya setiap tahun mulai dari tahun 2016 hingga 2023 harus dikonversikan ke nilai sekarang yaitu nilai di tahun 2024 dengan menggunakan rumus *Future Value* untuk menyamakan basis nilai uang sehingga seluruh komponen biaya dapat dibandingkan secara konsisten dalam analisis *Life Cycle Cost Analysis*. Berikut merupakan rumus *Future Value* (FV) yaitu:

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

**Keterangan :**

FV = nilai biaya pada tahun 2024

PV = nilai biaya CM pada tahun terjadinya

r = tingkat suku bunga atau *Minimum Attractive Rate of Return* (MARR)

n = Selisih tahun antara tahun biaya terjadi dan tahun acuan (2024)

Dalam penelitian ini digunakan nilai MARR sebesar 12% sesuai dengan standar evaluasi ekonomi yang berlaku pada perusahaan. Dengan demikian, seluruh biaya CM historis telah dinyatakan dalam nilai setara tahun 2024. Untuk periode prediksi (2024-2055), biaya CM per 2024 dihitung dengan mengalikan Prediksi CM per tahun (kejadian) hasil Simulasi Monte Carlo dengan biaya *maintenance* dalam satu kali perbaikan dan struktur biaya relatif konstan sepanjang periode yang dianalisis. Berikut merupakan rumus biaya *maintenance* dalam satu kali perbaikan:

$$\text{Biaya maintenance 1 kali perbaikan} = \frac{\sum \text{Biaya actual CM per tahun 2024}}{\sum \text{Jumlah kerusakan tahun 2016 – 2023}}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa biaya *maintenance* 1 kali perbaikan adalah Rp.33.550.530. Maka, perhitungan tersebut kemudian disajikan dalam bentuk tabel perhitungan biaya *Corrective Maintenance* yang telah dinyatakan dalam nilai ekuivalen tahun 2024 selama periode 2016 - 2055.

Tabel 4. 7 Tabel Perhitungan Biaya *Corrective Maintenance*

| Tahun ke- | Tahun | Prediksi                |                         | Biaya                  |                                     |
|-----------|-------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------------|
|           |       | CM per tahun (kejadian) | Biaya CM per tahun (Rp) | Nilai CM per 2024 (Rp) | <i>Maintenance</i> 1 kali perbaikan |
| 1         | 2016  | 0                       | Rp                      | -                      | Rp 33.550.530                       |

| Tahun ke- | Tahun | Prediksi                | Biaya                   |                        | Biaya                               |
|-----------|-------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------------|
|           |       | CM per tahun (kejadian) | Biaya CM per tahun (Rp) | Nilai CM per 2024 (Rp) | <i>Maintenance</i> 1 kali perbaikan |
| 2         | 2017  | 3                       | Rp -                    |                        |                                     |
| 3         | 2018  | 5                       | Rp -                    |                        |                                     |
| 4         | 2019  | 14                      | Rp 296.746.554          | Rp522.968.827,81       |                                     |
| 5         | 2020  | 9                       | Rp 91.946.525           | Rp144.679.641,95       |                                     |
| 6         | 2021  | 11                      | Rp 339.866.846          | Rp477.488.451,59       |                                     |
| 7         | 2022  | 10                      | Rp 102.687.037          | Rp128.810.621,33       |                                     |
| 8         | 2023  | 7                       | Rp 599.985.000          | Rp671.983.201,00       |                                     |
| 9         | 2024  | 4                       | Rp -                    | Rp 134.202.120         |                                     |
| 10        | 2025  | 9                       | Rp -                    | Rp 301.954.771         |                                     |
| 11        | 2026  | 10                      | Rp -                    | Rp 335.505.301         |                                     |
| 12        | 2027  | 3                       | Rp -                    | Rp 100.651.590         |                                     |
| 13        | 2028  | 10                      | Rp -                    | Rp 335.505.301         |                                     |
| 14        | 2029  | 3                       | Rp -                    | Rp 100.651.590         |                                     |
| 15        | 2030  | 7                       | Rp -                    | Rp 234.853.710         |                                     |
| 16        | 2031  | 9                       | Rp -                    | Rp 301.954.771         |                                     |
| 17        | 2032  | 11                      | Rp -                    | Rp 369.055.831         |                                     |
| 18        | 2033  | 3                       | Rp -                    | Rp 100.651.590         |                                     |
| 19        | 2034  | 7                       | Rp -                    | Rp 234.853.710         |                                     |
| 20        | 2035  | 4                       | Rp -                    | Rp 134.202.120         |                                     |
| 21        | 2036  | 2                       | Rp -                    | Rp 67.101.060          |                                     |
| 22        | 2037  | 2                       | Rp -                    | Rp 67.101.060          |                                     |
| 23        | 2038  | 9                       | Rp -                    | Rp 301.954.771         |                                     |
| 24        | 2039  | 6                       | Rp -                    | Rp 201.303.180         |                                     |
| 25        | 2040  | 8                       | Rp -                    | Rp 268.404.241         |                                     |
| 26        | 2041  | 5                       | Rp -                    | Rp 167.752.650         |                                     |
| 27        | 2042  | 9                       | Rp -                    | Rp 301.954.771         |                                     |
| 28        | 2043  | 10                      | Rp -                    | Rp 335.505.301         |                                     |

| Tahun ke- | Tahun | Prediksi                   |                         |   |    | Biaya                                  |
|-----------|-------|----------------------------|-------------------------|---|----|----------------------------------------|
|           |       | CM per tahun<br>(kejadian) | Biaya CM per tahun (Rp) |   |    | <i>Maintenance</i><br>1 kali perbaikan |
| 29        | 2044  | 3                          | Rp                      | - | Rp | 100.651.590                            |
| 30        | 2045  | 10                         | Rp                      | - | Rp | 335.505.301                            |
| 31        | 2046  | 8                          | Rp                      | - | Rp | 268.404.241                            |
| 32        | 2047  | 7                          | Rp                      | - | Rp | 234.853.710                            |
| 33        | 2048  | 8                          | Rp                      | - | Rp | 268.404.241                            |
| 34        | 2049  | 2                          | Rp                      | - | Rp | 67.101.060                             |
| 35        | 2050  | 8                          | Rp                      | - | Rp | 268.404.241                            |
| 36        | 2051  | 3                          | Rp                      | - | Rp | 100.651.590                            |
| 37        | 2052  | 3                          | Rp                      | - | Rp | 100.651.590                            |
| 38        | 2053  | 8                          | Rp                      | - | Rp | 268.404.241                            |
| 39        | 2054  | 6                          | Rp                      | - | Rp | 201.303.180                            |
| 40        | 2055  | 5                          | Rp                      | - | Rp | 167.752.650                            |

#### 4.4.2. Perhitungan Biaya *Preventive Maintenance* (PM)

Pada bagian ini dilakukan perhitungan *Preventive Maintenance* (PM) merupakan aktivitas biaya pemeliharaan yang dilakukan secara terjadwal untuk mencegah terjadinya kegagalan peralatan dan menjaga keandalan sistem. Data biaya *Preventive Maintenance* (PM) dari data historis pemeliharaan Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply* pada periode tahun 2016 hingga 2023. Biaya PM pertahun (Rp) merupakan biaya yang terjadi menjadi 2 jenis yaitu biaya dari data historis dan biaya dari perspektif tahun sekarang, karena sekarang adalah tahun 2024 maka semua biaya yang muncul dari tahun pertama (2016) hingga tahun (2023) adalah dari data historis. Maka, biaya setiap tahun mulai dari tahun 2016 hingga 2023 harus dikonversikan ke nilai sekarang yaitu nilai di tahun 2024 dengan menggunakan rumus *Future Value* untuk menyamakan basis nilai uang sehingga seluruh komponen biaya dapat dibandingkan secara konsisten dalam analisis *Life Cycle Cost Analysis*. Berikut merupakan rumus *Future Value* (FV) yaitu:

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

**Keterangan :**

FV = nilai biaya pada tahun 2024

PV = nilai biaya PM pada tahun terjadinya

r = tingkat suku bunga atau *Minimum Attractive Rate of Return* (MARR)

n = Selisih tahun antara tahun biaya terjadi dan tahun acuan (2024)

Dalam penelitian ini digunakan nilai MARR sebesar 12% sesuai dengan standar evaluasi ekonomi yang berlaku pada perusahaan. Dengan demikian, seluruh biaya PM historis telah dinyatakan dalam nilai setara tahun 2024. Setelah diperoleh nilai biaya PM historis yang telah dikonversikan ke tahun 2024, langkah selanjutnya yaitu tahun periode prediksi (2024-2055) pada periode, biaya PM akan menggunakan nilai rata rata biaya PM mulai dari 2016 hingga tahun 2055 yang sudah dikonversikan ke Nilai PM per 2024 (Rp). Maka, perhitungan tersebut kemudian disajikan dalam bentuk tabel perhitungan biaya *Preventive Maintenance* (PM) yang telah dinyatakan dalam nilai ekuivalen tahun 2024 selama periode 2016- 2055.

Tabel 4. 8 Tabel Perhitungan Biaya *Preventive Maintenance* (PM)

| Tahun ke- | Tahun | Biaya PM per tahun (Rp) | Nilai PM per 2024 (Rp) |
|-----------|-------|-------------------------|------------------------|
| 1         | 2016  | Rp                      | -                      |
| 2         | 2017  | Rp                      | -                      |
| 3         | 2018  | Rp                      | -                      |
| 4         | 2019  | Rp 1.223.800.822        | Rp 2.156.755.207       |
| 5         | 2020  | Rp 344.834.434          | Rp 542.603.663         |
| 6         | 2021  | Rp 1.607.311.022        | Rp 2.258.156.263       |
| 7         | 2022  | Rp 468.312.001          | Rp 587.450.576         |
| 8         | 2023  | Rp 177.560.000          | Rp 198.867.201         |
| 9         | 2024  |                         | Rp 717.979.114         |
| 10        | 2025  |                         | Rp 717.979.114         |
| 11        | 2026  |                         | Rp 717.979.114         |
| 12        | 2027  |                         | Rp 717.979.114         |
| 13        | 2028  |                         | Rp 717.979.114         |
| 14        | 2029  |                         | Rp 717.979.114         |
| 15        | 2030  |                         | Rp 717.979.114         |

| <b>Tahun<br/>ke-</b> | <b>Tahun</b> | <b>Biaya PM per<br/>tahun (Rp)</b> | <b>Nilai PM per 2024<br/>(Rp)</b> |
|----------------------|--------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 16                   | 2031         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 17                   | 2032         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 18                   | 2033         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 19                   | 2034         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 20                   | 2035         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 21                   | 2036         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 22                   | 2037         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 23                   | 2038         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 24                   | 2039         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 25                   | 2040         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 26                   | 2041         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 27                   | 2042         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 28                   | 2043         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 29                   | 2044         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 30                   | 2045         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 31                   | 2046         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 32                   | 2047         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 33                   | 2048         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 34                   | 2049         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 35                   | 2050         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 36                   | 2051         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 37                   | 2052         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 38                   | 2053         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 39                   | 2054         |                                    | Rp 717.979.114                    |
| 40                   | 2055         |                                    | Rp 717.979.114                    |

#### **4.4.3. Perhitungan Biaya *Predictive Maintenance* (PdM)**

Pada bagian ini dilakukan perhitungan *Predictive Maintenance* (PdM) merupakan aktivitas biaya pemeliharaan yang berbasis kondisi (*condition based maintenance*) yang dilakukan

dengan memanfaatkan data pemantauan dan analisis kinerja peralatan untuk memprediksi potensi terjadinya kegagalan sebelum kerusakan tersebut benar-benar terjadi. Data biaya *Predictive Maintenance* (PdM) dari data historis pemeliharaan Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply* pada periode tahun 2016 hingga 2023. Biaya PdM pertahun (Rp) merupakan biaya yang terjadi menjadi 2 jenis yaitu biaya dari data historis dan biaya dari perspektif tahun sekarang, karena sekarang adalah tahun 2024 maka semua biaya yang muncul dari tahun pertama (2016) hingga tahun (2023) adalah dari data historis. Maka, biaya setiap tahun mulai dari tahun 2016 hingga 2023 harus dikonversikan ke nilai sekarang yaitu nilai di tahun 2024 dengan menggunakan rumus *Future Value* untuk menyamakan basis nilai uang sehingga seluruh komponen biaya dapat dibandingkan secara konsisten dalam analisis *Life Cycle Cost Analysis*. Berikut merupakan rumus *Future Value* (FV) yaitu:

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

**Keterangan :**

FV = nilai biaya pada tahun 2024

PV = nilai biaya PM pada tahun terjadinya

r = tingkat suku bunga atau *Minimum Attractive Rate of Return* (MARR)

n = Selisih tahun antara tahun biaya terjadi dan tahun acuan (2024)

Dalam penelitian ini digunakan nilai MARR sebesar 12% sesuai dengan standar evaluasi ekonomi yang berlaku pada perusahaan. Dengan demikian, seluruh biaya PdM historis telah dinyatakan dalam nilai setara tahun 2024. Setelah diperoleh nilai biaya PdM historis yang telah dikonversikan ke tahun 2024, langkah selanjutnya yaitu tahun periode prediksi (2024-2055) pada periode, biaya PdM akan menggunakan nilai rata rata biaya PM mulai dari 2016 hingga tahun 2055 yang sudah dikonversikan ke Nilai PdM per 2024 (Rp). Maka, perhitungan tersebut kemudian disajikan dalam bentuk tabel perhitungan biaya *Predictive Maintenance* (PdM) yang telah dinyatakan dalam nilai ekuivalen tahun 2024 selama periode 2016 - 2055.

Tabel 4. 9 Tabel Perhitungan Biaya *Predictive Maintenance* (PdM)

| Tahun ke- | Tahun | Biaya PM per tahun (Rp) | Nilai PdM per 2024 (Rp) |
|-----------|-------|-------------------------|-------------------------|
| 1         | 2016  | Rp                      | -                       |
| 2         | 2017  | Rp                      | -                       |
| 3         | 2018  | Rp                      | -                       |

| <b>Tahun ke-</b> | <b>Tahun</b> | <b>Biaya PM per tahun (Rp)</b> |             | <b>Nilai PdM per 2024 (Rp)</b> |             |
|------------------|--------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|
| 4                | 2019         | Rp                             | 132.500.000 | Rp                             | 233.510.279 |
| 5                | 2020         | Rp                             | 228.173.800 | Rp                             | 359.035.897 |
| 6                | 2021         | Rp                             | 85.660.000  | Rp                             | 120.346.136 |
| 7                | 2022         | Rp                             | 23.200.000  | Rp                             | 29.102.082  |
| 8                | 2023         | Rp                             | 23.347.450  | Rp                             | 26.149.145  |
| 9                | 2024         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 10               | 2025         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 11               | 2026         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 12               | 2027         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 13               | 2028         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 14               | 2029         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 15               | 2030         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 16               | 2031         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 17               | 2032         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 18               | 2033         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 19               | 2034         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 20               | 2035         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 21               | 2036         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 22               | 2037         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 23               | 2038         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 24               | 2039         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 25               | 2040         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 26               | 2041         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 27               | 2042         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 28               | 2043         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 29               | 2044         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 30               | 2045         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 31               | 2046         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |
| 32               | 2047         |                                |             | Rp                             | 96.017.942  |

| Tahun ke- | Tahun | Biaya PM per tahun (Rp) | Nilai PdM per 2024 (Rp) |
|-----------|-------|-------------------------|-------------------------|
| 33        | 2048  |                         | Rp 96.017.942           |
| 34        | 2049  |                         | Rp 96.017.942           |
| 35        | 2050  |                         | Rp 96.017.942           |
| 36        | 2051  |                         | Rp 96.017.942           |
| 37        | 2052  |                         | Rp 96.017.942           |
| 38        | 2053  |                         | Rp 96.017.942           |
| 39        | 2054  |                         | Rp 96.017.942           |
| 40        | 2055  |                         | Rp 96.017.942           |

#### 4.4.4. Perhitungan Total Maintenance Cost

Pada bagian ini dilakukan perhitungan Total Maintenance Cost dilakukan untuk mengetahui total biaya pemeliharaan yang dikeluarkan setiap tahun selama umur operasional Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply*. Total Maintenance Cost ini merupakan akumulasi dari tiga jenis strategi pemeliharaan yang diterapkan yaitu, *Corrective Maintenance* (CM), *Preventive Maintenance* (PM), dan *Predictive Maintenance* (PdM). Seluruh biaya yang digunakan dalam perhitungan ini telah dinyatakan dalam nilai ekuivalen tahun 2024 sehingga berada pada basis nilai yang sama.

Tabel 4. 10 Tabel Perhitungan Maintenance Cost

| Tahun ke- | Tahun | Corrective Maintenance Cost (Rp) | Preventive Maintenance Cost (Rp) | Predictive Maintenance Cost (Rp) | Total Maintenance Cost (Rp) |
|-----------|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 1         | 2016  | Rp -                             | Rp -                             | Rp -                             | Rp -                        |
| 2         | 2017  | Rp -                             | Rp -                             | Rp -                             | Rp -                        |
| 3         | 2018  | Rp -                             | Rp -                             | Rp -                             | Rp -                        |
| 4         | 2019  | Rp 522.968.828                   | Rp 2.156.755.207                 | Rp 233.510.279                   | Rp 2.913.234.314            |
| 5         | 2020  | Rp 144.679.642                   | Rp 542.603.663                   | Rp 359.035.897                   | Rp 1.046.319.201            |
| 6         | 2021  | Rp 477.488.452                   | Rp 2.258.156.263                 | Rp 120.346.136                   | Rp 2.855.990.850            |
| 7         | 2022  | Rp 128.810.621                   | Rp 587.450.576                   | Rp 29.102.082                    | Rp 745.363.280              |
| 8         | 2023  | Rp 671.983.201                   | Rp 198.867.201                   | Rp 26.149.145                    | Rp 896.999.547              |
| 9         | 2024  | Rp 134.202.120                   | Rp 717.979.114                   | Rp 96.017.942                    | Rp 948.199.176              |

| <b>Tahun ke-</b> | <b>Tahun</b> | <b><i>Corrective</i><br/>Maintenance Cost<br/>(Rp)</b> | <b><i>Preventive</i><br/>Maintenance Cost<br/>(Rp)</b> | <b><i>Predictive</i><br/>Maintenance Cost<br/>(Rp)</b> | <b>Total Maintenance<br/>Cost (Rp)</b> |
|------------------|--------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 10               | 2025         | Rp 301.954.771                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.115.951.827                       |
| 11               | 2026         | Rp 335.505.301                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.149.502.357                       |
| 12               | 2027         | Rp 100.651.590                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 914.648.646                         |
| 13               | 2028         | Rp 335.505.301                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.149.502.357                       |
| 14               | 2029         | Rp 100.651.590                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 914.648.646                         |
| 15               | 2030         | Rp 234.853.710                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.048.850.767                       |
| 16               | 2031         | Rp 301.954.771                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.115.951.827                       |
| 17               | 2032         | Rp 369.055.831                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.183.052.887                       |
| 18               | 2033         | Rp 100.651.590                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 914.648.646                         |
| 19               | 2034         | Rp 234.853.710                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.048.850.767                       |
| 20               | 2035         | Rp 134.202.120                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 948.199.176                         |
| 21               | 2036         | Rp 67.101.060                                          | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 881.098.116                         |
| 22               | 2037         | Rp 67.101.060                                          | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 881.098.116                         |
| 23               | 2038         | Rp 301.954.771                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.115.951.827                       |
| 24               | 2039         | Rp 201.303.180                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.015.300.236                       |
| 25               | 2040         | Rp 268.404.241                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.082.401.297                       |
| 26               | 2041         | Rp 167.752.650                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 981.749.706                         |
| 27               | 2042         | Rp 301.954.771                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.115.951.827                       |
| 28               | 2043         | Rp 335.505.301                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.149.502.357                       |
| 29               | 2044         | Rp 100.651.590                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 914.648.646                         |
| 30               | 2045         | Rp 335.505.301                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.149.502.357                       |
| 31               | 2046         | Rp 268.404.241                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.082.401.297                       |
| 32               | 2047         | Rp 234.853.710                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.048.850.767                       |
| 33               | 2048         | Rp 268.404.241                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.082.401.297                       |
| 34               | 2049         | Rp 67.101.060                                          | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 881.098.116                         |
| 35               | 2050         | Rp 268.404.241                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.082.401.297                       |
| 36               | 2051         | Rp 100.651.590                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 914.648.646                         |
| 37               | 2052         | Rp 100.651.590                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 914.648.646                         |
| 38               | 2053         | Rp 268.404.241                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.082.401.297                       |
| 39               | 2054         | Rp 201.303.180                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 1.015.300.236                       |
| 40               | 2055         | Rp 167.752.650                                         | Rp 717.979.114                                         | Rp 96.017.942                                          | Rp 981.749.706                         |

| Tahun ke- | Tahun | <i>Corrective Maintenance Cost</i><br>(Rp) | <i>Preventive Maintenance Cost</i><br>(Rp) | <i>Predictive Maintenance Cost</i><br>(Rp) | <i>Total Maintenance Cost</i><br>(Rp) |
|-----------|-------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|
| Rata-rata |       | Rp 218.078.445                             | Rp 717.979.114                             | Rp 96.017.942                              | Rp 1.032.075.501                      |
| Jumlah    |       | Rp 8.723.137.817                           | Rp 28.719.164.548                          | Rp 340.717.694                             | Rp 41.283.020.059                     |

#### 4.4.5. Perhitungan *Oppurtunity Lost*

Pada bagian ini dilakukan perhitungan *Opportunity Loss*, biaya ini adalah biaya kehilangan kesempatan mendapatkan keuntungan karena berbagai macam hal, dalam kasus *Sistem Power Transmission and Auxiliary power supply* ini adalah karena berhentinya mensuplai listrik sehingga perusahaan tidak memperoleh pendapatan. Dengan demikian biaya *Opportunity Lost* menjadi komponen penting dalam evaluasi biaya siklus hidup. Perhitungan *Opportunity Lost* pada penelitian ini didasarkan pada total *downtime* per tahun (Frekuensi *Failure*/Tahun) dan durasi perbaikan (Durasi *Repair*/Tahun (Jam)), untuk total *downtime* per tahun pada tahun 2016 hingga 2023 diperoleh langsung berdasarkan data aktual sistem SAP IW39. Data ini mencerminkan kondisi riil pemeliharaan yang telah terjadi, baik dari sisi frekuensi kejadian yaitu tahun 2024 hingga 2055, dimana jumlah kejadian diperoleh dari hasil Simulasi Monte Carlo. Sementara itu durasi perbaikan untuk seluruh periode analisis, baik periode historis maupun periode prediksi, diperoleh dari hasil simulasi Monte Carlo. Total *downtime* didapatkan dari hasil perkalian antara frekuensi kerusakan dan durasi kerusakan.

Pada penelitian ini energi listrik yang hilang akibat *downtime* dihitung dengan mempertimbangkan kapasitas pembangkit sebesar 60 MW, dengan konversi 1MW = 1.000 kWh, sehingga kapasitas energi perjam adalah 60.000 kWh. Selanjutnya, nilai energi yang hilang dikonversi ke dalam nilai ekonomi menggunakan harga listrik sebesar \$0,08 per kWh, dengan kurs pada tahun 2024 sebesar Rp.15.866 per USD, sehingga diperoleh harga listrik sebesar Rp.1.269 per kWh. Berikut merupakan salah satu contoh perhitungan secara matematis pada tahun ke-2 yaitu =

$$\text{Opportunity Lost} = \sum \text{Downtime (Jam)} \times \text{Kapasitas} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{Jam}} \right) \times \text{Harga Listrik} \left( \frac{\text{Rp}}{\text{kWh}} \right)$$

$$\text{Opportunity Lost} = 60 \text{ Jam} \times 60.000 \text{ kWh} \times \text{Rp. 1.269}$$

$$\text{Opportunity Lost} = \text{Rp. 4.569.408.000}$$

**Keterangan =**

$$\Sigma Downtime (Jam) = 60 \text{ Jam}$$

$$\text{Kapasitas (60 MW) (1MW = 1000 Kwh)} = 60.000 \text{ kWh}$$

$$\begin{aligned} \text{Harga Listrik (\$0,08)} \\ \text{(Kurs Per 2024=Rp.15.866)} \end{aligned} = \text{Rp.1.269/kWh}$$

Berikut merupakan perhitungan yang sama diterapkan untuk setiap tahun selama periode analisis, hasil perhitungan *Opportunity Lost* tahunan selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel.

Tabel 4. 11 Tabel Perhitungan *Opportunity Lost*

| Tahun ke- | Tahun | Frekuensi<br><i>Failure/</i><br>Tahun | Durasi<br><i>Failure/</i><br>Tahun<br>(Jam) | Total<br><i>Downtime</i><br>(Jam) | Kapasitas (60 | Harga Listrik (\$0,08) |        | <i>Opportunity Lost</i> |
|-----------|-------|---------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|---------------|------------------------|--------|-------------------------|
|           |       |                                       |                                             |                                   | MW) (1MW =    | (Kurs Per              |        |                         |
|           |       |                                       |                                             |                                   | 1000 Kwh)     | 2024=Rp.15.866)        |        |                         |
|           |       |                                       |                                             |                                   | 60            | \$                     | 0,08   |                         |
|           |       |                                       |                                             |                                   | 1000          | Rp                     | 15.866 |                         |
| 1         | 2016  | 0                                     | 0                                           | 0                                 | 0             | 0                      |        | 0                       |
| 2         | 2017  | 3                                     | 20                                          | 60                                | 60000         | Rp                     | 1.269  | Rp 4.569.408.000        |
| 3         | 2018  | 5                                     | 16                                          | 80                                | 60000         | Rp                     | 1.269  | Rp 6.092.544.000        |
| 4         | 2019  | 14                                    | 14                                          | 196                               | 60000         | Rp                     | 1.269  | Rp 14.926.732.800       |
| 5         | 2020  | 9                                     | 2                                           | 18                                | 60000         | Rp                     | 1.269  | Rp 1.370.822.400        |
| 6         | 2021  | 11                                    | 9                                           | 99                                | 60000         | Rp                     | 1.269  | Rp 7.539.523.200        |
| 7         | 2022  | 10                                    | 20                                          | 200                               | 60000         | Rp                     | 1.269  | Rp 15.231.360.000       |
| 8         | 2023  | 7                                     | 7                                           | 49                                | 60000         | Rp                     | 1.269  | Rp 3.731.683.200        |
| 9         | 2024  | 4                                     | 9                                           | 36                                | 60000         | Rp                     | 1.269  | Rp 2.741.644.800        |
| 10        | 2025  | 9                                     | 2                                           | 18                                | 60000         | Rp                     | 1.269  | Rp 1.370.822.400        |
| 11        | 2026  | 10                                    | 20                                          | 200                               | 60000         | Rp                     | 1.269  | Rp 15.231.360.000       |
| 12        | 2027  | 3                                     | 20                                          | 60                                | 60000         | Rp                     | 1.269  | Rp 4.569.408.000        |
| 13        | 2028  | 10                                    | 5                                           | 50                                | 60000         | Rp                     | 1.269  | Rp 3.807.840.000        |
| 14        | 2029  | 3                                     | 15                                          | 45                                | 60000         | Rp                     | 1.269  | Rp 3.427.056.000        |
| 15        | 2030  | 7                                     | 20                                          | 140                               | 60000         | Rp                     | 1.269  | Rp 10.661.952.000       |

| Tahun<br>ke- | Tahun | Frekuensi<br><i>Failure/</i><br>Tahun | Durasi<br><i>Failure/</i><br>Tahun<br>(Jam) | Total<br><i>Downtime</i><br>(Jam) | Kapasitas (60<br>MW) (1MW =<br>1000 Kwh) | Harga Listrik (\$0,08)<br>(Kurs Per<br>2024=Rp.15.866) |        | <i>Opportunity Lost</i> |
|--------------|-------|---------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------|-------------------------|
|              |       |                                       |                                             |                                   | 60                                       | \$                                                     | 0,08   |                         |
|              |       |                                       |                                             |                                   | 1000                                     | Rp                                                     | 15.866 |                         |
| 16           | 2031  | 9                                     | 20                                          | 180                               | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 13.708.224.000       |
| 17           | 2032  | 11                                    | 5                                           | 55                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 4.188.624.000        |
| 18           | 2033  | 3                                     | 2                                           | 6                                 | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 456.940.800          |
| 19           | 2034  | 7                                     | 20                                          | 140                               | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 10.661.952.000       |
| 20           | 2035  | 4                                     | 14                                          | 56                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 4.264.780.800        |
| 21           | 2036  | 2                                     | 20                                          | 40                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 3.046.272.000        |
| 22           | 2037  | 2                                     | 20                                          | 40                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 3.046.272.000        |
| 23           | 2038  | 9                                     | 9                                           | 81                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 6.168.700.800        |
| 24           | 2039  | 6                                     | 20                                          | 120                               | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 9.138.816.000        |
| 25           | 2040  | 8                                     | 11                                          | 88                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 6.701.798.400        |
| 26           | 2041  | 5                                     | 17                                          | 85                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 6.473.328.000        |
| 27           | 2042  | 9                                     | 6                                           | 54                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 4.112.467.200        |
| 28           | 2043  | 10                                    | 5                                           | 50                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 3.807.840.000        |
| 29           | 2044  | 3                                     | 16                                          | 48                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 3.655.526.400        |
| 30           | 2045  | 10                                    | 3                                           | 30                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 2.284.704.000        |

| Tahun<br>ke- | Tahun | Frekuensi<br><i>Failure/</i><br>Tahun | Durasi<br><i>Failure/</i><br>Tahun<br>(Jam) | Total<br><i>Downtime</i><br>(Jam) | Kapasitas (60<br>MW) (1MW =<br>1000 Kwh) | Harga Listrik (\$0,08)<br>(Kurs Per<br>2024=Rp.15.866) |        | <i>Opportunity Lost</i> |
|--------------|-------|---------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------|-------------------------|
|              |       |                                       |                                             |                                   | 60                                       | \$                                                     | 0,08   |                         |
|              |       |                                       |                                             |                                   | 1000                                     | Rp                                                     | 15.866 |                         |
| 31           | 2046  | 8                                     | 14                                          | 112                               | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 8.529.561.600        |
| 32           | 2047  | 7                                     | 6                                           | 42                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 3.198.585.600        |
| 33           | 2048  | 8                                     | 17                                          | 136                               | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 10.357.324.800       |
| 34           | 2049  | 2                                     | 10                                          | 20                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 1.523.136.000        |
| 35           | 2050  | 8                                     | 17                                          | 136                               | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 10.357.324.800       |
| 36           | 2051  | 3                                     | 5                                           | 15                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 1.142.352.000        |
| 37           | 2052  | 3                                     | 8                                           | 24                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 1.827.763.200        |
| 38           | 2053  | 8                                     | 15                                          | 120                               | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 9.138.816.000        |
| 39           | 2054  | 6                                     | 14                                          | 84                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 6.397.171.200        |
| 40           | 2055  | 5                                     | 5                                           | 25                                | 60000                                    | Rp                                                     | 1.269  | Rp 1.903.920.000        |

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

Pada bagian ini dilakukan untuk menentukan umur ekonomis aset secara keseluruhan, yaitu periode waktu paling optimal untuk melakukan penggantian aset berdasarkan pertimbangan biaya. Penentuan umur ekonomis ini bertujuan untuk memperoleh titik keseimbangan antara biaya investasi dan biaya operasional serta perawatan yang dikeluarkan sepanjang umur pakai aset. Untuk mengetahui waktu penggantian aset yang paling optimal dari sisi ekonomi, penelitian ini menggunakan metode *Equivalent Annual Cost (EAC)*. Metode EAC dipilih untuk menentukan umur ekonomis aset dengan menghitung titik minimum dari total biaya tahunan yang setara. Dengan, hasil analisis ini dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam menentukan waktu penggantian aset yang optimal.

##### 4.5.1 Perhitungan Nilai MARR (*Minimum Attractive Rate of Return*)

Nilai MARR digunakan sebagai tingkat suku bunga acuan dalam analisis ekonomi. Dalam penelitian ini, nilai MARR yang digunakan adalah sebesar 12 % per tahun. Nilai tersebut ditetapkan berdasarkan ketentuan dan kebijakan perusahaan dalam menilai kelayakan investasi.

##### 4.5.2 Biaya Investasi Awal

Biaya investasi awal dalam penelitian ini merupakan biaya pengadaan awal aset pada Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply*. Dalam hal ini semua investasi untuk semua item yang ada dalam sistem peralatan ini. Dari awal 2016, harga perolehan awal dari sistem peralatan ini Rp. 420.628.122.630. untuk proses perhitungan nilai investasi pertahun dalam penelitian ini maka nilai investasi di tahun 2016 dikonversi ke nilai investasi tahun 2024 dengan rumus FV dengan hasil perhitungan nilai investasi di tahun 2024 adalah senilai Rp.1.041.459.742.558,20.

##### 4.5.3 Perhitungan Nilai Investasi Awal pada Tahun Dasar (*Future Value*)

Dalam menentukan nilai *Equivalent Annual Cost (EAC)* untuk investasi awal adalah mengoversi nilai investasi yang telah diketahui pada tahun awal investasi ke dalam nilai investasi pada tahun 2024. Proses konversi ini dilakukan menggunakan konsep *Future Value (FV)* dengan tingkat suku bunga sebesar 12% . Periode waktu konversi ditentukan berdasarkan selisih antara tahun perolehan aset dan tahun dasar analisis, yaitu selama 8 tahun. Berikut perhitungan yang digunakan untuk menghitung nilai investasi awal pada tahun 2024 adalah sebagai berikut:

$$FV = P \times \left( \frac{F}{P}, i, n \right)$$

$$FV = \text{Rp. } 420.628.122.630 \times (3,1058)$$

$$FV = \text{Rp. } 1.041.459.742.558,20.$$

**Keterangan =**

$P$  = biaya investasi awal pada tahun 2016

$FV$  = nilai investasi pada tahun dasar analisis (2024)

$i$  = tingkat suku bunga tahunan (12%)

$n$  = periode waktu (8 tahun)

#### 4.5.4 Perhitungan Biaya EAC Investasi

Pada bagian ini setelah dilakukan perhitungan nilai investasi awal yang di konversi ke tahun 2024, langkah selanjutnya adalah menghitung biaya tahunan setara atau *Equivalent Annual Cost* (EAC) pada tahun 2016 hingga 2055 . Berikut merupakan salah satu contoh pada tahun ke-2 yaitu =

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

$$P_2 = \frac{\text{Rp. } 1.041.459.742.558,20. \times 12\%}{1 - \frac{1}{(1+12\%)^2}}$$

$$P_2 = \text{Rp. } 616.229.764.653$$

#### 4.5.5 Perhitungan Biaya EAC Perawatan

Pada bagian ini dilakukan analisis yang mencakup seluruh biaya yang timbul akibat aktivitas pemeliharaan dan pengoperasian peralatan selama masa pakainya, Data biaya operasional dan perawatan untuk periode historis diperoleh langsung berdasarkan data aktual sistem SAP IW39, kemudian dijumlahkan untuk setiap tahun penggunaannya. Oleh karena itu, nilai biaya perawatan tiap tahun rill berdasarkan total pengeluaran yang dibutuhkan agar peralatan tetap beroperasi dengan optimal. Berikut merupakan salah satu contoh di EAC biaya perawatan pada periode tahun ke - 2 yaitu:

$$O \& Mt_2 = \frac{O \& Mt \times r}{1 - \frac{1}{(1+r)^t}}$$

$$O \& Mt_2 = \frac{\text{Rp. } 4.569.408.000 \times 12\%}{1 - \frac{1}{(1+12\%)^2}}$$

$$O \& Mt_2 = \text{Rp. } 2.703.710.092$$

#### 4.6 Hasil dan Analisis Perhitungan EAC dan *Maintenance Cost*

Setelah semua komponen biaya yang relevan dalam penelitian ini berhasil diidentifikasi dan dihitung, langkah selanjutnya adalah menentukan biaya total atau *life cycle cost* nya, perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui umur ekonomis peralatan berdasarkan kombinasi biaya investasi dan biaya perawatan selama masa operasinya. Biaya total pada penelitian ini dihitung menggunakan pendekatan *Equivalent Annual Cost* (EAC), sehingga seluruh biaya dapat dibandingkan dalam basis tahunan yang setara. Dengan pendekatan ini, keputusan umur penggantian tidak dipengaruhi oleh perbedaan nilai waktu uang antar periode. Berdasarkan tabel dibawah ini untuk Kolom tahun ke- merupakan umur aset mulai dair tahun ke-1 hingga estimasi umur pakainya, yaitu tahun ke-40, kolom tahun berisi tahun kalender umur asetnya, untuk kolom total biaya *operation and maintenance* per 2024 adalah nilai pada tahun 2024 untuk biaya total semua jenis perawatan yang ada pada Sistem *Power Transmission and Auxiliary Power Supply* per tahun, kolom akumulasi biaya perawatan adalah biaya total perawatan untuk semua jenis pekerjaan perawatan relatif terhadap tahunnya. Pada kolom EAC biaya perawatan berisi tentang nilai EAC untuk biaya total perawatan yang diperoleh dari nilai akumulasi biaya perawatan dibagi dengan *annuity factor* ditahun tersebut, kolom EAC biaya investasi diperoleh dari nilai biaya investasi dibagi dengan *annuity factor* di tahun tersebut, dan kolom total cost berisi tentang penjumlahan EAC biaya perawatan dan EAC biaya Investasi.

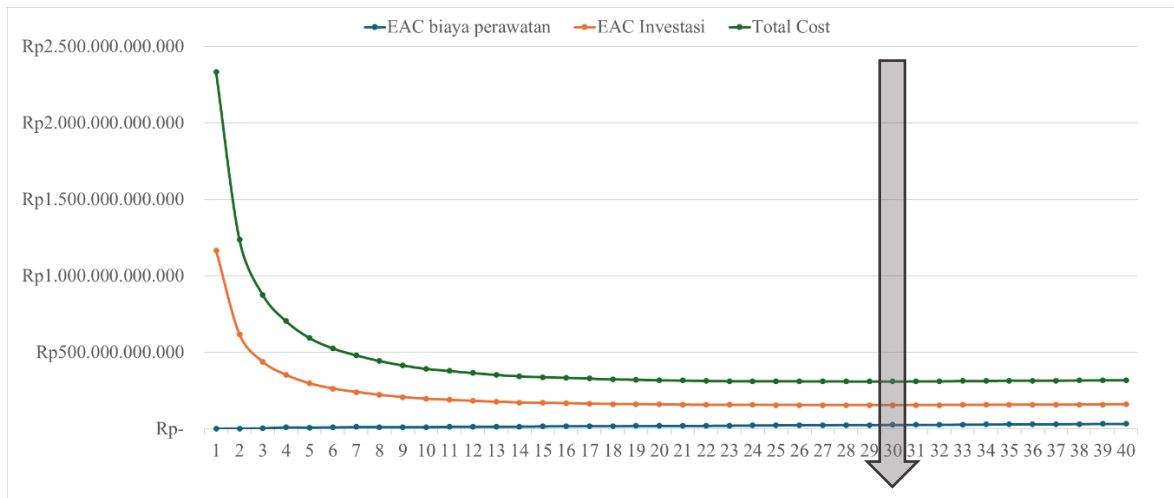
Tabel 4. 12 Total Cost pada Sistem *Power Transmission And Auxiliary Power Supply*

| Tahun ke- | Tahun | Total Biaya <i>Operation and Maintenance</i> per 2024 |               | Akumulasi Biaya <i>Operation and Maintenance</i> |                | EAC biaya perawatan |               | EAC Investasi        | Total Cost           |
|-----------|-------|-------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------|----------------|---------------------|---------------|----------------------|----------------------|
| 1         | 2016  | Rp                                                    | -             | Rp                                               | -              | Rp                  | -             | Rp 1.166.434.911.665 | Rp 1.166.434.911.665 |
| 2         | 2017  | Rp                                                    | 4.569.408.000 | Rp                                               | 4.569.408.000  | Rp                  | 2.703.710.092 | Rp 616.229.764.653   | Rp 618.933.474.745   |
| 3         | 2018  | Rp                                                    | 6.092.544.000 | Rp                                               | 10.661.952.000 | Rp                  | 4.439.092.846 | Rp 433.610.702.108   | Rp 438.049.794.954   |

| <b>Tahun ke-</b> | <b>Tahun</b> | <b>Total Biaya <i>Operation and Maintenance</i> per 2024</b> |                | <b>Akumulasi Biaya <i>Operation and Maintenance</i></b> |                 | <b>EAC biaya perawatan</b> |                | <b>EAC Investasi</b> |                 | <b>Total Cost</b> |                 |
|------------------|--------------|--------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------|----------------|----------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| 4                | 2019         | Rp                                                           | 17.839.967.114 | Rp                                                      | 28.501.919.114  | Rp                         | 9.383.813.273  | Rp                   | 342.884.411.276 | Rp                | 352.268.224.549 |
| 5                | 2020         | Rp                                                           | 2.417.141.601  | Rp                                                      | 30.919.060.715  | Rp                         | 8.577.248.345  | Rp                   | 288.911.068.010 | Rp                | 297.488.316.355 |
| 6                | 2021         | Rp                                                           | 10.395.514.050 | Rp                                                      | 41.314.574.766  | Rp                         | 10.048.767.129 | Rp                   | 253.309.794.094 | Rp                | 263.358.561.223 |
| 7                | 2022         | Rp                                                           | 15.976.723.280 | Rp                                                      | 57.291.298.045  | Rp                         | 12.553.539.515 | Rp                   | 228.202.300.822 | Rp                | 240.755.840.336 |
| 8                | 2023         | Rp                                                           | 4.628.682.747  | Rp                                                      | 61.919.980.792  | Rp                         | 12.464.668.071 | Rp                   | 209.648.805.356 | Rp                | 222.113.473.428 |
| 9                | 2024         | Rp                                                           | 3.689.843.976  | Rp                                                      | 65.609.824.769  | Rp                         | 12.313.579.005 | Rp                   | 195.460.007.179 | Rp                | 207.773.586.183 |
| 10               | 2025         | Rp                                                           | 2.486.774.227  | Rp                                                      | 68.096.598.995  | Rp                         | 12.052.019.655 | Rp                   | 184.321.882.043 | Rp                | 196.373.901.698 |
| 11               | 2026         | Rp                                                           | 16.380.862.357 | Rp                                                      | 84.477.461.352  | Rp                         | 14.227.305.808 | Rp                   | 175.397.863.603 | Rp                | 189.625.169.410 |
| 12               | 2027         | Rp                                                           | 5.484.056.646  | Rp                                                      | 89.961.517.998  | Rp                         | 14.523.100.272 | Rp                   | 168.129.936.076 | Rp                | 182.653.036.348 |
| 13               | 2028         | Rp                                                           | 4.957.342.357  | Rp                                                      | 94.918.860.355  | Rp                         | 14.776.701.943 | Rp                   | 162.131.531.543 | Rp                | 176.908.233.486 |
| 14               | 2029         | Rp                                                           | 4.341.704.646  | Rp                                                      | 99.260.565.001  | Rp                         | 14.975.565.131 | Rp                   | 157.126.329.131 | Rp                | 172.101.894.262 |
| 15               | 2030         | Rp                                                           | 11.710.802.767 | Rp                                                      | 110.971.367.768 | Rp                         | 16.293.286.695 | Rp                   | 152.911.534.823 | Rp                | 169.204.821.518 |
| 16               | 2031         | Rp                                                           | 14.824.175.827 | Rp                                                      | 125.795.543.594 | Rp                         | 18.037.825.264 | Rp                   | 149.334.931.266 | Rp                | 167.372.756.531 |
| 17               | 2032         | Rp                                                           | 5.371.676.887  | Rp                                                      | 131.167.220.481 | Rp                         | 18.423.318.545 | Rp                   | 146.280.027.270 | Rp                | 164.703.345.815 |
| 18               | 2033         | Rp                                                           | 1.371.589.446  | Rp                                                      | 132.538.809.927 | Rp                         | 18.282.047.103 | Rp                   | 143.656.156.863 | Rp                | 161.938.203.966 |
| 19               | 2034         | Rp                                                           | 11.710.802.767 | Rp                                                      | 144.249.612.694 | Rp                         | 19.583.760.878 | Rp                   | 141.391.704.156 | Rp                | 160.975.465.034 |
| 20               | 2035         | Rp                                                           | 5.212.979.976  | Rp                                                      | 149.462.592.670 | Rp                         | 20.009.869.568 | Rp                   | 139.429.359.794 | Rp                | 159.439.229.362 |

| <b>Tahun ke-</b> | <b>Tahun</b> | <b>Total Biaya <i>Operation and Maintenance</i> per 2024</b> |                      | <b>Akumulasi Biaya <i>Operation and Maintenance</i></b> |                        | <b>EAC biaya perawatan</b> |                       | <b>EAC Investasi</b> |                        | <b>Total Cost</b> |                        |
|------------------|--------------|--------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|-------------------|------------------------|
| 21               | 2036         | Rp                                                           | 3.927.370.116        | Rp                                                      | 153.389.962.786        | Rp                         | 20.284.302.717        | Rp                   | 137.722.731.670        | Rp                | 158.007.034.387        |
| 22               | 2037         | Rp                                                           | 3.927.370.116        | Rp                                                      | 157.317.332.902        | Rp                         | 20.578.760.366        | Rp                   | 136.233.878.861        | Rp                | 156.812.639.228        |
| 23               | 2038         | Rp                                                           | 7.284.652.627        | Rp                                                      | 164.601.985.529        | Rp                         | 21.325.827.477        | Rp                   | 134.931.487.753        | Rp                | 156.257.315.231        |
| 24               | 2039         | Rp                                                           | 10.154.116.236       | Rp                                                      | 174.756.101.766        | Rp                         | 22.449.770.299        | Rp                   | 133.789.502.967        | Rp                | 156.239.273.266        |
| 25               | 2040         | Rp                                                           | 7.784.199.697        | Rp                                                      | 182.540.301.462        | Rp                         | 23.273.882.925        | Rp                   | 132.786.085.734        | Rp                | 156.059.968.659        |
| 26               | 2041         | Rp                                                           | 7.455.077.706        | Rp                                                      | 189.995.379.168        | Rp                         | 24.063.267.803        | Rp                   | 131.902.811.534        | Rp                | 155.966.079.336        |
| 27               | 2042         | Rp                                                           | 5.228.419.027        | Rp                                                      | 195.223.798.195        | Rp                         | 24.579.475.374        | Rp                   | 131.124.044.979        | Rp                | 155.703.520.354        |
| 28               | 2043         | Rp                                                           | 4.957.342.357        | Rp                                                      | 200.181.140.552        | Rp                         | 25.071.460.560        | Rp                   | 130.436.447.654        | Rp                | 155.507.908.214        |
| 29               | 2044         | Rp                                                           | 4.570.175.046        | Rp                                                      | 204.751.315.598        | Rp                         | 25.524.341.337        | Rp                   | 129.828.586.839        | Rp                | 155.352.928.175        |
| <b>30</b>        | <b>2045</b>  | <b>Rp</b>                                                    | <b>3.434.206.357</b> | <b>Rp</b>                                               | <b>208.185.521.955</b> | <b>Rp</b>                  | <b>25.844.912.145</b> | <b>Rp</b>            | <b>129.290.621.634</b> | <b>Rp</b>         | <b>155.135.533.779</b> |
| 31               | 2046         | Rp                                                           | 9.611.962.897        | Rp                                                      | 217.797.484.851        | Rp                         | 26.938.512.117        | Rp                   | 128.814.049.039        | Rp                | 155.752.561.156        |
| 32               | 2047         | Rp                                                           | 4.247.436.367        | Rp                                                      | 222.044.921.218        | Rp                         | 27.373.770.348        | Rp                   | 128.391.496.922        | Rp                | 155.765.267.270        |
| 33               | 2048         | Rp                                                           | 11.439.726.097       | Rp                                                      | 233.484.647.314        | Rp                         | 28.700.005.137        | Rp                   | 128.016.554.000        | Rp                | 156.716.559.137        |
| 34               | 2049         | Rp                                                           | 2.404.234.116        | Rp                                                      | 235.888.881.431        | Rp                         | 28.920.127.440        | Rp                   | 127.683.629.242        | Rp                | 156.603.756.682        |
| 35               | 2050         | Rp                                                           | 11.439.726.097       | Rp                                                      | 247.328.607.527        | Rp                         | 30.252.399.136        | Rp                   | 127.387.834.878        | Rp                | 157.640.234.014        |
| 36               | 2051         | Rp                                                           | 2.057.000.646        | Rp                                                      | 249.385.608.173        | Rp                         | 30.441.039.946        | Rp                   | 127.124.888.473        | Rp                | 157.565.928.419        |
| 37               | 2052         | Rp                                                           | 2.742.411.846        | Rp                                                      | 252.128.020.020        | Rp                         | 30.719.175.183        | Rp                   | 126.891.030.498        | Rp                | 157.610.205.681        |

| <b>Tahun ke-</b> | <b>Tahun</b> | <b>Total Biaya <i>Operation and Maintenance</i> per 2024</b> |                | <b>Akumulasi Biaya <i>Operation and Maintenance</i></b> |                 | <b>EAC biaya perawatan</b> |                | <b>EAC Investasi</b> |                 | <b>Total Cost</b> |                 |
|------------------|--------------|--------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------|----------------|----------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| 38               | 2053         | Rp                                                           | 10.221.217.297 | Rp                                                      | 262.349.237.316 | Rp                         | 31.912.108.711 | Rp                   | 126.682.954.609 | Rp                | 158.595.063.320 |
| 39               | 2054         | Rp                                                           | 7.412.471.436  | Rp                                                      | 269.761.708.753 | Rp                         | 32.765.787.634 | Rp                   | 126.497.748.372 | Rp                | 159.263.536.006 |
| 40               | 2055         | Rp                                                           | 2.885.669.706  | Rp                                                      | 272.647.378.459 | Rp                         | 33.073.115.513 | Rp                   | 126.332.842.671 | Rp                | 159.405.958.184 |



Gambar 4. 1 Grafik Total Biaya EAC

Berdasarkan hasil diatas terlihat bahwa total terkecil terjadi pada tahun ke 30 atau tahun 2045 yang menunjukkan bahwa biaya total minimum terjadi pada tahun ke 30 atau tahun 2045, dengan nilai sebesar Rp.155.135.533.779 Hal ini menunjukan bahwa pada tahun ke-30 atau tahun 2045 total biaya tahunan berada pada titik minimum. Maka, umur ekonomis yang paling optimal pada sistem ini pada tahun ke-30 untuk mengoptimalkan strategi perawatan hingga bisa mengurangi biaya total perawatan, strategi ini diharapkan dapat juga menurunkan biaya perawatan dan memperpanjang usia ekonomis asetnya.

Penurunan nilai EAC pada tahun tahun awal terjadi karena biaya investasi awal yang relatif besar dapat didistribusikan ke periode penggunaan yang semakin panjang. Akibatnya, beban biaya tahunan menjadi semakin kecil sehingga total EAC cenderung menurun. Namun, seiring bertambahnya umur aset, frekuensi kegagalan dan kebutuhan pemeliharaan mulai meningkat akibat penurunan kondisi peralatan. Kondisi tersebut menyebabkan biaya pemeliharaan dan biaya akibat kegagalan terus bertambah dari waktu ke waktu. Setelah tahun ke 30, peningkatan biaya pemeliharaan dan biaya kegagalan menjadi lebih besar dibandingkan penghematan yang diperoleh dari penyebaran biaya investasi. Hal inilah yang menyebabkan nilai EAC kembali meningkat. Jika aset terus dipertahankan setelah periode tersebut, perusahaan berpotensi mengeluarkan biaya yang lebih besar untuk mempertahankan kinerja sistem dibandingkan manfaat ekonomi yang diperoleh.

Selain berdasarkan nilai EAC minimum, evaluasi umur ekonomis juga dilakukan dengan membandingkan akumulasi biaya perawatan tahun ke 30 terhadap nilai investasi awal aset. Berdasarkan hasil perhitungan, akumulasi biaya perawatan tahun ke 30 mencapai sebesar

Rp208.185.521.955. Jika dibandingkan dengan nilai investasi awal yang telah dikonversi ke tahun dasar 2024 sebesar Rp1.041.459.742.558, maka biaya pemeliharaan tersebut setara dengan sekitar 20% dari nilai investasi awal. Hasil ini menunjukkan bahwa selama periode operasional hingga tahun ke 30, biaya yang dikeluarkan untuk mempertahankan aset masih relatif rendah dibandingkan nilai investasi aset yang dimiliki. Oleh karena itu, aset masih layak dipertahankan melalui kegiatan pemeliharaan hingga mencapai umur ekonomisnya.

Namun demikian, hasil penelitian ini berdasarkan data historis yang digunakan dalam simulasi Monte Carlo, LCCA, dan EAC, sehingga berfungsi sebagai rekomendasi ekonomi dan bukan keputusan yang bersifat mutlak. Umur ekonomis yang diperoleh melalui metode EAC merupakan titik dimana total biaya tahunan ekuivalen berada pada nilai minimum. Oleh karena itu, tahun ke 30 tepat digunakan sebagai titik evaluasi untuk membandingkan alternatif mempertahankan aset melalui pemeliharaan atau melakukan investasi penggantian aset baru berdasarkan kondisi aktual dan kebijakan perusahaan, dan juga dapat digunakan sebagai referensi bagi perusahaan dalam melakukan evaluasi terhadap sistem, Jika perusahaan memutuskan untuk melakukan penggantian sistem pada tahun tersebut, maka keputusan tersebut sejalan dengan hasil analisis yang menunjukkan biaya minimum selama siklus hidup aset. Namun, apabila perusahaan menerapkan alternatif strategi seperti *overhaul*, *refurbishment*, atau peningkatan kegiatan pemeliharaan, maka umur ekonomis sistem berpotensi mengalami perubahan yang pada akhirnya akan memengaruhi nilai biaya siklus hidup yang dihasilkan.

## **BAB V**

### **PEMBAHASAN**

#### **5.1 Hasil Analisis Simulasi Monte Carlo**

Simulasi Monte Carlo menunjukkan bahwa pola kegagalan pada Sistem *Power Transmission and Auxiliary Power Supply* bersifat tidak pasti dan mengikuti distribusi tertentu yang telah ditentukan. Berdasarkan hasil pemodelan, distribusi yang paling merepresentasikan data kegagalan yaitu distribusi *Ekspensial* untuk waktu antar kerusakan (MTBF) dan distribusi *Lognormal* untuk waktu antar perbaikan (MTTR). Pemilihan distribusi ini didasarkan pada visualisasi data menggunakan histogram melalui aplikasi statistik untuk mengidentifikasi pola sebaran data sebagai dasar pemilihan distribusi yang sesuai.

Melalui proses simulasi, didapatkan gambaran perilaku sistem dalam berbagai kemungkinan kondisi operasional. Hal ini memberikan informasi penting terkait estimasi frekuensi kegagalan, serta pola waktu terjadinya kerusakan. Maka dari itu, metode simulasi tidak hanya menggambarkan kondisi historis, tetapi juga mampu memproyeksikan kondisi sistem secara realistis. Secara praktis, hasil simulasi menunjukkan bahwa frekuensi kerusakan yang dihasilkan bersifat fluktuatif pada setiap iterasi, namun masih berada dalam rentang yang konsisten dengan data historis. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan simulasi monte carlo mampu merepresentasikan ketidakpastian sistem secara realistis.

Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem memiliki karakteristik risiko yang sepenuhnya dapat dihilangkan, melainkan hanya dapat dikendalikan. Maka dari itu, hasil simulasi Monte Carlo memberikan dasar dalam merancang strategi pemeliharaan yang lebih adaptif dengan tujuan menekan tingkat kegagalan hingga berada pada batas yang dapat diterima oleh sistem.

#### **5.2 Hasil Analisis Life Cycle Cost Analysis (LCCA)**

Hasil perhitungan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA), diperoleh gambaran total biaya yang dikeluarkan selama umur operasional Sistem *Power Transmission and Auxiliary Power Supply*, yang mencakup biaya investasi awal, biaya operasional, biaya pemeliharaan, serta biaya yang timbul akibat kegagalan. Pendekatan ini memberikan perspektif yang lebih komprehensif karena tidak hanya mempertimbangkan biaya awal tetapi juga biaya jangka panjang yang harus dilakukan oleh perusahaan selama siklus hidup aset.

Dari hasil analisis, diketahui bahwa komponen biaya pemeliharaan dan biaya akibat kegagalan memiliki kontribusi dominan terhadap total biaya keseluruhan. Hal ini menunjukkan bahwa tingginya frekuensi gangguan yang tercatat dalam data historis berbanding lurus dengan peningkatan biaya operasional. Dengan kata lain, semakin sering sistem mengalami kegagalan, maka semakin besar pula beban biaya yang harus dikeluarkan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa strategi pemeliharaan yang ditetapkan saat masih belum optimal dan berpotensi untuk ditingkatkan, terutama dalam mengurangi kerusakan berulang.

Hasil ini menunjukkan bahwa sebagian besar potensi peningkatan biaya dapat dikendalikan melalui penerapan strategi pemeliharaan yang lebih sistematis dan berbasis data. Namun demikian, masih terdapat komponen biaya yang tidak dapat dieliminasi sepenuhnya karena dipengaruhi oleh faktor internal, seperti kondisi operasional sistem dan variasi beban kerja, serta faktor internal seperti ketidaksesuaian pelaksanaan pemeliharaan. Secara keseluruhan, upaya pengelolaan biaya melalui metode ini mampu memberikan kondisi sistem yang lebih terkendali dan menjadi dasar penting dalam penyusunan kebijakan pemeliharaan yang lebih efisien dan terukur.

### 5.3 Hasil Analisis *Equivalent Annual Cost* (EAC)

Metode *Equivalent Annual Cost* (EAC) digunakan untuk menentukan besarnya biaya tahunan ekuivalen yang harus ditanggung selama umur penggunaan Sistem *Power Transmission and Auxiliary Power Supply*. Metode ini mengkonversi seluruh biaya siklus hidup menjadi nilai biaya tahunan yang seragam sehingga memudahkan proses evaluasi ekonomi dan perbandingan antar alternatif umur penggunaan aset. Berdasarkan hasil analisis, nilai EAC mengalami perubahan seiring bertambahnya umur aset yang dipengaruhi oleh biaya investasi, biaya pemeliharaan, dan biaya kegagalan sistem. Pada periode awal penggunaan, nilai EAC cenderung menurun karena biaya investasi awal dapat didistribusikan ke periode penggunaan yang lebih panjang. Namun, seiring bertambahnya umur peralatan, peningkatan biaya pemeliharaan dan frekuensi kegagalan mulai memberikan kontribusi yang lebih besar terhadap total biaya tahunan ekuivalen.

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai EAC minimum diperoleh pada umur ekonomis 30 tahun atau setara dengan tahun penggantian 2045. Pada umur tersebut diperoleh nilai EAC investasi sebesar Rp129.290.621.634 dan EAC perawatan sebesar Rp25.844.912.145, sehingga

total EAC yang dihasilkan sebesar Rp155.135.533.779. Nilai tersebut menunjukkan bahwa komponen biaya investasi memberikan kontribusi sebesar 83,34% terhadap total biaya tahunan ekuivalen, sedangkan biaya perawatan memberikan kontribusi sebesar 16,66%. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada umur ekonomis tersebut biaya yang dikeluarkan masih didominasi oleh investasi aset, sementara biaya perawatan relatif lebih rendah. Oleh karena itu, penetapan umur ekonomis pada tahun ke 30 tidak hanya disebabkan oleh tingginya biaya pemeliharaan, melainkan karena kombinasi biaya investasi, biaya pemeliharaan, dan biaya kegagalan menghasilkan nilai EAC minimum dibandingkan alternatif umur penggunaan lainnya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa tahun ke 30 merupakan periode penggunaan yang paling optimal dari sudut pandang ekonomi karena menghasilkan biaya tahunan ekuivalen terendah selama siklus hidup aset. Setelah melewati periode tersebut, peningkatan biaya pemeliharaan dan biaya akibat kegagalan cenderung lebih besar dibandingkan manfaat ekonomi yang diperoleh dari mempertahankan aset. Dengan demikian, tahun ke 30 dapat dijadikan sebagai acuan dalam evaluasi strategi penggantian aset berdasarkan hasil analisis Life Cycle Cost Analysis (LCCA) dan EAC.

Jika dibandingkan dengan umur teknis peralatan kelistrikan yang menjadi bagian dari sistem, hasil umur ekonomis selama 30 tahun masih berada dalam rentang umur operasi yang wajar. Berdasarkan pedoman *Life Extension Guidelines for HVDC Systems* yang diterbitkan oleh CIGRE Working Group B4.27, *station service transformer* umumnya memiliki umur layanan antara 25 hingga 40 tahun, *battery charger* sekitar 20 tahun, dan *battery bank* sekitar 15 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa umur ekonomis yang diperoleh masih berada dalam rentang umur teknis komponen utama sistem. Namun demikian, umur ekonomis tidak menunjukkan batas akhir kemampuan peralatan untuk beroperasi, melainkan menunjukkan periode penggunaan yang paling optimal dari sisi ekonomi berdasarkan kombinasi biaya investasi, biaya pemeliharaan, dan biaya kegagalan selama siklus hidup aset.

## **BAB VI**

### **PENUTUP**

#### **6.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan dalam menentukan umur ekonomis serta waktu penggantian aset yang optimal menggunakan metode *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dan *Equivalent Annual Cost* (EAC), hasil analisis menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu memberikan dasar keputusan yang terukur dalam pengelolaan aset. Melalui perhitungan biaya siklus hidup, diketahui bahwa total biaya yang dikeluarkan selama umur operasional sistem dipengaruhi secara signifikan oleh biaya pemeliharaan dan kegagalan, sehingga diperlukan penentuan waktu optimal untuk meminimalkan beban biaya tersebut.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai biaya total minimum terjadi pada tahun ke-30 atau tahun 2045 dengan nilai sebesar Rp.155.135.533.779. Hal ini mengindikasikan bahwa pada titik tersebut biaya tahunan berada pada kondisi paling efisien, sehingga dapat ditetapkan sebagai umur ekonomis optimal dari sistem. Dengan demikian, strategi penggantian atau perawatan aset yang dilakukan pada periode tersebut diharapkan mampu menekan biaya total, meningkatkan efisiensi pemeliharaan, serta memperpanjang kinerja dan keberlanjutan operasional aset.

#### **6.2 Saran**

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, berikut merupakan saran yang diberikan yaitu:

1. Bagi Perusahaan

Perusahaan dapat memanfaatkan hasil analisis *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dan *Equivalent Annual Cost* (EAC) sebagai acuan dalam menentukan kebijakan pengelolaan aset, khususnya dalam menetapkan waktu yang paling tepat untuk melakukan penggantian maupun perbaikan pada Sistem *Power Transmission and Auxiliary Power Supply*. Selain itu, strategi pemeliharaan yang diterapkan sebaiknya mulai diarahkan pada pendekatan yang lebih preventif dan berbasis kondisi, sehingga potensi kerusakan dapat ditekan lebih awal dan biaya pemeliharaan jangka panjang menjadi lebih efisien.

2. Bagi Peneliti

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan, terutama pada kelengkapan data historis serta asumsi yang digunakan dalam perhitungan. Maka dari itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan data dengan periode yang lebih panjang dan lebih detail, serta mempertimbangkan variabel tambahan yang dapat memengaruhi keandalan dan biaya, seperti kondisi operasional, lingkungan kerja, maupun faktor manusia, sehingga hasil analisis yang diperoleh dapat menjadi lebih akurat dan representatif.

### 3. Bagi Akademis

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan rujukan dalam pengembangan kajian di bidang manajemen aset dan analisis biaya siklus hidup, khususnya pada sektor pembangkit listrik. Ke depan, pendekatan yang digunakan dapat dikombinasikan dengan metode lain, seperti teknik optimasi atau pemodelan berbasis kecerdasan buatan, guna menghasilkan analisis yang lebih mendalam dan mampu menjawab kompleksitas permasalahan secara lebih komprehensif.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afdal, Z. A. (2023). Preventive Maintenance Analysis Using Monte Carlo Simulation and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 22(2), 251-262.
- Akbar, M. R. (2022). Analisis Perawatan Mesin Bubut dengan Metode Preventive Maintenance Guna Menghindari Kerusakan Secara Mendadak dan Untuk Menghitung Biaya Perawatan. *Jurnal SENOPATI: Sustainability, Ergonomics, Optimization, and Application of Industrial Engineering* 4.1, 32-45.
- Albany, Z. a. (2025). Analysis of the Effectiveness of Component Maintenance on PT. XYZ Water Pump Machines through the Life Cycle Cost (LCC) Approach. *Advance Sustainable Science Engineering and Technology* 7.2.
- Almobarok, M. M.-S. (2021). Fleet replacement analysis by equivalent uniform annual cost method. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 1400-1407.
- Arohman, A. W. (2024). Analisis Preventive Maintenance pada Mesin Injection Molding dengan Metode Mean Time Between Failure dan Mean Time to Repair di PT. XZY. *Jurnal Serambi Engineering* 9.1, 7623-7630.
- Ayuningtyas, M. H. (2019). Pengembangan Strategi Pada Aktivitas Rantai Nilai Panas Bumi (Studi Pada PT Geo Dipa Energi (Persero)). *JURNAL BISNIS STRATEGI* 28.1, 56-78.
- Cai, J. (2022). Research on the Application of EAA and EAC." 2022 International Conference on mathematical statistics and economic analysis (MSEA 2022). *Atlantis Press*, .
- Damiri, D. J. (2021). echnical Performance and Economic Feasibility Simulation of 200kWp Rooftop Solar Photovoltaic On grid on Industrial Estate Factory Building with Helioscope Software. *Jurnal Rekayasa ElektriKa* 17.2, 86-93.
- Habibi, M. H. (2025). Analisis Perhitungan Mean Time Between Failure (MTBF) Dan Mean Time To Repair (MTTR) Mesin Cold Storage. *J-CEKI: Jurnal Cendekia Ilmiah* 4.4, 1410-1421.
- Huang, Z. C. (2021). An improved stochastic life-cycle cost analysis model for examining the impact of environmental policy instruments on construction equipment replacement. *Environmental Impact Assessment Review*, 90.
- Jati, D. (2022). Life Cycle Cost Analysis Pada Aset Milik Negara: Studi Pada Terminal Bus Tipe A Dhaksinarga. *Jurnal Manajemen Aset dan Penilaian* 2.2 .
- Kamble, S. N. (2022). Machine health monitoring with life cycle cost analysis by condition monitoring. *Materials Today: Proceedings* 52, 893-897.
- Khan, U. Z. (2023). Life cycle cost analysis (LCCA) of Stirling-cycle-based heat pumps vs. conventional boilers. *Cleaner environmental systems*, 8.
- Li, B. W. (2022). A strategy for determining the decommissioning life of energy equipment based on economic factors and operational stability. *Sustainability*, 14.
- Manurung, M. M. (2025). Sistem Pengendalian Persediaan Bahan Bakar Solar Dengan Simulasi Monte Carlo Di PT. Willy Dwi Perkasa. *Jurnal Teknologi dan Teknik Industri (JTTI)* 3.2 .
- Muhaemin, G. a. (2022). Penerapan Total Productive Maintenance (TPM) Pada Perawatan Mesin Cutter di PT. XYZ. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan* 8.9, 205-219.

- Ngantung, T. A. (2025). Integrasi Life Cycle Cost Analysis Terhadap Regulasi Pemeliharaan Bangunan Perkantoran. *Prosiding Seminar Nasional Produk Terapan Unggulan Vokasi* , 99-104.
- Nurman, H. R. (2024). "Kelayakan Ekonomi Investasi Pengadaan Alat Gali Muat PC-800 dan Alat Angkut Terex-50D pada Pengupasan Overburden.". *Jurnal Sains dan Teknologi: Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknologi Industri* 24.1, 95-104.
- 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.
- Puspasari, D. A. (2025). Analisis Pemakaian Daya Listrik Genset Berbasis Ekonomi Teknik PT. Teladan Kutai Timur. *MUTIARA: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia* 3.1 , 182-200.
- Putri, S. N. (2025). Model Antrian dan Simulasi untuk Meningkatkan Pengalaman Pengguna dalam Layanan Online. *SISTEMATIK* 2.1 .
- Rahmawati, N. A. (2025). Efficient Strategy for Distribution Transformer Replacement: A Study on Replacement Methods in Power Systems. *Jurnal ELTIKOM: Jurnal Teknik Elektro, Teknologi Informasi dan Komputer* 9.2, 140-156.
- Saepullah, A. (2024). Implementasi Sistem Barcode Terintegrasi dengan SAP ERP pada Sistem Persediaan PT AL. *Jurnal Ekselenta-Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik* 1.1 , 59-64.
- Sahid, D. I. (2025). Implementasi Metode LCCA dalam Strategi Perbaikan Blade Cooling Tower di PLTP. *JIMU: Jurnal Ilmiah Multidisipliner* 3.02, 1109-1119.
- Sahid, D. I. (2025). Implementasi Metode LCCA dalam Strategi Perbaikan Blade Cooling Tower di PLTP. *JIMU: Jurnal Ilmiah Multidisipliner* 3.02 , 1109-1119.
- Samodro, G. a. (2025). Analisis Risiko pada Unit Critical Asset Menggunakan House of Risk pada Perusahaan X. *Metode: Jurnal Teknik Industri* 11.1 , 148-160.
- Sauni, H. Z. (2022). Energi Geothermal Dalam Aturan, Masalah Lingkungan Hidup Dan Solusi Penyelesaian Konflik Di Masyarakat. *Jurnal Rechts Vinding: Media Pembinaan Hukum Nasional* 11.3.
- Siregar, M. S. (2022). Analisis Pemeliharaan Berkala Pada Motor Diesel Generator Set Daya 90 Kva Sebagai Energi Listrik Cadangan Di Upt Rumah Sakit Khusus Paru. *SINERGI POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 3(1), 55-67.
- Sumiyati, A. R. (2024). Konsep dasar transmisi tenaga listrik: Klasifikasi, komponen serta gangguannya. . *Jurnal Surya Teknika*, 612-617.
- Suryadi, N. a. (2023). Economic Analysis of Remaining Geothermal Reserves to Increase Geothermal Power Plant Capacity in Achieving National Energy Mix Target. *Int. J. Eng. Bus. Soc. Sci* 1 , 654-665.
- Waskita. (2024). Optimizing Asset Management: Comprehensive Analysis and Innovative Strategy Design to Increase the Effectiveness of Life Cycle Delivery at PT Pembangkitan Jawa-Bali Services. *International Journal of Current Science Research and Review*, 6681-6692.
- Yusuf, M. a. (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.

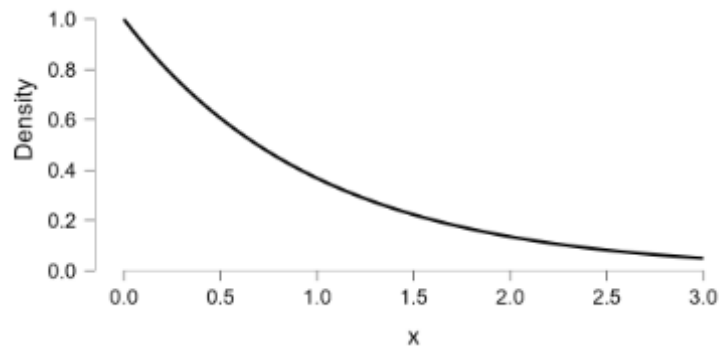
## LAMPIRAN

### A. Grafik JASP MTBF Pada Distribusi *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     | 58 | 1042 | $1.822 \times 10^{16}$ | 1350           | 1       | 224          | 624    | 1167         | 6910    |

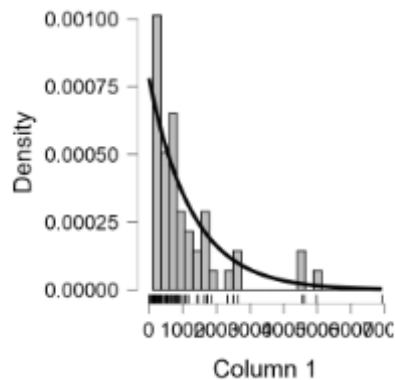
##### Maximum likelihood

##### Estimated Parameters

| Parameter | Estimate               |
|-----------|------------------------|
| $\lambda$ | $7.816 \times 10^{-4}$ |

##### Fit Assessment

##### Histogram vs. Theoretical PDF

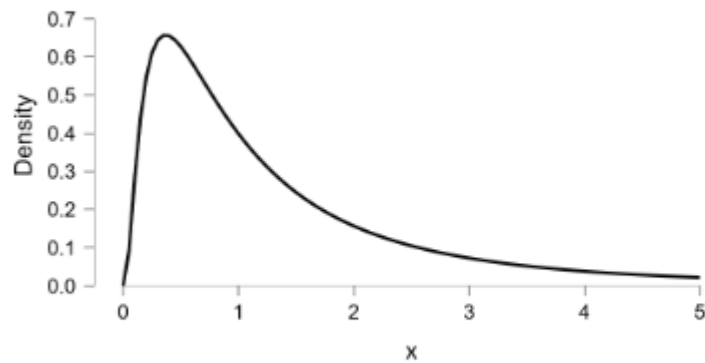


## B. Grafik JASP MTTR Pada Distribusi *Log Normal*

### 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 | 51 | 1055 | $6.656 \times 10^{16}$ | 2580           | 1       | 2            | 9      | 718          | 11192   |

#### Maximum likelihood

##### Estimated Parameters

| Parameter | Estimate |
|-----------|----------|
| $\mu$     | 3.428    |
| $\sigma$  | 3.108    |

#### Fit Assessment

##### Histogram vs. Theoretical PDF

