



TESIS-TM185400

**BIAYA SIKLUS HIDUP DAN
ANALISA PENGGANTIAN GENERATOR
PEMBANGKIT (STUDI KASUS PLTU LABUAN)**

**RIDHO FAQIH LUTHFI, ST.
NRP. 2111750078008**

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Sutikno, ST., MT

Program Magister
Bidang Keahlian Manajemen Energi
Kerjasama PT. Indonesia Power
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2020



TESIS-TM185400

**BIAYA SIKLUS HIDUP DAN
ANALISA PENGGANTIAN GENERATOR
PEMBANGKIT (STUDI KASUS PLTU LABUAN)**

**RIDHO FAQIH LUTHFI, ST.
NRP. 2111750078008**

**Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Sutikno, ST.,MT.**

**Program Magister
Bidang Keahlian Managemen Energi
Kerjasama PT. Indonesia Power
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2020**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)

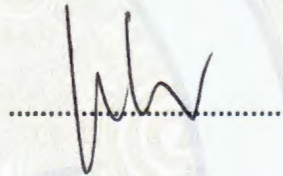
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
RIDHO FAQIH LUTHFI
02111750078008

Tanggal Ujian: 17 Januari 2020
Periode Wisuda: Maret 2020

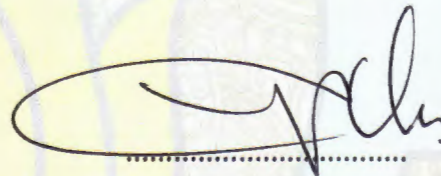
Disetujui oleh:
Pembimbing:

1. Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T.
NIP 197407032000031001

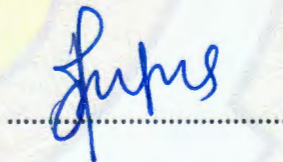


Penguji:

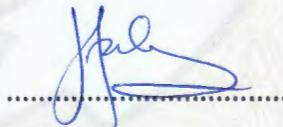
1. Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng
NIP 196505051990031005




2. Suwarno, S.T., MSc., Ph.D
NIP 198005202005011003



3. Fahmi Mubarak, S.T., MSc., Ph.D.
NIP 197801152003121002



Kepala Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem


Dr. Ir. Atok Setiawan, M.Eng., Sc.
NIP 196604021989031002

Halaman ini sengaja dikosongkan

Biaya Siklus hidup dan Analisa Penggantian Generator Pembangkit (Studi Kasus Pada PLTU labuan)

Mahasiswa Nama : Ridho Faqih Luthfi, ST
Mahasiswa ID : 02111750078008
Pembimbing : Dr. Eng. Sutikno, ST.MT

ABSTRAK

Generator adalah salah satu peralatan utama pada pembangkit dan merupakan peralatan dengan tingkat kekritisan yang tinggi. Dengan tingkat gangguan yang tinggi, kajian peralatan perlu dilakukan ditinjau dari faktor ekonomisnya, apakah akan tetap mempertahankan, ataukah melakukan penggantian peralatan. Metode yang banyak digunakan untuk menganalisa kelayakan peralatan dan pengantiannya dengan mempertimbangkan biaya yang timbul selama masa pakainya adalah analisa biaya siklus hidup (*life cycle costing analysis*) dan analisa penggantian (*replacement analysis*).

Metode penelitian yang dilaksanakan yaitu melakukan kajian literatur, mengumpulkan data-data yang diperlukan, menentukan komponen biaya dalam life cycle cost, menentukan model *life cycle cost* yang sesuai, melakukan perhitungan *life cycle cost* dan *replacement analysis*, menganalisa hasil perhitungan dan mengambil kesimpulan dari hasil penelitian. Dalam penelitian ini, juga dilakukan perhitungan terhadap keandalan peralatan existing sebagai data pendukung dalam pengambilan keputusan.

Nilai life cycle cost untuk masing-masing alternatif adalah sebagai berikut. Nilai LCC untuk alternative 1 sebesar Rp.604.323.538.638; alternative 2 sebesar Rp. 564.543.953.550,-; alternative 3 sebesar Rp. 322.802.322.719,-; dan alternatif 4 sebesar Rp.341.045.197.768,-. Dengan menggunakan *replacement analysis*, disarankan untuk melakukan penggantian dengan peralatan non – OEM dalam jangka waktu 4 tahun, dikarenakan mulai terjadi peningkatan biaya tahunan.

Kata kunci : Generator, Biaya siklus hidup, Analisa penggantian

Halaman ini sengaja dikosongkan

Life Cycle Cost And Replacement Analysis of Generator Power Plant (Case Study at PLTU Labuan)

Mahasiswa Nama : Ridho Faqih Luthfi, ST
Mahasiswa ID : 02111750078008
Pembimbing : Dr. Eng. Sutikno, ST.MT.

ABSTRACT

The generator is one of the main equipment in the power plant. It has high level of criticality. With a high level of interference, it is important to conduct a studies about the equipment in terms of economic factors. The decicion need to be taken is usually between keep the equipment or to replace equipment. The methods that are widely used to analyze the appropriateness of equipment and its replacement by considering costs occured during its useful life are life cycle costing analysis and replacement analysis.

The research methods carried out are conducting a literature review, collecting necessary data, determining the cost components in the life cycle cost, determining the appropriate life cycle cost model, performing life cycle cost and replacement analysis, analyzing the results of the calculations and take conclusions from the results of the study . In this study, also performed calculations on the reliability of existing equipment as supporting data in decision making.

Life cycle cost values for each alternative are as follows. LCC value for alternative 1 is Rp.604,323,538,638; alternative 2 is Rp. 564,543,953,550; alternative 3 is Rp. 322.802.322.719, -; and alternative 4 in the amount of Rp.341,045,197,768. By using replacement analysis, it is recommended to replace the equipment with non-OEM within 4 years, due to the beginning of an increase in annual costs.

Keywords : *Generator, Life cycle cost, Replacement analysis*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan karunia, rahmat, serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul “Biaya Siklus Hidup dan Analisa Penggantian Generator Pembangkit (Studi Kasus di PLTU Labuan)”. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan, do’a, dan dukungan dari beberapa pihak, maka penyusunan tesis ini tidak dapat berjalan sesuai harapan. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua: Ibu Sumiati dan Bapak Ilzam Luthfi, keluarga: Istri Susi Mei Wijayanti, Anak Aleesya Durrotul Imtiyaz, Mutiah Khaylila Luthfiah, dan Meifa Azkadina yang senantiasa memberikan do’a, dorongan dan dukungan tanpa henti kepada penulis.
2. Dosen pembimbing Bapak Dr. Eng. Sutikno, ST.MT yang telah memberikan saran, bimbingan, pencerahan, dan motivasi dalam proses penyelesaian tesis ini.
3. Bapak dan Ibu dosen Departemen Teknik Mesin ITS yang telah mendidik penulis selama masa perkuliahan.
4. Seluruh rekan-rekan program S2 Manajemen Energi KKIP yang secara langsung maupun tidak langsung bersinergi ikut membantu dalam proses penulisan tesis ini.
5. Bapak Zuhdi Rahmanto selaku GM PLTU Labuan dan jajaran manajemen atas dukungan dan kesempatan yang diberikan.
6. Rekan-rekan pegawai PLTU Labuan, Bapak Syarif, Bapak Oji, Mas Shandy, Mas Arif, Mas Bayu atas diskusi dan data-datanya. Dan juga rekan-rekan PBJ. Terima kasih atas semua dukungan dan pengertiannya.
7. Seluruh rekan-rekan Divisi Pengembangan Talenta Kantor Pusat PT Indonesia Power dan Staf Sekretariat Departemen Teknik Mesin atas segala bantuan dan dukungan selama menjalani program S2 Manajemen Energi.
8. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per-satu atas segala bantuan serta dukungan untuk penyusunan tesis ini.

Selain itu penulis berharap semoga tesis ini dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah	7
1.3 Batasan Masalah.....	7
1.4 Tujuan Penelitian	8
1.5 Manfaat Hasil Penelitian	8
BAB II KAJIAN PUSTAKA	9
2.1 Generator.....	9
2.2.1 Peralatan Utama dan Pendukung Generator	12
2.2.2 Pemeliharaan Generator	12
2.2.3 Gangguan Generator	13
2.3 . Keandalan Peralatan.....	14
2.3.1 Distribusi Kegagalan.....	15
2.3.1.1 Laju Kegagalan	16
2.3.1.2 Distribusi Weibull	16
2.3.1.3 Perhitungan Parameter Weibull	17
2.3.2 Analisa Kekritisn Peralatan	18
2.4 Biaya Siklus Hidup (<i>Life Cycle Cost</i>).....	19

2.4.1 Kelebihan dan Kekurangan Biaya Siklus Hidup	21
2.4.2 Model perhitungan analisa biaya siklus hidup	22
2.4.2.1 Model Perhitungan Biaya Siklus Hidup Menurut J.P. Barret.....	22
2.4.2.2 Model perhitungan analisa Biaya Siklus Hidup Menurut Jianping	23
2.4.2.3 Model Perhitungan Analisa Biaya Siklus Hidup Menurut Barringer....	23
2.4.2.4 Model Analisa Biaya Siklus Hidup Menurut Norsok Standard	24
2.4.2.5 Model Perhitungan LCC menurut Dhillon	25
2.5 <i>Net Present Value</i>	27
2.6 Analisa Penggantian	28
2.6.1 Konsep <i>Defender</i> dan <i>Challenger</i>	29
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1 Studi Literatur.....	33
3.2 Pengumpulan Data.....	35
3.3 Analisa Biaya.....	37
3.4 Analisa Keandalan.....	37
3.5 Analisa Perhitungan dan Kesimpulan.....	38
3.6 Flowchart Penelitian	39
3.7 Pemilihan Model LCC.....	40
3.8 Teknik Analisa Penggantian	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Data Perhitungan	43
4.1.1 Data Gangguan Generator	44
4.1.2 Data Biaya dan Lingkup Pemeliharaan Generator	44
4.1.3 Data Biaya Operasi Generator	48
4.1.4 Data Biaya Pembelian dan Disposal.....	48
4.2 Analisa Biaya.....	49
4.2.1 Perhitungan Life Cycle Cost.....	50
4.2.1.1 Perhitungan LCC Alternatif 1.....	50

4.2.1.2 Perhitungan LCC Alternatif 2	56
4.2.1.3 Perhitungan LCC Alternatif 3	63
4.2.1.4 Perhitungan LCC Alternatif 4	68
4.3.2 Perhitungan Analisa Penggantian	75
4.3 Analisa Keandalan dan Penentuan Tingkat Kekritisn Peralatan	83
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	87
5.1 Kesimpulan	87
5.2 Saran.....	88
DAFTAR PUSTAKA	89
LAMPIRAN	93

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Grafik Penurunan Kinerja Peralatan	2
Gambar 1.2 Gangguan Generator dan Kerugiannya	2
Gambar 1.3 Grafik Sisa Umur Peralatan.....	3
Gambar 1.4 Pengaruh keandalan peralatan terhadap biaya siklus hidup Peralatan.....	4
Gambar 2.1 Desain Generator PLTU Labuan.....	11
Gambar 2.2 Tipikal biaya siklus hidup pada peralatan pompa	20
Gambar 2.3 Konsep biaya siklus hidup menurut PJ. Barret (2001).....	21
Gambar 2.4 Kelebihan analisa biaya siklus hidup	22
Gambar 2.5 Model LCC menurut Barringer	24
Gambar 2.6 Rincian Biaya Operasi untuk Perhitungan Biaya Siklus Hidup	25
Gambar 2.7 Equipment Life.....	29
Gambar 2.8 Usia ekonomis peralatan berdasarkan metode minimalisasi biaya .	29
Gambar 2.9 EUAC Defender dan Challenger.....	30
Gambar 3.1 Seal Ring Single Flow	34
Gambar 3.2 Seal Ring Double Flow	34
Gambar 3.3 Pohon Biaya Akuisisi dari LCC	35
Gambar 3.4 Pohon Biaya penopang dari LCC.....	36
Gambar 3.5 Flowchart metodologi penelitian.....	39
Gambar 3.6 Teknik Analisa Penggantian.....	41
Gambar 4.1 Cost Breakdown Structure for Generator.....	43
Gambar 4.2 Biaya Tahunan dari tiap komponen biaya alternatif 1	55
Gambar 4.3 Pareto Cost Alternatif 1	55

Gambar 4.4 Biaya Tahunan dari tiap komponen biaya alternatif 2.....	62
Gambar 4.5 Pareto Cost Alternatif 2	62
Gambar 4.6 Biaya Tahunan dari tiap komponen biaya alternatif 3.....	68
Gambar 4.7 Pareto Cost Alternatif 3	68
Gambar 4.8 Biaya Tahunan dari tiap komponen biaya alternatif 4.....	74
Gambar 4.9 Pareto Cost Alternatif 4	74
Gambar 4.10 Total Life Cycle Cost Tiap Alternatif.....	75
Gambar 4.11 Grafik Capital Recovery, EAOC dan EUAC Defender.....	77
Gambar 4.12 Grafik Capital Recovery, EAOC dan EUAC Challenger 1	79
Gambar 4.13 Grafik Capital Recovery, EAOC dan EUAC Challenger 2.....	80
Gambar 4.14 Grafik Capital Recovery, EAOC dan EUAC Alternatif 2.....	82
Gambar 4.15 Grafik EUAC Defender vs Challenger	83

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 : Spesifikasi Generator di PLTU Labuan	10
Tabel 2.2 Komponen Utama dan Alat Bantu Generator	12
Tabel 2.3 Tipe Kerusakan Yang Terjadi Pada Komponen Generator	14
Tabel 2.4 Penerapan Net Present Value Untuk Perhitungan LCC	27
Tabel 3.1 Pemilihan Model LCC	40
Tabel 4.1 Data Gangguan Generator.....	44
Tabel 4.2 Daftar Kegiatan Preventive Maintenance Generator	45
Tabel 4.3 Data Biaya Preventive Maintenance	45
Tabel 4.4 Data Biaya Kegiatan Periodic Maintenance Generator	46
Tabel 4.5 Data Breakdown Maintenance Generator dan Biaya Perbaikannya	46
Tabel 4.6 Kebutuhan Material Untuk Kegiatan Pemeliharaan per Tahun	48
Tabel 4.7 Daya Biaya Operasi generator	48
Tabel 4.8 Data Biaya Pembelian Generator dan Modifikasi Seal Ring	49
Tabel 4.9 Biaya Pemeliharaan Generator alternatif 1	50
Tabel 4.10 Biaya Operasi Generator Alternatif 1	51
Tabel 4.11 Jumlah Force Outage Hour Gnerator Alternatif 1	51
Tabel 4.12 Hasil Perhitungan Komponen Biaya Alternatif 1	53
Tabel 4.13 Hasil Perhitungan Present Value Komponen Biaya Alternatif 1	54
Tabel 4.14 Data Biaya Modifikasi Seal Ring Generator.....	56
Tabel 4.15 Biaya Pemeliharaan Generator Alternatif 2	57
Tabel 4.16 Biaya Operasi Generator Alternatif 2	58
Tabel 4.17 Jumlah Force Outage Hour Alternatif 2.....	58
Tabel 4.18 Hasil Perhitungan Komponen Biaya Alternatif 2	60

Tabel 4.19 Hasil Perhitungan Present Value Komponen Biaya Alternatif 2	61
Tabel 4.20 Biaya Pemeliharaan Generator Alternatif 3	63
Tabel 4.21 Biaya Operasi Generator Alternatif 3.....	64
Tabel 4.22 Data Gangguan Peralatan Generator OEM	64
Tabel 4.23 Hasil Perhitungan Komponen Biaya Alternatif 3.....	66
Tabel 4.24 Hasil Perhitungan Present Value Komponen Biaya Alternatif 3	66
Tabel 4.25 Biaya Pemeliharaan Generator Alternatif 4	69
Tabel 4.26 Biaya Operasi Generator Alternatif 4.....	70
Tabel 4.26 Data Gangguan Generator Peralatan Non-OEM	70
Tabel 4.28 Hasil Perhitungan Komponen Biaya Alternatif 4.....	72
Tabel 4.29 Hasil Perhitungan Present Value Komponen Biaya Alternatif 4.....	73
Tabel 4.30 Capital Recovery, EAOC, dan EUAC Defender.....	76
Tabel 4.31 Capital Recovery, EAOC, dan EUAC Challenger 1	78
Tabel 4.32 Capital Recovery, EAOC, dan EUAC Challenger 2	79
Tabel 4.33 Capital Recovery, EAOC, dan EUAC Alternatif 2	81
Tabel 4.34 Daftar Peralatan Kritis Pembangkit.....	84
Tabel 4.35 Perhitungan Jumlah Kumulatif Gangguan Generator	85
Tabel 4.36 Hasil Perhitungan Nilai X dan Y	85
Tabel 4.37 Nilai Laju Kegagalan dan MTTF Peralatan Generator	86

BAB I

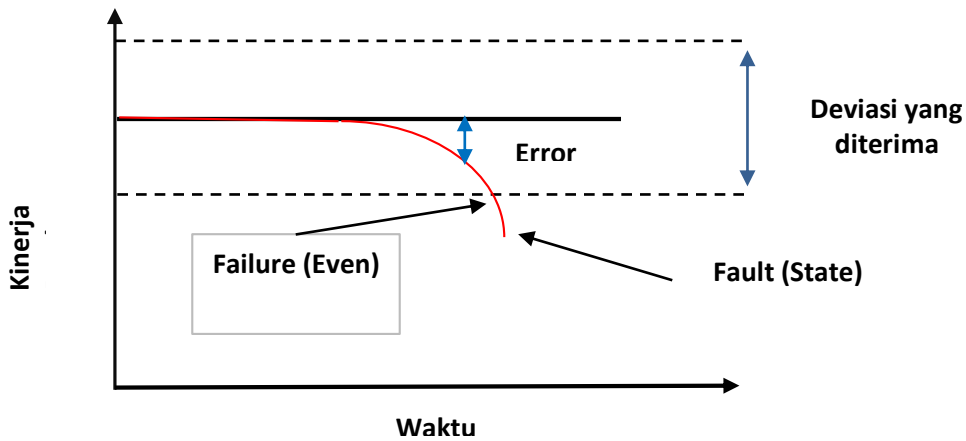
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Listrik saat ini merupakan suatu kebutuhan pokok manusia, baik untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga, maupun untuk memenuhi kebutuhan industri. Ketersediaan energi listrik disuplai oleh pembangkit–pembangkit listrik dimana hasil produksi listrik tersebut dapat dipengaruhi oleh jenis dan kapasitas pembangkit listrik.

PLTU Labuan sebagai salah satu unit pembangkit berbahan bakar batubara yang dikelola oleh PT. Indonesia Power dengan kapasitas 2 x 300 MW merupakan salah satu aset penting dalam menyuplai kebutuhan listrik di Pulau Jawa dan Bali, untuk itu harus dijaga ketersediaan dan keandalannya sehingga terhindar dari gangguan yang dapat mengganggu ketersediaan listrik. Kinerja dari suatu mesin atau peralatan akan bergantung kepada *reliability* dan *availability* peralatan yang akan digunakan, lingkungan operasi, efisiensi pemeliharaan, proses operasi, keahlian operator, dan lain-lain[1].

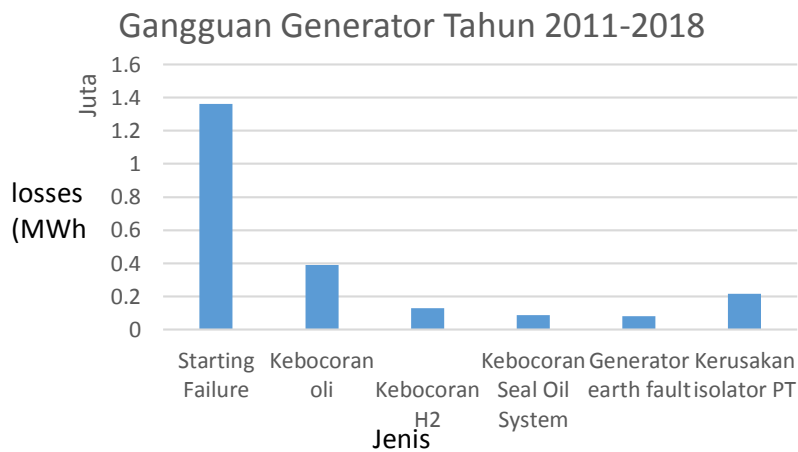
Pembangkit listrik terdiri atas beberapa komponen yang terdiri pula atas beberapa sub komponen. Setiap komponen dalam pembangkit memiliki peran dalam menentukan performa *reliability* dan *availability system* [2]. Seiring bertambahnya umur pemakaian peralatan pembangkit, pasti terjadi penurunan kinerja dari peralatan tersebut. Hal ini akan mengakibatkan gangguan yang menyebabkan terhentinya atau menurunnya proses produksi listrik. Selain itu, biaya pemeliharaan dan operasional peralatan juga akan mengalami peningkatan. Gambar 1.1 berikut menjelaskan bagaimana performa suatu peralatan mengalami penurunan dan dapat mengalami kegagalan pada periode waktu tertentu.



Gambar 1.1 Grafik Penurunan Kinerja Peralatan (Sumber: Barabady, 2005, "Improvement of System Availability Using Reliability and Maintainability Analysis")

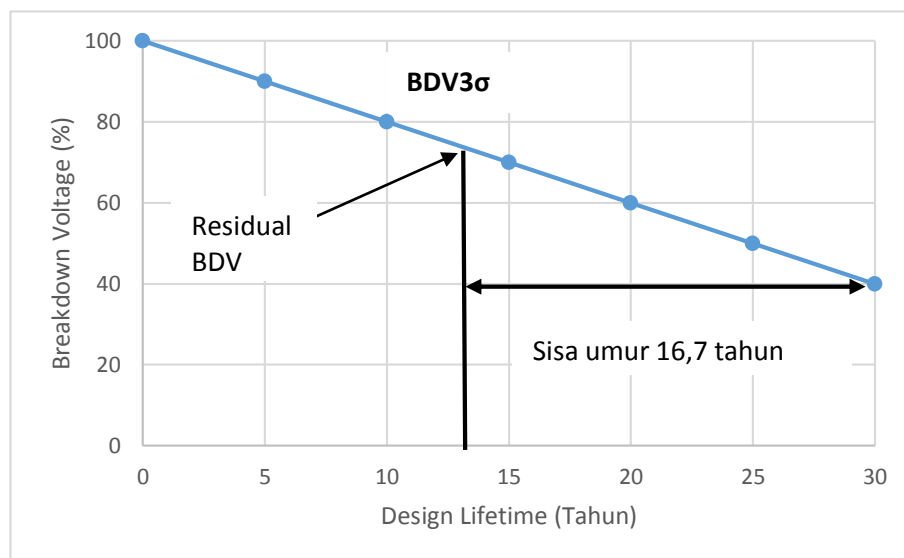
Salah satu peralatan utama pada pembangkit adalah generator yang berfungsi merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Karena fungsinya yang vital inilah, maka generator harus dijaga keandalannya supaya tidak terjadi gangguan dan tetap bisa dioperasikan sepanjang waktu.

Selama beroperasinya PLTU labuan, peralatan generator telah mengalami beberapa kali gangguan yang menyebabkan kehilangan kesempatan produksi yang cukup besar, sebagaimana ditampilkan pada gambar 1.2 berikut.



Gambar 1.2 Gangguan generator dan kerugiannya (Sumber: Data Perhitungan Pareto Loss Bidang Engineering PLTU Labuan)

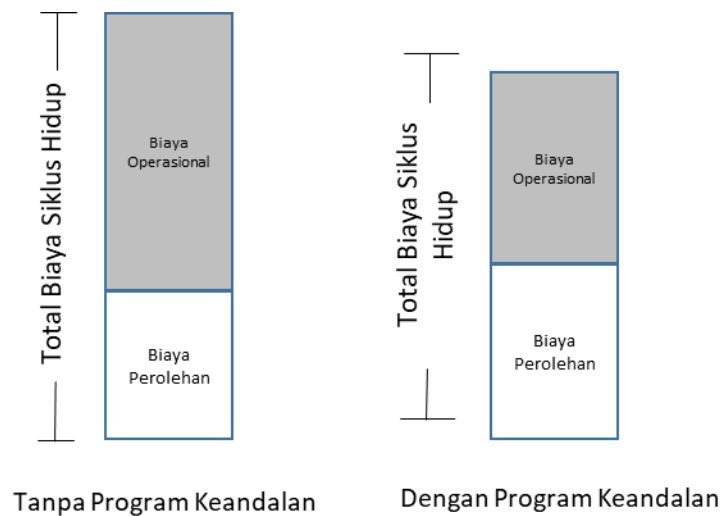
Beberapa peneliti telah melakukan penelitian terkait gangguan-gangguan yang terjadi pada generator antara lain: “Analisis Kenaikan Suhu Belitan pada Generator 60 MW di PLTA Mrica yang dilakukan oleh Basuki dkk, yang menemukan bahwa gangguan suhu pada generator disebabkan oleh belitan yang kurang bersih dan kurang optimalnya kinerja alat pemindah panas [3]. Analisa gangguan generator pada PLTA Mendalan dilakukan oleh Wicaksono dan Agung [4] dan menemukan penyebab gangguan tersebut adalah terjadinya kehilangan medan penguat dan gangguan kelebihan arus yang disebabkan oleh kerusakan AVR. Hal ini mengakibatkan penurunan kinerja generator. Flownex dalam jurnalnya “Generator Seal Oil System” mengembangkan model simulasi untuk menentukan penyebab kegagalan pada seal ring [5]. Berdasarkan data tingkat peralatan kritis pembangkit PLTU Labuan yang tertuang dalam MPI (*Maintenance Priority Index*), saat ini generator menempati peringkat teratas peralatan kritis pembangkit. Pada tahun 2017 dilakukan Remaining Life Assesment untuk generator untuk mengetahui kondisi fisik peralatan dan sisa umur peralatan, dengan hasil sebagai berikut [6]:



Gambar 1.3 Grafik sisa umur Generator (Sumber: *Final Report RLA Generator Unit 2 PLTU Labuan Tahun 2017*)

Generator tersebut Sudah beroperasi sejak tahun 2010. Dengan perkiraan sisa umur peralatan sebanyak 16,7 tahun, maka generator diperkirakan dapat bertahan sampai tahun 2033. Dengan demikian telah terjadi penurunan umur peralatan sebanyak kurang lebih 6 (enam) tahun jika dibandingkan dengan usia desain peralatan yang diharapkan yaitu selama 30 tahun. Hal ini tentu akan menurunkan tingkat keandalan dan efisiensi dari pembangkit tersebut. Beberapa pilihan yang kerap muncul terkait kondisi peralatan adalah apakah akan tetap mempertahankan peralatan tersebut ataukah akan lebih baik jika dilakukan penggantian peralatan. Seringkali dalam melakukan penggantian peralatan yang menjadi fokus utama adalah biaya pembelian saja. Sedangkan selain itu, juga akan muncul biaya lain yaitu biaya yang muncul saat peralatan tersebut mulai dioperasikan, antara lain biaya operasi dan pemeliharaan [7].

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengevaluasi keseluruhan biaya dari kepemilikan suatu peralatan adalah biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost*). *Life Cycle Cost* adalah suatu konsep pemodelan perhitungan biaya dari tahap permulaan (pembelian) sampai pembongkaran suatu aset sebagai alat untuk mengambil keputusan atas sebuah studi analisis dan perhitungan dari total biaya yang ada selama siklus hidupnya. Tujuan dari analisa life cycle cost sendiri adalah untuk menentukan alternatif yang paling efektif dari sisi biaya dari beberapa pilihan alternative yang tersedia [8]. Salah satu faktor yang mempengaruhi total life cycle cost adalah program peningkatan reliability dari suatu peralatan. Reliability dan Availability adalah suatu pengukuran yang valid terhadap kualitas produk, kinerja peralatan dan efektifitas biaya [1]. Gambar 1.4, mengilustrasikan bagaimana suatu program reliability mempengaruhi biaya akuisisi dan biaya operasi dari suatu peralatan, dimana biaya perolehan akan mengalami kenaikan seiring dengan usaha untuk meningkatkan keandalan peralatan. Namun, hal ini juga akan menurunkan biaya operasional peralatan dan selanjutnya akan dapat menurunkan keseluruhan biaya selama siklus hidup peralatan.



Gambar 1.4 Pengaruh program keandalan peralatan terhadap biaya siklus hidup peralatan (Sumber: Barabady, 2005, "*Improvement of System Availability Using Reliability and Maintainability Analysis*")

Life cycle cost telah banyak digunakan di berbagai bidang, mulai bidang konstruksi, manufaktur, maupun teknik. Sebagian besar tujuan penelitian tersebut berupaya untuk mendapatkan pilihan-pilihan yang paling menguntungkan selama usia pakai dari suatu peralatan atau system. Pada bidang konstruksi life cycle cost telah digunakan dalam penelitian yang dilakukan antara lain oleh Janitra [9] dan Alzahri [10]. Janitra dkk, menggunakan metode life cycle cost untuk menentukan penggunaan sistem pendingin pada gedung yang lebih hemat biaya. Sedangkan Alzahri meneliti factor dan variable biaya pada life cycle cost pembangunan dermaga dan besaran nilainya. Pada bidang teknik beberapa penelitian terkait terkait *life cycle cost* telah dilakukan antara lain oleh Mardiansyah [11] yang menggunakan metode tersebut pada peralatan pulverizer pembangkit untuk memilih alternatif yang paling efisien diantara tiga alternatif yaitu pertama melakukan pembelian OEM, kedua melakukan *reverse engineering*, atau yang ketiga, melakukan rekondisi peralatan. Berikutnya Sinisuka [12] menggunakan *life cycle cost analysis* untuk membandingkan beberapa alternatif pengoperasian peralatan pembangkit dan berhasil mendapatkan hasil yang paling efisien. Brom [13] dalam penelitiannya "*Life Cycle Cost for Energy Equipment*" menyebutkan bahwa bahwa metode *life cycle cost* bisa menunjukkan alternative /

strategi mana yang paling murah. Dan dalam penelitian yang dilakukan oleh Fajardhani [14] dimana metode *Cost of Electricity* (COE) dan *Life Cycle Cost* (LCC) digunakan untuk menganalisa penggantian PLTD, dimana dari LCC bisa menghasilkan perhitungan yang lebih akurat. Wibowo [15] dalam penelitiannya menggunakan *life cycle cost* dan *replacement analysis* untuk mengusulkan kebijakan pemeliharaan pada mesin jet dying pada pabrik tekstil.

Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa *life cycle cost* dapat digunakan untuk mengetahui factor dan variable biaya dari suatu proyek atau peralatan, dapat menentukan alternative yang paling menguntungkan dari beberapa pilihan alternative, serta dapat mengusulkan dilakukannya penggantian peralatan maupun usulan kebijakan pemeliharaan dari suatu peralatan.

Untuk menentukan kapan suatu asset atau peralatan harus diganti atau masih perlu dipertahankan tidak cukup hanya dilihat secara fisiknya, tetapi juga perlu dilihat unsur-unsur ekonomisnya, yaitu dengan membandingkan antara biaya yang akan dikeluarkan oleh asset tersebut dengan manfaat yang akan diperolehnya. Untuk itu amat penting mempertimbangkan nilai-nilai ekonomis asset yang dimiliki dengan nilai-nilai ekonomis asset pengganti. Permasalahan ini dapat dipecahkan dengan melakukan analisa penggantian [16]. Kesalahan dalam menentukan penggantian peralatan dapat menyebabkan penurunan performa maupun terhentinya kerja dari peralatan. Permasalahan kapan waktu penggantian peralatan dengan yang lebih andal dan efisien dapat diselesaikan dengan menggunakan konsep “*defender*” dan “*challenger*” [17]. Seiring dengan meningkatnya tekanan kompetisi global, yang membutuhkan peningkatan kualitas produk dan jasa, waktu respon yang lebih cepat, dan factor lainnya, penggantian peralatan membutuhkan suatu kajian tekno ekonomi yang baik untuk meningkatkan efisiensi operasi dan tingkat kompetisi dari suatu perusahaan. [18].

Beberapa penelitian terkait “*Replcamenet Analysis*” antara lain dilakukan oleh Wijayanti [19] untuk menentukan kelayakan penggantian *nozzle sootblower* dan menemukan bahwa pendekatan analisa penggantian dapat digunakan untuk

membandingkan kondisi peralatan saat ini dengan apabila dilakukan pembelian peralatan yang baru. Begitu pula Abidin [20] telah melakukan analisa penggantian komponen pada pompa dan mendapatkan asset yang lebih menguntungkan untuk dipilih karena biaya fabrikasi yang lebih murah. Penelitian ini menggunakan metode EUAC untuk menghitung biaya operasi tahunan dari pompa. Oktaviyani [21] dalam penelitiannya “analisa kelayakan investasi penggantian mesin produksi PT. Wahanamas Panca Jaya Kudus (Suatu analisa kualitatif dan kuantitatif)” , menggunakan metode NPV (*Net Present Value*), BEP (*Break Even Point*) dan *Payback Periode* untuk mengevaluasi kelayakan investasi mesin produksi tersebut.

Berdasarkan kajian literatur dari penelitian-penelitian sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa generator merupakan salah satu komponen yang sangat penting pada pembangkit listrik. Dengan potensi gangguan yang ada, maka perlu dilakukan analisis terkait peralatan generator dengan mempertimbangkan unsur nilai ekonomis peralatan yaitu menggunakan metode *life cycle cost* dan *replacement analysis*

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan permasalahan dalam penelitian ini adalah bahwa peralatan generator mengalami penurunan tingkat keandalan dan kenaikan biaya akibat kerugian yang disebabkan gangguan pada generator dan bagaimana mengevaluasi alternatif peningkatan keandalan generator yang lebih menguntungkan dilihat dari unsur ekonomisnya.

1.3 Batasan Masalah

Untuk menghindari pembahasan yang terlalu luas, ruang lingkup atau batasan masalah dari penelitian ini ditetapkan sebagai berikut:

1. Obyek penelitian ini adalah salah satu peralatan utama pembangkit yaitu Generator dan peralatan pendukungnya yaitu sistem seal oil dan sistem pendingin (air dan hydrogen).

2. Alternatif yang dipilih terdiri dari 4 (empat) alternative yaitu: alternatif 1 “Mempertahankan peralatan lama dengan pola pemeliharaan yang sudah ada” (Do nothing) sebagai baseline kondisi saat ini, alternatif 2, “melakukan pemeliharaan sesuai kondisi saat ini dengan improvement pada desain seal ring generator, alternatif 3 “Melakukan penggantian dengan peralatan OEM”, dan alternatif 4 “Melakukan penggantian dengan peralatan non OEM”.
3. Perhitungan analisa penggantian menggunakan konsep “Defender” dan Challenger (Challenger 1 OEM, Challenger 2 non-OEM) dengan metode biaya tahunan rata-rata.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian pada tesis ini adalah:

1. Untuk membandingkan alternatif peningkatan keandalan menggunakan metode life cycle cost dan replacement analysis.
2. Untuk mengetahui tingkat biaya (life cycle cost) yang paling menguntungkan
3. Untuk mengetahui waktu penggantian peralatan menggunakan teknik analisa penggantian

1.5 Manfaat Hasil Penelitian

Manfaat yang diharapkan akan diperoleh dari penelitian ini adalah perusahaan akan memiliki suatu metode yang tervalidasi untuk melakukan kajian kelayakan secara ekonomis terkait alternatif-alternatif tindakan terhadap kondisi peralatan kritis pembangkit. Mengetahui waktu yang optimal untuk melakukan penggantian peralatan dan opsi peralatan penggantinya sehingga memudahkan pengambilan keputusan dalam rangka meningkatkan keandalan pembangkit dan menurunkan biaya pokok produksi listrik. Selain itu, dengan adanya penelitian ini akan menambah referensi akademis terkait implementasi biaya siklus hidup dan analisa penggantian pada peralatan pembangkit.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Generator

Generator merupakan peralatan utama dalam pembangkit listrik yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin menjadi energi listrik. Generator bekerja berdasarkan hukum Faraday, yaitu pada sebuah batang konduktor akan timbul Gaya Gerak Listrik (GGL) apabila dikenai medan magnet yang berubah-ubah terhadap waktu [3]. Besarnya GGL induksi yang dihasilkan adalah:

$$e = B \times L \times v \quad (2.1)$$

dengan:

e : GGL Induksi (volt)

B : Medan Magnet (tesla)

v : Kecepatan (rpm)

Generator terdiri dari dua bagian utama, yaitu: (1) Rotor, yakni bagian yang bergerak yang menghasilkan medan magnet dan menginduksi ke stator dan (2) Stator, yakni bagian diam yang mengeluarkan tegangan bolak balik [3]. Rotor berhubungan dengan poros generator yang berputar di pusat stator, dimana rotor tersebut digerakkan oleh turbin. Selain itu, generator juga dilengkapi dengan perlengkapan tambahan yaitu eksitasi yang berfungsi membangkitkan medan magnet di rotor serta *seal oil system* sebagai perapat, dan *hydrogen cooler* dan *stator cooling water system* yang berfungsi sebagai pendingin. Di PLTU labuan generator menggunakan dua media pendingin yaitu hidrogen untuk pendingin rotor, dan air untuk pendingin stator.

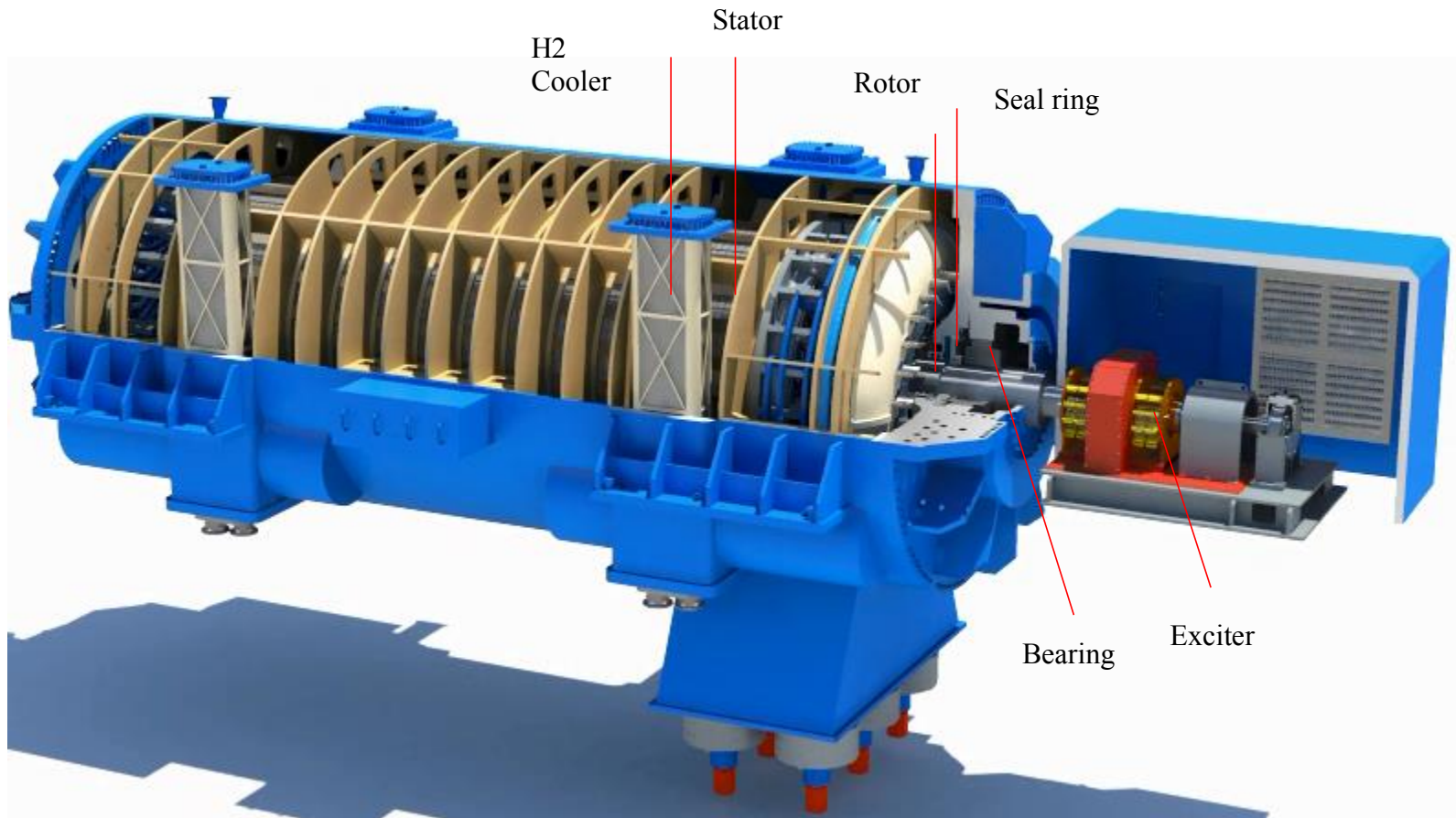
Spesifikasi Generator yang digunakan di PLTU labuan ditunjukkan pada table 2.1 berikut :

Tabel 2.1 Spesifikasi generator di PLTU Labuan

Uraian	Keterangan
Manufaktur	: Dongfang Electrical Machinery
Tipe	: QFSN-300-2-20B
Nomer seri	: HD185-2-12
Tahun pembuatan	: 2008
Tahun pengoperasian	: 2010
Standar	: IEC 60034-3
Metode pendinginan	: Pendingin dengan media air dan Hidrogen
Tekanan air pendingin	: 0,2 Mpa
Tekanan Hidrogen	: 0,3 Mpa
Rate frekuensi	: 50 Hz
Rate power	: 353 MVA
Rate tegangan	: 20 KV
Rate arus	: 10189 A
Fase	: 3
Faktor power	: 0,85
Kecepatan	: 3000 rpm
Kelas insulasi	: kelas F
Tegangan eksiter	: 472 V
Arus eksiter	: 2075 A

(Sumber : Buku Manual Generator Dongfang Electrical Machinery (2004), "Description of Generator") [22]

Gambar skema peralatan generator ditampilkan pada gambar 2.1 di bawah ini



Gambar 2.1 Desain Generator PLTU Labuan (Sumber: Buku Manual Generator *Dongfang Electrical Machinery (2004), "Description of Generator"*)

2.2.1. Peralatan Utama dan Pendukung Generator

Generator terdiri dari peralatan utama dan peralatan pendukung sebagaimana ditampilkan pada tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2 Komponen Utama dan Alat Bantu Generator

No	Komponen	Fungsi	Keterangan
1	Rotor	Sebagai pembangkit medan magnet yang diputar agar memberikan induksi keada stator	Utama
2	Stator	Sebagai kumparan jangkar yang mendapat induksi magnetic dari rotor agar bisa membangkitkan energy listrik	Utama
3	Seal oil	Sebagai media perapat hydrogen, sehingga tidak keluar dari generator	Alat bantu
4	Bearing	Sebagai bantalan shaft generator agar tidak terjadi gesekan yang berlebihan	Alat bantu
5	Oil lubricating system	Sebagai system penyuplai pelumasan pada bearing, untuk mengurangi gesekan akibat putaran rotor	Alat bantu
6	Stator cooling system	Sebagai pendingin stator generator	Alat bantu
7	Hydrogen cooler	Sebagai pendingin rotor genarator	Alat bantu

(Sumber: “Dokumen *Life Cycle Management* Generator Unit 2 PLTU Labuan)[23]

2.2.2. Pemeliharaan Generator

Jadwal inspeksi rutin dan berkala, pengujian dan *preventive maintenance* harus dilakukan sehingga permasalahan minor (kecil) bisa dihilangkan sebelum menjadi permasalahan besar. Biaya inspeksi dan pemeliharaan yang masih berada dalam kondisi baik akan meningkatkan reliability dan menurunkan total biaya dibandingkan dengan mengoperasikan mesin secara terus menerus sampai terjadi kegagalan (*run to failure*). Pemeliharaan generator di PLTU labuan dilaksanakan berdasarkan Surat Ketetapan Direksi no.47.K/010/IP/2018 yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Pemeliharaan Rutin

Pemeliharaan rutin adalah kegiatan pemeliharaan yang dilakukan secara berulang dengan periode waktu harian, mingguan, dan bulanan dengan kondisi sedang beroperasi yang meliputi:

- Pemeriksaan temperature belitan stator, bearing, air pendingin
- Pemeriksaan kebocoran pendingin hydrogen
- Pemeriksaan vibrasi
- Pemeriksaan tekanan hydrogen, seal oil pump
- Pemeriksaan fuse rotating rectifier atau pemeriksaan sikat arang

2. Pemeliharaan Berkala

Kegiatan pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan dari lama operasi generator atau dalam waktu periode tertentu dengan ruang lingkup pemeliharaan mengikuti pola SI, ME, SI, SE, dengan interval tiap 2000 jam sebagai berikut:

- *First year inspection* : 8000 – 10000 jam
- Tahun ke-1 sd 2 (Simple Inspection) : 8000 – 10000 jam
- Tahun ke-3 sd 4 (Mean Inspecton) : 10000 – 12000 jam
- Tahun ke-5 sd 6 (Simple Inspection) : 12000 – 14000 jam
- Tahun ke-8 dst (Serious Inspection) : 14000 – 16000 jam

Pemeliharaan berkala yang dilakukan meliputi pembongkaran (disassembly), pemeriksaan (inspection) dan pengujian (testing). Kegiatan yang dilakukan tergantung dari ruang lingkup masing-masing jenis pemeriksaan yang dilakukan [24].

2.2.3 Gangguan Generator

Tipe kerusakan yang terjadi pada komponen peralatan generator dan modus kerusakan lainnya yang mungkin terjadi ditunjukkan pada tabel 2.3 dibawah ini.

Tabel 2.3 Tipe Kerusakan Yang Terjadi Pada Komponen Generator

Komponen	Kasus Kegagalan	Penjelasan
Rotor	Vibration fatigue Crack Short	Terjadi pada poros generator karena vibrasi apabila tahanan isolasi rendah
Stator	Short	Terjadi apabila tahanan isolasi rendah
Seal oil	Erosi Leakage	Terjadi apabila perbedaan tekanan antara hydrogen dan seal oil pada sisi generator keluar dari batasan
Cooling water line	Leakage	Terjadi pada sambungan Teflon dari header ke stator coil
Lubricating system	Degradation Oil contamination	Kontaminasi berupa air dan kotoran yang menyebabkan menurunnya kualitas pelumas

(Sumber: “Dokumen *Life Cycle Management* Generator Unit 2 PLTU Labuan)

2.3 Keandalan Peralatan

Keandalan adalah suatu kemungkinan dari suatu part, komponen, produk atau sistem untuk berfungsi sesuai dengan desainnya tanpa kegagalan selama waktu dan kondisi tertentu [25]. Keandalan generator sangat penting diperhitungkan dalam sistem pembangkit listrik. Gangguan-gangguan dan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan menyebabkan generator tidak berfungsi sebagaimana yang diinginkan dan menyebabkan terhentinya proses produksi listrik. Hal-hal yang menjadi indikasi keandalan adalah [26]:

- Performansi standar yaitu kemampuan peralatan untuk memenuhi fungsinya
- Waktu, dimana suatu peralatan akan berfungsi maksimum selama periode waktu tertentu

- Kondisi kerja atau lingkungan seperti temperatur, getaran, bahan kimia dan lain sebagainya.

Fungsi keandalan dari suatu peralatan atau sistem biasanya dinyatakan dalam bentuk $R(t)$, sedangkan fungsi distribusi kerusakan kumulatif dinyatakan dalam bentuk $F(t)$. Kedua fungsi tersebut dihubungkan dalam sebuah formula sebagai berikut [27]:

$$R(t) = 1 - F(t) = \Pr(T \geq t) \text{ untuk } t > 0 \quad (2.2)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (2.3)$$

dengan:

$F(t)$: Fungsi kumulatif dari t

$\Pr(T \geq t)$: Probabilitas suatu sistem berfungsi di atas periode waktu t

$f(t)$: Fungsi peluang densitas dari t

2.3.1 Distribusi Kegagalan

Distribusi kegagalan adalah informasi dasar mengenai umur pakai suatu peralatan dalam suatu populasi. Ada beberapa cara untuk menyajikan sejumlah probabilitas yang berguna untuk melakukan penelitian terkait keandalan, antara lain: Distribusi Normal, Distribusi Eksponensial, dan Distribusi Weibull.

Metode median rank digunakan dalam perhitungan fungsi distribusi kumulatif karena memberikan hasil yang lebih baik apabila terjadi penyimpangan distribusi. Persamaan $F(t)$ dinyatakan dengan formula sebagai berikut [28]:

$$F(t) = \frac{i}{n+1} \quad (2.4)$$

dimana:

i : Jumlah kumulatif gangguan

n : Banyaknya data (gangguan)

2.3.1.1 Laju Kegagalan

Laju kegagalan atau yang biasa disebut *failure rate* merupakan banyaknya kegagalan yang terjadi dalam selang waktu tertentu dengan total waktu operasi suatu komponen atau sistem [29]. Laju kegagalan dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\lambda = \frac{f}{t} \quad (2.5)$$

dimana:

f : banyaknya kegagalan selama jangka waktu operasi

t : total waktu operasi

λ : laju kegagalan

2.3.1.2 Distribusi Weibull

Distribusi weibull sudah banyak digunakan sebagai model matematika untuk memprediksi laju kegagalan, keandalan, dan memprediksi sisa umur peralatan. Distribusi weibull cocok digunakan untuk peralatan dengan karakteristik sebagai berikut :

1. Ukuran sampel penelitian yang kecil
2. Data populasi penelitian yang kurang lengkap
3. Distribusi antar waktu kerusakan sampel tidak simetris

[28] dalam penelitiannya menggunakan distribusi weibull untuk menentukan tingkat keandalan transformator daya, dimana didapatkan nilai MTTF dan laju kegagalan dari peralatan transformator tersebut. Fungsi peluang densitas distribusi Weibull dinyatakan sebagai berikut [30]:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} (t)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}, \text{ untuk } t \geq \beta, \alpha > 0 \quad (2.6)$$

Dan fungsi laju kegagalan dan MTTF (Mean Time To Failure) dari distribusi Weibull adalah sebagai berikut [28]:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} t^{\beta-1} \quad (2.7)$$

$$MTTF = 1/\lambda \quad (2.8)$$

dengan:

t : Waktu kerusakan

α : Parameter skala dari distribusi weibull

β : Parameter bentuk dari distribusi weibull

Nilai dari parameter tersebut tergantung pada waktu kegagalan, waktu perawatan dan lain-lain. Distribusi Weibull memiliki beberapa indeks keandalan yaitu: laju kegagalan, MTTF (Mean Time To Failure) dan indeks keandalan [28].

2.3.1.3 Perhitungan Parameter Weibull

Untuk menentukan nilai konstanta a dan b dengan menggunakan least square formula (Ebelling), sehingga nilai parameter skala (α) dan parameter bentuk (β) dapat ditaksir menggunakan metode regresi linier. Parameter-parameter tersebut dapat dihitung menggunakan formula dibawah ini [28]:

$$Xi = \ln(ti) \quad (2.9)$$

$$Yi = \ln \ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \quad (2.10)$$

$$b = \frac{n \sum Xi Yi - \sum Xi \cdot \sum Yi}{n \sum Xi^2 - (\sum Xi)^2} \quad (2.11)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \quad (2.12)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t(i) \quad (2.13)$$

$$\alpha = e^{\frac{(\bar{y}-\bar{x})}{\beta}} \quad (2.14)$$

dimana:

$b = \beta$: Parameter bentuk

α : Parameter skala

2.3.2 Analisa Kekritisan Peralatan

Dalam menentukan tingkat kekritisan suatu peralatan, metode yang banyak dijadikan acuan di pembangkitan adalah metode SERP (*System & Equipment Reliability Prioritization*) berdasarkan standar *Electric Power Research Institute (EPRI) CA:1004015 “Guideline On Proactive Maintenance”* [31]. SERP adalah suatu metode untuk menentukan peringkat keandalan dari suatu sistem atau peralatan. Hasil dari proses SERP adalah *Maintenance Priority Index (MPI)* yang disajikan dalam bentuk form dari peringkat peralatan (Sistem atau komponen) berdasarkan kriteria tertentu yang menentukan tingkat kritis dari peralatan berdasarkan total data dan frekuensi kerusakan [32]. Proses perhitungan SERP ini dilakukan dengan langkah sebagai berikut:

- Menentukan atau membagi unit pembangkit ke dalam sistem, dimana satu sistem merupakan kumpulan dari beberapa peralatan
- Menentukan dampak kerusakan dan tingkat kehandalan sistem peralatan berupa *system criticality ranking (SCR)* dan *equipment criticality ranking (ECR)*. SCR didapat dengan formulasi berikut :

$$SCR = \sqrt{(S^2 + E^2 + C^2 + CA^2 + EFF^2)/5} \quad (2.15)$$

dimana,

S = Faktor Keamanan (Safety)

E = Faktor Lingkungan (Environment)

C = Faktor Biaya (Cost)

CA = Faktor Ketersediaan Komersial (Commercial Availability)

EFF = Faktor Efisiensi

- Mengkombinasikan equipment criticality dengan system criticality dimana peralatan tersebut berada yang akan menghasilkan asset criticality ranking (ACR).

$$ACR = SCR \times ECR \quad (2.16)$$

- Menentukan RMS (Root Mean Square) dari condition status (CS) dan repair status (RS) dari peralatan. Kriteria CS dan RS adalah sebagai berikut:

- *Repair status* adalah:
 - 1 jika pemeliharaan minimal dilakukan
 - 2 jika pemeliharaan berada di tingkat moderat
 - 3 jika pemeliharaan sering dilakukan
- *Condition status* adalah:
 - 1 jika masih dapat diterima (hijau) atau dalam pengawasan (biru)
 - 2 jika status marjinal (kuning)
 - 3 jika kondisi tidak dapat diterima (merah)

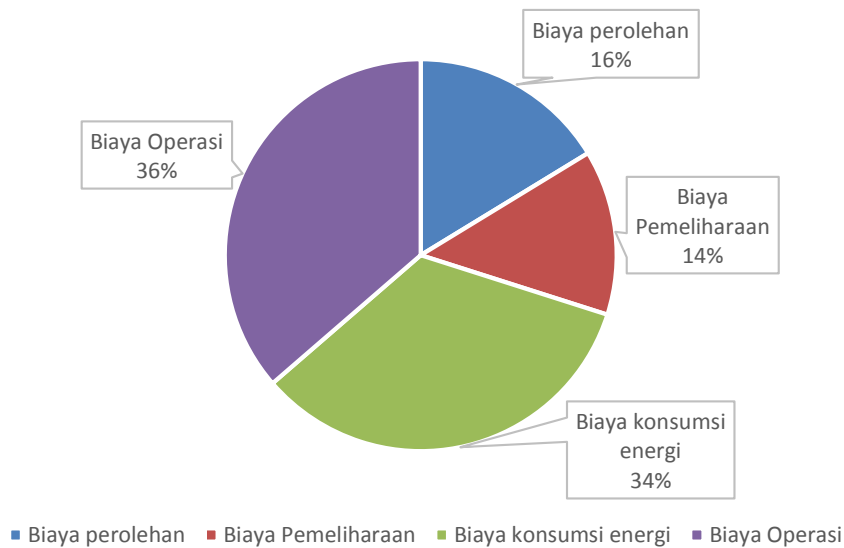
- Nilai MPI didapat dengan mengkombinasikan nilai ACR dengan RMS CS dan RS.

$$MPI = ACR \times RMS \quad (2.17)$$

2.4 Biaya Siklus Hidup (*Life Cycle Cost*)

Istilah *life cycle costing* pertama kali diperkenalkan pertama kali pada tahun 1965 pada sebuah laporan yang berjudul “*Life Cycle Costing In Equipment Procurement*” yang diterbitkan oleh Institut manajemen logistik di Washington DC. *Life Cycle Cost* dari sebuah sistem secara sederhana didefinisikan sebagai jumlah keseluruhan biaya yang terjadi selama rentang masa hidupnya [33]. [34] dalam publikasinya yang berjudul “*Common requirements life cycle cost for systems and equipment*” menjelaskan bahwa *life cycle cost* untuk sistem dan peralatan merupakan penjumlahan dari beberapa elemen biaya yaitu biaya capital, biaya operasi, dan biaya

atas terhentinya proses produksi. Contoh elemen biaya pada peralatan pompa ditunjukkan pada gambar 2.2 berikut:

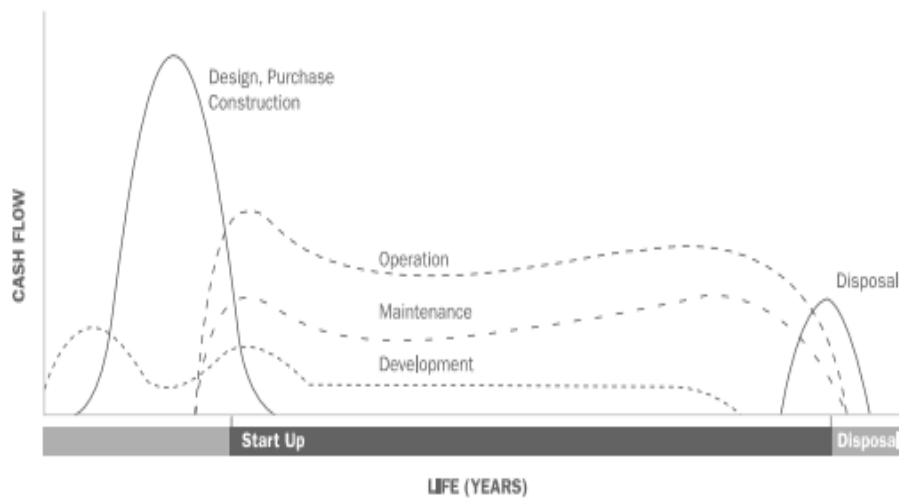


Gambar 2.2 Tipikal biaya siklus hidup pada peralatan pompa (Sumber : *Pump life cycle cost : A guide to LCC analysis for pumping systems, executive summary*) [35]

LCC bisa diaplikasikan secara luas untuk berbagai kebutuhan, namun secara umum LCC banyak digunakan untuk 6 (enam) kebutuhan yaitu:

- Menyeleksi penawar yang paling kompetitif dalam sebuah proyek
- Perencanaan dan pengalokasian biaya untuk jangka panjang
- Mengendalikan proyek yang sedang berjalan
- Membandingkan proyek yang kompetitif
- Menentukan penggantian peralatan yang sudah tua
- Membandingkan konsep logistik

Proses life cycle cost terdiri dari 2 (dua) hal mendasar yaitu menilai seluruh biaya yang muncul selama siklus hidupnya dan mengevaluasi alternatif yang berpengaruh terhadap biaya kepemilikan peralatan tersebut. Konsep life cycle cost dijelaskan pada gambar 2.3 dibawah ini.



Gambar 2.3 Konsep biaya siklus hidup menurut PJ.Barret (Sumber: Barret,PJ (2001) *Life cycle costing, beter practice guide*)[36]

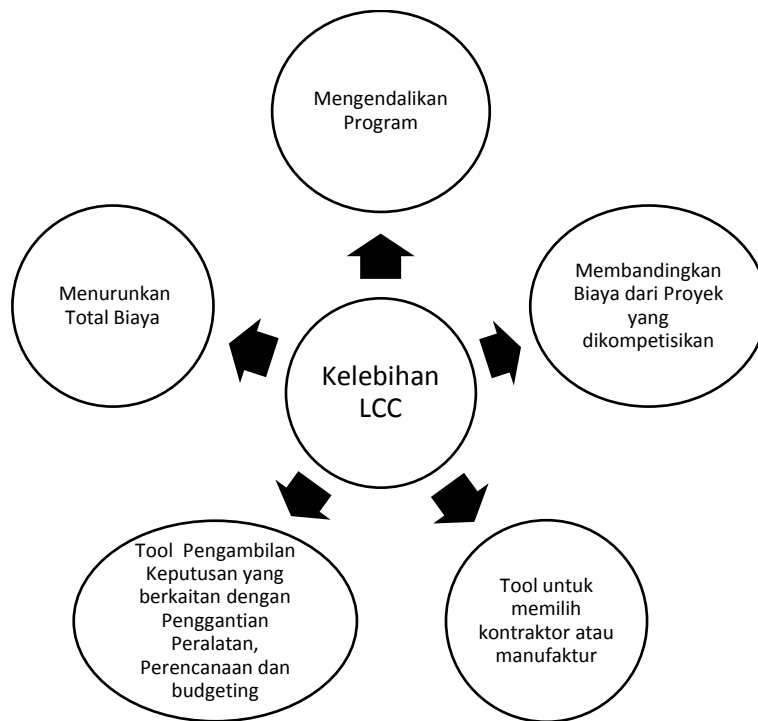
Ada 3 (tiga) tahap penggunaan analisa life cycle cost yang banyak digunakan yaitu:

- Tahap konsep ketika pengajuan awal investasi dipertimbangkan
- Tahap akuisisi ketika penilaian dilakukan pada saat proses lelang untuk penyediaan peralatan, Fasilitas, software
- Tahap servis ketika akan dilakukan pengambilan keputusan terkait peralatan, apakah peralatan akan dipertahankan, diperbaiki, ataukah dibuang / diganti.

Analisa life cycle cost membantu engineer untuk memastikan pemilihan alternatif berdasarkan pengeluaran total dari harga pembelian awal. Alternatif terbaik adalah pada saat didapatkan total biaya siklus hidup terkecil.

2.4.1 Kelebihan dan Kekurangan Biaya Siklus Hidup

Dalam penerapannya, life cycle cost memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan penggunaan life cycle cost dijelaskan pada gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4 Kelebihan analisa biaya siklus hidup (Sumber: Dhillon, B.S. (2010), "*Life Cycle Costing for Engineers*", CRC Press, New York)

Sedangkan beberapa kekurangan siklus biaya hidup yaitu membutuhkan banyak waktu, mahal, akurasi data menjadi faktor yang sangat penting, dan membutuhkan beberapa percobaan dalam proses pengumpulan data [33].

2.4.2 Model perhitungan biaya siklus hidup

Dalam implementasinya, estimasi perhitungan biaya analisa siklus hidup memiliki karakteristik dan variabel tertentu yang diperhitungkan. Tidak ada satu model standar dari *life cycle cost* yang dapat diterima di semua jenis industri. Banyak alasan kenapa hal tersebut terjadi, antara lain kecenderungan pemilik peralatan, permasalahan alami peralatan, banyaknya perbedaan data yang tersedia dan sistem pengumpulannya, serta banyaknya jenis peralatan, sistem maupun sub sistem. Oleh karena itu, penting

untuk mendapatkan model perhitungan biaya siklus hidup yang paling mendekati untuk peralatan atau sistem tertentu [33].

2.4.2.1 Model Biaya Siklus Hidup Menurut J.P. Barret

Estimasi biaya siklus hidup bisa diformulasikan secara sederhana sebagai berikut [36]:

$$LCC = \text{Capital Cost} + \text{Life Time Operating Cost} + \text{Life Time maintenance Cost} + \text{Disposal Value} - \text{Residual Value} \quad (2.18)$$

Langkah-langkah analisa biaya siklus hidup direncanakan sebagai berikut:

- 1) Menetapkan tujuan analisa
- 2) Mengidentifikasi *cost driver* dan menetapkan parameter
- 3) Melakukan perhitungan dan memilih diskon rate
- 4) Menganalisa hasil perhitungan

2.4.2.2 Model Biaya Siklus Hidup Menurut Jianping Bian dkk

Estimasi perhitungan / model *life cycle cost* adalah sebagai berikut [37]:

$$LCC = CI + CO + CM + CF + CD \quad (2.19)$$

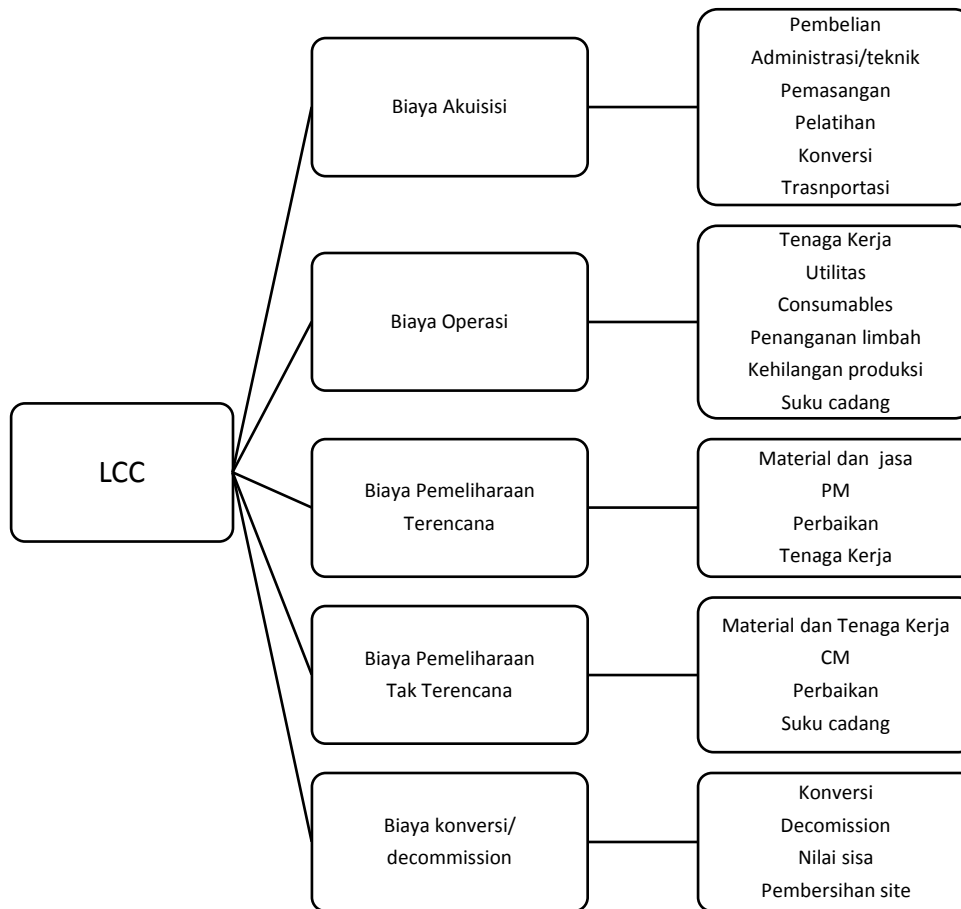
dimana CI adalah biaya investasi, CO biaya operasi, CM biaya pemeliharaan, CF biaya kegagalan, dan CD adalah biaya disposal.

2.4.2.3 Model Biaya Siklus Hidup Menurut Barringer

Estimasi perhitungan LCC yang disampaikan oleh Barringer dijelaskan sebagai berikut [8]:

$$LCC = \text{Biaya Akuisisi} + \text{Biaya Operasi} + \text{Pemeliharaan Terencana} + \text{Pemeliharaan Tak Terencana} + \text{Penghapusan} \quad (2.20)$$

Pemilahan dari masing-masing variable di atas ditunjukkan pada gambar 2.5 di bawah ini.



Gambar 2.5 Model LCC menurut Barringer (Sumber: Barringer, H.P dan Weber, D.P (1996), "Life Cycle Cost Tutorial")

2.4.2.4 Model Biaya Siklus Hidup Menurut Norsok Standard

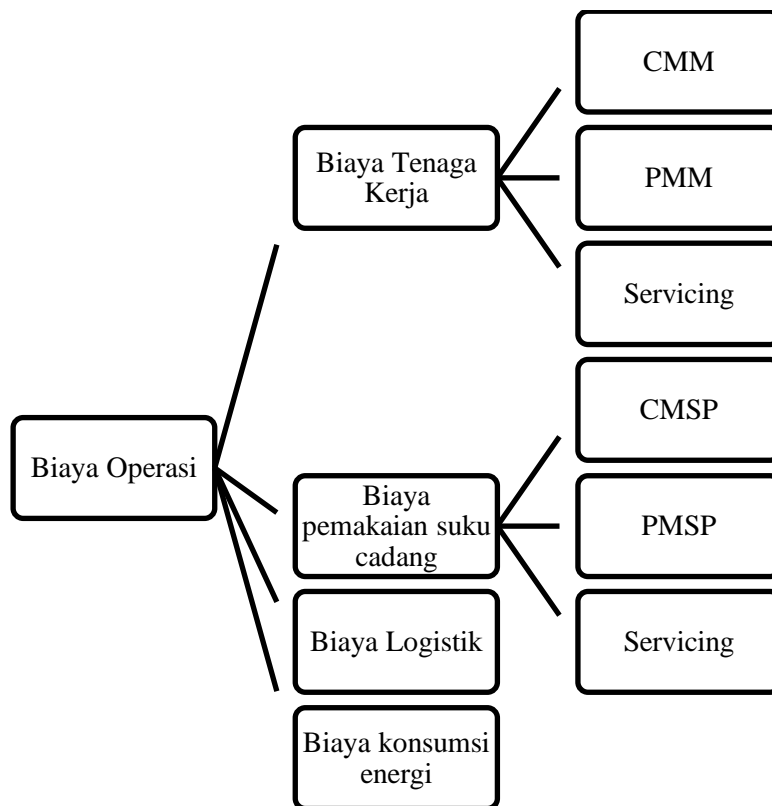
Biaya siklus hidup dari sistem dan peralatan merupakan penjumlahan dari beberapa elemen biaya, yaitu : *Capital Cost*, *Operating Cost*, dan *Cost of Deffered Production* [34].

- ***Capital Cost***

Capital Cost dihitung dengan menambahkan beberapa elemen biaya seperti biaya pembelian peralatan, biaya instalasi, biaya komisioning, biaya jaminan suku cadang, dan biaya reinvestasi.

- **Operating Cost**

Perhitungan *operating cost* didapatkan dengan menambahkan elemen biaya seperti biaya jam kerja, biaya konsumsi suku cadang, biaya dukungan logistik, dan biaya konsumsi energy. Biaya jam kerja adalah penjumlahan dari jam kerja prediktif, jam kerja korektif dan jam kerja jasa. Rincian biaya operasi dijelaskan pada gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6 Rincian Biaya Operasi untuk Perhitungan Biaya Siklus Hidup (sumber: Norsok Sandard (1996),"Common Requirements Life Cycle Cost for systems and Equipment")

- ***Cost of Deffered Production***

Cost of Deffered Production adalah biaya yang timbul karena kemungkinan kegagalan dari peralatan atau sistem. Formula untuk menghitung CDP adalah sebagai berikut:

$$CDP = E \times p \times D \times L \times C_{DP} \quad (2.21)$$

dimana:

E = jumlah rata-rata kegagalan per tahun

p = kemungkinan pengurangan produksi

D = Durasi pengurangan produksi

C_{DP} = Biaya downtime per jam selama umur pakainya

2.4.2.5 Model Biaya Siklus Hidup menurut Dhillon

Secara umum perhitungan LCC dirumuskan sebagai berikut [33]:

$$LCC = RC + NRC \quad (2.22)$$

dimana RC adalah *recurring cost*, dan NRC adalah *non recurring cost*. *Recurring cost* terdiri dari biaya operasi, biaya inventory, biaya pendukung, biaya tenaga kerja, dan biaya pemeliharaan. Sedangkan *non recurring cost* terdiri dari biaya Pengadaan, biaya instalasi, biaya kualifikasi, biaya penelitian dan pengembangan, biaya pelatihan, biaya keandalan dan perbaikan, dan biaya pendukung.

Beberapa macam metode yang dapat digunakan untuk menghitung biaya siklus hidup antara lain : *Simple Payback Methode*, *Discounted Payback Methode*, *Net Present Value*, *Equivalent Annual Cost*, *Internal Rate of Return*, dan *Net Saving*. Dari beberapa metode di atas, *Net Present Value* merupakan teknik yang cocok digunakan untuk menghitung *cash flow comparison* dalam jangka panjang [38].

Tabel 2.4 Penerapan *Net Present Value* untuk Perhitungan *Life Cycle Cost* pada beberapa literatur

No	Penelitian/Literatur	Variabel yang digunakan	Metode
1	Barringer (2003) tentang model konseptual life cycle cost pada solo pump[39]	Biaya Kapital, Penghematan, Depresiasi, pajak keuntungan, pemasukan yang akan datang	Net Present Value
2	Jianping dkk (2014) tentang analisa probabilitas dari life cycle cost pada power transformer	Biaya investasi, Biaya Operasi, Biaya Pemeliharaan, Biaya karena kegagalan, dan Biaya atas Disposal	Net Present Value
3	JP Barret (2001B) tentang life cycle costing "better practice guide"	Biaya kapital, Biaya operasi, Biaya pemeliharaan, Biaya disposal, nilai sisa	Net Present Value
4	Norsok Standart (1996) "common requirements life cycle cost for systems and equipment"	Biaya kapital, Biaya operasi, Biaya terhentinya produksi	Net Present Value

(Sumber: Literature review)

2.5 *Net Present Value (NPV)*

Prinsip dari perhitungan LCC adalah membawa pilihan alternatif ke dalam basis waktu yang sebanding [40]. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Net Present Value* (NPV). *Net Present Value* adalah selisih antara nilai sekarang dari arus kas yang masuk dengan nilai sekarang dari arus kas yang keluar pada periode waktu tertentu. NPV ini mengestimasi nilai sekarang dari suatu proyek, asset, ataupun investasi berdasarkan arus kas masuk yang diharapkan pada masa depan dan arus kas keluar yang disesuaikan dengan suku Bunga dan harga pembelian awal. Perhitungan NPV dirumuskan sebagai berikut:

$$PV = \sum_{n-awal}^{n-akhir} C_n \frac{(1+k)^{tn-tc}}{(1+d)^{tn-tPV}} \quad (2.23)$$

dimana :

C_n = biaya tahun ke-n

n-awal = tahun pertama dimana biaya akan diakumulasi

n-akhir = tahun terakhir dimana biaya akan diakumulasi

k = laju inflasi

d = rate diskon

tn = tahun ke-n dimana biaya muncul

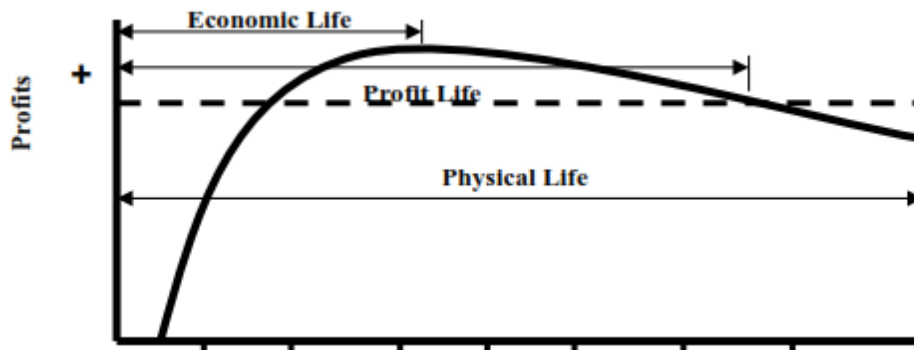
tPV = tahun dimana PV akan dihitung

tc = tahun dimana data biaya dimasukkan

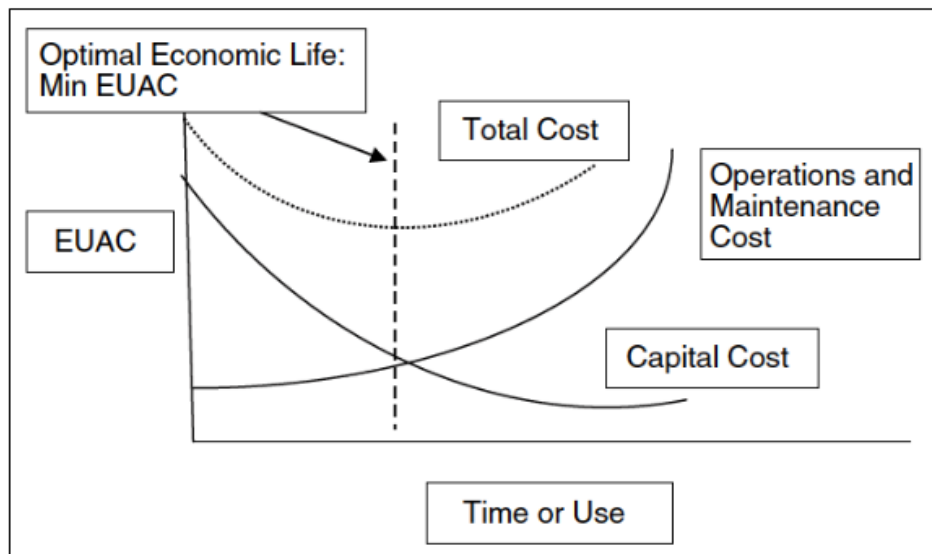
2.6 Analisa Penggantian

Sebuah peralatan yang ada saat ini, akan dihapus suatu saat nanti, baik itu karena performa yang sudah tidak menguntungkan, ataupun karena performa akan lebih efisien jika membeli peralatan baru yang lebih baik (lihat gambar 2.7). Pertimbangan penggantian tersebut juga harus memperhatikan faktor-faktor ekonomis sebagaimana dijelaskan pada gambar 2.8, dimana nilai kapital suatu asset atau peralatan mengalami penurunan ketika biaya operasi dan pemeliharaannya meningkat [41].

Service life optimum dari suatu peralatan adalah ketika total biaya berada pada titik minimum dan akan menetapkan usia keekonomiannya. Pertanyaan selanjutnya adalah kapan peralatan tersebut seharusnya diganti dengan peralatan yang lebih efisien? Ataupun kita akan menunda penggantian tersebut dengan melakukan perbaikan dan *overhaul*? Untuk menjawab situasi tersebut telah dikembangkan suatu metode yang telah banyak digunakan di dunia, yaitu metode *Defender* dan *Challenger*. Jika ingin mengganti *defender* dengan *challenger*, kita harus memastikan memilih alternatif terbaik [17].



Gambar 2.7 Equipment Life (Sumber : Gransberg, 2006 “*Major Equipment Life Cycle Cost analysis*”)



Gambar 2.8 Usia ekonomis peralatan berdasarkan metode minimalisasi biaya (Sumber: Gransberg, 2006 “*Major Equipment Life Cycle Cost analysis*”)

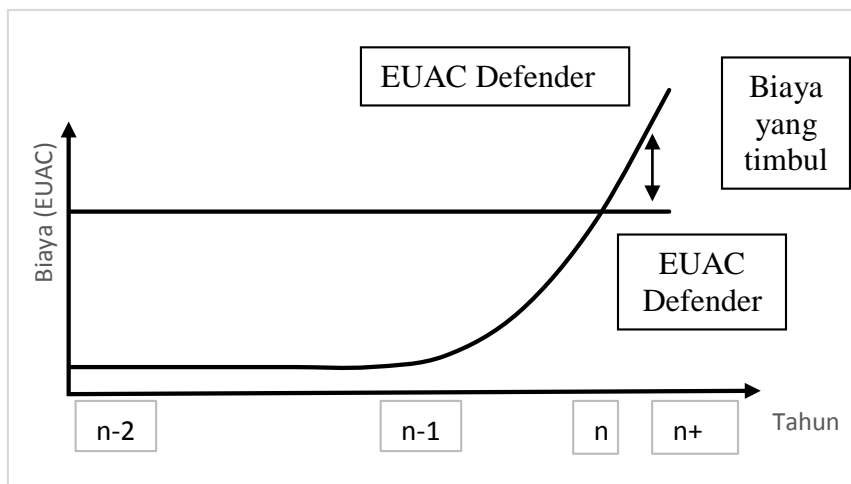
2.6.1 Konsep *Defender* dan *Challenger*

Secara umum, analisa penggantian untuk memutuskan, apakah suatu peralatan itu perlu dilakukan penggantian dengan alat yang lebih dan lebih efisien atau tidak, serta kapan sebaiknya penggantian itu dilakukan. Pengertian *Defender* disini adalah

peralatan yang saat ini sedang digunakan. Sedangkan *Challenger* adalah peralatan yang diusulkan untuk menggantikan [42].

Suatu penggantian asset atau peralatan seharusnya dilakukan atas pertimbangan ekonomis-nya dibandingkan dengan hanya dengan pertimbangan fisiknya. Jumlah dan lama aliran kas dari asset lama (*defender*) dan asset pengganti (*Challenger*) biasanya sangat berbeda. Aset baru selalu memiliki biaya investasi yang lebih tinggi dan biaya operasi dan perawatan yang lebih rendah dibandingkan dengan peralatan yang lama. Nilai sekarang dari aset lama adalah nilai jualnya saat ini, dan akan dianggap sebagai nilai awal dari *defender*. Sedangkan nilai awal dari *challenger* adalah semua biaya yang diperlukan sampai peralatan tersebut dapat dioperasikan. Disamping itu, usia ekonomis dari aset lama biasanya lebih pendek karena dihitung dari sisa masa pakai ekonomisnya di saat analisa mulai dilakukan.

Kriteria yang biasa dipakai sebagai acuan untuk pengambilan keputusan adalah biaya tahunan rata-rata atau disebut *Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC)*. Penggantian akan dilakukan jika biaya-biaya tahunan dari *defender* sama dengan EUAC *challenger*, sebagaimana dapat dilihat pada gambar 2.10. Keterlambatan penggantian akan mengakibatkan penambahan biaya [20].



Gambar 2.9 EUAC Defender dan Challenger (Sumber: Syarifuddin dan Abidin, Z. - 2014)

Metode biaya tahunan rata-rata menghitung ekivalensi dari setiap biaya selama masa pemakaiannya. Dengan mempertimbangkan bunga uang, umur ekonomis dapat dicapai pada saat total ekivalensi biaya tahunan rata-rata adalah minimum. Untuk menghitung biaya total tahunan rata-rata digunakan persamaan sebagai berikut:

$$EUAC = CR + EAOC \quad (2.24)$$

$$EUAC = (P - S)(A/P, i, n) + Si + FW \text{ (Operating cost year } n)(A/F, i, n) \quad (2.25)$$

Atau

$$EUAC = (P - S)(A/P, i, n) + Si + PW \text{ (Operating cost year } n)(A/G, i, n) \quad (2.26)$$

$$EAOC = PW \text{ (Operating cost year } n)(A/G, i, n) \quad (2.27)$$

$$CR = (P - S)(A/P, i, n) + Si \quad (2.28)$$

dimana:

EUAC : Equivalensi Uniform Annual Cost

CR : Capital Recovery

EAOC : Equivalent Annual Operating Cost

FW : Future Worth

PW : Present Worth

P : Harga awal peralatan

S : Harga akhir peralatan

i : Bunga uang

n : Umur pakai peralatan

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian adalah cara ilmiah untuk mendapatkan data dengan dengan tujuan dan kegunaan tertentu [43]. Jenis penelitian ini merupakan jenis penelitian deskriptif kuantitatif, yang tujuannya memberikan gambaran secara sistematis mengenai objek penelitian tertentu. Dalam melakukan penelitian ini, terdapat 4 (empat) tahap yang dilakukan yaitu:

1. Tahap identifikasi awal
2. Tahap pengumpulan data (Primer dan Sekunder)
3. Tahap perhitungan
4. Tahap analisa dan kesimpulan

3.1 Studi Literatur

Penelitian ini dimulai dengan melakukan studi literatur terhadap penelitian terdahulu dan dokumen peralatan dengan merujuk pada permasalahan yang ada di PLTU Labuan yaitu tingginya losses akibat gangguan pada peralatan generator. Dari permasalahan tersebut, diperlukan alternatif solusi untuk meningkatkan keandalan peralatan. Pada prinsipnya langkah yang diambil adalah apakah peralatan akan tetap dipertahankan atau akan dilakukan penggantian. Keputusan untuk mempertahankan peralatan dengan kondisi yang ada saat ini tentu harus mempertimbangkan tingkat resiko dan kemungkinan kerugian yang muncul. Alternatif yang disusun adalah sebagai berikut :

1. Tetap mempertahankan peralatan lama dengan pola pemeliharaan yang ada (*Do Nothing*).

Alternatif ini akan menghitung biaya yang muncul jika pengoperasian generator tetap dilakukan tanpa ada perubahan. Hanya mengikuti pola

pemeliharaan preventif dan periodik, serta melakukan perbaikan apabila terjadi kegagalan.

2. Tetap mempertahankan peralatan lama dengan melakukan *improvement*.

Gangguan yang paling sering terjadi pada generator saat ini adalah terjadinya kebocoran pelumas dan Hidrogen. Berdasarkan data pemeliharaan dan reliability, salah satu penyebab terjadinya kebocoran hydrogen adalah karena kegagalan seal ring (terjadinya scratch), yang menyebabkan tekanan seal menjadi lebih kecil dari tekanan hidrogen di dalam generator sehingga menyebabkan hydrogen mendesak keluar. Beberapa tindakan yang telah dilakukan yaitu melakukan perbaikan seal ring, dan meningkatkan kualitas pelumas untuk seal. Untuk mencegah kejadian berulang diusulkan untuk melakukan modifikasi pada seal ring generator dari *single flow* menjadi *double flow*. Mengingat bahwa desain seal ring di PLTU Labuan berbeda dengan pembangkit yang sejenis yang menggunakan double flow. Hal ini bertujuan untuk menjaga tetap terjaganya tekanan seal oil apabila terjadi kegagalan di salah satu sisi, sehingga tidak menyebabkan terhentinya operasi. Gambar 3.1 dan 3.2 menunjukkan gambar seal ring generator single flow dan double flow.



Gambar 3.1 Seal ring single flow



Gambar 3.2 Gambar seal ring double flow

3. Penggantian total dengan peralatan OEM dan non OEM

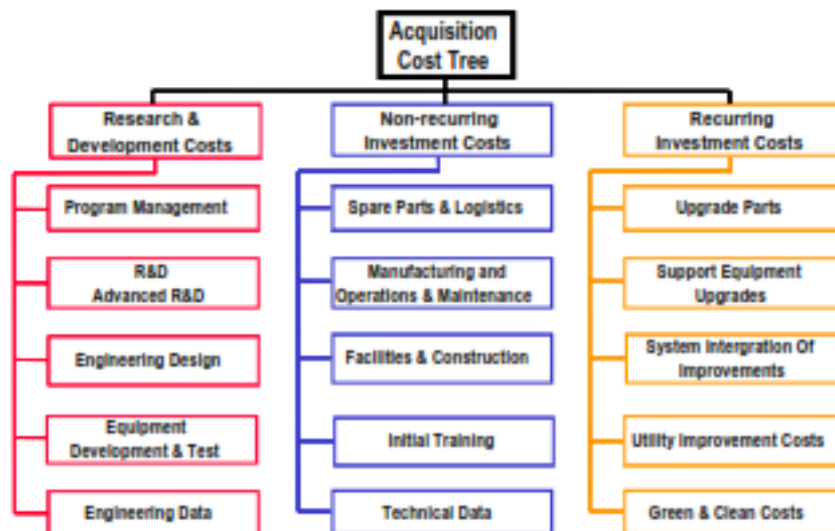
Alternatif ketiga dan keempat adalah melakukan penggantian total peralatan dengan merk yang berbeda, yaitu Original Equipment Manufacturer (OEM) dan non Original Equipment Manufacturer (non-OEM).

3.2 Pengumpulan Data

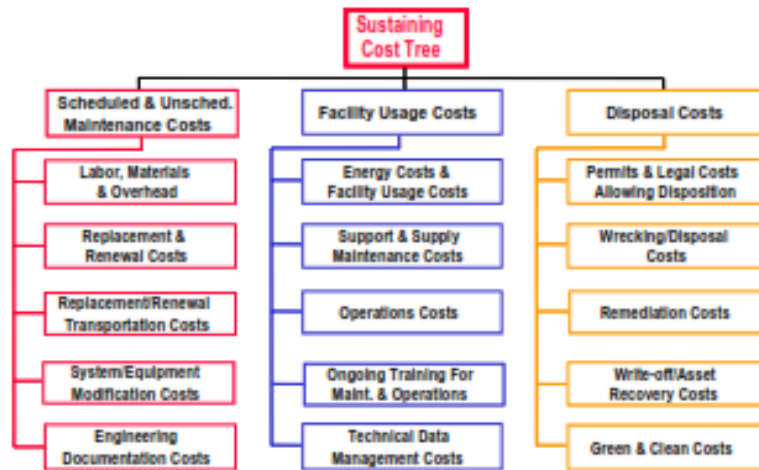
Data dikumpulkan dengan teknik pengumpulan data kualitatif yaitu:

- a) Studi Literatur
- b) Observasi dokumentasi
- c) Survey

Untuk melakukan perhitungan keandalan peralatan, *life cycle cost* dan *replacement analysis* diperlukan pengumpulan data yang meliputi data gangguan, data pemeliharaan, data operasi dan data pembelian peralatan. Untuk menentukan variable biaya yang nantinya digunakan dalam perhitungan *life cycle cost* dengan menggunakan pohon biaya yang terdiri dari biaya akuisisi dan biaya sebagaimana ditampilkan pada gambar 3.3 dan 3.4 [39]



Gambar 3.3 Pohon biaya akuisisi dari LCC



Gambar 3.4 Pohon Biaya Penopang dari LCC

Data yang dibutuhkan ini didapatkan dari observasi dokumen, aplikasi maximo, dan ERP serta penawaran dari vendor. Data-data yang dibutuhkan untuk perhitungan yaitu :

A. Biaya penopang pengoperasian peralatan :

1. Biaya Operasi

Biaya operasi adalah biaya-biaya yang dikeluarkan untuk mengoperasikan peralatan antara lain biaya operator, biaya pemakaian gas hidrogen sebagai pendingin, dan biaya pemakaian air pendingin.

2. Biaya Pemeliharaan

Biaya pemeliharaan adalah biaya yang dikeluarkan untuk menjaga peralatan tetap berfungsi sebagaimana yang diharapkan. Biaya pemeliharaan terdiri dari biaya preventif dan biaya overhaul.

3. Biaya Gangguan

Biaya gangguan adalah biaya yang muncul akibat terhentinya proses produksi dan biaya yang diperlukan untuk melakukan perbaikan.

4. Biaya Disposal

Biaya disposal adalah biaya yang timbul pada saat penghapusan suatu aset atau peralatan. Biaya disposal terdiri dari biaya pembongkaran dan nilai sisa dari suatu peralatan.

B. Biaya Akuisisi

Biaya akuisisi yang dimaksud adalah biaya pembelian dan pemasangan peralatan. Biaya akuisisi bagi *end user* biasanya sudah termasuk dalam biaya perolehan dan pemasangan dari suatu peralatan.

Setelah data-data diperoleh, langkah selanjutnya adalah melakukan pengolahan data dengan metode *life cycle cost* dan *replacement analysis*. Setelah didapatkan hasil perhitungan, dilakukan analisa dan mengambil kesimpulan dari hasil analisa tersebut.

3.3 Analisa Biaya

Analisa biaya dilakukan dengan metode *life cycle cost* untuk mengetahui keseluruhan biaya yang mungkin muncul selama masa pakai peralatan. Langkah pertama adalah menentukan model LCC dan menentukan variable-variabel biaya yang berpengaruh selama pengoperasian peralatan. Kemudian dilakukan perhitungan untuk masing-masing variabel sehingga didapatkan nilai total life cycle cost dari peralatan. Analisa biaya juga menggunakan metode *replacement analysis* untuk mendapatkan waktu penggantian peralatan yang optimal. *Replacement analysis* dihitung menggunakan metode biaya ekuivalen tahunan rata-rata (EUAC).

3.4 Analisa Keandalan

Analisa keandalan dimaksudkan untuk mengetahui tingkat keandalan peralatan generator ditinjau dari laju kegagalan dan MTTF (*Mean Time To Failure*). Distribusi kerusakan menggunakan pola distribusi Weibull. Perhitungan dilakukan pertama-tama untuk mendapatkan nilai parameter skala (α) dan parameter bentuk (β). Dari data tersebut selanjutnya dapat dihitung tingkat laju kegagalan dan nilai MTTF dari

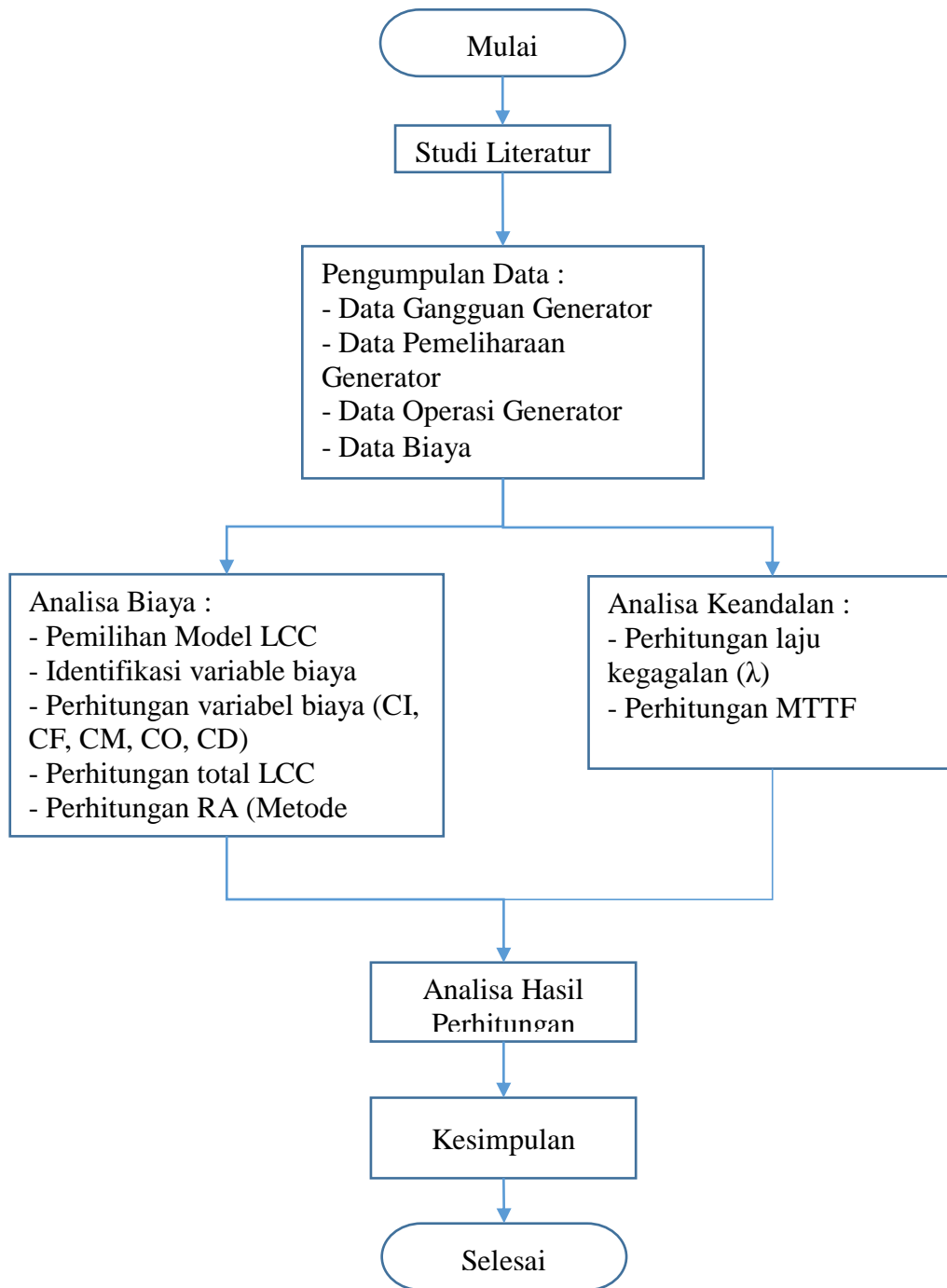
peralatan. Analisa keandalan digunakan sebagai data pendukung pengambilan keputusan penggantian peralatan generator

3.5 Analisa Perhitungan dan Kesimpulan

Langkah terakhir dari penelitian ini, adalah melakukan analisa terhadap hasil perhitungan dan mengambil kesimpulan.

3.6 Flowchart Penelitian

Metodologi pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.5 berikut ini:



Gambar 3.5 Flow Chart Metodologi Penelitian

3.7 Pemilihan Model LCC

Sebagaimana telah disampaikan sebelumnya bahwa diperlukan pemilihan model perhitungan biaya siklus hidup. Pemilihan model diupayakan menggunakan model dengan elemen biaya yang paling mendekati. Tabel 3.1 berikut adalah daftar ceklist untuk pemilihan model biaya siklus hidup. Model 1 adalah model yang dikembangkan oleh J.P Barret, Model 2 oleh Jianping, Model 3 oleh Barringer, Model 4 oleh Norsok Standard, dan model 5 oleh Dhillon.

Tabel 3.1 Pemilihan Model LCC

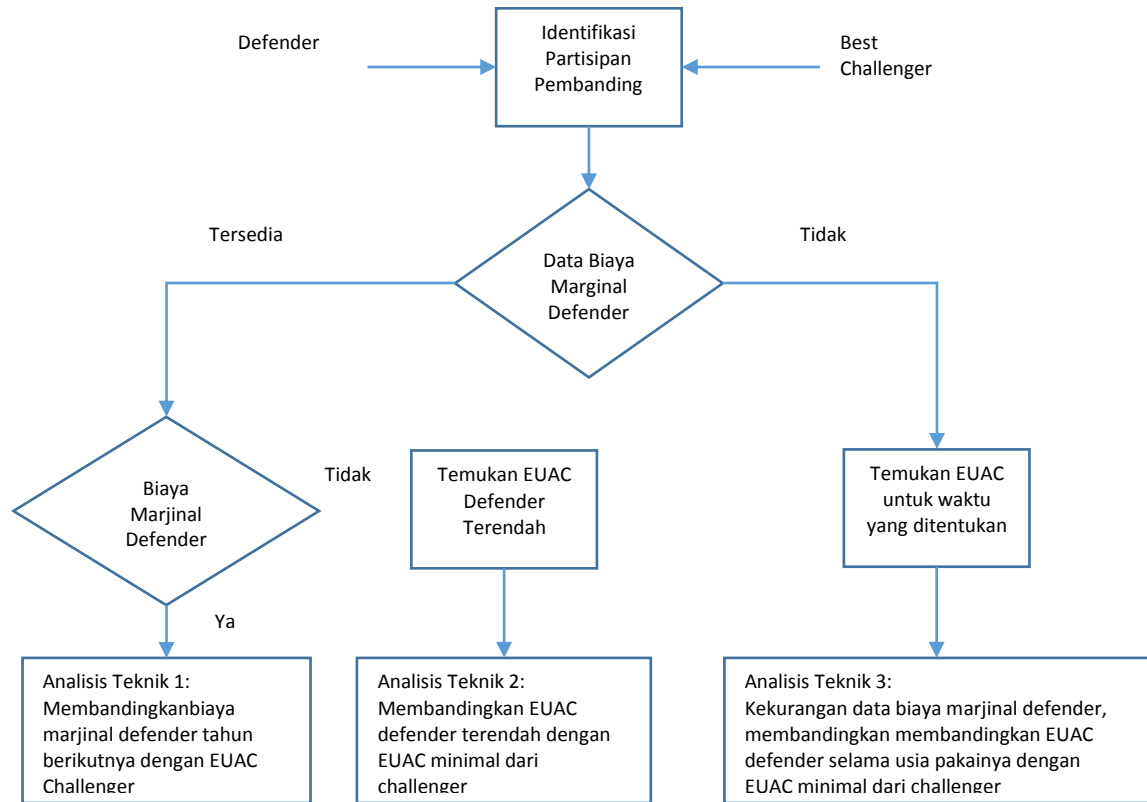
No	Elemen Biaya	Model				
		1	2	3	4	5
1	Biaya Aquisisi					
	Biaya investasi dan Pemasangan	v	v	v	v	v
2	Biaya Penopang					
	Biaya pemeliharaan	v	v	v	v	v
	Biaya Operasi	v	v	v	v	v
	Biaya Kegagalan	-	v	-	-	v
	Biaya Disposasi	v	v	-	-	-
	Nilai Sisa	v	v	v	v	-

Dari ceklist di atas, dipilih model yang akan digunakan adalah model nomer 2, yaitu model yang dikembangkan oleh Jianping dalam penelitiannya yang berjudul "*Propabilistic Analysis of Life Cycle Cost for Power Transformer*".

3.8 Teknik Analisa Penggantian

Aspek utama analisa penggantian dengan konsep defender dan challenger bukan hanya mengarah kepada apakah peralatan *defender* akan diganti atau tidak, tetapi lebih kepada kapan peralatan defender tersebut harus diganti. Pertanyaannya adalah, "Haruskah dilakukan penggantian sekarang, atau lebih baik dipertahankan beberapa tahun lagi?".

Dalam melakukan analisa penggantian, ada 3 (tiga) teknik yang bisa diterapkan, tergantung dari ketersediaan data (biaya) dan perubahan-nya. Ketiga teknik tersebut digambarkan dalam gambar 3.6 dibawah ini [42].



Gambar 3.6 Teknik analisa Penggantian (Sumber: Donald G. Newnan (2004), Engineering Economic Analysis, 9th edition, Oxford University Press, New York)

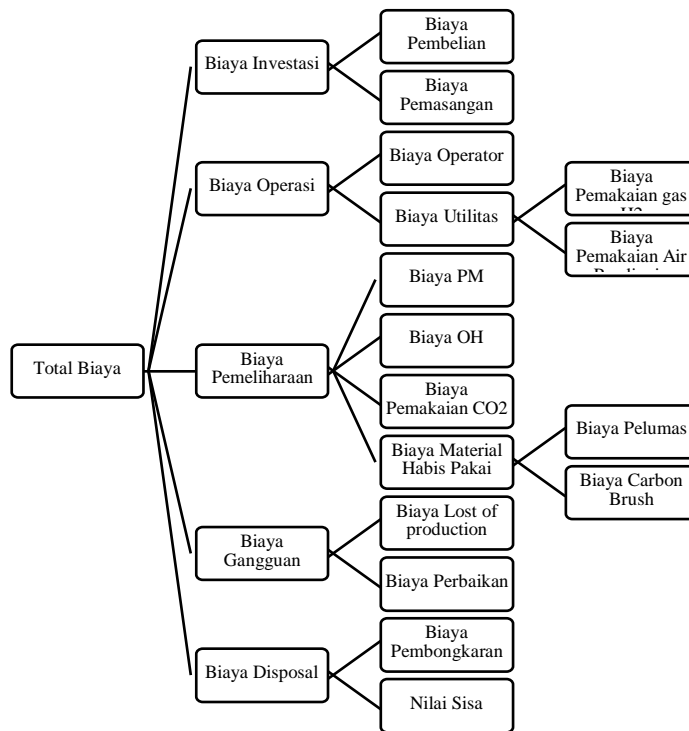
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hasil analisa data dan pembahasan dari hasil analisa keandalan dan analisa biaya dari peralatan generator pembangkit.

4.1 Data Perhitungan

Data yang digunakan merujuk ke data operasi, pemeliharaan dan gangguan generator di PLTU Labuan. Untuk perhitungan *life cycle cost*, data yang dikumpulkan dipetakan menggunakan *cost breakdown structure* sebagaimana ditampilkan pada gambar 4.1 yang meliputi biaya investasi, biaya operasi, biaya pemeliharaan, biaya gangguan, dan biaya disposal.



Gambar 4.1. Cost Breakdown Structure for Generator

4.1.1 Data Gangguan Generator

Data gangguan generator di ambil dengan rentang waktu dari awal pengoperasian yaitu dari tahun 2011 sampai dengan tahun 2019. Tabel 4.1 dibawah ini menampilkan data gangguan generator PLTU Labuan dan biayanya. Biaya yang dimaksud adalah *lost of opportunity cost* yaitu kerugian yang ditimbulkan akibat terhentinya proses produksi. Kerugian tersebut didapatkan dengan mengalikan jumlah jam stop dengan margin keuntungan produksi listrik per kwh.

Tabel 4.1 Data Gangguan Generator

Tahun	Jenis Gangguan	Jumlah Kejadian	Jam Stop	Kerugian (MWh)	Kerugian (Rp)
2013	Kebocoran Seal Oil System	2	1.281	384.400	55.339.200.000,-
2013	Kebocoran Seal Oil System	1	284	85.115	12.268.800.000,-
2013	Earth Fault Rotor	1	271	81.355	11.707.200.000,-
2014	Kebocoran Seal Oil System	5	3.576	1.072.800	154.483.200.000,-
2015	Earth Fault Rotor	1	4.545	1.363.625	196.344.000.000,-
2015	Gagal Start	5	5	1.500	216.000.000,-
2016	Gangguan PT Generator	1	18	5.400	43.200.000,-
2017	Tidak ada gangguan				
2018	Kebocoran H2	1	429	128.835	18.532.800.000,-

4.1.2 Data Biaya dan Lingkup Pemeliharaan Generator

Strategi pemeliharaan generator saat ini dibagi menjadi 3(tiga) kegiatan, yaitu: Preventive Maintenance, Periodic Maintenance, dan breakdown Maintenance. Preventive maintenance adalah jenis maintenance yang dilakukan untuk mencegah terjadinya kerusakan pada mesin selama operasi

berlangsung. Tabel 4.2 dan 4.3 menunjukkan ruang lingkup kegiatan preventive maintenance dan biaya yang dikeluarkan.

Tabel 4.2 Daftar kegiatan preventive maintenance generator

Deskripsi	Kegiatan	Frekuensi
PM Generator	Pemeriksaan temperatur belitan stator, bearing dan air pendingin	Mingguan
	Pemeriksaan vibrasi	Bulanan
	Pemeriksaan tekanan H2 dan seal oil	Mingguan
PM Exciter	Inspeksi ruang eksitasi	Mingguan
	Inspeksi filter eksitasi	Mingguan
	Pemeriksaan karbon brush	Mingguan

Tabel 4.3 Data biaya preventive maintenance

No	Item	Jumlah / Bulan	Biaya / Bulan	Total Biaya / Bulan
1	Tenaga kerja	Teknisi 2 orang Helper 1 orang	Rp. 4.308.364,- Rp. 3.659.267,-	Rp. 8.616.728,- Rp. 3.659.267,-
2	Material (Tool set, Majun dll)	1 lot	Rp. 2.500.000,-	Rp. 2.500.000,-

Kegiatan preventive maintenance dilaksanakan oleh 3 orang, yang terdiri dari 2 orang teknisi dan 1 orang tenaga bantu (helper). Total biaya per bulan yang dikeluarkan adalah sebesar Rp. 10.467.631,-. Maka biaya tahunan biaya preventive maintenance adalah sebesar Rp. 125.611.572,-.

Periodic maintenance adalah kegiatan berkala yang terjadwal dalam melakukan pembersihan, inspeksi mesin, maupun penggantian suku cadang. Kegiatan pemeliharaan tersebut dilaksanakan dengan interval 2000 jam. Ruang lingkup *periodic maintenance* sebagaimana disebutkan pada lampiran 1 dan Tabel 4.4

Tabel 4.4 Data biaya kegiatan periodic maintenance (Overhaul) generator

No	Item	Volume	Satuan	Biaya (Rp)
1	Jasa Tenaga Kerja	1	lot	290.477.468,-
2	Material Consumable	1	lot	376.128.019,-
3	Tools	1	lot	60.000.000,-
4	Dokumentasi dan Laporan	1	lot	20.000.000,-
5	Transportasi	1	lot	81.900.000,-
6	Safety dan K3	1	lot	7.250.000,-

Total biaya untuk pelaksanaan satu kali kegiatan overhaul adalah sebesar Rp. 835.755.487,-.

Breakdown maintenance adalah perawatan mesin yang dilakukan ketika sudah terjadi kerusakan pada mesin sehingga menyebabkan tidak dapat beroperasinya mesin tersebut. Selama rentang waktu 2011 – 2019, terjadi beberapa kerusakan yang menyebabkan perlunya dilakukan breakdown maintenance sebagaimana terlihat pada tabel 4.5. Data tersebut meliputi pembelian material yang dibutuhkan untuk melakukan perbaikan ketika terjadi kerusakan pada sistem.

Tabel 4.5 Data breakdown maintenance generator dan biaya perbaikannya

Tahun	Jenis Perbaikan	Biaya Perbaikan (Rp)
2013	Pengadaan Carbon Brush Generator	95.085.760
2013	Pengadaan Gas CO2	28.600.000
2013	Pengadaan Pelumas	124.000.000
2014	Pengadaan Pompa Seal Oil System Generator dan Voltage Transformer Generator	605.000.000
2014	Jasa Perbaikan Holder Carbon Brush Eksitasi Generator Unit	21.450.000
2014	Pengadaan Minyak Pelumas	179.850.000
2014	Jasa Perbaikan Jurnal Shaft Generator No. 5, 6, dan Exciter	5.057.936.070
2015	Pengadaan spesial baut generator dan bearing motor exhaust fan air detring	11.000.000
2015	Pengadaan fuse PT generator 20 KV	78.100.000

Tabel 4.5 Data breakdown maintenance generator dan biaya perbaikannya
(lanjutan)

2015	Pengadaan isi ulang gas CO2	49.852.110
2015	Jasa preheating pembukaan retaining ring rotor generator unit 2	165.733.348
2015	Jasa penggantian o-ring bracket generator bearing 5 dan 6	240.650.000
2015	Jasa perbaikan part generator unit 2	165.000.000
2015	Perbaikan Exhaust duct exciter generator #2	52.000.000
2015	Jasa Partial Reinsulation Rotor Generator Unit 2	3.764.800.787
2016	Pengadaan isolator PT unit 2	45.144.000
2016	Pengadaan carbon brush exciter generator	86.240.000
2016	Pengadaan PT Generator Unit 2	91.520.000
2018	Jasa Tenaga Bantu Pemeliharaan Untuk Pekerjaan FO Seal Ring	39.000.060
2018	Jasa Pemasangan Scaffolding Additional Work Recovery Unit 2	64.000.024
2018	Jasa Machining Seal Ring Generator Unit 2	803.000.000
2018	Jasa Grinding Shaft Rotor Generator Side Seal Ring Bearing 6 Unit 2	227.157.984
2018	Consumable Pekerjaan Recovery Generator Unit 2	222.622.328
2018	Consumabel Pull Out Generator Unit 2	209.110.000
2018	Pengadaan Spring Seal Ring Generator Unit 2	33.440.000
2018	Pengadaan Rubber Gasket H2 Cooler Generator Unit 2	55.558.800
2018	Pengadaan Seal Ring Generator	292.138.000

Biaya pemeliharaan juga meliputi biaya beberapa kegiatan yang membutuhkan material antara lain pemakaian pelumas, pemakaian gas CO2, dan penggantian carbon brush. Tabel 4.6 menunjukkan kebutuhan material untuk kegiatan pemeliharaan.

Tabel 4.6 Kebutuhan material untuk kegiatan pemeliharaan per tahun

Material	Jumlah	Satuan	Harga satuan (Rp)	Harga total(Rp)
Pelumas	3	drum	6.550.000	19.650.000
Gas CO2	10	tabung	924.500	9.245.000
Carbon brush	50	pcs	1.225.000	61.250.000

4.1.2 Data Biaya Operasi Generator

Biaya operasi generator adalah biaya yang dikeluarkan untuk dapat menjalankan generator sesuai dengan parameter operasi yang telah ditetapkan. Biaya tersebut terdiri dari biaya untuk tenaga kerja yang bertugas sebagai operator. Selain itu dibutuhkan juga konsumsi air pendingin has hidrogen sebagai pendingin generator baik rotor maupun stator. Data biaya operasi ditampilkan pada tabel 4.7 berikut:

Tabel 4.7 Data biaya operasi Generator

Item	Jumlah	Satuan	Harga Satuan(Rp)	Biaya /Tahun (Rp)
Operator	2	Orang/bulan	6.405.214	153.725.136
Gas Hidrogen	14.820	Nm3/Tahun	28.082	416.175.240
Air Pendingin	1.539	M3/Tahun	28.104	43.252.056

4.1.3 Data biaya pembelian dan Disposol

Data biaya pembelian diperlukan untuk melakukan perhitungan life cycle cost dan replacement analysis. Untuk data peralatan existing didapatkan dari laporan keuangan perusahaan, sedangkan untuk data peralatan baru didapatkan dari data penawaran harga dari pabrikan. Biaya pembelian atau investasi yang dimaksud sudah termasuk biaya pemasangan peralatan. Tabel 4.8 menampilkan data biaya

pembelian peralatan generator, baik itu peralatan existing maupun peralatan penggantinya. Sedangkan biaya disposal adalah biaya yang muncul ketika peralatan diputuskan untuk tidak digunakan lagi. Biaya disposal terdiri dari biaya pembongkaran dari peralatan itu sendiri dan nilai sisa dari peralatan tersebut.

Tabel 4.8 Data biaya pembelian generator dan modifikasi seal ring

Peralatan	Harga Beli (Rp)	Biaya Disposal(Rp)
Existing	165.947.114.883	4.489.824.683
Generator OEM	185.000.000.000	5.124.920.853
Generator non OEM	282.821.518.509	8.385.638.137
Biaya modifikasi seal ring	5.266.360.362	4.489.824.683

4.2 Analisa Biaya

Dalam operasi pembangkit, untuk meningkatkan laba perusahaan, perlu juga diperhitungkan terkait biaya kepemilikan peralatan untuk melihat sejauh mana efektifitas biaya dibandingkan dengan profit yang didapatkan. Life cycle cost dapat menunjukkan total biaya yang muncul selama kepemilikan suatu peralatan. Hal ini dapat digunakan sebagai pertimbangan bagi perusahaan untuk mempertahankan suatu peralatan atau dilakukan penggantian. Sebagaimana telah di bahas sebelumnya, perhitungan life cycle cost akan digunakan untuk membandingkan efektifitas biaya kepemilikan peralatan dari empat alternatif yang telah ditetapkan, yaitu: mempertahankan aset lama, melakukan modifikasi terhadap seal ring, melakukan penggantian dengan peralatan OEM, dan melakukan penggantian dengan peralatan non-OEM. Perhitungan life cycle cost dan replacement analysis menggunakan tahun saat ini sebagai acuan untuk memperkirakan biaya-biaya di masa yang akan datang. Perhitungan menggunakan data rata-rata dari nilai historis selama pengoperasian generator. Untuk biaya yang akan datang, digunakan asumsi berdasarkan inflasi sebesar 5% dan untuk diskon rate diasumsikan sebesar 12,5%.

4.1.3 Perhitungan Life Cycle Cost

4.1.3.1 Perhitungan LCC alternatif 1

a. Biaya Investasi

Biaya investasi adalah biaya pembelian termasuk pemasangan peralatan. Pada alternatif 1, dimana alternatifnya adalah mempertahankan aset lama, maka tidak ada biaya investasi yang diperlukan. Dengan ini, maka biaya investasi dianggap nol.

b. Biaya Pemeliharaan

Biaya pemeliharaan merupakan biaya yang dikeluarkan oleh perusahaan secara rutin untuk menjaga peralatan dapat beroperasi sesuai performa yang diinginkan. Biaya pemeliharaan generator terdiri dari biaya preventive maintenance, biaya periodic maintenance, biaya penggantian pelumas, biaya pemakaian gas CO₂, dan biaya penggantian carbon brush. Tabel 4.9 menunjukkan biaya pemeliharaan generator.

Tabel 4.9 Biaya pemeliharaan generator alternatif 1

Biaya Maintenance	Jumlah	Satuan	Harga	Total/Tahun
Biaya PM	1	lot	125.611.572	125.611.572
Biaya OH per 2 tahun	1	lot	835.755.487	417.877.744
Biaya Penggantian Pelumas	13	drum/tahun	6.550.000	85.150.000
Biaya Pemakaian CO ₂	60	tabung	924.500	55.470.000
Biaya Penggantian Carbon Brush	90	pieces	1.225.000	110.250.000

Total biaya pemeliharaan per tahun adalah sebesar Rp. 794.359.316,-

c. Biaya Operasi

Biaya operasi adalah biaya yang dikeluarkan untuk memenuhi kebutuhan pengoperasian peralatan. Biaya tersebut terdiri dari biaya

tenaga kerja (Operator), biaya pemakaian air dan gas hidrogen sebagai pendingin generator, sebagaimana ditampilkan pada tabel 4.10.

Tabel 4.10 Biaya Operasi Generator alternatif 1

Biaya Operasi	Jumlah	Satuan	Harga satuan	Total/Tahun
Biaya Operator	3	orang / bulan	6.405.214	153.725.136
Pemakaian Gas Hidrogen	14.820	Nm ³ / tahun	28.082	416.175.240
Pemakaian Air pendingin	1.539	m ³ / Tahun	28.104	43.252.056

Dengan demikian jumlah biaya operasi tahunan generator adalah sebesar Rp. 613.152.432,-.

d. Biaya Failure

Biaya failure adalah biaya yang timbul karena adanya kerusakan atau gangguan pada generator. Setiap gangguan yang timbul memunculkan dua macam biaya, yaitu biaya perbaikan terhadap gangguan dan biaya akibat hilangnya kesempatan produksi. Biaya perbaikan diambil dari rata-rata biaya perbaikan selama rentang tahun 2011-2018. Data jumlah jam stop operasi ditampilkan pada tabel 4.11.

Tabel 4.11 Jumlah Force Outage Hour Generator

Tahun	FOH (hour)	Total Loss (MwH)	Jumlah Kejadian
2011	-	0	
2012	-	0	
2013	1.836	550.870	4
2014	3.576	1.072.800	6
2015	4.545	1.363.625	8
2016	18	5.400	1
2017	-	0	
2018	429	128.835	1
2019	-	0	

Dari data tersebut, dapat dihitung laju kegagalan peralatan adalah sebesar 2,22 kali/tahun dan durasi lama stop peralatan per

kejadian selama 521 jam. Dengan demikian, rata-rata jam stop operasi dari generator adalah 1.158 jam per tahun. Biaya yang timbul atas hilangnya kesempatan produksi adalah:

$$\begin{aligned}\text{Biaya atas hilangnya kesempatan produksi} &= \text{jam stop} \times \\ &\text{kapasitas pembangkit} \times \text{margin} \times 1000 \\ &= 1.158 \text{ jam/tahun} \times 300 \text{ MW/jam} \times \text{Rp } 144/\text{kw} \times 1000 \\ &\text{kw/Mw} \\ &= \text{Rp } 50.045.280.000,- / \text{tahun}\end{aligned}$$

Biaya perbaikan rata-rata berdasarkan data pada tabel 4.5 adalah sebesar Rp. 1.600.998.659,- / tahun. Biaya failure tahunan yang timbul adalah penjumlahan dari biaya perbaikan ditambah dengan biaya atas hilangnya kesempatan produksi yakni sebesar Rp. 51.646.278.659,- / tahun.

e. Biaya Disposal

Biaya disposal adalah biaya yang timbul saat memutuskan penghentian penggunaan peralatan. Biaya tersebut terdiri dari biaya pembongkaran dan nilai sisa dari peralatan tersebut. Berdasarkan data historis diketahui bahwa biaya pembongkaran yang dibutuhkan adalah sebesar Rp. 1.041.745.814 ,-. Sedangkan nilai sisa dari peralatan adalah nilai perolehan tersebut dibagi dengan usia pakai peralatan. Dari tabel 4.8 didapatkan biaya perolehan generator sebesar Rp. 165.947.114.883,-. Dengan usia pakai selama 30 tahun, didapatkan nilai sisa peralatan sebesar Rp. 5.531.570.496,-. Biaya disposal merupakan pengurangan dari biaya pembongkaran dengan nilai sisa sebesar Rp. 4.489.824.683,-.

f. Life cycle cost alternatif 1

Life cycle cost merupakan penjumlahan dari seluruh biaya yang timbul selama rentang waktu yang telah ditetapkan. Dalam penelitian ini digunakan waktu selama 21 tahun. Tabel 4.12 menunjukkan hasil

perhitungan biaya operasi, biaya pemeliharaan, dan biaya failure selama rentang waktu 21 tahun dari tahun 2020 sampai dengan tahun 2040 dengan tingkat inflasi 5%.

Tabel 4.12 Hasil perhitungan komponen biaya alternatif 1

Tahun	Biaya Investasi	Biaya Operasi	Biaya Pemeliharaan	Biaya Failure	Biaya Disposal
1	0	613.152.432	785.114.316	51.646.278.659	
2		643.810.054	824.370.031	54.228.592.592	
3		676.000.556	865.588.533	56.940.022.221	
4		709.800.584	908.867.960	59.787.023.332	
5		745.290.613	954.311.358	62.776.374.499	
6		782.555.144	1.002.026.925	65.915.193.224	
7		821.682.901	1.052.128.272	69.210.952.885	
8		862.767.046	1.104.734.685	72.671.500.530	
9		905.905.399	1.159.971.420	76.305.075.556	
10		951.200.668	1.217.969.991	80.120.329.334	
11		998.760.702	1.278.868.490	84.126.345.800	
12		1.048.698.737	1.342.811.915	88.332.663.091	
13		1.101.133.674	1.409.952.510	92.749.296.245	
14		1.156.190.358	1.480.450.136	97.386.761.057	
15		1.213.999.875	1.554.472.643	102.256.099.110	
16		1.274.699.869	1.632.196.275	107.368.904.066	
17		1.338.434.863	1.713.806.088	112.737.349.269	
18		1.405.356.606	1.799.496.393	118.374.216.732	
19		1.475.624.436	1.889.471.213	124.292.927.569	
20		1.549.405.658	1.983.944.773	130.507.573.947	
21		1.626.875.941	2.083.142.012	137.032.952.645	-4.489.824.683

Dari table 4.12 kemudian dilakukan perhitungan life cycle cost menggunakan metode present value dengan diskon rate sebesar 12,5%. Hasil perhitungan ditunjukkan pada table 4.13.

Tabel 4.13 Hasil perhitungan present value komponen biaya untuk alternative 1

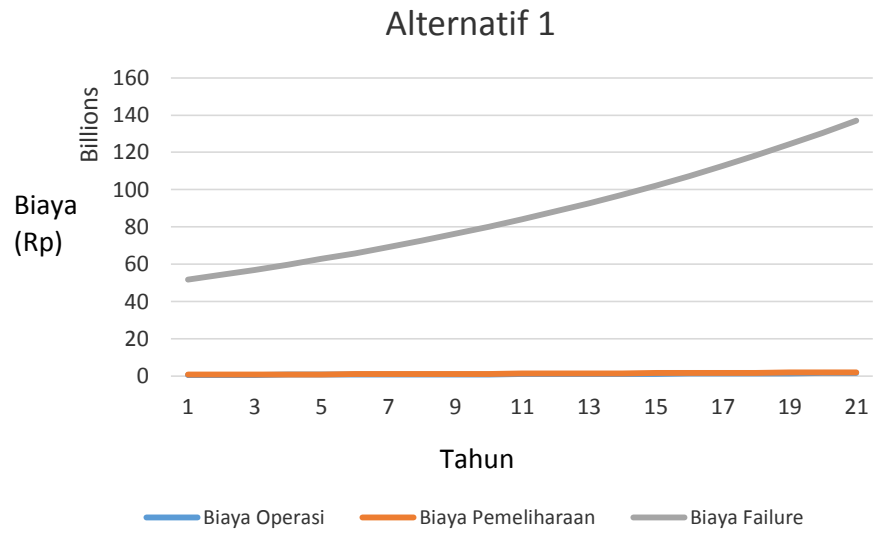
Tahun	Biaya Investasi	Diskon rate	PV Biaya Operasi	PV Biaya Pemeliharaan	PV Biaya Failure	Biaya Disposal
1	0	1	613,152,432	785,114,316	51,646,278,659	
2		0.888888889	572,275,603	732,773,361	48,203,193,415	
3		0.790123457	534,123,896	683,921,804	44,989,647,187	
4		0.702331962	498,515,637	638,327,017	41,990,337,375	
5		0.624295077	465,281,261	595,771,882	39,190,981,550	
6		0.554928957	434,262,510	556,053,757	36,578,249,446	
7		0.493270184	405,311,676	518,983,506	34,139,699,483	
8		0.438462386	378,290,898	484,384,606	31,863,719,518	
9		0.389744343	353,071,504	452,092,299	29,739,471,550	
10		0.346439416	329,533,404	421,952,812	27,756,840,113	
11		0.307946148	307,564,511	393,822,625	25,906,384,106	
12		0.273729909	287,060,210	367,567,783	24,179,291,832	
13		0.243315475	267,922,863	343,063,264	22,567,339,043	
14		0.216280422	250,061,338	320,192,380	21,062,849,774	
15		0.192249264	233,390,582	298,846,221	19,658,659,789	
16		0.170888235	217,831,210	278,923,140	18,348,082,470	
17		0.151900653	203,309,130	260,328,264	17,124,876,972	
18		0.135022803	189,755,188	242,973,046	15,983,218,507	
19		0.120020269	177,104,842	226,774,843	14,917,670,606	
20		0.106684684	165,297,852	211,656,520	13,923,159,233	
21		0.09483083	154,277,996	197,546,086	12,994,948,617	-4,489,824,683

Total life cycle cost untuk rentang waktu pengoperasian selama 21 tahun adalah penjumlahan antara biaya investasid awal, total biaya operasi, total biaya pemeliharaan, total biaya failure, dan biaya disposal d akhir periode.

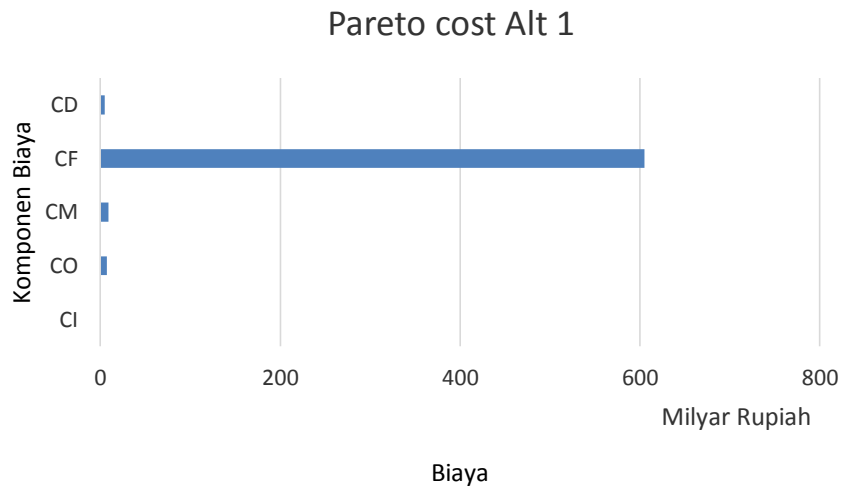
$$LCC = CI + CO + CM + CF + CD$$

$$LCC = 0 + 7.037.394.543 + 9.011.069.534 + 592.764.899.244 + (-4.489.824.683)$$

$$LCC = \text{Rp. } 604.323.538.638,-$$



Gambar 4.2 Biaya Tahunan dari tiap komponen biaya untuk alternative 1



Gambar 4.3 *Pareto cost* alternative 1

4.1.3.2 Perhitungan LCC alternatif 2

a. Biaya Investasi

Biaya investasi adalah biaya pembelian termasuk pemasangan peralatan. Pada alternatif 2, upaya untuk meningkatkan keandalan generator adalah dengan melakukan modifikasi pada seal ring generator dari single flow, menjadi double flow. Hal ini dilakukan sesuai hasil RCFA (Root Cause Failure Analysis) yang dilakukan, dimana salah satu penyebab kebocoran hidrogen adalah karena kegagalan pada seal ring. Untuk melakukan modifikasi tersebut, dibutuhkan biaya investasi sebagaimana ditunjukkan pada tabel 4.14 berikut.

Tabel 4.14 Data biaya modifikasi seal ring generator

Item Pekerjaan	Jumlah	Satuan	Harga(Rp)	Total(Rp)
Mob Demob inc insurance	2	trip	98.000.000	196.000.000
Seal ring	2	set	210.500.000	421.000.000
PDCV dan Piping	2	lot	75.000.000	150.000.000
Machining Shaft	1	lot	1.332.680.181	1.332.680.181
Pemasangan Seal ring, PDCV, piping dan instrumentasi	1	lot	125.000.000	125.000.000
Setting dan commissioning	1	lot	50.000.000	50.000.000
Tools and equipment	1	lot	130.000.000	130.000.000
Special tool lifting	1	lot	25.000.000	25.000.000
Material and consumable	1	lot	40.000.000	40.000.000
Fabrikasi spesial tools	1	lot	163.500.000	163.500.000

Jumlah biaya yang dibutuhkan untuk melakukan modifikasi seal ring adalah sebesar Rp. 2.633.180.181,-. Dikarenakan modifikasi harus dilakukan di kedua sisi, yaitu sisi turbin dan sisi exciter, maka total biaya yang dibutuhkan adalah sebesar Rp. 5.266.360.362,-.

4.2 Biaya Pemeliharaan

Biaya pemeliharaan merupakan biaya yang dikeluarkan oleh perusahaan secara rutin untuk menjaga peralatan dapat beroperasi sesuai performa yang diinginkan. Biaya pemeliharaan generator terdiri dari biaya preventive maintenance, biaya periodic maintenance, biaya penggantian pelumas, biaya pemakaian gas CO₂, dan biaya penggantian carbon brush. Tabel 4.15 menunjukkan biaya pemeliharaan generator.

Tabel 4.15 Biaya pemeliharaan generator alternatif 2

Biaya Maintenance	Jumlah	Satuan	Harga	Total/Tahun
Biaya PM	1	lot	125.611.572	125.611.572
Biaya OH per 2 tahun	1	lot	835.755.487	417.877.744
Biaya Penggantian Pelumas	10	drum/tahun	6.550,000	65.500.000
Biaya Pemakaian CO ₂	50	tabung	924.500	46.225.000
Biaya Penggantian Carbon Brush	90	pieces	1.225.000	110.250.000

Total biaya pemeliharaan per tahun adalah sebesar Rp. 748.134.316,-. Pada table 4.17 terlihat perbedaan pada pemakaian gas CO₂. Hal ini dikarenakan setelah adanya modifikasi, akan mengurangi tingkat kegagalan dari generator sehingga jumlah start/stop peralatan jukan akan berkurang. Dengan demikian pemakaian gas CO₂ ikut berkurang. Fungsi gas CO₂ digunakan saat proses start maupun stop generator yang berfungsi untuk menghilangkan sisa gas Hidrogen pada generator sehingga tidak membahayakan karena sifatnya yang eksplosive.

b. Biaya Operasi

Biaya operasi adalah biaya yang dikeluarkan untuk memenuhi kebutuhan pengoperasian peralatan. Biaya tersebut terdiri dari biaya tenaga kerja (Operator), biaya pemakaian air dan gas hidrogen sebagai pendingin generator, sebagaimana ditampilkan pada tabel 4.16.

Tabel 4.16 Biaya Operasi Generator alternatif 2

Biaya Operasi	Jumlah	Satuan	Harga satuan	Total/Tahun
Biaya Operator	3	orang / bulan	6.405.214	153.725.136
Pemakaian Gas Hidrogen	10.308	Nm ³ / tahun	28.082	289.469.256
Pemakaian Air pendingin	1.539	m ³ / Tahun	28.104	43.252.056

Dengan demikian jumlah biaya operasi tahunan generator adalah sebesar Rp. 486.446.448,-.

c. Biaya Failure

Biaya failure adalah biaya yang timbul karena adanya kerusakan atau gangguan pada generator. Setiap gangguan yang timbul memunculkan dua macam biaya, yaitu biaya perbaikan terhadap gangguan dan biaya akibat hilangnya kesempatan produksi. Biaya failure tahunan dihitung dengan menggunakan data historis rata-rata gangguan generator. Biaya atas hilangnya kesempatan produksi menggunakan rata-rata jumlah jam stop produksi dikalikan dengan margin keuntungan penjualan. Sedangkan biaya perbaikan diambil dari rata-rata biaya perbaikan selama rentang tahun 2011-2018. Setelah dilakukan modifikasi, diasumsikan bahwa kegagalan generator yang diakibatkan karena terjadinya kebocoran hydrogen yang diakibatkan kegagalan fungsi seal ring sudah tidak akan terjadi lagi. Data jumlah jam stop operasi ditampilkan pada tabel 4.17.

Tabel 4.17 Jumlah Force Outage Hour Generator alternatif 2

Tahun	FOH (hour)	Total Loss (MwH)	Jumlah Kegagalan
2011	-	0	
2012	-	0	
2013	1.553	465.900	3
2014	3.597	1.079.100	4
2015	4.545	1.363.625	8
2016 - 2019	-	0	

Dari data tersebut, dapat dihitung laju kegagalan peralatan adalah sebesar 1,89 kali/tahun dan durasi lama stop peralatan per kejadian selama 570 jam. Dengan demikian, rata-rata jam stop operasi dari generator adalah 1.077 jam per tahun. Biaya yang timbul atas hilangnya kesempatan produksi adalah:

$$\begin{aligned} \text{Biaya atas hilangnya kesempatan produksi} &= \text{jam stop} \times \text{kapasitas} \\ &\text{pembangkit} \times \text{margin} \times 1000 \\ &= 1.077 \text{ jam/tahun} \times 300 \text{ MW/jam} \times \text{Rp } 144/\text{kw} \times 1000 \text{ kw/Mw} \\ &= \text{Rp } 46.538.000.000,- / \text{ tahun} \end{aligned}$$

Biaya perbaikan rata-rata berdasarkan data pada tabel 4.5 adalah sebesar Rp. 1.329.882.259,- / tahun. Biaya failure tahunan yang timbul adalah penjumlahan dari biaya perbaikan ditambah dengan biaya atas hilangnya kesempatan produksi yakni sebesar Rp. 47.867.882.259,- / tahun.

d. Biaya Disposal

Biaya disposal adalah biaya yang timbul saat memutuskan penghentian penggunaan peralatan. Biaya tersebut terdiri dari biaya pembongkaran dan nilai sisa dari peralatan tersebut. Berdasarkan data historis diketahui bahwa biaya pembongkaran yang dibutuhkan adalah sebesar Rp. 1.041.745.814,-. Sedangkan nilai sisa dari peralatan adalah nilai perolehan tersebut dibagi dengan usia pakai peralatan. Dari tabel 4.8 didapatkan biaya perolehan generator sebesar Rp. 165.947.114.883,-. Dengan usia pakai selama 30 tahun, didapatkan nilai sisa peralatan sebesar Rp. 5.531.570.496,-. Biaya disposal merupakan pengurangan dari biaya pembongkaran dengan nilai sisa sebesar Rp. 4.489.824.683,-.

e. Life cycle cost alternatif 2

Perhitungan life cycle cost sama dengan cara perhitungan pada alternative 1. Tabel 4.18 menunjukkan hasil perhitungan life cycle cost selama rentang waktu 21 tahun dari tahun 2020 sampai dengan tahun 2040 menggunakan metode present value.

Tabel 4.18 Hasil perhitungan komponen biaya alternatif 2

Tahun	Biaya Investasi	Biaya Operasi	Biaya Pemeliharaan	Biaya Failure	Biaya Disposals
1	5,266,360,362	486,446,448	765,464,316	47,867,882,259	
2		510,768,770	803,737,531	50,261,276,372	
3		536,307,209	843,924,408	52,774,340,191	
4		563,122,569	886,120,628	55,413,057,201	
5		591,278,698	930,426,660	58,183,710,061	
6		620,842,633	976,947,993	61,092,895,564	
7		651,884,764	1,025,795,392	64,147,540,342	
8		684,479,003	1,077,085,162	67,354,917,359	
9		718,702,953	1,130,939,420	70,722,663,227	
10		754,638,100	1,187,486,391	74,258,796,388	
11		792,370,005	1,246,860,711	77,971,736,208	
12		831,988,506	1,309,203,746	81,870,323,018	
13		873,587,931	1,374,663,933	85,963,839,169	
14		917,267,327	1,443,397,130	90,262,031,127	
15		963,130,694	1,515,566,987	94,775,132,684	
16		1,011,287,229	1,591,345,336	99,513,889,318	
17		1,061,851,590	1,670,912,603	104,489,583,784	
18		1,114,944,169	1,754,458,233	109,714,062,973	
19		1,170,691,378	1,842,181,145	115,199,766,121	
20		1,229,225,947	1,934,290,202	120,959,754,428	
21		1,290,687,244	2,031,004,712	127,007,742,149	-4,489,824,683

Tabel 4.19 Hasil perhitungan present value komponen biaya untuk alternative 2

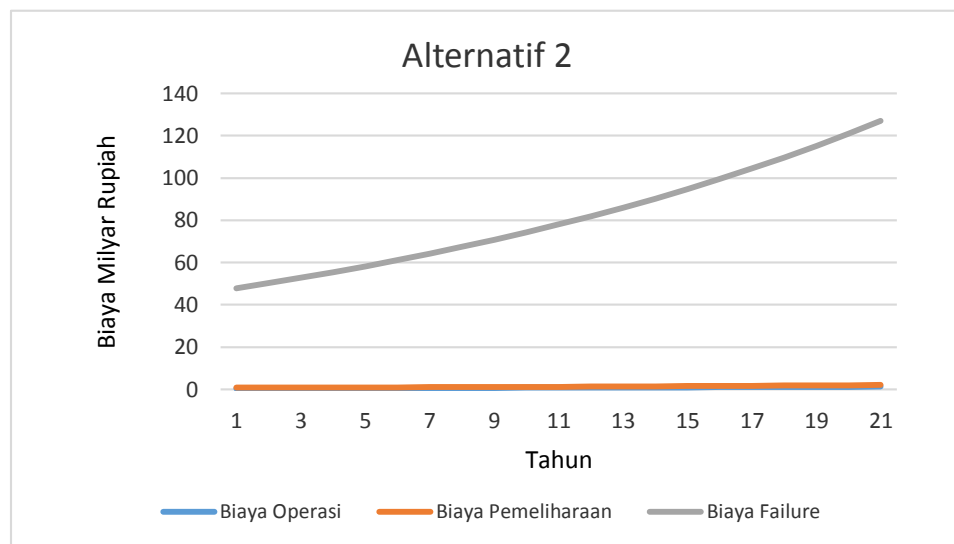
Tahun	Biaya Investasi	Diskon rate	PV Biaya Operasi	PV Biaya Pemeliharaan	PV Biaya Failure	Biaya Disposal
1	5,266,360,362	1	486,446,448	748,134,316	23,804,510,076	
2		0.888888889	454,016,685	698,258,695	22,217,542,738	
3		0.790123457	423,748,906	651,708,115	20,736,373,222	
4		0.702331962	395,498,979	608,260,907	19,353,948,340	
5		0.624295077	369,132,380	567,710,180	18,063,685,118	
6		0.554928957	344,523,555	529,862,835	16,859,439,443	
7		0.493270184	321,555,318	494,538,646	15,735,476,814	
8		0.438462386	300,118,297	461,569,403	14,686,445,026	
9		0.389744343	280,110,410	430,798,109	13,707,348,691	
10		0.346439416	261,436,383	402,078,235	12,793,525,445	
11		0.307946148	244,007,291	375,273,020	11,940,623,749	
12		0.273729909	227,740,138	350,254,818	11,144,582,165	
13		0.243315475	212,557,462	326,904,497	10,401,610,021	
14		0.216280422	198,386,965	305,110,864	9,708,169,353	
15		0.192249264	185,161,167	284,770,140	9,060,958,063	
16		0.170888235	172,817,089	265,785,464	8,456,894,192	
17		0.151900653	161,295,950	248,066,433	7,893,101,246	
18		0.135022803	150,542,887	231,528,671	7,366,894,496	
19		0.120020269	140,506,694	216,093,426	6,875,768,196	
20		0.106684684	131,139,581	201,687,197	6,417,383,650	
21		0.09483083	122,396,942	188,241,384	5,989,558,073	- 4,489,824,683

Total life cycle cost untuk rentang waktu pengoperasian selama 21 tahun adalah penjumlahan antara biaya investasi di awal periode, total biaya operasi, total biaya pemeliharaan, total biaya failure, dan biaya disposal di akhir periode.

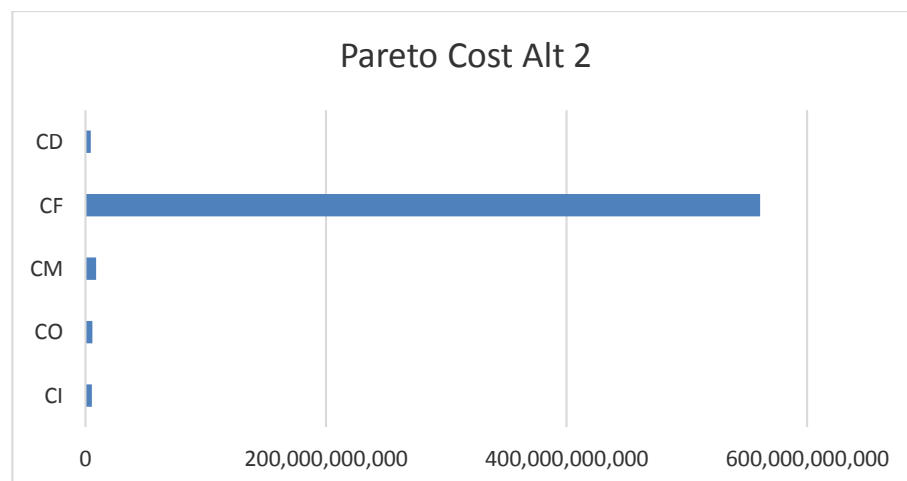
$$LCC = CI + CO + CM + CF + CD$$

$$LCC = 5.266.360.362 + 5.583.139.526 + 8.785.538.662 + 549.398.739.683 + (-4.489.824.683)$$

$$LCC = \text{Rp. } 564.543.953.550,-$$



Gambar 4.4 Biaya Tahunan dari tiap komponen biaya untuk alternatif 2



Gambar 4.5 Pareto cost alternatif 2

4.2.1.1 Perhitungan LCC alternatif 3

a. Biaya Investasi

Biaya investasi adalah biaya pembelian termasuk pemasangan peralatan. Pada alternatif 3, upaya untuk meningkatkan keandalan generator adalah dengan melakukan penggantian generator dengan pabrikan yang sama dengan peralatan sebelumnya (OEM). Untuk melakukan penggantian tersebut, dibutuhkan biaya investasi sebagaimana ditunjukkan pada tabel 4.8, yaitu sebesar Rp. 185.000.000.000,-.

b. Biaya Pemeliharaan

Biaya pemeliharaan merupakan biaya yang dikeluarkan oleh perusahaan secara rutin untuk menjaga peralatan dapat beroperasi sesuai performa yang diinginkan. Biaya pemeliharaan generator terdiri dari biaya preventive maintenance, biaya periodic maintenance, biaya penggantian pelumas, biaya pemakaian gas CO₂, dan biaya penggantian carbon brush. Tabel 4.20 menunjukkan biaya pemeliharaan generator.

Tabel 4.20 Biaya pemeliharaan generator alternatif 3

Biaya Maintenance	Jumlah	Satuan	Harga	Total/Tahun
Biaya PM	1	lot	125.611.572	125.611.572
Biaya OH per 2 tahun	1	lot	835.755.487	417.877.744
Biaya Penggantian Pelumas	13	drum/tahun	6.550.000	85.150.000
Biaya Pemakaian CO ₂	20	tabung	924.500	18.490.000
Biaya Penggantian Carbon Brush	90	pieces	1.225.000	110.250.000

Total biaya pemeliharaan per tahun adalah sebesar Rp. 757.379.316,-. Pada table 4.22 terlihat perbedaan pada pemakaian gas CO₂. Hal ini dikarenakan setelah adanya penggantian, tingkat kegagalan dari generator diharapkan berkurang sehingga pemakaian gas CO₂ ikut berkurang.

c. Biaya Operasi

Biaya operasi adalah biaya yang dikeluarkan untuk memenuhi kebutuhan pengoperasian peralatan. Biaya tersebut terdiri dari biaya tenaga kerja (Operator), biaya pemakaian air dan gas hidrogen sebagai pendingin generator, sebagaimana ditampilkan pada tabel 4.21.

Tabel 4.21 Biaya Operasi Generator alternatif 3

Biaya Operasi	Jumlah	Satuan	Harga satuan	Total/Tahun
Biaya Operator	3	orang / bulan	6.405.214	153.725.136
Pemakaian Gas Hidrogen	10.308	Nm ³ / tahun	28.082	289.469.256
Pemakaian Air pendingin	1.539	m ³ / Tahun	28.104	43.252.056

Dengan demikian jumlah biaya operasi tahunan generator adalah sebesar Rp. 486.446.448,-.

d. Biaya Failure

Biaya failure adalah biaya yang timbul karena adanya kerusakan atau gangguan pada generator. Setiap gangguan yang timbul memunculkan dua macam biaya, yaitu biaya perbaikan terhadap gangguan dan biaya akibat hilangnya kesempatan produksi. Peralatan generator yang akan dibeli menggunakan desain seal ring double flow. Data tersebut ditampilkan pada tabel 4.22.

Tabel 4.22 Data gangguan peralatan Generator OEM

Data	Nilai	Satuan
Laju kerusakan	1,2	Kali / tahun
Jumlah rata-rata FOH	245	Jam / tahun
Estimasi biaya perbaikan per gangguan	690.000.000	Rupiah / kejadian

Rata-rata jam stop operasi dari generator adalah 245 jam per tahun. Dengan demikian biaya yang timbul atas hilangnya kesempatan produksi adalah:

$$\begin{aligned} \text{Biaya atas hilangnya kesempatan produksi} &= \text{jam stop} \times \text{kapasitas} \\ &\text{pembangkit} \times \text{margin} \times 1000 \\ &= 245 \text{ jam/tahun} \times 300 \text{ MW/jam} \times \text{Rp } 144/\text{kw} \times 1000\text{kw/Mw} \\ &= \text{Rp } 10.576.360.000,- / \text{tahun} \end{aligned}$$

Biaya perbaikan rata-rata berdasarkan data pada tabel 4.24 adalah sebesar Rp. 690.000.000,- / tahun. Biaya failure tahunan yang timbul adalah penjumlahan dari biaya perbaikan ditambah dengan biaya atas hilangnya kesempatan produksi yakni sebesar Rp. 11.265.360.000,- / tahun.

e. Biaya Disposal

Biaya disposal adalah biaya yang timbul saat memutuskan penghentian penggunaan peralatan. Biaya tersebut terdiri dari biaya pembongkaran dan nilai sisa dari peralatan tersebut. Berdasarkan data historis diketahui bahwa biaya pembongkaran yang dibutuhkan adalah sebesar Rp. 1.041.745.814,-. Sedangkan nilai sisa dari peralatan adalah nilai perolehan tersebut dibagi dengan usia pakai peralatan. Dari tabel 4.8 didapatkan biaya perolehan generator sebesar Rp. 185.000.000.000,-. Dengan usia pakai selama 30 tahun, didapatkan nilai sisa peralatan sebesar Rp. 6.166.666.667,-. Biaya disposal merupakan pengurangan dari biaya pembongkaran dengan nilai sisa yaitu sebesar Rp. 5.124.920.853,-.

f. *Life cycle cost* alternatif 3

Life cycle cost merupakan penjumlahan dari seluruh biaya yang timbul selama rentang waktu yang telah ditetapkan. Dalam penelitian ini digunakan waktu selama 21 tahun. Tabel 4.23 dan 4.24 menunjukkan hasil perhitungan *life cycle cost* selama rentang waktu 21 tahun dari tahun 2020 sampai dengan tahun 2040 menggunakan metode *present value*.

Tabel 4.23 Hasil perhitungan komponen biaya alternatif 3

Tahun	Biaya Investasi	Biaya Operasi	Biaya Pemeliharaan	Biaya Failure	Biaya Disposal
1	185,000,000,000	486,446,448	701,124,316	11,265,360,000	
2		510,768,770	736,180,531	11,828,628,000	
3		536,307,209	772,989,558	12,420,059,400	
4		563,122,569	811,639,036	13,041,062,370	
5		591,278,698	852,220,988	13,693,115,489	
6		620,842,633	894,832,037	14,377,771,263	
7		651,884,764	939,573,639	15,096,659,826	
8		684,479,003	986,552,321	15,851,492,818	
9		718,702,953	1,035,879,937	16,644,067,459	
10		754,638,100	1,087,673,934	17,476,270,831	
11		792,370,005	1,142,057,630	18,350,084,373	
12		831,988,506	1,199,160,512	19,267,588,592	
13		873,587,931	1,259,118,537	20,230,968,021	
14		917,267,327	1,322,074,464	21,242,516,422	
15		963,130,694	1,388,178,188	22,304,642,243	
16		1,011,287,229	1,457,587,097	23,419,874,356	
17		1,061,851,590	1,530,466,452	24,590,868,073	
18		1,114,944,169	1,606,989,774	25,820,411,477	
19		1,170,691,378	1,687,339,263	27,111,432,051	
20		1,229,225,947	1,771,706,226	28,467,003,653	
21		1,290,687,244	1,860,291,538	29,890,353,836	-5,124,920,853

Tabel 4.24 Hasil perhitungan present value komponen biaya untuk alternative 3

Tahun	Biaya Investasi	Diskon rate	PV Biaya Operasi	PV Biaya Pemeliharaan	PV Biaya Failure	Biaya Disposal
1	185,000,000,000	1	486,446,448	757,379,316	11,887,440,000	
2		0.888888889	454,016,685	706,887,361	11,094,944,000	
3		0.790123457	423,748,906	659,761,537	10,355,281,067	
4		0.702331962	395,498,979	615,777,435	9,664,928,996	
5		0.624295077	369,132,380	574,725,606	9,020,600,396	
6		0.554928957	344,523,555	536,410,565	8,419,227,036	
7		0.493270184	321,555,318	500,649,861	7,857,945,234	

Tabel 4.24 Hasil perhitungan present value komponen biaya untuk alternative 3 (lanjutan)

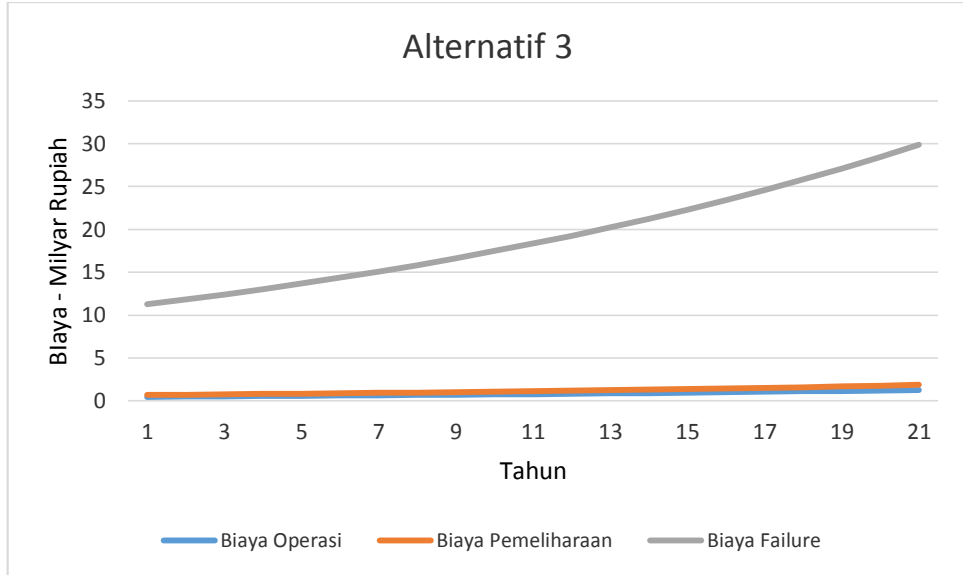
8		0.438462386	300,118,297	467,273,204	7,334,082,218	
9		0.389744343	280,110,410	436,121,657	6,845,143,404	
10		0.346439416	261,436,383	407,046,880	6,388,800,510	
11		0.307946148	244,007,291	379,910,421	5,962,880,476	
12		0.273729909	227,740,138	354,583,060	5,565,355,111	
13		0.243315475	212,557,462	330,944,189	5,194,331,437	
14		0.216280422	198,386,965	308,881,243	4,848,042,674	
15		0.192249264	185,161,167	288,289,160	4,524,839,829	
16		0.170888235	172,817,089	269,069,883	4,223,183,841	
17		0.151900653	161,295,950	251,131,891	3,941,638,251	
18		0.135022803	150,542,887	234,389,765	3,678,862,368	
19		0.120020269	140,506,694	218,763,780	3,433,604,877	
20		0.106684684	131,139,581	204,179,528	3,204,697,885	
21		0.09483083	122,396,942	190,567,560	2,991,051,359	5,124,920,853

Total *life cycle cost* untuk rentang waktu pengoperasian selama 21 tahun adalah penjumlahan antara biaya investasi di awal periode, total biaya operasi, total biaya pemeliharaan, total biaya failure, dan biaya disposal di akhir periode.

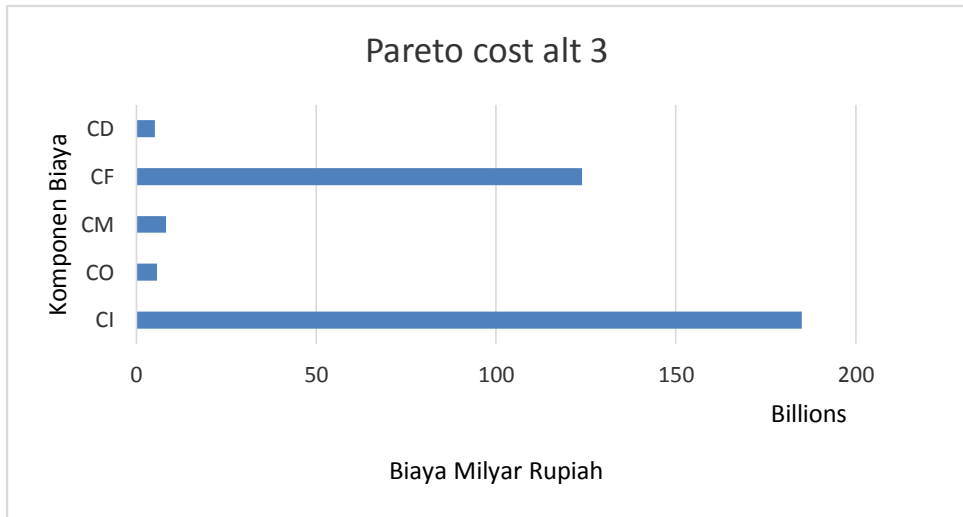
$$LCC = CI + CO + CM + CF + CD$$

$$LCC = 185.000.000.000 + 5.583.139.526 + 8.047.082.870 + 129.297.021.177 + (-5.124.920.853)$$

$$LCC = \text{Rp. } 322.802.322.719,-$$



Gambar 4.6 Biaya Tahunan dari tiap komponen biaya untuk alternatif 3



Gambar 4.7 Pareto cost alternative 3

4.2.1.2 Perhitungan LCC alternatif 4

a. Biaya Investasi

Biaya investasi adalah biaya pembelian termasuk pemasangan peralatan. Pada alternatif 4, upaya untuk meningkatkan keandalan generator adalah dengan melakukan penggantian generator dengan pabrikan yang berbeda dengan peralatan sebelumnya (non-OEM).

Untuk melakukan penggantian tersebut, dibutuhkan biaya investasi sebagaimana ditunjukkan pada tabel 4.8, yaitu sebesar Rp. 282.821.518.509,-.

b. Biaya Pemeliharaan

Biaya pemeliharaan merupakan biaya yang dikeluarkan oleh perusahaan secara rutin untuk menjaga peralatan dapat beroperasi sesuai performa yang diinginkan. Biaya pemeliharaan generator terdiri dari biaya preventive maintenance, biaya periodic maintenance, biaya penggantian pelumas, biaya pemakaian gas CO₂, dan biaya penggantian carbon brush. Tabel 4.25 menunjukkan biaya pemeliharaan generator.

Tabel 4.25 Biaya pemeliharaan generator alternatif 4

Biaya Maintenance	Jumlah	Satuan	Harga	Total/Tahun
Biaya PM	1	lot	125.611.572	125.611.572
Biaya OH per 2 tahun	1	lot	835.755.487	417.877.744
Biaya Penggantian Pelumas	3	drum/tahun	6.550.000	19.650.000
Biaya Pemakaian CO ₂	10	tabung	924.500	9.245.000
Biaya Penggantian Carbon Brush	50	pieces	1.225.000	61.250.000

Total biaya pemeliharaan per tahun adalah sebesar Rp. 633.634.316,-.

Pada table 4.27 terlihat perbedaan pada pemakain gas CO₂, pelumas dan carbon brush. Hal ini dikarenakan setelah adanya penggantian, tingkat keandalan dari generator diharapkan akan meningkat sehingga pemakaian gas CO₂, pelumas dan penggantian karbon brush ikut berkurang.

a. Biaya Operasi

Biaya operasi adalah biaya yang dikeluarkan untuk memenuhi kebutuhan pengoperasian peralatan. Biaya tersebut terdiri dari biaya

tenaga kerja (Operator), biaya pemakaian air dan gas hidrogen sebagai pendingin generator, sebagaimana ditampilkan pada tabel 4.26.

Tabel 4.26 Biaya Operasi Generator alternatif 4

Biaya Operasi	Jumlah	Satuan	Harga satuan	Total/Tahun
Biaya Operator	3	orang / bulan	6.405.214	153.725.136
Pemakaian Gas Hidrogen	10.308	Nm ³ / tahun	28.082	289.469.256
Pemakaian Air pendingin	500	m ³ / Tahun	28.104	144.052.000

Dalam biaya pengoperasian generator terdapat penurunan pemakaian air pendingin. Hal ini diasumsikan karena system cooling water berfungsi dengan baik, sehingga tidak terjadi kebocoran pada system. Dari data tersebut diatas, jumlah biaya operasi tahunan generator dengan menggunakan peralatan non – OEM adalah sebesar Rp. 457.246.392,-.

b. Biaya Failure

Biaya failure adalah biaya yang timbul karena adanya kerusakan atau gangguan pada generator. Setiap gangguan yang timbul memunculkan dua macam biaya, yaitu biaya perbaikan terhadap gangguan dan biaya akibat hilangnya kesempatan produksi. Data failure generator non-OEM didapatkan dari informasi manufaktur berdasarkan informasi gangguan yang terjadi. Data tersebut ditampilkan pada tabel 4.27.

Tabel 4.27 Data gangguan peralatan Generator non - OEM

Data	Nilai	Satuan
Laju kerusakan	0,2	Kali / tahun
Jumlah rata-rata FOH	95	Jam / tahun
Estimasi biaya perbaikan per gangguan	600.000.000	Rupiah / kejadian

Rata-rata jam stop operasi dari generator adalah 95 jam per tahun. Dengan demikian biaya yang timbul atas hilangnya kesempatan produksi adalah:

$$\begin{aligned}\text{Biaya atas hilangnya kesempatan produksi} &= \text{jam stop} \times \text{kapasitas pembangkit} \times \text{margin} \times 1000 \\ &= 95 \text{ jam/tahun} \times 300 \text{ MW/jam} \times \text{Rp } 144/\text{kw} \times 1000\text{kw/Mw} \\ &= \text{Rp } 4.112.640.000,- / \text{ tahun}\end{aligned}$$

Biaya perbaikan rata-rata berdasarkan data pada tabel 4.29 adalah sebesar Rp. 600.000.000,- / tahun. Biaya failure tahunan yang timbul adalah penjumlahan dari biaya perbaikan ditambah dengan biaya atas hilangnya kesempatan produksi yakni sebesar Rp. 4.712.640.000,- / tahun.

c. Biaya Disposal

Biaya disposal adalah biaya yang timbul saat memutuskan penghentian penggunaan peralatan. Biaya tersebut terdiri dari biaya pembongkaran dan nilai sisa dari peralatan tersebut. Berdasarkan data historis diketahui bahwa biaya pembongkaran yang dibutuhkan adalah sebesar Rp. 1.041.745.814,-. Sedangkan nilai sisa dari peralatan adalah nilai perolehan tersebut dibagi dengan usia pakai peralatan. Dari tabel 4.8 didapatkan biaya perolehan generator sebesar Rp. 282.821.518.509,-. Dengan usia pakai selama 30 tahun, didapatkan nilai sisa peralatan sebesar Rp. 9.427.383.950,-. Biaya disposal merupakan pengurangan dari biaya pembongkaran dengan nilai sisa yaitu sebesar Rp. 8.385.638.137,-.

d. Life cycle cost alternatif 4

Life cycle cost merupakan penjumlahan dari seluruh biaya yang timbul selama rentang waktu yang telah ditetapkan. Dalam penelitian ini digunakan waktu selama 21 tahun. Tabel 4.28 dan 4.29

menunjukkan hasil perhitungan life cycle cost selama rentang waktu 21 tahun dari tahun 2020 sampai dengan tahun 2040 menggunakan metode present value.

Tabel 4.28 Hasil perhitungan komponen biaya alternatif 4

Tahun	Biaya Investasi	Biaya Operasi	Biaya Pemeliharaan	Biaya Failure	Biaya Disposal
1	282,821,518,509	457,246,392	633,634,316	4,712,640,000	
2		480,108,712	665,316,031	4,948,272,000	
3		504,114,147	698,581,833	5,195,685,600	
4		529,319,855	733,510,925	5,455,469,880	
5		555,785,847	770,186,471	5,728,243,374	
6		583,575,140	808,695,794	6,014,655,543	
7		612,753,897	849,130,584	6,315,388,320	
8		643,391,591	891,587,113	6,631,157,736	
9		675,561,171	936,166,469	6,962,715,623	
10		709,339,230	982,974,792	7,310,851,404	
11		744,806,191	1,032,123,532	7,676,393,974	
12		782,046,501	1,083,729,709	8,060,213,673	
13		821,148,826	1,137,916,194	8,463,224,356	
14		862,206,267	1,194,812,004	8,886,385,574	
15		905,316,580	1,254,552,604	9,330,704,853	
16		950,582,409	1,317,280,234	9,797,240,095	
17		998,111,530	1,383,144,246	10,287,102,100	
18		1,048,017,106	1,452,301,458	10,801,457,205	
19		1,100,417,962	1,524,916,531	11,341,530,065	
20		1,155,438,860	1,601,162,358	11,908,606,569	
21		1,213,210,803	1,681,220,475	12,504,036,897	-8,385,638,137

Tabel 4.29 Hasil perhitungan present value komponen biaya untuk alternative 4

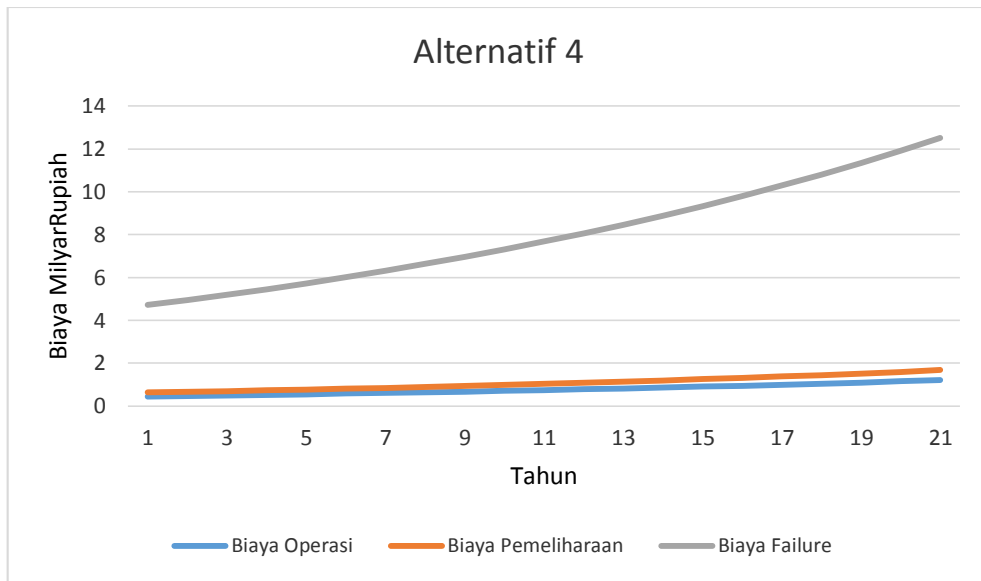
Tahun	Biaya Investasi	Diskon rate	PV Biaya Operasi	PV Biaya Pemeliharaan	PV Biaya Failure	Biaya Disposal
1	282,821,518,509	1	457,246,392	633,634,316	4,712,640,000	
2		0.888888889	426,763,299	591,392,028	4,398,464,000	
3		0.790123457	398,312,413	551,965,893	4,105,233,067	
4		0.702331962	371,758,252	515,168,167	3,831,550,862	
5		0.624295077	346,974,368	480,823,622	3,576,114,138	
6		0.554928957	323,842,744	448,768,714	3,337,706,529	
7		0.493270184	302,253,227	418,850,800	3,115,192,760	
8		0.438462386	282,103,012	390,927,413	2,907,513,243	
9		0.389744343	263,296,145	364,865,585	2,713,679,027	
10		0.346439416	245,743,069	340,541,213	2,532,767,092	
11		0.307946148	229,360,197	317,838,466	2,363,915,952	
12		0.273729909	214,069,517	296,649,235	2,206,321,555	
13		0.243315475	199,798,216	276,872,619	2,059,233,452	
14		0.216280422	186,478,335	258,414,444	1,921,951,222	
15		0.192249264	174,046,446	241,186,815	1,793,821,140	
16		0.170888235	162,443,350	225,107,694	1,674,233,064	
17		0.151900653	151,613,793	210,100,514	1,562,617,527	
18		0.135022803	141,506,207	196,093,813	1,458,443,025	
19		0.120020269	132,072,460	183,020,892	1,361,213,490	
20		0.106684684	123,267,629	170,819,499	1,270,465,924	
21		0.09483083	115,049,787	159,431,533	1,185,768,196	-8,385,638,137

Total life cycle cost untuk rentang waktu pengoperasian selama 21 tahun adalah penjumlahan antara biaya investasi di awal periode, total biaya operasi, total biaya pemeliharaan, total biaya failure, dan biaya disposal di akhir periode.

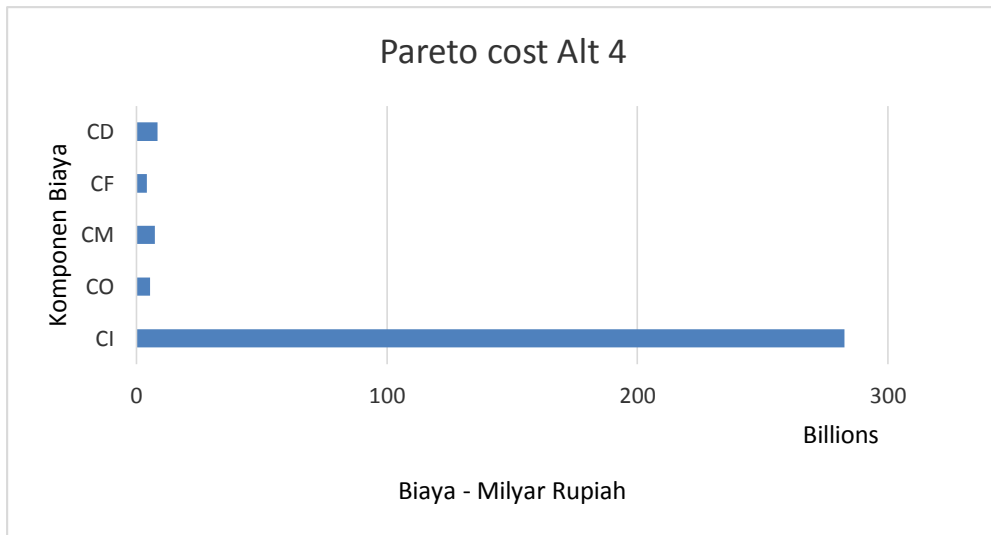
$$LCC = CI + CO + CM + CF + CD$$

$$LCC = 282.821.518.509 + 5.247.998.859 + 7.272.473.274 + 54.088.845.263 + (-8.385.638.137)$$

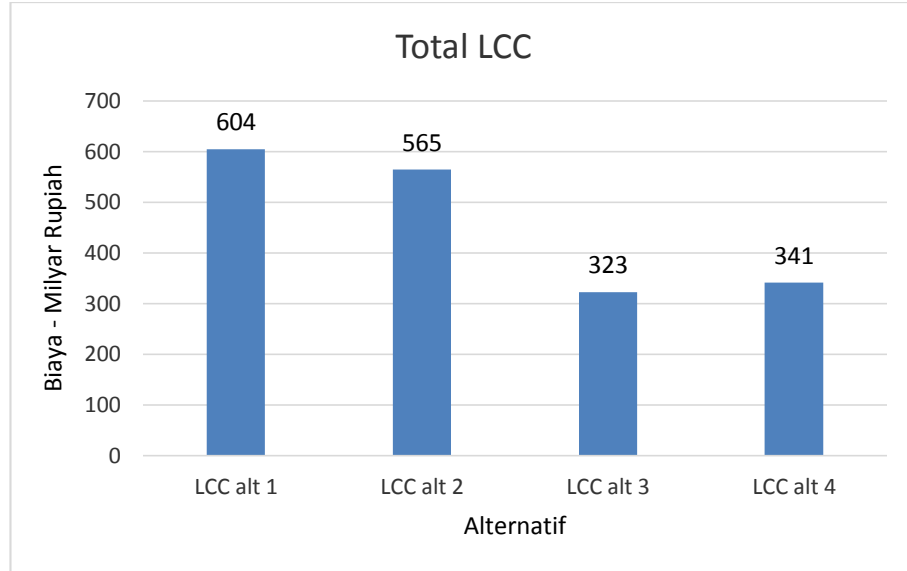
$$LCC = \text{Rp. } 341.045.197.768,-$$



Gambar 4.8 Biaya Tahunan dari tiap komponen biaya untuk alternatif 4



Gambar 4.9 Pareto cost alternative 4



Gambar 4.10 Total Life Cycle Cost Untuk setiap alternative selama rentang waktu 21 tahun

Gambar 4.8 terlihat bahwa total life cycle cost yang paling rendah dalam rentang waktu pengoperasian selama 21 tahun adalah alternative 3, dengan nilai life cycle cost sebesar Rp. 322.802.322.719,-. Dengan melakukan investasi yang tidak terlalu besar, yaitu dengan alternatif 2, didapatkan penghematan sebesar Rp. 39.779.585.088,- dalam rentang waktu 21 tahun ke depan. Alternatif 2 bisa menjadi pilihan yang menarik apabila belum tersedia anggaran untuk melakukan penggantian.

4.3.2 Perhitungan Analisa Penggantian

Analisa penggantian menggunakan metode biaya tahunan rata-rata yang merupakan penjumlahan dari biaya pengembalian modal (*Capital Recovery*) dan biaya operasi rata-rata tahunan (*Equivalent Annual Operating Cost*).

a) Perhitungan *Capital Recovery* (CR), EAOC dan EUAC Defender

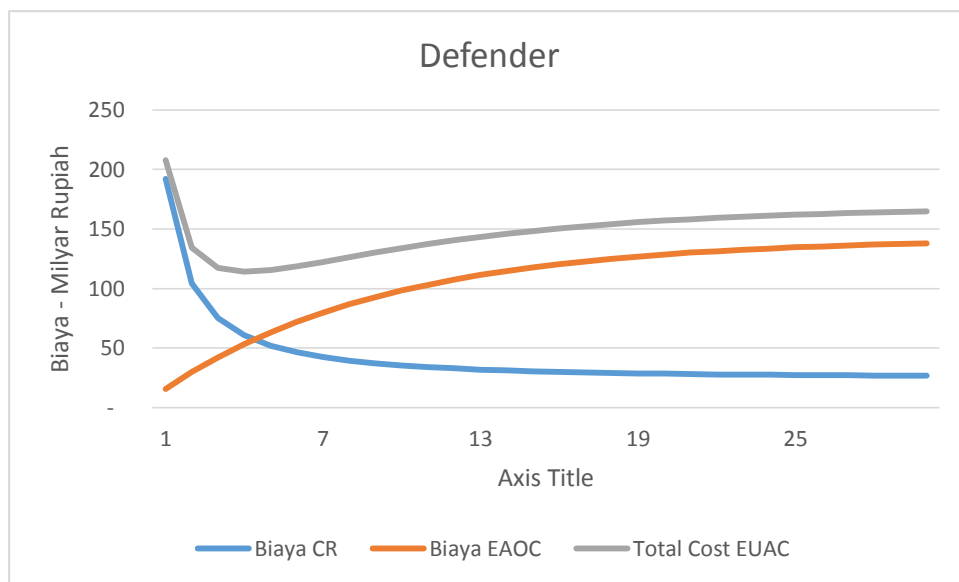
Capital recovery dihitung berdasarkan nilai pembelian peralatan, tingkat suku bunga dan nilai sisa dari peralatan. Tabel 4.30, menampilkan hasil perhitungan tingkat pengembalian modal, biaya operasi peralatan yang meliputi biaya operasi, biaya maintenance dan *failure cost* selama jangka waktu pemakaian atau usia peralatan yaitu selama 30 tahun. Untuk menghitung nilai sisa peralatan digunakan metode depresiasi garis lurus, yaitu dengan membagi nilai pembelian dengan usia pakai peralatan. Nilai sisa peralatan defender sebesar Rp. 5.500.000.000,-.

Tabel 4.30 Capital Recovery , EAOC, dan EUAC Defender

Tahun	Biaya CR	Biaya EAOC	Total Cost EUAC
1	192,222,074,739	15,787,041,486	208,009,116,226
2	104,367,719,801	29,819,967,251	134,187,687,053
3	75,217,887,748	42,293,679,043	117,511,566,791
4	60,743,488,384	53,381,422,857	114,124,911,241
5	52,138,487,978	63,237,195,137	115,375,683,115
6	46,467,368,463	71,997,881,608	118,465,250,071
7	42,471,908,675	79,785,158,471	122,257,067,146
8	39,522,880,739	86,707,182,349	126,230,063,088
9	37,270,616,381	92,860,092,463	130,130,708,844
10	35,505,234,092	98,329,345,898	133,834,579,990
11	34,093,106,512	103,190,904,506	137,284,011,018
12	32,945,094,450	107,512,289,936	140,457,384,386
13	31,999,442,349	111,353,521,429	143,352,963,778
14	31,212,004,366	114,767,949,423	145,979,953,789
15	30,550,380,054	117,802,996,529	148,353,376,583
16	29,990,249,109	120,500,816,178	150,491,065,288
17	29,512,999,630	122,898,878,089	152,411,877,719
18	29,104,146,807	125,030,488,676	154,134,635,483
19	28,752,250,786	126,925,253,643	155,677,504,429
20	28,448,158,958	128,609,489,168	157,057,648,126
21	28,184,464,513	130,106,587,414	158,291,051,926

Tabel 4.30 Capital Recovery , EAO, dan EUAC Defender

22	27,955,112,421	131,437,341,409	159,392,453,830
23	27,755,107,961	132,620,233,850	160,375,341,811
24	27,580,297,881	133,671,693,797	161,251,991,677
25	27,427,203,845	134,606,324,861	162,033,528,706
26	27,292,894,098	135,437,108,029	162,730,002,127
27	27,174,883,440	136,175,581,957	163,350,465,396
28	27,071,054,433	136,832,003,225	163,903,057,658
29	26,979,594,742	137,415,488,797	164,395,083,540
30	26,898,946,833	137,934,142,639	164,833,089,473



Gambar 4.11 Capital Recovery , EAO, dan EUAC Defender

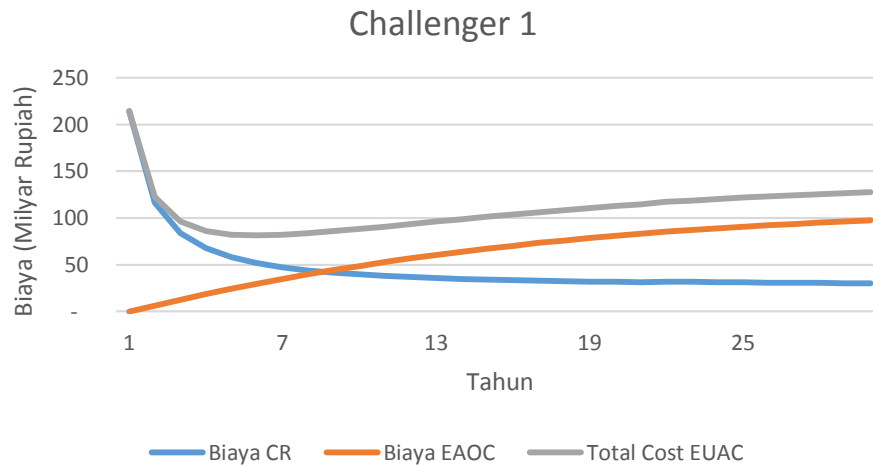
Dari gambar 4.11 terlihat bahwa biaya tahunan terendah didapatkan pada tahun ke-4. Setelah itu biaya EAO yang meliputi biaya operasi, pemeliharaan, biaya gangguan mengalami kenaikan yang signifikan.

b. Perhitungan *Capital Recovery* (CR), EAOC dan EUAC Challenger 1

Dengan cara yang sama pada perhitungan defender, didapatkan hasil perhitungan untuk challenger 1 sebagaimana ditampilkan pada table 4.31.

Tabel 4.31 *Capital Recovery* , EAOC, dan EUAC Challenger 1

Tahun	Biaya CR	Biaya EAOC	Total Cost EUAC
1	214,291,666,667	11,069,271,790	225,360,938,457
2	116,350,490,196	20,908,624,492	137,259,114,688
3	83,853,878,648	29,654,715,783	113,508,594,431
4	67,717,630,156	37,429,019,153	105,146,649,308
5	58,124,663,889	44,339,511,037	102,464,174,926
6	51,802,426,163	50,482,170,490	102,284,596,652
7	47,348,235,673	55,942,312,225	103,290,547,899
8	44,060,621,011	60,795,771,546	104,856,392,557
9	41,549,767,438	65,109,957,608	106,659,725,047
10	39,581,696,323	68,944,789,664	108,526,485,988
11	38,007,438,148	72,353,529,269	110,360,967,417
12	36,727,619,384	75,383,520,029	112,111,139,414
13	35,673,394,134	78,076,845,150	113,750,239,283
14	34,795,548,038	80,470,911,923	115,266,459,961
15	34,057,960,658	82,598,971,277	116,656,931,935
16	33,433,519,403	84,490,579,592	117,924,098,994
17	32,901,475,482	86,172,009,205	119,073,484,687
18	32,445,681,042	87,666,613,306	120,112,294,348
19	32,053,382,785	88,995,150,284	121,048,533,069
20	31,714,377,264	90,176,072,042	121,890,449,306
21	31,419,166,667	91,225,780,272	122,644,946,939
22	32,053,382,785	92,158,854,254	124,212,237,039
23	31,714,377,264	92,988,253,349	124,702,630,613
24	31,420,407,270	93,725,496,989	125,145,904,259
25	31,164,722,577	94,380,824,669	125,545,547,247
26	30,941,755,007	94,963,338,163	125,905,093,169
27	30,746,874,458	95,481,127,935	126,228,002,392
28	30,576,203,237	95,941,385,510	126,517,588,747
29	30,426,472,986	96,350,503,354	126,776,976,341
30	30,294,913,171	96,714,163,661	127,009,076,831



Gambar 4.12 *Capital Recovery* , *EAO*, dan *EUAC Challenger 1*

Grafik 4.12 menunjukkan bahwa penggantian dengan peralatan OEM memiliki biaya tahunan terendah pada tahun ke-6. Setelah tahun ke-6, biaya tahunan peralatan mengalami kenaikan.

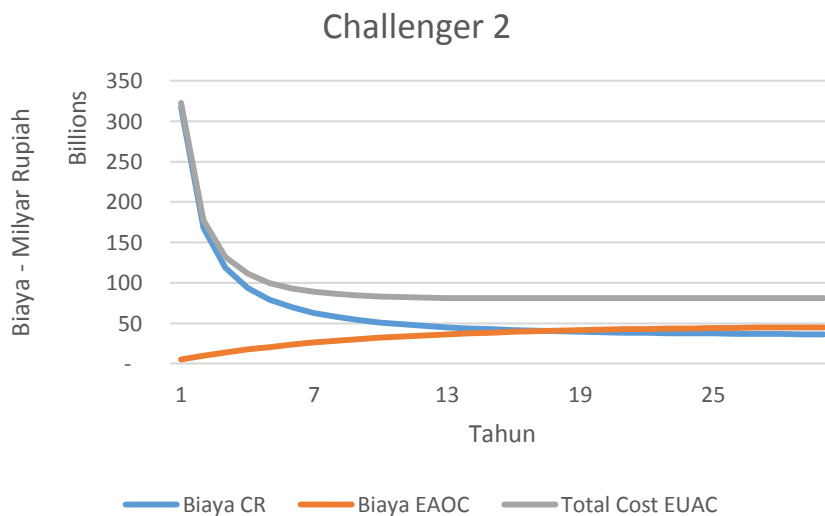
c. Perhitungan *Capital Recovery* (CR), *EAO* dan *EUAC Challenger 2*

Tabel 4.32 *Capital Recovery* , *EAO*, dan *EUAC Challenger 2*

Tahun	Biaya CR	Biaya EAO	Total Cost EUAC
1	317,250,000,000	5,158,685,073	322,408,685,073
2	167,955,882,353	9,744,182,916	177,700,065,269
3	118,420,506,912	13,820,180,999	132,240,687,912
4	93,823,630,832	17,443,290,406	111,266,921,238
5	79,200,839,009	20,663,832,101	99,864,671,110
6	69,563,698,259	23,526,535,830	93,090,234,089
7	62,774,067,351	26,071,161,367	88,845,228,717
8	57,762,676,352	28,333,050,733	86,095,727,085
9	53,935,321,176	30,343,619,058	84,278,940,234
10	50,935,342,504	32,130,790,903	83,066,133,406
11	48,535,662,474	33,719,388,098	82,255,050,572
12	46,584,803,602	35,131,474,494	81,716,278,096
13	44,977,822,409	36,386,662,401	81,364,484,810
14	43,639,700,253	37,502,384,986	81,142,085,238
15	42,515,377,868	38,494,138,394	81,009,516,262

Tabel 4.32 *Capital Recovery* , *EAOC*, dan *EUAC Challenger 2* (lanjutan)

16	41,563,526,873	39,375,696,979	80,939,223,852
17	40,752,519,383	40,159,304,610	80,911,823,993
18	40,057,740,832	40,855,844,727	80,913,585,559
19	39,459,751,056	41,474,991,498	80,934,742,553
20	38,942,996,694	42,025,344,182	80,968,340,876
21	38,494,891,081	42,514,546,569	81,009,437,650
22	38,105,144,685	42,949,393,135	81,054,537,820
23	37,765,269,794	43,335,923,415	81,101,193,209
24	37,468,208,633	43,679,505,887	81,147,714,519
25	37,208,050,340	43,984,912,528	81,192,962,868
26	36,979,812,876	44,256,385,099	81,236,197,975
27	36,779,273,049	44,497,694,050	81,276,967,099
28	36,602,832,622	44,712,190,896	81,315,023,518
29	36,447,411,826	44,902,854,758	81,350,266,584
30	36,310,363,885	45,072,333,748	81,382,697,633



Gambar 4.13 *Capital Recovery* , *EAOC*, dan *EUAC Challenger 2*

Pada gambar 4.13, menunjukkan bahwa penggantian dengan peralatan non- OEM memiliki biaya tahunan terendah pada tahun ke-17. Jauh

lebih lama dari defender dan challenger 1. Setelah tahun ke-17, biaya tahunan peralatan mengalami kenaikan, namun tidak signifikan.

d. Perhitungan *Capital Recovery* (CR), EAO dan EUAC Alternatif 2

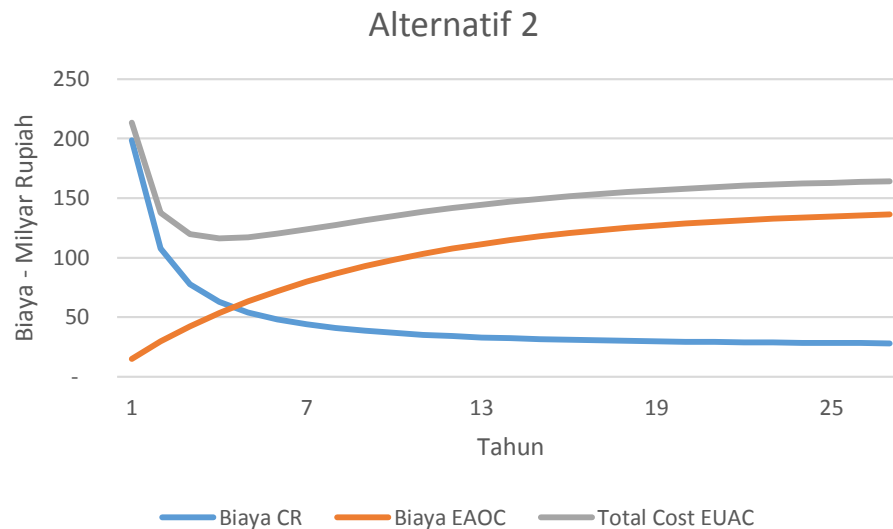
Tabel 4.33 Menampilkan hasil perhitungan CR, EAO dan EUAC untuk alternatif 2 yaitu melakukan modifikasi pada seal ring generator.

Tabel 4.33 *Capital Recovery* (CR), EAO dan EUAC Alternatif 2

Tahun	Biaya CR	Biaya EAO	Total Cost EUAC
1	198,322,275,492	15,126,251,035	213,448,526,527
2	107,679,847,421	29,819,967,251	137,499,814,673
3	77,604,940,412	42,293,679,043	119,898,619,454
4	62,671,193,483	53,381,422,857	116,052,616,340
5	53,793,111,902	63,237,195,137	117,030,307,039
6	47,942,018,429	71,997,881,608	119,939,900,037
7	43,819,762,034	79,785,158,471	123,604,920,505
8	40,777,146,188	86,707,182,349	127,484,328,537
9	38,453,405,831	92,860,092,463	131,313,498,294
10	36,631,998,830	98,329,345,898	134,961,344,728
11	35,175,057,137	103,190,904,506	138,365,961,643
12	33,990,612,715	107,512,289,936	141,502,902,651
13	33,014,950,180	111,353,521,429	144,368,471,610
14	32,202,522,717	114,767,949,423	146,970,472,140
15	31,519,901,644	117,802,996,529	149,322,898,172
16	30,941,994,846	120,500,816,178	151,442,811,025
17	30,449,599,772	122,898,878,089	153,348,477,861
18	30,027,771,935	125,030,488,676	155,058,260,611
19	29,664,708,432	126,925,253,643	156,589,962,075
20	29,350,966,197	128,609,489,168	157,960,455,366
21	29,078,903,364	130,106,587,414	159,185,490,777
22	28,842,272,743	131,437,341,409	160,279,614,152

Tabel 4.33 *Capital Recovery (CR), EAO dan EUAC Alternatif 2 (lanjutan)*

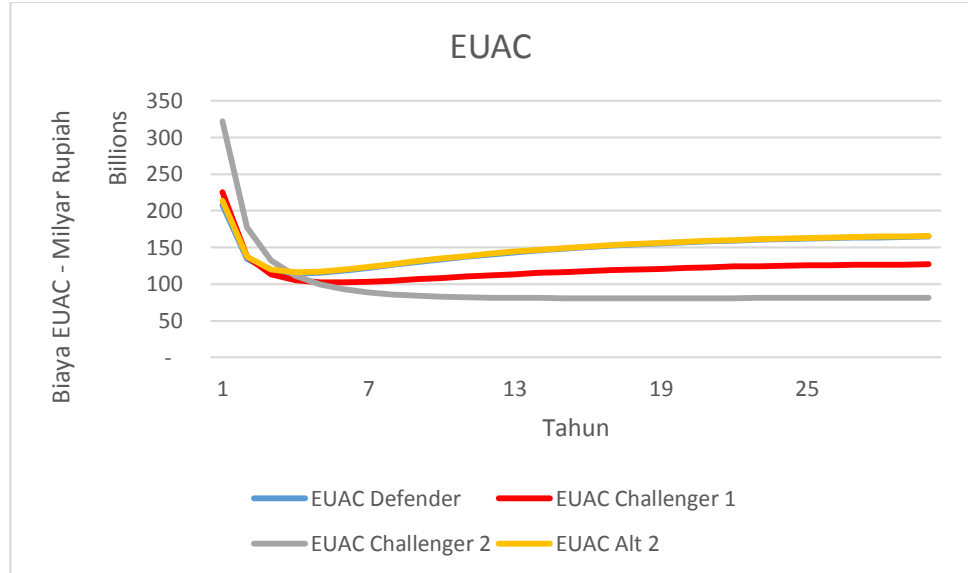
23	28,635,921,107	132,620,233,850	161,256,154,957
24	28,455,563,399	133,671,693,797	162,127,257,196
25	28,297,610,897	134,606,324,861	162,903,935,758
26	28,159,038,808	135,437,108,029	163,596,146,837
27	28,037,283,061	136,175,581,957	164,212,865,017
28	27,930,159,023	136,832,003,225	164,762,162,248
29	27,835,796,843	137,415,488,797	165,251,285,640
30	27,752,589,559	137,934,142,639	165,686,732,198



Gambar 4.14 *Capital Recovery, EAO, dan EUAC Alternatif 2*

Untuk alternatif 2, biaya tahunan minimal didapatkan pada tahun ke-4, sama dengan alternatif 1. Hal ini disebabkan karena selisih biaya failure dan investasi tidak berdampak secara signifikan. Perbedaan antara alternatif 1 dan 2 adalah pada biaya tahunan rata-rata yang lebih murah.

Gambar 4.15 di bawah ini menunjukkan perbandingan EUAC (biaya tahunan rata-rata) dari defender dan challenger.



Gambar 4.15 EUAC Defender vs Challenger 1, Challenger 2 dan alternatif2

Gambar 4.15 menunjukkan perbandingan antara EUAC defender dengan Challenger 1 dan 2, serta alternatif 2, dimana terlihat bahwa biaya tahunan rata-rata dari challenger 2 memiliki nilai paling rendah. Hal ini dikompensasikan dengan biaya investasi di awal yang tinggi. Masa ekonomis dari challenger 2 juga memiliki jangka waktu yang paling lama yaitu 17 tahun.

4.3.3 Analisa Keandalan dan Penentuan Tingkat Kekritisan Peralatan

Analisa keandalan dan tingkat kekritisan peralatan generator dilakukan terhadap peralatan existing untuk mendukung pengambilan keputusan penggantian generator. Analisa tersebut dilakukan berdasarkan metode SERP yang berpedoman pada EPRI. Tabel 4.9 menampilkan hasil perhitungan penentuan Maintenance Priority Index (MPI) yang disusun berdasarkan System Criticality Ranking, Equipment Criticality Ranking dan kondisi peralatan. Tabel 4.33 menunjukkan asset atau peralatan kritis yang disusun berdasarkan Maintenance Priority Index (MPI) dari beberapa peralatan utama pembangkit di PLTU Labuan.

Tabel 4.34 Daftar Aset Kritis Peralatan Pembangkit Berdasarkan MPI

No	Nama Peralatan	SCR	ECR	ACR	RMS	MPI
1	HP Turbine	8.96	8.96	80.20	3.00	240.60
2	Generator #2	8.07	8.96	72.31	2.24	161.69
3	Kondensor A	8.96	7.59	67.97	2.24	151.98
4	Kondensor B	8.96	7.59	67.97	2.24	151.98
5	AVR Cabinet	8.07	7.94	64.09	2.24	143.31
6	Governor CV 3	8.96	7.16	64.08	2.24	143.29
7	High Pressure Heater No. 3	7.62	5.85	44.54	3.00	133.61
8	Steam Drum	8.02	6.97	55.94	2.24	125.10
9	Medium Speed Mill (MSM) A	7.62	7.11	54.17	2.24	121.14
10	Medium Speed Mill (MSM) B	7.62	7.11	54.17	2.24	121.14

Dari perhitungan yang dilakukan dengan metode SERP, kondisi peralatan generator saat ini menempati urutan kedua sebagai peralatan yang paling kritis. Ini berarti tingkat kegagalan, pemeliharaan yang diperlukan serta kerugian yang ditimbulkan meningkat.

Berdasarkan data kerusakan pada tabel 4.1, dilakukan analisa keandalan peralatan generator menggunakan distribusi Weibull. Analisa keandalan bertujuan untuk mendapatkan nilai keandalan, laju kegagalan, dan Mean Time To Failure (MTTF) dari peralatan. Tabel 4.34 menunjukkan data kumulatif gangguan generator. Data tersebut digunakan untuk menghitung parameter skala (α) dan parameter bentuk (β) dari distribusi Weibull.

Tabel 4.35 Perhitungan Jumlah Kumulatif Gangguan Generator

Tahun	Jumlah Failure	Kumulatif Failure (i)	Fungsi Kumulatif $F(t)=i/(n+1)$
2011	0	0	0,0000
2012	0	0	0,0000
2013	4	4	0,2000
2014	5	9	0,4500
2015	8	17	0,8500
2016	1	18	0,9000
2017	0	18	0,9000
2018	1	19	0,9500

Tabel 4.36 Hasil Perhitungan nilai X dan Y

Tahun	Jumlah Failure	Fungsi Kumulatif $F(t)=i/(n+1)$	$X=\ln(t)$	$Y=\ln\ln(1/1-F(t))$
1	0	0,0000	0,0000	0
2	0	0,0000	0,6931	0
3	4	0,2000	1,0986	-1,3821
4	5	0,4500	1,3863	-0,3655
5	8	0,8500	1,6094	0,6403
6	1	0,9000	1,7918	0,834
7	0	0,9000	1,9459	0
8	1	0,9500	2,0794	1,0971

Tabel 4.34 dan 4.35 menampilkan hasil perhitungan keandalan untuk generator *existing*. Dengan menggunakan persamaan (11), (14), (5), dan (8) didapatkan nilai parameter skala, parameter bentuk, laju kegagalan dan MTTF. Hasil perhitungan ditunjukkan pada tabel 4.39. Dengan persamaan di atas, didapatkan nilai laju kegagalan generator *existing* adalah sebesar 1,6749 kali / tahun (rata-rata) dan nilai MTTF sebesar 0,59704 tahun. Dari tabel 4.36 didapatkan nilai rata-rata untuk $F(t)$ adalah sebesar 0,53125. Berdasarkan rumus (2) maka didapatkan nilai keandalan peralatan generator sebesar 47%. Nilai MTTF sebesar 0,59704 tahun menunjukkan bahwa tingkat kerusakan peralatan sudah

lebih singkat daripada durasi *periodic maintenance* yang dilaksanakan dalam rentang waktu 2 tahun. Dengan laju kegagalan sebesar 1,6749 kali/tahun perlu dilakukan analisa penyebab kerusakan dan perlu dipertimbangkan alternatif untuk meningkatkan keandalan generator.

Tabel 4.37 Nilai laju kegagalan dan MTTF peralatan Generator

Tahun	Shape parameter (β)	Scale parameter (α)	Laju Kegagalan (λ)(kali/tahun)	MTTF (Tahun)
1	1,000836244	0,597889914	1,6739	0,59704
2			1,6744	
3			1,6747	
4			1,6749	
5			1,6751	
6			1,6752	
7			1,6754	
8			1,6754	

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa keandalan dan biaya yang dilakukan terhadap peralatan generator, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dalam upaya meningkatkan keandalan generator dipilih empat alternatif tindakan, dan berdasarkan metode life cycle cost, didapatkan nilai LCC untuk alternative 1 sebesar Rp.604.323.538.638,-; alternative 2 sebesar Rp. 564.543.953.550,-; alternative 3 sebesar Rp. 322.802.322.719,-; dan alternative 4 sebesar Rp.341.045.197.768,-.
2. Dari perhitungan LCC direkomendasikan untuk melakukan penggantian dengan peralatan non-OEM (Alternatif 4). Hal ini mempertimbangkan masa ekonomis peralatan yang lebih panjang (17 tahun) dan biaya tahunan rata-rata yang lebih rendah dibandingkan dengan alternatif yang lainnya.
3. Dengan menggunakan *replacement analysis*, disarankan untuk melakukan penggantian dengan peralatan non-OEM pada tahun ke-4, dimana biaya tahunan rata-rata peralatan *existing* mulai mengalami peningkatan.
4. Tingkat keandalan generator *existing* telah mengalami penurunan sejak pertama kali dioperasikan sampai saat ini mencapai 47%, dengan tingkat laju kerusakan sebesar 1,67 kali per tahun dan nilai MTTF sebesar 0,597 tahun. Nilai MTTF sudah jauh dari standar pemeliharaan periodik yang dilaksanakan dalam waktu 2 tahun sekali.

4.2 Saran

1. Perlu kajian lebih lanjut terkait keandalan peralatan generator jika alternative kedua, yaitu melakukan modifikasi seal ring dilaksanakan dan pengaruhnya terhadap kebocoran oli dan hydrogen pada generator.
2. Perlu dibandingkan distribusi kegagalan menggunakan metode distribusi yang lain selain distribusi Weibull.
3. Perusahaan perlu mempertimbangkan jadwal pemeliharaan periodik dan mitigasi resiko apabila memilih untuk tetap mempertahankan peralatan yang ada saat ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Barabady, "Improvement of System Availability Using Reliability and Maintainability Analysis," 2005, doi: ISSN: 0280-8242.
- [2] W. B. R. Shanaz, "Analisis Availibility dan Reliability Komponen Kritis Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap," 2015.
- [3] P. G. Basuki, T. Haryono, and Harnoko, "Analisa kenaikan suhu belitan pada generator 60 MW Mrica," *J. Penelit. Tek. Elektro Vol.3*, 2010.
- [4] R. S. Wicaksono and I. A. I. Agung, "Analisis Gangguan Generator di PLTA Mendalan Malang," *Tek. Elektro*, vol. 7, no. 2, pp. 93–99, 2018.
- [5] Flownex, "GENERATOR – SEAL OIL," *Power Gener.*
- [6] A. Winardi, "Final Report RLA Generator Unit 2 Labuan," 2017.
- [7] Ahmadi, B. Santoso, and A. Maulana, "Analisa Pemilihan Alutsista TNI AL dengan Metode Life Cycle Cost dan Analytic Network Process (ANP) (Studi Kasus Kapal Layar Latih)," 2014.
- [8] H. Barringer and D. Weber, *Life Cycle Cost Tutorial*. 1996.
- [9] K. Janitra, K. Widyanugrah, and R. Setiawardani, "Perhitungan Life Cycle Cost Sistem Pendingin Ruangan Pada Gedung Hotel Goldvitel Surabaya," pp. 203–210, 2017.
- [10] Alzahri, "Penerapan Life Cycle Cost pada Dermaga (Studi kasus pada dermaga Teluk Bayur)," 2013.
- [11] R. F. Mardiansyah, E. Kusrini, and F. RM, "Analisa ekonomis peralatan pulverizer untuk optimalisasi keandalan PLTU dengan simulasi Monte Carlo dan pendekatan analisa biaya siklus hidup (Studi kasus: PLTU X)," *Teknoin*, vol. 23, no. 3, pp. 275–288, 2017, doi: 10.20885/teknoin.vol23.iss3.art8.
- [12] N. I. Sinisuka and H. Nugraha, "Life cycle cost analysis on the operation of power generation," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 5–24, 2013, doi: 10.1108/13552511311304447.
- [13] A. E. Brom, O. V. Belova, and A. Sissinio, "Lifecycle Costs for Energy Equipment: FMECA & Lifecycle Costing Models as 'decision Making' Tools for Cost Reduction during the Whole Equipment Life," *Procedia Eng.*, vol. 152, pp. 173–176, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.687.

- [14] M. Ir. Fajardhani and T. K. Sari, “Analisis Penggantian (Replacement) Pembangkit Listrik Tenaga Diesel,” vol. 2, pp. 1–10, 2012.
- [15] Abdul Machmud Wibowo, “Usulan Penentuan Kebijakan Maintenance Mesin Jet dying menggunakan Metode Life Cycle Cost dan Replacement Analysis,” 2018.
- [16] M. Giatman, *Engineering Economic*. Jakarta: Rajawali Press, 2006.
- [17] Chan S. Park, *Fundamental of Engineering Economics*. Pearson, 2013.
- [18] W. G. Sullivan, *Engineering Economy*, Sixteenth. Pearson, 2015, 2015.
- [19] C. I. Wijayanti and W. Sutopo, “Analisis Kelayakan Penggantian Nozzle Soot Blower pada PT. PJB UP Paiton Unit 1 dan 2,” *PERFORMA Media Ilm. Tek. Ind.*, vol. 16, no. 1, pp. 26–35, 2017, doi: 10.20961/performa.16.1.12746.
- [20] Z. Abidin, “Analisis Pergantian Komponen Pada Intake Pump 56-GA-4001 di PT Pupuk Iskandar Muda,” vol. 3, no. 1, pp. 53–57, 2014.
- [21] E. Oktaviyani, “Analisa penggantian mesin produksi pt wahanamas panca jaya kudus: Suatu analisis Kualitatif dan kuantitatif,” 2013.
- [22] Do. E. Machinery, “Description of Generator (Document No.Q723.” 2004.
- [23] B. Yusuf and S. Y. Hasan, “Dokumen Life Cycle Management Generator Unit 2 PLTU Labuan,” 2016.
- [24] IP, “Durasi, Interval dan Ruang Lingkup Pemeliharaan Periodik di Lingkungan Direktorat Operasi PT. Indonesia Power - PLTU tipe Boiler Pulverized Coal Sub Critical,” 2018.
- [25] D. Kececioglu, “Reliability Engineering Handbook vol.1.” DESTech Publications, Inc, 2002.
- [26] N. M. Sudri, B. Nedissa, and Y. Herawati, “Analisis Sistem Perawatan Komponen Generator Starter pada Mesin Pesawat,” *J. Tek. dan Komput.*, pp. 287–293, 2012.
- [27] C. Ebellling, “An Introduction To Reliability and maintainability engineering.” McGraw Hill Companies. Inc, Boston, 1997.
- [28] J. C. Napitupulu and P. S. M. . Tobing, “Analisis keandalan transformator daya menggunakan metode distribusi weibull,” vol. 3, no. 3, pp. 112–117, 2013.
- [29] M. A. Pratama, “Analisa Reliability Dengan Menggunakan Metode Reliability entered Maintenance (RCM) II pada Sistem Stripper CO2 di PT. Petrokimia Gresik,” Sepuluh Nopember Institute of Technology, 2017.

- [30] I. G. N. R. Usadha, V. Lukitosari, and R. N. Rohmah, “Analisa Keandalan Pada Peralatan Unit Penggilingan Akhir Semen Untuk Menentukan Jadwal Perawatan Mesin,” *Semin. Nas. Mat. dan Apl.*, pp. 264–269, 2017.
- [31] EPRI, “Guideline on Proactive Maintenance,” 2001.
- [32] E. Hartini, S. Dibyo, S. Pujiarta, M. Reactor, K. Puspipetek, and T. Selatan, “Determination of maintenance priority index (mpi) for components on rsg-gas safety system 1),” vol. 22, no. 3, pp. 77–88, 2020, doi: 10.17146/tdm.2018.20.2.4283.
- [33] B. . Dhillon, *Life Cycle Costing for Engineers*, CRC Press, New York, 2010. 2010.
- [34] Norsok, “Life cycle cost for systems and equipment,” no. April, 1996.
- [35] U. D. of Energy, “Pump Life Cycle Cost: LCCA for Pumping Systems,” 2001.
- [36] J. Barret, “Life–cycle costing: Better Practice Guide,” no. December, pp. 1–36, 2001.
- [37] J. Bian, X. Sun, M. Wang, H. Zheng, and H. Xing, “Probabilistic Analysis of Life Cycle Cost for Power Transformer,” *J. Power Energy Eng.*, vol. 02, no. 04, pp. 489–494, 2014, doi: 10.4236/jpee.2014.24066.
- [38] J. G. Arief and M. A. Berawi, “Analisis Life Cycle cost Pengembangan Potensi Pariwisata Pada Conceptual Design Proyek JembatanSelat Sunda Dengan Pendekatan Value Engineering,” no. 1960, 2013.
- [39] H. P. Barringer and P. E. Barringer, “A Life Cycle Cost Summary International Conference of Maintenance Societies,” *ICOMS*, pp. 1–10, 2003.
- [40] RICS, “RICS Professional Guidance -Life cycle costing,” 2016.
- [41] D. D. Gransberg, “Major Equipment Life Cycle Cost analysis”, Final Report, Institute for Transportation, Iowa State University, Iowa,” 2015.
- [42] D. G. Newnan, T. E. G., and J. P. Lavelle, *Engineering Economic Analysis*, 9th ed. Oxford University Press, 2004.
- [43] Sugiyono, *Metode Penelitian Kualitatif Kuantitatif dan R&D*. Bandung: Alfabeta, 2013.

LAMPIRAN

A. Ruang lingkup pemeliharaan periodic peralatan Generator pembangkit

BID	SYSTEM EQUIPMENT	DESCRIPTION	JP TASK	JOB TASK	SI	ME	SE
HL	INSPEKSI GENERATOR SYSTEM	INSPEKSI MAIN GENERATOR	10	PERSIAPAN	√	√	√
HL			20	PENGUKURAN TAHANAN ISOLASI STATOR & ROTOR	√	√	√
HL			30	PENGUKURAN TAN - DELTA	√	√	√
HL			40	PENGUKURAN TAHANAN DALAM (Rdc)	√	√	√
HL			50	PENGUKURAN RSO PADA ROTOR	√	√	√
HL			60	PURGING GAS HYDROGEN	√	√	√
HL			70	OPEN COVER EXCITER	√	√	√
HL			80	CLEANING COOLER HYDROGEN	√	√	√
HL			90	CEK ALIGNMENT GENERATOR-LP TURBIN	√	√	√
HL			100	CEK ALIGNMENT GENERATOR-EXCITER	√	√	√
HL			110	CEK CLEARANCE BEARING GENERATOR	√	√	√
HL			120	LEPAS BEARING GENERATOR	√	√	√
HL			130	CEK CLEARANCE BEARING EXCITER	√	√	√
HL			140	CEK LABIRIN SEAL GENERATOR	√	√	√
HL			150	CEK CLEARANCE SEAL RING	√	√	√
HL			160	GANTI CARBON LABIRIN SEAL GENERATOR	√	√	√
HL			170	LEPAS BEARING EXCITER	√	√	√
HL			180	PULL- OUT GENERATOR	√	√	√
HL			190	CEK & CLEAN ROTOR GENERATOR	√	√	√
HL			200	CEK & CLEAN SEAL STRIP	√	√	√
HL			210	CEK & CLEAN BLOWER SHROUD	√	√	√
HL			220	CEK & CLEAN LEAD BUSHING SPACER POSITION	√	√	√
HL			230	CEK KEKENCANGAN KONEKSI TERMINAL DAN ISOLATOR BUSHING OUTPUT GENERATOR	√	√	√
HL			240	CEK VISUAL DAN CLEANING PT GENERATOR	√	√	√
HL			250	CEK VISUAL & CLEAN BOLTS	√	√	√
HL			260	CEK VISUAL LAMINASI & CLEAN ISOLASI BELITAN STATOR	√	√	√
HL			270	CEK VISUAL & CLEAN VENTILATION DUCT (UNDER MAIN GENERATOR	√	√	√
HL			280	CEK & CLEAN BINDING ROPE (PENGIKAT COIL STATOR)	√	√	√
HL			290	CEK , CLEAN, MEASURE WEDGES & SABLUNGAN BELITAN	√	√	√
HL			300	CEK KEKENCANGAN LEAD WIRE RTD DAN MEASURE TEMPERATURE DETECTOR (RTD) . Supporting By HKI	√	√	√
HL			310	BACKWASH / DRAIN STATOR COOLING WATER	√	√	√
HL			320	UKUR KIMIA ANALYS (CU, CILICA, CONDUCTIVITY, HARDNES, Fe) STATOR COOLING WATER, By Kimia	√	√	√
HL			330	CEK ROTOR CONECTION	√	√	√
HL			340	PASANG BEARING GENERATOR	√	√	√
HL			350	PASANG BEARING EXCITER	√	√	√
HL			360	ISI KEMBALI GAS HYDROGEN	√	√	√
HL			370	CEK SPRING CARBON BRUSH	√	√	√
HL			380	CEK KEBOCORAN H2 SYSTEM	√	√	√
HL			390	CEK EDDY CLURRENT H2 COOLER	√	√	√
HL			400	BEARING OIL FLUSHING	√	√	√
HL			410	CLEANING BODY GENERATOR - EXCITER	√	√	√
HL			420	PAINTING BODY GENERATOR - EXCITER	√	√	√
HL			430	FINAL CHECK	√	√	√
HL			440	TAGGING RELEASED	√	√	√

B. Perhitungan Maintenance Priority Index

b.1 Kriteria SCR dan ECR

System Criticality Ranking (SCR) Criteria	Skor	Equipment Criticality Ranking (ECR) Criteria	Skor
S : Safety		S : Safety	
High Safety Concern, possible fatality , injuries occur to personnel	10	High Safety Concern, possible fatality , injuries occur to personnel	10
High Safety Concern - injuries occur to personnel, lost time .	8	High Safety Concern - injuries occur to personnel, lost time .	8
Safety concerns - Possible doctor attended injuries.	5	Safety concerns - Possible doctor attended injuries.	5
Low Safety Concern - Action taken to secure area.	3	Low Safety Concern - Action taken to secure area.	3
No Safety Concern	1	No Safety Concern	1
E : Environmental		E : Environmental	
Shut Down	10	Shut Down	10
Fine	8	Fine	8
Notice of Violation	5	Notice of Violation	5
Close Call (Non-Reportable)	3	Close Call (Non-Reportable)	3
No Effect	1	No Effect	1
C : Cost		C : Cost	
>15.000.000.000	10	>150.000.000.000	10
7.500.000.000 - 15.000.000.000	9	75.000.000.000 - 150.000.000.000	9
3.750.000.000 - 7.500.000.000	8	37.500.000.000 - 75.000.000.000	8
1.500.000.000 - 3.750.000.000	7	15.000.000.000 - 37.500.000.000	7
1.125.000.000 - 1.500.000.000	6	11.250.000.000 - 15.000.000.000	6
750.000.000 - 1.125.000.000	5	7.500.000.000 - 11.250.000.000	5
375.000.000 - 750.000.000	4	3.750.000.000 - 7.500.000.000	4
75.000.000 - 375.000.000	3	750.000.000 - 3.750.000.000	3
15.000.000 - 75.000.000	2	150.000.000 - 750.000.000	2
<15.000.000	1	<150.000.000	1
CA : Commercial Availability		CA : Commercial Availability	
Plant Shutdown	10	Plant Shutdown	10
Long Term Unit Shutdown (> 1 week)	9	Long Term Unit Shutdown (> 1 week)	9
Short Term Unit Shutdown (< 1 week)	8	Short Term Unit Shutdown (< 1 week)	8
Long Term Boiler Shutdown (> 1week)	7	Long Term Boiler Shutdown (> 1week)	7
Short Term Boiler Shutdown (< 1week)	6	Short Term Boiler Shutdown (< 1week)	6
Long Term Load Reduction (> 1 week)	5	Long Term Load Reduction (> 1 week)	5
Short Term Load Reduction (< 1 week)	4	Short Term Load Reduction (< 1 week)	4
Future Potential Loss of MW's	3	Future Potential Loss of MW's	3
No Effect	1	No Effect	1
E : Efficiency		E : Efficiency	
berdampak besar	10	berdampak besar	10
berdampak kecil	5	berdampak kecil	5
tidak berdampak	1	tidak berdampak	1

b.2 Perhitungan SCR, ECR

b.2.1 Nilai S, E, C, CA, EFF SCR

Nama Peralatan Utama	S	E	C	CA	EFF	SCR
HP Turbin	10	1	10	10	10	8.96
Generator	10	1	10	10	5	8.07
Condensor A	10	1	10	10	10	8.96
Condensor B	10	1	10	10	10	8.96
AVR Cabinet	10	1	10	10	5	8.07
Governor CV 3	10	1	10	10	10	8.96
High Pressure Heater No.3	8	1	10	5	10	7.62
Steam Drum	10	1	10	10	5	8.07
Medium Speed Mill (MSM) A	8	1	10	5	10	7.62
Medium Speed Mill (MSM) (B)	8	1	10	5	10	7.62

b.2.2 Nilai S, E, C, CA, EFF ECR

Nama Peralatan Utama	S	E	C	CA	EFF	ECR
HP Turbin	10	1	10	10	10	8.96
Generator	10	1	10	10	10	8.96
Condensor A	5	1	9	9	10	7.59
Condensor B	5	1	9	9	10	7.59
AVR Cabinet	10	3	5	9	10	7.94
Governor CV 3	10	1	7	9	5	7.16
High Pressure Heater No.3	5	3	3	3	10	5.51
Steam Drum	8	3	5	4	10	6.54
Medium Speed Mill (MSM) A	8	3	8	4	10	7.11
Medium Speed Mill (MSM) (B)	8	3	8	4	10	7.11

b.3 Perhitungan ACR, RMS(CS dan RS), dan MPI

Nama Peralatan Utama	CS	RS	RMS	ACR	MPI
HP Turbin	3	3	3.00	80.20	240.60
Generator	3	2	2.50	72.31	180.78
Condensor A	3	2	2.50	67.97	169.92
Condensor B	3	2	2.50	67.97	169.92
AVR Cabinet	3	2	2.50	64.09	160.23
Governor CV 3	3	2	2.50	64.08	160.20
High Pressure Heater No.3	3	3	3.00	41.99	125.97

Steam Drum	3	2	2.50	52.83	132.06
Medium Speed Mill (MSM) A	3	2	2.50	54.17	135.43
Medium Speed Mill (MSM) (B)	3	2	2.50	54.17	135.43

C. Perhitungan Capital Recovery dan EAO

C.1 Peralatan Defender

Asumsi:

Tingkat diskon rate :	12.50%
Depresiasi :	Metode Garis lurus
Harga Pembelian awal (Rp) :	165,000,000,000
Life time peralatan (Tahun) :	30
Nilai sisa (Rp) :	5,500,000,000
Biaya Operasi (Rp/Tahun) :	613,152,432
Biaya Pemeliharaan (Rp/Tahun):	794,359,316
Biaya Failure (Rp/Tahun) :	49,858,080,000
Total Biaya Tahunan (Rp/Tahun) :	51,265,591,748

Tahun	A/P,12,5%,n	A/G,12,5%,n	CR	EAO
0				
1	1.1250	0.0000	191,125,000,000	-
2	0.5956	0.4706	103,772,058,824	24,124,984,352
3	0.4199	0.9217	74,788,594,470	47,249,393,316
4	0.3327	1.3533	60,396,805,274	69,380,127,412
5	0.2809	1.7658	51,840,916,442	90,526,752,476
6	0.2467	2.1594	46,202,163,875	110,701,406,953
7	0.2226	2.5342	42,229,507,493	129,918,685,746
8	0.2048	2.8907	39,297,310,632	148,195,502,770
9	0.1913	3.2293	37,057,900,688	165,550,934,722
10	0.1806	3.5503	35,302,594,018	182,006,048,815
11	0.1721	3.8541	33,898,525,915	197,583,717,439
12	0.1652	4.1413	32,757,065,937	212,308,422,835
13	0.1595	4.4124	31,816,810,984	226,206,054,868
14	0.1548	4.6679	31,033,867,169	239,303,704,970
15	0.1508	4.9083	30,376,018,966	251,629,459,218
16	0.1474	5.1343	29,819,084,873	263,212,193,312
17	0.1445	5.3463	29,344,559,213	274,081,372,038

18	0.1420	5.5450	28,938,039,848	284,266,855,493
19	0.1399	5.7309	28,588,152,214	293,798,714,099
20	0.1381	5.9047	28,285,795,938	302,707,054,084
21	0.1365	6.0669	28,023,606,484	311,021,854,824
22	0.1351	6.2181	27,795,563,380	318,772,819,088
23	0.1339	6.3588	27,596,700,411	325,989,236,937
24	0.1329	6.4897	27,422,888,030	332,699,863,740
25	0.1319	6.6113	27,270,667,752	338,932,812,473
26	0.1311	6.7241	27,137,124,555	344,715,460,256
27	0.1304	6.8286	27,019,787,423	350,074,368,838
28	0.1298	6.9254	26,916,551,003	355,035,218,578
29	0.1292	7.0149	26,825,613,302	359,622,755,293
30	0.1288	7.0976	26,745,425,678	363,860,749,255

C.2 Peralatan Challenger 1

Asumsi:

Tingkat diskon rate :	12.50%
Depresiasi :	Metode Garis lurus
Harga Pembelian awal (Rp) :	185,000,000,000
Life time peralatan (Tahun) :	30
Nilai sisa (Rp) :	6,166,666,667
Biaya Operasi (Rp/Tahun) :	486,446,448
Biaya Pemeliharaan (Rp/Tahun) :	1,334,062,225
Biaya Failure (Rp/Tahun) :	11,887,440,000
Total Biaya Tahunan (Rp/Tahun) :	13,707,948,673

Tahun	A/P,12,5%,n	A/G,12,5%,n	CR	EAOC
0				
1	1.1250	0.0000	214,291,666,667	-
2	0.5956	0.4706	116,350,490,196	6,450,799,376
3	0.4199	0.9217	83,853,878,648	12,634,054,076
4	0.3327	1.3533	67,717,630,156	18,551,609,239
5	0.2809	1.7658	58,124,663,889	24,206,022,679
6	0.2467	2.1594	51,802,426,163	29,600,540,105
7	0.2226	2.5342	47,348,235,673	34,739,064,061

8	0.2048	2.8907	44,060,621,011	39,626,117,173
9	0.1913	3.2293	41,549,767,438	44,266,800,374
10	0.1806	3.5503	39,581,696,323	48,666,746,843
11	0.1721	3.8541	38,007,438,148	52,832,072,447
12	0.1652	4.1413	36,727,619,384	56,769,323,514
13	0.1595	4.4124	35,673,394,134	60,485,422,755
14	0.1548	4.6679	34,795,548,038	63,987,614,171
15	0.1508	4.9083	34,057,960,658	67,283,407,720
16	0.1474	5.1343	33,433,519,403	70,380,524,501
17	0.1445	5.3463	32,901,475,482	73,286,843,125
18	0.1420	5.5450	32,445,681,042	76,010,347,910
19	0.1399	5.7309	32,053,382,785	78,559,079,409
20	0.1381	5.9047	31,714,377,264	80,941,087,753
21	0.1365	6.0669	31,419,166,667	83,164,389,150
22	0.1351	6.2181	32,053,382,785	85,236,925,849
23	0.1339	6.3588	31,714,377,264	87,166,529,744
24	0.1329	6.4897	31,420,407,270	88,960,889,755
25	0.1319	6.6113	31,164,722,577	90,627,523,034
26	0.1311	6.7241	30,941,755,007	92,173,749,973
27	0.1304	6.8286	30,746,874,458	93,606,672,940
28	0.1298	6.9254	30,576,203,237	94,933,158,625
29	0.1292	7.0149	30,426,472,986	96,159,823,834
30	0.1288	7.0976	30,294,913,171	97,293,024,520

C.3 Peralatan Challenger 2

Asumsi:

Tingkat diskon rate :	12.50%
Depresiasi :	Metode Garis lurus
Harga Pembelian awal (Rp) :	282,000,000,000
Life time peralatan (Tahun) :	30
Nilai sisa (Rp) :	9,400,000,000
Biaya Operasi (Rp/Tahun) :	457,246,392
Biaya Pemeliharaan (Rp/Tahun) :	633,634,316
Biaya Failure (Rp/Tahun) :	3,562,240,000
Total Biaya Tahunan (Rp/Tahun) :	4,653,120,708

Tahun	A/P,12,5%,n	A/G,12,5%,n	CR	EAOC
0				
1	1.1250	0.0000	326,650,000,000	-
2	0.5956	0.4706	177,355,882,353	2,189,703,862
3	0.4199	0.9217	127,820,506,912	4,288,590,514
4	0.3327	1.3533	103,223,630,832	6,297,286,280
5	0.2809	1.7658	88,600,839,009	8,216,659,404
6	0.2467	2.1594	78,963,698,259	10,047,811,631
7	0.2226	2.5342	72,174,067,351	11,792,067,668
8	0.2048	2.8907	67,162,676,352	13,450,962,706
9	0.1913	3.2293	63,335,321,176	15,026,228,241
10	0.1806	3.5503	60,335,342,504	16,519,776,438
11	0.1721	3.8541	57,935,662,474	17,933,683,310
12	0.1652	4.1413	55,984,803,602	19,270,170,986
13	0.1595	4.4124	54,377,822,409	20,531,589,361
14	0.1548	4.6679	53,039,700,253	21,720,397,386
15	0.1508	4.9083	51,915,377,868	22,839,144,296
16	0.1474	5.1343	50,963,526,873	23,890,450,991
17	0.1445	5.3463	50,152,519,383	24,876,991,844
18	0.1420	5.5450	49,457,740,832	25,801,477,105
19	0.1399	5.7309	48,859,751,056	26,666,636,117
20	0.1381	5.9047	48,342,996,694	27,475,201,469
21	0.1365	6.0669	47,893,000,000	28,229,894,240
22	0.1351	6.2181	48,859,751,056	28,933,410,402
23	0.1339	6.3588	48,342,996,694	29,588,408,465
24	0.1329	6.4897	47,894,891,081	30,197,498,412
25	0.1319	6.6113	47,505,144,685	30,763,231,915
26	0.1311	6.7241	47,165,269,794	31,288,093,859
27	0.1304	6.8286	46,868,208,633	31,774,495,121
28	0.1298	6.9254	46,608,050,340	32,224,766,577
29	0.1292	7.0149	46,379,812,876	32,641,154,282
30	0.1288	7.0976	46,179,273,049	33,025,815,743

BIOGRAFI PENULIS



Ridho Faqih Luthfi, lahir di Situbondo pada hari Rabu tanggal 16 Juni 1982 merupakan putra kedua dari pasangan Ibu Sumiati dan Bapak Ilzam Luthfi. Penulis sudah berkeluarga dengan 1 orang istri Susi Mei Wijayanti dan 3 orang anak Aleesya Durrotul Imtiyaz, Mutiah Khaylila Luthfiah dan Meifa Azkadina. Pendidikan formal dasar ditempuh di SD Negeri Dabasah 7 Bondowoso, dan lulus pada tahun 1995. Pendidikan selanjutnya ditempuh di SLTP Negeri 1 Banyuglugur Situbondo, lulus tahun 1998, dan di SMA Darul ‘Ulum 2 Jombang, lulus tahun 2001. Dari jenjang SMA penulis melanjutkan ke jenjang Diploma 3 Jurusan Teknik Kimia Institut Sepuluh Nopember yang dijalani sejak tahun 2001 hingga tahun 2004, kemudian dilanjutkan pada jenjang Sarjana sejak tahun 2005 sampai 2008. Pada tahun 2018, penulis melanjutkan studi pascasarjana di Departemen Teknik Mesin, Program Studi S2 Manajemen Energi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Alamat-email:

ridho.faqih@indonesiapower.co.id atau ridho82.online@gmail.com.