



TESIS - RE 185401

**EVALUASI PROGRAM UNGGULAN PENGELOLAAN
LINGKUNGAN PLTU X DI JAWA TIMUR MENGGUNAKAN
*LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) DAN ANALYTICAL
HIERARCHY PROCESS (AHP)***

MAYA MAHARANI
NRP 03211950030001

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. Joni Hermana M.Sc.ES., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN, DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2022



TESIS - RE 185401

**EVALUASI PROGRAM UNGGULAN PENGELOLAAN
LINGKUNGAN PLTU X DI JAWA TIMUR MENGGUNAKAN
*LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) DAN ANALYTICAL
HIERARCHY PROCESS (AHP)***

MAYA MAHARANI
NRP 03211950030001

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. Joni Hermana M.Sc.ES., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN, DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2022



TESIS - RE 185401

**EVALUATION OF THE LEADING PROGRAM FOR
ENVIRONMENTAL MANAGEMENT OF PLTU X EAST JAVA
USING LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) AND
ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP)**

MAYA MAHARANI
NRP 03211950030001

SUPERVISOR
Prof. Ir. Joni Hermana M.Sc.ES., Ph.D.

DEPARTEMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
FACULTY OF CIVIL, PLANNING, AND GEO ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2022

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

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

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MAYA MAHARANI

NRP: 03211950030001

Tanggal Ujian: 6 Agustus 2021

Periode Wisuda: Maret 2022

Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. Prof. Ir. Joni Hermana M.Sc.ES., Ph.D.
NIP: 196006181988031002



Penguji:

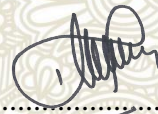
1. Adhi Yuniarto, ST.,MT.,PhD.
NIP: 197306012000031001



2. Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si, MT
NIP: 197510182005011003



3. Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST., MEPI
NIP: 198201192005011001



Kepala Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan



Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST., MEPM
NIP: 198201192005011001

**EVALUASI PROGRAM UNGGULAN PENGELOLAAN LINGKUNGAN
PLTU X JAWA TIMUR MENGGUNAKAN LIFE CYCLE ASSESSMENT
(LCA) DAN ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP)**

Nama Mahasiswa : Maya Maharani
NRP : 03211950030001
Pembimbing : Prof. Ir. Joni Hermana M.Sc.ES., Ph.D.

ABSTRAK

Dalam kegiatan proses produksi energi listrik PLTU, beberapa unit proses akan menghasilkan emisi yang berpotensi menimbulkan dampak pada lingkungan dan kesehatan manusia. Tujuan dari penelitian ini yaitu menganalisis dampak lingkungan yang paling dominan dan unit operasi yang memberikan kontribusi dampak lingkungan paling besar sehingga dapat menjadi inputan untuk mengevaluasi program yang telah diimplementasikan di perusahaan untuk mengurangi dampak lingkungan, serta memberikan rekomendasi prioritas program unggulan dalam menanggulangi dampak lingkungan secara tepat sasaran.

Analisis dampak lingkungan dilakukan dengan metode LCA menggunakan aplikasi SimaPro dengan metode CML-1A dan ReCiPe. Hasil analisis LCA menjadi dasar evaluasi penentuan program-program perusahaan terkait efisiensi energi dan pengurangan pencemaran udara. Program-program tersebut selanjutnya dianalisis menggunakan metode AHP dengan mempertimbangkan 3 aspek terdiri dari aspek finansial, aspek teknis, dan aspek lingkungan. Inputan data untuk pelaksanaan metode AHP berdasarkan dari responden *expert* internal perusahaan. Metode AHP menggunakan aplikasi *expert choice* (EC), hingga mendapatkan prioritas program unggulan yang mampu menurunkan dampak lingkungan.

Hasil analisis LCA menunjukkan bahwa proses produksi 1 kWh listrik memberikan kontribusi dampak lingkungan yang paling dominan berdasarkan metode CML-1A Baseline yaitu *abiotic depletion fossil fuel* sebesar 11,62466 MJ dan berdasarkan metode ReCiPe 2016 Midpoint yaitu dampak *global warming* sebesar 1.049575 kg CO₂ eq dan dampak *terrestrial acidification* sebesar 0,003672 kg SO₂ eq. Rekomendasi prioritas program unggulan pengelolaan lingkungan

terkait dengan efisiensi energi yaitu pengaturan *coal to air ratio*, *cleaning tube boiler*, penggantian elemen *air preheater*, sedangkan prioritas program unggulan untuk pengurangan pencemaran udara adalah pengaturan *coal to air ratio*, *tiny oil burner*, perubahan pola operasi *LFO pump*. Dari analisis LCA diketahui bahwa dengan implementasi program pengaturan *coal to air ratio* terjadi pengurangan dampak *global warming* sebesar 71,01% (0,755846 kg CO₂ eq) dan pengurangan dampak *acidification* sebesar 65,52% (0,002406 kg SO₂ eq). Serta dengan implementasi program perubahan pola operasi *LFO pump* terjadi pengurangan dampak *global warming* sebesar 72,02 % (0,755891 kg CO₂ eq) dan pengurangan dampak *acidification* sebesar 65,53% (0,002406 kg SO₂ eq).

Kata kunci : Batubara, LCA, AHP, PLTU

**EVALUATION OF THE LEADING PROGRAM FOR ENVIRONMENTAL
MANAGEMENT OF PLTU X EAST JAVA USING LIFE CYCLE
ASSESSMENT (LCA) AND ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS
(AHP)**

Name of student : Maya Maharani
Student ID Number : 03211950030001
Supervisor : Prof. Ir. Joni Hermana M.Sc.ES., Ph.D.

ABSTRACT

In the process of producing electricity, several process units will produce emissions that may have an impact on the environment and human health. The purpose of this study is to analyze the most dominant environmental impact and the operating unit that contributes the most to the environmental impact so that it can be used as input for evaluating programs that have been implemented in the company to reduce environmental impacts, as well as providing recommendations for priority leading programs in tackling environmental impacts appropriately.

Environmental impact analysis was carried out using the LCA method using the SimaPro application with the CML-1A and ReCiPe methods. The results of the LCA analysis become the basis for evaluating the determination of company programs related to energy efficiency and air pollution reduction. These programs are then analyzed using the AHP method by considering 3 aspects consisting of financial aspects, technical aspects, and environmental aspects. The data input for the implementation of the AHP method is based on the company's internal expert respondents. The AHP method uses an expert choice (EC) application, to get the priority leading programs that are able to reduce environmental impacts.

The results of the LCA analysis show that the production process of 1 kWh electricity contributes the most dominant environmental impact based on the CML-IA Baseline method is abiotic depletion fossil fuel of 11,62466 MJ and based on the 2016 Midpoint ReCiPe method are global warming of 1.049575 kg CO₂ eq and terrestrial acidification of 0.003672 kg SO₂ eq. The recommendations for environmental management priority leading programs related to energy efficiency

are setting the coal to air ratio, cleaning tube boilers, replacing the air preheater element, while the priority leading programs for reducing air pollution are setting the coal to air ratio, tiny oil burner, changing the operating pattern of the LFO pump. It was concluded that the implementation of setting the coal to air ratio program effect on reduction in the impact of global warming by 71,01% (0,755846 kg CO₂ eq) and reduction in the impact of acidification by 65,52% (0,002406 kg SO₂ eq). As well as the implementation of LFO pump operational pattern change program effect on reduction in the impact of global warming by 72.02% (0.755891 kg CO₂ eq) and reduction in the impact of acidification by 65.53% (0.002406 kg SO₂ eq).

Keywords : Coal, LCA, AHP, coal fired power plant

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat, taufiq serta hidayah-Nya sehingga penyusunan Laporan Tesis ini dapat berjalan dengan lancar. Tesis ini berjudul “**Evaluasi Program Unggulan Pengelolaan Lingkungan PLTU X Jawa Timur Menggunakan Life Cycle Assessment (LCA) dan Analytical Hierarchy Process (AHP)**”. Penyusunan Laporan Tesis ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik di Departemen Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Dalam kesempatan ini, penyusun menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Joni Hermana M.Sc.ES., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan waktu, ilmu, nasihat, arahan dan bimbingan kepada penulis dengan penuh kesabaran, motivasi, dan perhatian. Tanpa beliau, penyusun tidak akan bisa melewati semua ini.
2. Bapak Adhi Yuniarto, ST.,MT.,PhD., Bapak Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si, MT., dan Bapak Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST., MEPI selaku dosen penguji yang telah memberikan ilmu, nasihat, arahan serta kesabarannya dalam membimbing penulis.
3. Seluruh bapak/ibu dari PT PJB UBJ O&M Paiton yang telah bersedia membantu memberi inputan data dan konsultasi informasi data.
4. Rekan-rekan S2 Teknik Lingkungan ITS yang telah memberikan banyak bantuan, semangat dan motivasi kepada penulis.
5. Keluarga dan segenap kerabat yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang menjadi penyemangat dalam proses penyelesaian Tesis ini.

Penulis menyadari adanya keterbatasan pengetahuan dan pengalaman dalam penyusunan Tesis ini. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan sebagai bahan perbaikan laporan agar menjadi lebih baik, sehingga nantinya diharapkan dapat memberikan manfaat dan pengetahuan bagi pembaca maupun penulis sendiri.

Surabaya, 12 Juli 2021

Maya Maharani

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Proses Produksi Listrik di PT PJB UBJOM Paiton.....	7
2.2 Dampak Lingkungan dari Produksi Listrik	10
2.2.1 Pencemaran Udara	10
2.2.2 Pemanasan Global	13
2.2.3 Pencemaran Perairan.....	13
2.2.4 Pencemaran Tanah.....	16
2.3 <i>Life Cycle Assessment (LCA)</i>	17
2.3.1 Manfaat dan Kegunaan LCA	18
2.3.2 Ruang Lingkup LCA.....	19
2.3.3 Karakteristik dan Batasan LCA.....	20
2.3.4 Tahapan LCA	20
2.4 Pemilihan <i>Software SimaPro</i> untuk Analisis LCA	32
2.5 <i>Analytical Hierarchy Process (AHP)</i>	40
2.6 Pemilihan <i>Software Expert Choice</i> untuk Metode AHP.....	43
2.7 Hubungan LCA dengan AHP.....	47

2.8 Program Penurunan Dampak Lingkungan	47
2.8.1 Program Efisiensi Energi	47
2.8.2 Program Pengurangan Pencemaran Udara	52
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	55
3.1 Kerangka Penelitian	55
3.2 Ide Penelitian	55
3.3 Studi Literatur.....	57
3.4 Pengumpulan Data	57
3.5 Analisis Dampak Lingkungan dengan Metode LCA	59
3.5.1 Tahapan dalam Analisis LCA	59
3.5.2 Pemilihan Metode LCIA	62
3.6 Rekomendasi Prioritas Program Unggulan dengan AHP	64
3.7 Kesimpulan dan Saran	67
BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN	69
4.1 Analisis LCA	69
4.1.1 <i>Goal and Scope Definition</i>	69
4.1.2 <i>Life Cycle Inventory (LCI)</i>	71
4.1.3 <i>Life Cycle Impact Assessment (LCIA)</i>	92
4.1.4 Interpretasi Data	108
4.2 Evaluasi Program Pengelolaan Lingkungan Berdasarkan LCA	114
4.3 Rekomendasi Prioritas Program Unggulan dengan AHP.....	119
4.3.1 Identifikasi Kriteria dan Penentuan Alternatif	120
4.3.2 Menyusun Hirarki Kriteria dan Alternatif	120
4.3.3 Penentuan Bobot Prioritas dengan Perbandingan Antar Alternatif	122
4.4 <i>Sensitivity check</i> Program Unggulan Pengelolaan Lingkungan	156
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	159
5.1 Kesimpulan	159
5.2 Saran	160
DAFTAR PUSTAKA	163

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Baku Mutu Emisi PLTU	12
Tabel 2.2 Baku Mutu Air Limbah Pendingin Kondensor	14
Tabel 2.3 Baku Mutu Air Limbah Reject RO	15
Tabel 2.4 Baku Mutu Air Limbah Domestik	16
Tabel 2.5 Software Analisis LCA	32
Tabel 2.6 Metode Dampak pada Software SimaPro	36
Tabel 2.7 Skala Penilaian Perbandingan Berpasangan	42
Tabel 2.8 Hasil Absolut Efisiensi Energi	48
Tabel 2.9 Hasil Absolut Pengurangan Pencemaran Udara	52
Tabel 3.1 Kebutuhan Data Primer	58
Tabel 3.2 Pemilihan Metode LCIA Berdasarkan Kategori Dampak pada PROPER	63
Tabel 4.1 Hasil Verifikasi Data terhadap Pengumpulan Data Sekunder	71
Tabel 4.2 Data Debit dan Beban Pencemaran Unit <i>Condenser</i>	75
Tabel 4.3 Emisi SO ₂ , NO _x , dan Partikulat Tahun 2020	79
Tabel 4.4 Beban Pencemaran Air Blowdown Boiler Tahun 2020	80
Tabel 4.5 Inventori Data Proses Produksi Listrik	85
Tabel 4.6 Normalisasi Data Produksi Listrik	90
Tabel 4.7 Faktor Karakterisasi Metode CML-IA <i>Baseline</i>	96
Tabel 4.8 Faktor Karakterisasi Metode ReCiPe Midpoint 2016	96
Tabel 4.9 Nilai Karakterisasi Dampak dengan Metode CML-IA <i>Baseline</i>	98
Tabel 4.10 Nilai Karakterisasi Dampak dengan Metode ReCiPe 2016	99
Tabel 4.11 Integrasi Nilai Karakterisasi Proses Produksi Listrik	100
Tabel 4.12 Faktor Normalisasi Metode CML-IA <i>Baseline</i>	102
Tabel 4.13 Faktor Normalisasi Metode ReCiPe Midpoint 2016	103
Tabel 4.14 Nilai Normalisasi Dampak dengan Metode CML-IA <i>Baseline</i>	104
Tabel 4.15 Nilai Normalisasi Dampak dengan Metode ReCiPe 2016 Midpoint	105
Tabel 4.16 Integrasi Nilai Normalisasi Proses Produksi Listrik	107

Tabel 4.17 Persentase Karakterisasi Proses Produksi Listrik	109
Tabel 4.18 <i>Completeness Chek</i> LCA Proses Produksi Listrik.....	111
Tabel 4.19 <i>Consistency Check</i> LCA Proses Produksi Listrik.....	112
Tabel 4.20 Variasi <i>Input</i> Kontributor Dampak <i>Abiotic Depletion Fossil Fuel</i>	113
Tabel 4.21 Hasil Pemeriksaan Sensitivitas Dampak <i>Abiotic Depletion Fossil Fuel</i>	113
Tabel 4.22 Variasi <i>Input</i> Kontributor Dampak Global Warming	114
Tabel 4.23 Hasil Pemeriksaan Sensitivitas Dampak <i>Global Warming</i>	114
Tabel 4.24 Evaluasi Program Pengelolaan Lingkungan	116
Tabel 4.25 Efisiensi Energi dan Penghematan Finansial Program Pengaturan <i>Coal to Air Ratio</i>	126
Tabel 4.26 Nilai Present Value Program <i>Tiny Oil Burner</i>	128
Tabel 4.27 Nilai Present Value Program Penggantian Elemen <i>Air Preheater</i>	130
Tabel 4.28 Efisiensi Energi dan Penghematan Program <i>Cleaning Tube Boiler</i> ..	132
Tabel 4.29 Nilai Efisiensi Energi tahun 2016 - 2020.....	133
Tabel 4.30 Nilai Penghematan Program Efisiensi Energi Tahun 2016 - 2020	133
Tabel 4.31 Perbandingan Konsistensi Hasil AHP dengan Perhitungan Efisiensi Energi.....	134
Tabel 4.32 Efisiensi energi Program Pengaturan Pola Operasi LFO <i>Pump</i>	138
Tabel 4.33 Konsumsi Batu Bara saat Program Pengaturan Pola Operasi LFO <i>Pump</i>	139
Tabel 4.34 Faktor Emisi Konvensional	139
Tabel 4.35 Faktor Emisi Gas Rumah Kaca.....	140
Tabel 4.36 Perhitungan Penurunan Beban Emisi Konvensional	141
Tabel 4.37 Perhitungan Beban emisi GRK Menggunakan Perhitungan IPCC 2006	141
Tabel 4.38 Rekapitulasi Penurunan Beban Emisi.....	142
Tabel 4.39 Penghematan Finansial Program Pengaturan Pola Operasi LFO <i>Pump</i>	143
Tabel 4.40 Pemakaian HSD Program <i>Tiny Oil Burner</i>	143
Tabel 4.41 Faktor Emisi Metode Tier 1	144
Tabel 4.42 Rekap Beban emisi GRK Program <i>Tiny Oil Burner</i>	146

Tabel 4.43 Rekap Beban emisi Konvensional Program Tiny Oil Burner.....	147
Tabel 4.44 Penurunan Emisi dari Program Tiny Oil Burner	148
Tabel 4.45 Penghematan Finansial Program <i>Tiny Oil Burner</i>	148
Tabel 4.46 Penurunan Beban Emisi Konvensional Program Pengaturan <i>Coal to Air Ratio</i>	150
Tabel 4.47 Penurunan Beban Emisi GRK Program Pengaturan <i>Coal to Air Ratio</i>	151
Tabel 4.48 Penghematan Finansial Program Pengaturan <i>Coal to Air Ratio</i>	152
Tabel 4.49 Hasil Pengurangan Pencemaran Udara Emisi Gas Rumah Kaca.....	153
Tabel 4.50 Penghematan Program Pengurangan Pencemaran Udara Emisi Gas Rumah Kaca.....	153
Tabel 4.51 Data Pengurangan Pencemaran Udara Emisi Gas Konvensional	154
Tabel 4.52 Data Penghematan Program Pengurangan Pencemaran Udara Emisi Gas Konvensional	155
Tabel 4.53 Perbandingan Konsistensi Hasil AHP dengan Program Pengurangan Pencemaran Udara	156
Tabel 4.54 <i>Sensitivity Check</i> Program Pengaturan <i>Coal to Air Ratio</i>	157
Tabel 4.55 <i>Sensitivity Check</i> Program Perubahan Pola Operasi LFO Pump	158

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Alur Proses Produksi Siklus Batu Bara.....	8
Gambar 2.2 Diagram Alur Proses Produksi Siklus Air dan Uap.....	9
Gambar 2.3 Ruang Lingkup LCA.....	19
Gambar 2.4 Tahapan LCA.....	21
Gambar 2.5 Representasi Neraca <i>Product System</i>	23
Gambar 2.6 Konsep dari Kategori Dampak, Indikator Kategori dan Model Karakterisasi.....	24
Gambar 2.7 Penentuan Goal.....	34
Gambar 2.8 Penentuan Scope.....	35
Gambar 2.9 Data Inventory Process.....	36
Gambar 2.10 Nilai Karakterisasi pada Kegiatan dalam 14 Kategori Dampak.....	38
Gambar 2.11 Nilai Normalisasi pada Kegiatan dalam 14 Kategori Dampak.....	39
Gambar 2.12 Nilai Pembobotan pada Kegiatan dalam 14 Kategori Dampak.....	39
Gambar 2.13 Hasil Dampak Lingkungan dari setiap Kegiatan.....	40
Gambar 2.14 Input <i>Goal</i> dan Kriteria.....	44
Gambar 2.15 Pembobotan Perhitungan Perbandingan Antar Kriteria.....	45
Gambar 2.16 Input Skala Prioritas Perhitungan Antar Kriteria.....	45
Gambar 2.17 Input Pembobotan Antar Alternatif.....	46
Gambar 2.17 <i>Sensitivity Analysis</i> pada <i>Expert Choice</i>	46
Gambar 3.1 Kerangka Penelitian.....	56
Gambar 3.2 Proses AHP Program Unggulan Pengelolaan Lingkungan.....	66
Gambar 3.3 Proses AHP Program Unggulan Pengurangan Pencemar Udara.....	66
Gambar 4.1 <i>System Boundary</i> Proses Produksi Listrik.....	70
Gambar 4.2 Mass Balance Kondensor.....	81
Gambar 4.3 Mass Balance Heater.....	82
Gambar 4.4 Mass Balance Boiler.....	83
Gambar 4.5 Mass Balance Turbin.....	84
Gambar 4.6 Mass Balance Generator.....	84

Gambar 4.7 Neraca Massa Proses Produksi Listrik Berdasarkan Kapasitas Produksi	87
Gambar 4.8 Neraca Massa Proses Produksi Listrik Berdasarkan <i>Functional Unit</i>	91
Gambar 4.9 Klasifikasi Dampak Proses Produksi Listrik Metode CML-1A	93
Gambar 4.10 Klasifikasi Dampak Proses Produksi Listrik Metode CML-1A	94
Gambar 4.11 Grafik Normalisasi Dampak dengan Metode CML-IA Baseline...	104
Gambar 4.12 Grafik Normalisasi Dampak dengan Metode ReCiPe 2016 Mid ..	106
Gambar 4.13 Persentase Pembobotan Proses Produksi Listrik.....	110
Gambar 4.14 Hirarki Prioritas Program Unggulan Efisiensi Energi	121
Gambar 4.15 Hirarki Prioritas Program Unggulan Pengurangan Pencemaran Udara	121
Gambar 4.16 Hasil Analisis Kriteria Program Efisiensi Energi	122
Gambar 4.17 Hasil Analisis Prioritas Program Unggulan Efisiensi Energi	123
Gambar 4.18 Hasil Analisis Kriteria Program Pengurangan Pencemaran Udara	135
Gambar 4.19 Hasil Analisis Prioritas Program Pengurangan Pencemaran Udara.....	136

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik memiliki peranan yang sangat pokok dalam menunjang perkembangan suatu wilayah, yaitu kaitannya dalam menunjang berbagai macam kegiatan sesuai dengan fungsi dan peran wilayah. Energi listrik pada suatu wilayah pada umumnya dipergunakan untuk pemenuhan kebutuhan permukiman, fasilitas umum dan fasilitas sosial (pendidikan, kesehatan, peribadatan, rekreasi, dll.), industri dalam berbagai skala, perdagangan dan jasa, dan jaringan prasarana wilayah. Tingkat pelayanan energi listrik pada suatu wilayah akan menentukan tingkat perkembangan suatu wilayah. Jika energi listrik dapat dipenuhi secara layak baik dari segi kapasitas maupun jaringannya, maka aktivitas atau kegiatan wilayah yang memiliki tingkat kompleksitas tinggi dapat berjalan dengan baik dan cepat, yang selanjutnya berpengaruh terhadap perkembangan wilayah.

Pembangunan PLTU dengan kapasitas 1×660 MW ini secara umum bertujuan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik untuk berbagai kepentingan pembangunan khususnya di Pulau Jawa, Madura dan Bali. Pembangunan PLTU ini merupakan pelaksanaan program pemerintah yang telah dicanangkan dalam rangka intensifikasi, diversifikasi dan konservasi energi. Dalam hal ini adalah pemanfaatan potensi batubara yang ada di Indonesia sebagai sumber energi dan mengurangi ketergantungan pada minyak bumi.

Proses produksi energi listrik PLTU ini meliputi unit proses desalinasi, demineralisasi, kondenser, heater, boiler, turbin, generator, dan trafo dengan jumlah produksi netto pada tahun 2020 mencapai 4.186.476 kWh. Dalam rangkaian kegiatan proses produksi energi listrik, beberapa unit proses PLTU akan menghasilkan emisi yang berpotensi menimbulkan pencemaran pada lingkungan dan kesehatan manusia melalui media udara, air, dan tanah.

Potensi pencemaran udara yang timbul dari proses produksi listrik salah satunya berasal dari konsumsi energi. Konsumsi energi utama di PLTU berkaitan dengan penggunaan batu bara pada proses pembakaran di boiler dan penggunaan

energi listrik di setiap unit proses produksi. Proses pembakaran batu bara akan menghasilkan emisi yang dilepaskan ke lingkungan diantaranya adalah CO₂, CH₄, N₂O, SO₂ dan NO_x. Emisi gas rumah kaca seperti CO₂, CH₄, dan N₂O yang dilepaskan ke atmosfer berkontribusi terhadap terjadinya dampak global warming. Emisi gas konvensional seperti SO₂ and NO_x memiliki sifat toksik yang dapat menimbulkan dampak terhadap kesehatan manusia berupa gangguan sistem pernapasan serta berkontribusi besar terhadap lingkungan yaitu penyebab terjadinya hujan asam.

Potensi pencemaran air yang timbul dari proses produksi listrik salah satunya berasal dari emisi air limbah *blowdown boiler* yang mengandung Cu dari proses korosi instalasi boiler. Cu terbawa saat proses cleaning boiler, berpotensi menyebabkan dampak lingkungan berupa *human toxicity*, *marine aquatic ecotoxicity*, dan *terrestrial ecotoxicity*.

Produk samping yang dihasilkan dari proses produksi listrik yaitu limbah *fly ash* dan *bottom ash* yang dihasilkan dari proses pembakaran di boiler. Karakteristik *fly ash* dan *bottom ash* mengandung senyawa diantaranya SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, dan MgO yang berpotensi menyebabkan pencemaran air tanah apabila tidak dilakukan pengelolaan lanjut sesuai dengan regulasi.

Berbagai dampak yang menyebabkan perubahan lingkungan akibat proses produksi PLTU ini harus dikaji dan ditelaah secara komprehensif sebagai upaya pengelolaan dan pemantauan dampak lingkungan, sehingga dampak yang diperkirakan timbul tersebut dapat dicegah atau diminimalisir. Salah satu upaya yang dapat dilakukan oleh sektor industri untuk berkontribusi terhadap pencapaian SDGs adalah menerapkan sistem manajemen daur hidup atau *life cycle management* (LCM). LCM adalah konsep yang terintegrasi untuk mengelola keseluruhan daur hidup dari suatu barang dan jasa untuk menciptakan produksi dan konsumsi yang berkelanjutan. Untuk mendukung pelaksanaan manajemen daur hidup, diperlukan berbagai metode analisis. Salah satu metode analisis yang dapat digunakan adalah metode analisis daur hidup atau *life cycle assessment* (LCA). Pada tahun 1994, *Organization for Standardization* (ISO) menetapkan LCA sebagai standar instrumen yang dapat digunakan untuk melakukan analisis dampak

lingkungan pada semua industri. Penetapan LCA diatur di dalam ISO 14040 (Hermawan dkk, 2013).

LCA adalah metode untuk menganalisis beban lingkungan disemua tahapan dalam siklus hidup dari produk dimulai dari ekstraksi sumber daya, proses produksi, produk itu sendiri, dan konsumsi produk sampai produk itu dibuang (baik oleh penggunaan kembali, daur ulang atau pembuangan akhir) (Bruijn dkk, 2002). LCA dikembangkan salah satunya adalah untuk mengkaji dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh pabrik dan proses produksi (Haas, 2000). Pada pelaksanaannya, digunakan *software* SimaPro yang biasa dipakai sebagai perangkat untuk menganalisis penghematan energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca, dan lingkungan global yang berfokus pada siklus hidup suatu produk, serta efisiensi penggunaan sumberdaya berupa tanah, air, energi dan sumberdaya alam lainnya. LCA memiliki kelebihan karena sifatnya yang komprehensif sehingga mampu menganalisis dampak lingkungan yang potensial terjadi pada proses-proses yang terkait dalam daur hidup suatu produk (Wahyudi, 2017).

Beberapa program pengoperasian pembangkit telah diimplementasikan dengan tujuan untuk memperbaiki kinerja pengelolaan lingkungan, namun perlu dilakukan analisis LCA agar dapat mengetahui dampak dan titik kritis (*hotspot*) penyebab dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses produksi. Penelitian LCA disusun berdasarkan kriteria yang tercantum dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 1 Tahun 2021 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup serta ketentuan Asosiasi Lingkungan Ketenagalistrikan Indonesia (ALLIN) yaitu ruang lingkup sistem *gate to gate* yang meliputi kondensor, heater, boiler, turbin hingga generator-trafo.

LCA dilakukan untuk mengetahui dampak lingkungan dari proses produksi listrik dan unit proses yang memberikan kontribusi dampak lingkungan paling besar. Berdasarkan hasil analisis LCA dapat dilakukan evaluasi terhadap program-program yang telah diimplementasikan terkait dengan efisiensi energi dan pengurangan pencemaran udara yang secara langsung mempengaruhi emisi yang dihasilkan. Selanjutnya dilakukan analisis menggunakan metode AHP untuk

mendapatkan rekomendasi program unggulan pengelolaan lingkungan dengan mempertimbangkan kriteria finansial, teknis, dan lingkungan.

Dengan adanya pendekatan ini, maka perusahaan mampu mengukur kepatuhan terhadap standar yang telah ditetapkan pemerintah dan mengukur seberapa besar kontribusi kepedulian perusahaan terhadap kondisi dan kualitas lingkungan, sehingga mampu bersaing secara global.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana dampak lingkungan yang dihasilkan serta unit proses yang memberikan kontribusi dampak lingkungan paling dominan dari proses produksi listrik di PLTU dan program pengelolaan lingkungan apa saja yang telah diimplementasikan yang dapat mengurangi dampak tersebut?
2. Rekomendasi prioritas program unggulan pengelolaan lingkungan apa saja yang direkomendasikan terkait efisiensi energi dan pengurangan pencemaran udara dalam upaya pengurangan dampak lingkungan ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis dampak lingkungan dan unit proses yang memberikan kontribusi dampak lingkungan yang paling dominan dari proses produksi 1 kWh listrik sehingga dapat menjadi inputan evaluasi program efisiensi energi dan pengurangan pencemaran udara PLTU.
2. Merekomendasikan prioritas program pengelolaan lingkungan unggulan dengan metode AHP berdasarkan aspek finansial, teknis, dan lingkungan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Menjadi acuan bagi perusahaan dalam menganalisis dampak lingkungan yang dihasilkan dari setiap tahap proses produksi

2. Sebagai bahan evaluasi perusahaan untuk melakukan perbaikan kinerja pengelolaan lingkungan secara berkelanjutan dan mewujudkan pelaksanaan bisnis dan jasa yang berwawasan lingkungan.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini adalah:

1. Ruang Lingkup Analisis LCA adalah *gate to gate* meliputi kondensor, heater, boiler, turbin, dan generator-trafo.
2. Program pengelolaan lingkungan yang dievaluasi adalah terkait dengan efisiensi energi dan pengurangan pencemaran udara yang telah diimplementasikan di perusahaan.
3. Inventarisasi data meliputi data sekunder dengan periode data penelitian yaitu Januari – Desember 2020, meliputi data input berupa bahan baku, bahan bakar, konsumsi energi, bahan kimia yang digunakan pada proses produksi, serta data output berupa produk, emisi, dan limbah yang dihasilkan dari setiap tahap proses produksi listrik.
4. Menggunakan metode *life cycle assessment* (LCA) dengan *software* SimaPro 9, dengan kajian dampak menggunakan metode CML-IA dan ReCiPe 2016 Baseline.
5. Dampak lingkungan yang dianalisis adalah *Mid Point* (dampak tunggal) dari proses produksi 1 kWh listrik.
6. Analisis AHP mempertimbangkan 3 aspek yaitu :
 - Aspek finansial meliputi biaya investasi (*capital cost*), biaya pemeliharaan (termasuk biaya teknisi dan spare part), dan biaya operasional (biaya listrik, biaya operator, dan biaya bahan baku operasi)
 - Aspek teknis meliputi kemudahan operasional, kemudahan *troubleshooting*, kehandalan (*reliability*), ketersediaan bahan baku, bahan kimia, dan bahan bakar, serta ketersediaan sumber daya manusia/teknisi,
 - Aspek lingkungan adalah dampak lingkungan dari suatu proses produksi yang merupakan hasil analisis LCA
7. Penentuan rekomendasi prioritas program unggulan pengelolaan lingkungan menggunakan metode AHP dengan *soft ware expert choice* (EC) berdasarkan

hasil data kuisisioner *online* dengan responden *experts* yaitu meliputi perwakilan manajemen, supervisor dan staff bidang operasi, pemeliharaan, dan enjiniring dengan jenjang minimal D3 sebanyak 30 orang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Produksi Listrik

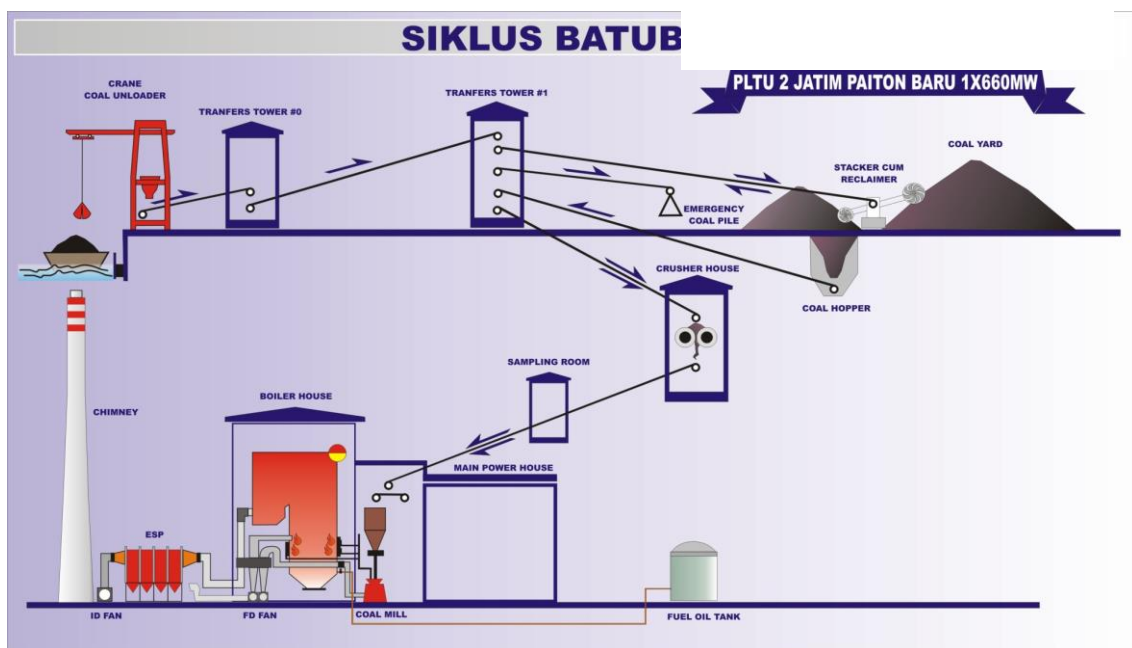
PLTU X terdiri dari 1 (satu) unit dengan kapasitas total 660 MW yang menempati luasan 55,72 ha di dalamnya meliputi berbagai bangunan utama termasuk *switchyard* untuk tenaga listrik, *coal storage*, *ash disposal*, bangunan administrasi dan berbagai bangunan *auxiliary* (penunjang). Jenis batubara yang digunakan adalah jenis *low rank coal* dengan nilai bakar sekitar 3500 – 4500 kcal/kg.

Kegiatan operasional sistem dimulai dari pembongkaran batubara dari kapal tongkang ke *ship unloader*, selanjutnya dipindahkan dengan *conveyor* untuk ditimbun di *coal yard*. Penataan batubara di *coalyard* menggunakan *bulldozer* untuk meratakan timbunan, serta terdapat *stacker-reclaimer* yang juga berfungsi untuk menata batubara dan mengambil batubara dari *coal yard* untuk ditransfer menuju silo melalui jalur *conveyor*. Kegiatan penataan batubara dan pengambilan batu bara berpotensi terjadi sebaran debu, sehingga harus memperhatikan arah angin. Batubara selanjutnya masuk ke dalam *furnace* boiler dengan jumlah pada kondisi rating sekitar 800 ton/jam.

Udara bakar diambil dari udara luar yang dipanaskan terlebih dahulu di dalam pemanas udara (*air heater*). Aliran udara bakar ke dalam *furnace* diatur melalui sistem ID (*induced draft*) fan dan FD (*forced draft*) fan dengan jumlah sekitar 1.500.000 m³/jam. Kalor (*heat*) hasil pembakaran digunakan untuk mengubah fase air boiler menjadi uap (*steam*), atau energi kalor ditransfer menjadi energi fluida uap (*enthalpi*).

Saat proses pembakaran terjadi reaksi kimia bahan bakar dengan udara pada *furnace* boiler yang menghasilkan kalor (*heat*), abu (*bottom ash* dan *fly ash*), serta *flue gas* yang mengandung gas-gas CO₂, CH₄, N₂O, SO₂,NO_x, dan partikulat. *Bottom ash* / abu dasar merupakan sisa pembakaran batubara yang jatuh di dasar boiler dan terkumpul pada *bottom ash silo*, sedangkan *fly ash* / abu terbang akan

ditangkap oleh *Electro Static Presipitator* (ESP) dengan metode pemberian muatan negatif pada *fly ash* melalui beberapa elektroda yang kemudian divakum menuju *fly ash silo*. ESP merupakan alat yang memiliki efisiensi kerja untuk menangkap *fly ash* sangat tinggi yaitu di atas 90% - 99.84% sehingga partikulat yang keluar melalui cerobong asap kurang dari 10% hingga 0,16%. *Flue gas* dengan temperatur sekitar 150 - 200 °C dibuang ke udara bebas melalui cerobong (*stack*) dengan tinggi 275 m. Diagram alur proses produksi siklus batu bara ditampilkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram Alur Proses Produksi Siklus Batu Bara

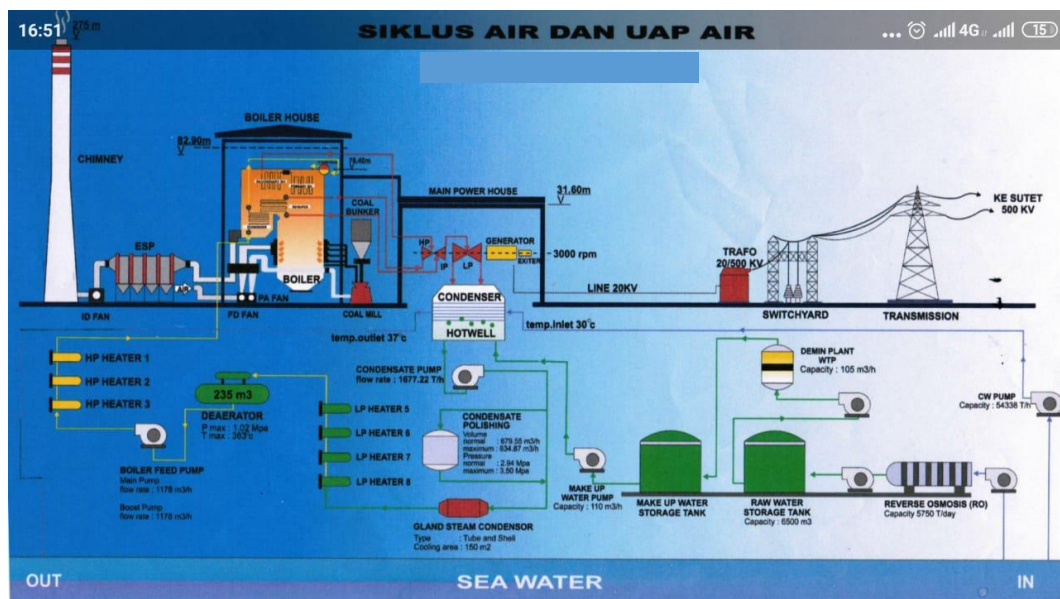
Air boiler seluruhnya berasal dari *demin plant* yang memproduksi *demin water* untuk pertama kali operasi atau start unit. Setelah beroperasi, air boiler berasal dari kondensat yang terjadi pada kondensor, ditambah dengan *make up water* dari *demin plant*. Sebelum masuk boiler, air boiler dipanaskan terlebih dulu di dalam ekonomiser.

Proses perubahan fase yang terjadi di dalam boiler adalah sebagai berikut : Air boiler dari drum turun melalui pipa-pipa turun (*down comer*) ke dalam drum bawah. Seterusnya, dengan sistem sirkulasi yang digunakan, air boiler masuk ke dalam pipa-pipa naik (*raiser*) yang berfungsi sebagai evaporator. Di sini sebagian besar air boiler berubah fase menjadi uap jenuh. Uap jenuh dengan tekanan sekitar

18 MPa, selanjutnya dipanaskan lebih lanjut di dalam *superheater* menjadi uap panas lanjut (*Superheated steam*) dengan tekanan 18 MPa dan temperatur 540°C. Jumlah uap yang dihasilkan dalam kondisi maksimum rating adalah sekitar 2100 ton/jam.

Selanjutnya, melalui main valve, uap masuk ke dalam turbin. Di dalam turbin terjadi konversi energi dari enthalpy uap menjadi energi kerja dalam bentuk torsi dan putaran poros turbin. Tekanan uap sekitar 17 MPa masuk ke dalam turbin tekanan tinggi (HP Casing) dan keluar menjadi tekanan sekitar 3 MPa. Selanjutnya uap dipanaskan kembali di dalam boiler pada *reheater* dan dirasukkan ke dalam turbin tekanan rendah (*LP Casing*) dan keluar pada tekanan *back pressure* sekitar 12 kPa. Putaran turbin sekitar 3000 rpm di kopel langsung, menggunakan kopling, dengan generator listrik, sehingga menghasilkan daya sekitar 600 - 660 MW. Aliran uap dan putaran turbin dapat menghasilkan kebisingan sekitar 80 hingga 130 dB bergantung pada kondisinya.

Uap yang telah terkonversi sebagian energinya akan turun enthalpinya dan selanjutnya masuk ke dalam kondensor yang dijaga pada tekanan *back pressure* sekitar 5 kPa. Uap tersebut harus diubah fasenya agar kembali menjadi air (kondensat) dengan mengambil kalornya menggunakan air pendingin (*circulated water*). Diagram alur proses produksi siklus air dan uap ditampilkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram Alur Proses Produksi Siklus Air dan Uap

2.2 Dampak Lingkungan dari Produksi Listrik

Kegiatan produksi listrik mulai dari proses produksi siklus batu bara, produksi siklus air dan uap hingga menjadi produk listrik yang siap didistribusikan memberikan dampak lingkungan yang dapat membahayakan lingkungan dan kesehatan manusia. Potensi pencemaran lingkungan terhadap media lingkungan (udara, perairan, dan tanah) dari kegiatan produksi listrik adalah sebagai berikut:

2.2.1 Pencemaran Udara

Menurut Peraturan Menteri LHK Nomor P.15 Tahun 2019 tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal, pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya. Sedangkan menurut Karunia (2019), pencemaran udara adalah bertambahnya bahan atau substrat fisik atau kimia ke dalam lingkungan udara normal yang mencapai sejumlah tertentu, sehingga dapat dideteksi oleh manusia (yang dapat dihitung dan diukur).

Pembangkit Listrik Tenaga Uap berbahan bakar batubara menghasilkan emisi dari hasil pembakaran batubaranya (Talayansa, 2017). Emisi-emisi yang dihasilkan dapat berupa SO₂, NO₂, CO, CO₂, VHC (*Volatile Hydrocarbon*), dan SPM (*Suspended Particulate Matter*) (Iswan, 2010). Polutan-polutan ini dapat menyebabkan korosi pada material, iritasi saluran pernafasan, kanker paru-paru dan gangguan kesehatan lainnya.

Setiap emisi mempunyai sifat dan karakteristik yang berbeda. Karakteristik emisi merupakan jenis-jenis senyawa kimia yang menggambarkan suatu emisi. Senyawa kimia tersebut mempunyai peranan dan ciri-ciri yang berbeda. Berikut adalah beberapa jenis emisi gas:

2.2.1.1 Karbon Dioksida (CO₂)

Udara merupakan campuran beberapa gas yang perbandingannya tidak tetap. Dalam udara terdapat oksigen, karbondioksida dan ozon. Gas CO₂ dalam udara murni berjumlah 0,03%, bila melebihi toleransi dapat mengganggu

pernapasan. Selain itu, peningkatan CO₂ di atmosfer dapat menghalangi pemancaran panas dari bumi sehingga panas dipantulkan kembali ke bumi yang disebut sebagai efek rumah kaca. Emisi gas rumah kaca (GRK) yang dilepaskan ke atmosfer berkontribusi terhadap terjadi dampak *global warming*. *Global warming* adalah kejadian meningkatnya temperatur rata-rata atmosfer, laut dan daratan di bumi karena terperangkapnya radiasi gelombang panjang matahari yang dipancarkan ke bumi akibat gas-gas rumah kaca (Triana, 2008). *Global warming* diperkirakan menjadi penyebab utama terjadinya perubahan iklim.

2.2.1.2 Metan (CH₄)

Metana adalah gas yang molekulnya tersusun dari satu atom karbon dan empat atom hidrogen. Metana mudah terbakar, dan menghasilkan karbon dioksida sebagai hasil sampingan. Metana merupakan gas rumah kaca yang banyak di atmosfer setelah CO₂, dimana keberadaannya dapat tereduksi dengan adanya reaksi kimia dengan hidroksil (OH) radikal. Selain itu, gas metana memiliki potensi terhadap *global warming* sebesar 21-23 CO₂-*equivalent*, yang berarti setiap kg dari metana yang diemisikan ke atmosfer memiliki efek yang ekuivalen terhadap iklim bumi sebesar 21-23 kali lebih besar dari karbon dioksida selama periode waktu 100 tahun. Gas metana menyerap sebagian frekuensi dari radiasi inframerah yang diemisikan dari permukaan bumi) yang seharusnya diteruskan ke luar angkasa (Sabljić, 2009).

2.2.1.3 Sulfur Oksida (SO_x)

Emisi SO_x terbentuk dari proses pembakaran fungsi kandungan sulfur dalam bahan bakar. Pencemaran oleh SO_x terdiri dari oleh dua komponen sulfur yaitu sulfur dioksida (SO₂) dan sulfur trioksida (SO₃). Kandungan SO₃ dalam SO_x sangat kecil sekali yaitu sekitar 1-5%. SO₂ mempunyai karakteristik bau yang tajam, tidak berwarna, tidak mudah terbakar di udara, jika bereaksi di atmosfer akan membentuk zat asam. Sedangkan SO₃ adalah komponen yang tidak reaktif. Pencemaran SO_x menimbulkan dampak pada manusia berupa iritasi sistem pernafasan pada kadar 5 ppm, dan kerusakan pada tanaman terjadi pada kadar 0,5 ppm. Emisi SO_x dan NO_x merupakan emisi yang berkontribusi besar penyebab dampak *terrestrial acidification* (Roy et al., 2012).

2.2.1.4 Nitrogen Dioksida (NO_x)

Oksida nitrogen (NO_x) adalah kelompok gas nitrogen yang terdapat di atmosfer yang terdiri atas nitrogen monoksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO₂). NO terdapat di udara dalam jumlah lebih besar daripada NO₂. Pembentukan NO dan NO₂ adalah reaksi antara nitrogen dan oksigen di udara sehingga membentuk NO, yang bereaksi lebih lanjut dengan lebih banyak oksigen membentuk NO₂. Komposisi nitrogen dalam udara adalah 78%. NO₂ merupakan gas yang toksik bagi manusia. Pada kadar 50-100 ppm dapat menyebabkan peradangan paru-paru untuk paparan selama satu menit (Budianto, 2008).

2.2.1.5 Particulate Matter (PM)

Particulate Matter adalah campuran partikel dan tetesan di udara, terdiri dari berbagai komponen seperti senyawa organik, logam, asam, tanah, dan debu (Cienczewicki dan Jaspers, 2007). Dampak utama bagi kesehatan manusia dari paparan PM-10 meliputi: efek pada pernapasan dan sistem pernapasan, kerusakan jaringan paru-paru, kanker, dan kematian dini. Orang tua, anak-anak, dan orang-orang dengan penyakit paru-paru kronis, influenza, atau asma, sangat sensitif terhadap efek partikel..

Adanya potensi pencemaran udara tersebut yang dapat ditimbulkan dari kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Termal, maka terdapat regulasi Peraturan Menteri LHK Nomor P.15 Tahun 2019 yang bertujuan untuk memberikan batasan Baku Mutu Emisi dan kewajiban melakukan pemantauan Emisi kepada penanggung jawab usaha dan/atau kegiatan yang mengoperasikan Pembangkit Listrik Tenaga Termal. Baku Mutu Emisi yang berlaku bagi PLTU Paiton unit 9 sesuai Peraturan Menteri LHK No. P.15 Tahun 2019 ditampilkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Baku Mutu Emisi PLTU

No	Parameter	Kadar Maksimum		
		Batubara (mg/Nm ³)	Minyak Solar (mg/Nm ³)	Gas (mg/Nm ³)
1	Sulfur Dioksida (SO ₂)	550	650	50
2	Nitrogen Oksida (NO _x)	550	450	320
3	Partikulat (PM)	100	75	30
4	Merkuri (Hg)	0,03	-	-

Sumber : Peraturan Menteri LHK Nomor P.15 Tahun 2019, Lampiran I

2.2.2 Pemanasan Global

Pemanasan global merupakan salah satu masalah terbesar yang dihadapi bumi kita saat ini karena penyalahgunaan energi dan sumber daya sehingga menyebabkan suhu bumi meningkat. Peningkatan suhu bumi ini telah mempengaruhi siklus hidup semua makhluk (Riebeek, 2010). Pemanasan global (global warming) adalah suatu bentuk ketidakseimbangan ekosistem di bumi akibat terjadinya proses peningkatan suhu rata-rata atmosfer, laut, dan daratan di bumi. Selama kurang lebih seratus tahun terakhir, suhu rata-rata di permukaan bumi telah meningkat $0,74 \pm 0,18$ °C. Meningkatnya suhu rata-rata permukaan bumi disebabkan oleh meningkatnya emisi gas rumah kaca, seperti karbondioksida (CO₂), metana (CH₄), dinitrooksida (N₂O), hidrofluorokarbon, perfluorokarbon, dan sulfur heksafluorida di atmosfer. Emisi ini terutama dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar fosil (minyak bumi dan batu bara) serta akibat penggundulan dan pembakaran hutan (Utina, 2008). Penyebab pemanasan global lainnya antara lain ialah deforestasi, pembentukan gas metana, karbon dioksida dari kendaraan bermotor, karbon dioksida dari pembangkit listrik, perubahan penggunaan lahan, dan lain sebagainya (Zein dan Chehayeb, 2015).

Seperti diketahui, gas CO₂ adalah salah satu komponen gas rumah kaca yang diperkirakan setiap tahun dilepaskan sekitar 18,35 miliar ton CO₂. Ketika atmosfer semakin kaya akan gas-gas rumah kaca ini, maka semakin menjadi insulator yang menahan lebih banyak panas dari matahari yang dipancarkan ke bumi, sehingga menyebabkan pemanasan global atau global warming (Sulistiyono, 2010). Pemanasan global diperkirakan telah menyebabkan perubahan-perubahan sistem terhadap ekosistem di bumi, antara lain perubahan iklim yang ekstrim, mencairnya es sehingga permukaan air laut naik, serta perubahan jumlah dan pola presipitasi. Adanya perubahan sistem dalam ekosistem ini telah memberi dampak pada kehidupan di bumi seperti terpengaruhnya hasil pertanian, hilangnya gletser dan punahnya berbagai jenis hewan (Utina, 2008)

2.2.3 Pencemaran Perairan

Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, definisi

pencemaran air adalah masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan atau komponen lain ke dalam air oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu air yang telah ditetapkan. Air Limbah adalah air yang berasal dari suatu proses dalam suatu kegiatan.

Berdasarkan Izin Pembuangan Air Limbah ke Laut, dihasilkan air limbah yang dapat dikelompokkan menjadi 3 yaitu :

1. Air Limbah Pendingin Kondensor/ Air Bahang

Pada air pendingin kondensor dilakukan injeksi bahan kimia diantaranya yaitu :

- *chlorine* yang berfungsi untuk mencegah dan menekan perkembangan pertumbuhan biota laut yang dapat mengganggu proses perpindahan kalor di kondensor,
- *anti scale* yang berfungsi untuk meminimalisir adanya pengendapan di dalam pipa close cooling agar tidak terjadi penyumbatan dalam kondensor,
- *anti foam* yang berfungsi untuk mengurangi terbentuknya busa dari injeksi bahan kimia yang dilakukan.

Sebelum dibuang ke perairan laut (*outfall*), air pendingin kondensor melalui saluran tertutup sepanjang 628 m yang bertujuan untuk menurunkan suhu karena adanya panas yang diserap oleh air pendingin dari uap turbin. Baku mutu air limbah pendingin kondensor yang diizinkan dibuang ke laut ditampilkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Baku Mutu Air Limbah Pendingin Kondensor/ Bahang

No	Parameter	Satuan	Kadar Paling Tinggi
1	Temperatur	°C	40*
2	Korin bebas (Cl ₂)**	mg/L	0,5

Keterangan :

* Merupakan hasil pengukuran rata-rata bulanan di outlet kondensor

** Dilarang melakukan chlorine chocking lebih dari 2 jam setiap hari

Sumber : data perusahaan

2. Air limbah *Reject Reverse Osmosis* (RO)

Proses pengolahan air laut menjadi air baku yang memenuhi parameter operasi untuk proses produksi dilakukan secara 2 tahap yaitu tahap desalinasi dengan metode *reverse osmosis* dan tahap demineralisasi dengan metode *ion exchange*. *Reverse osmosis* terdiri dari SWRO (*Sea Water Reverse Osmosis*) yang bertujuan untuk mengolah air laut menjadi air tawar dan BWRO (*Brackish Water Reverse Osmosis*) yang bertujuan untuk mengolah air payau menjadi air demin. Pada proses desalinasi terbentuk air limbah dari proses SWRO dan BWRO berupa *reject water* yang belum memenuhi parameter konduktivitas untuk digunakan sebagai air proses sehingga dilakukan pembuangan ke laut. Baku mutu air limbah *reject RO* yang diizinkan dibuang ke laut ditampilkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Baku Mutu Air Limbah *Reject RO*

No	Parameter	Satuan	Kadar Paling Tinggi
1	pH	-	6-9
2	Salinitas	‰	Pada radius 30 meter dari lokasi pembuangan air limbah ke laut, kadar salinitas air limbah sudah harus sama dengan kadar salinitas alami

Sumber : Data perusahaan

3. Air Limbah Domestik

Air limbah domestik berasal dari limbah cair dari kegiatan sehari-hari karyawan seperti dari wastafel, kamar mandi, ataupun toilet yang dibuang ke *septic tank* dan diolah pada Sewage Treatment Plant (STP). Pengolahan STP dilakukan dengan menggunakan sistem *actiuated sludge* dengan menggunakan *oxidation pond*, kemudian air limbah hasil pengolahan STP yang telah memenuhi baku mutu dialirkan ke saluran menuju ke laut. Baku mutu air limbah domestik yang diizinkan dibuang ke laut ditampilkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Baku Mutu Air Limbah Domestik

No	Parameter	Satuan	Kadar Paling Tinggi
1	pH	-	6-9
2	BOD	mg/L	30
3	COD	mg/L	100
4	TSS	mg/L	30
5	Minyak dan Lemak	mg/L	5
6	Amoniak	mg/L	10
7	Total Coliform	Jumlah/100 mL	3000

Sumber : Data Perusahaan

2.2.4 Pencemaran Tanah

Produk samping yang dihasilkan dari proses produksi listrik yaitu limbah fly ash (abu terbang) dan bottom ash (abu dasar) yang dihasilkan dari proses pembakaran di boiler. Fly ash dan bottom ash mengandung unsur kimia antara lain silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), fero oksida (Fe_2O_3) dan kalsium oksida (CaO), serta unsur tambahan lain yaitu magnesium oksida (MgO), titanium oksida (TiO_2), alkalin (Na_2O dan K_2O), sulfur trioksida (SO_3), fosfor oksida (P_2O_5) dan carbon yang berpotensi menyebabkan pencemaran air tanah apabila tidak dilakukan pengelolaan lanjut sesuai dengan regulasi.

Menurut ASTM C618 fly ash dibagi menjadi dua kelas yaitu fly ash kelas F dan kelas C. Perbedaan utama dari keduanya adalah banyaknya calsium, silika, aluminium dan kadar besi pada fly ash. Fly ash yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara PLTU termasuk kelas C yang berasal dari pembakaran lignite atau batu bara subbituminous yang memiliki senyawa kimia $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 50\%$. Fly ash kelas C ini bersifat pozzolan dan cementitious. Dari hasil penelitian, fly ash tipe C meningkatkan sedikit workability beton, mengurangi kadar air beton dan juga meningkatkan kuat tekan beton. Fly ash tipe C memiliki kadar kalsium lebih tinggi sehingga memiliki kekuatan awal yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan tipe F. Meningkatnya kadar fly ash dapat mengurangi kebutuhan air, hal ini dikarenakan oleh bentuk partikel fly ash yang bulat dan memiliki ukuran yang sangat kecil sehingga mengurangi *void* (Naganathan et al., 2015).

Pengelolaan fly ash dan bottom ash meliputi pemanfaatan internal yang dilakukan sesuai dengan izin pemanfaatan yang dimiliki, yaitu sebagai paving dan batako, serta pemanfaatan eksternal yaitu sebagai substitusi bahan baku pada industri beton dan semen. Pada fly ash dan bottom ash yang tidak dimanfaatkan dilakukan penanganan berupa penimbunan pada landfill, dengan kewajiban pengujian berkala sesuai dengan ketentuan pada izin landfill yang bertujuan untuk mencegah terjadinya pencemaran air tanah.

Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No 22 tahun 2021 lampiran IV tercantum bahwa fly ash dan bottom ash yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara pada fasilitas pembangkitan listrik tenaga uap PLTU atau dari kegiatan lain yang menggunakan teknologi selain stocker boiler dan/atau tungku industri termasuk dalam limbah non B3 terdaftar. Namun, fly ash dan bottom ash terdapat dalam jumlah yang cukup besar sehingga memerlukan pengelolaan agar tidak menimbulkan masalah lingkungan, seperti pencemaran udara, atau perairan, dan penurunan kualitas ekosistem (Wardani, 2008).

2.3 *Life Cycle Assessment (LCA)*

Salah satu metode yang paling diakui untuk menilai dampak lingkungan yang terkait dengan kegiatan atau produk adalah LCA (Hospido et al., 2003). Konsep dasar dari LCA didasarkan pada pemikiran bahwa suatu sistem industri yang terdapat input dan output tidak lepas kaitannya dengan dampak terhadap lingkungan. Input dari sistem adalah material yang diambil dari lingkungan dan output dari sistem merupakan material akan dibuang ke lingkungan kembali. Pengambilan material (input) yang berlebihan akan menyebabkan semakin berkurangnya persediaan material, sedangkan hasil output dari sistem industri yang bisa berupa limbah (padat, cair, udara) akan banyak memberi dampak negatif terhadap lingkungan.

LCA dapat digunakan sebagai metode ilmiah untuk mengidentifikasi material, sumber energi dan emisi yang dapat muncul pada keseluruhan daur hidup sebuah produk (Klöpffer dan Grahl 2014). Metode ini nantinya akan menghasilkan output berupa proses atau aktivitas yang memberikan dampak paling besar terhadap lingkungan, dimana hasil tersebut akan dijadikan sebagai acuan dalam menentukan

alternatif-alternatif perbaikan untuk mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan (Kautzar dkk., 2015). Oleh karena itu, LCA dapat digunakan untuk membantu strategi dalam pembuatan keputusan, untuk meningkatkan kualitas produk dan proses serta mempelajari aspek lingkungan dari suatu produk (Putri, 2017)

LCA membutuhkan data mengenai input dan output secara lengkap, meliputi bahan baku, proses pembuatan, distribusi, transportasi, konsumsi, hasil samping, dan dampak lingkungan. Menurut Klöpffer dan Grahl (2014), LCA terdiri dari beberapa elemen, di antaranya:

1. Identifikasi dan mengukur faktor-faktor yang terlibat dalam keseluruhan proses seperti energi dan bahan baku yang digunakan, hingga emisi dan limbah yang dihasilkan.
2. Evaluasi faktor-faktor yang berpotensi berdampak terhadap lingkungan.
3. Analisis untuk mengurangi dampak lingkungan yang akan terjadi.

Dalam upaya melaksanakan proses produksi yang berkelanjutan dan berwawasan lingkungan, perusahaan telah berusaha melaksanakan berbagai program guna meningkatkan efisiensi proses produksi dengan menyediakan biaya investasi yang tidak sedikit jumlahnya. Namun dengan biaya yang cukup besar tersebut, perusahaan harus melakukan pemilihan program yang efektif dalam mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan dalam proses produksi. Sehingga diperlukan suatu analisis untuk menentukan pada unit proses manakah dampak lingkungan terbesar dihasilkan. Untuk urgensi tersebut, perusahaan dapat menggunakan hasil analisis LCA sebagai acuan dalam menentukan rekomendasi program lingkungan yang sesuai dan efektif dalam menurunkan dampak lingkungan yang ditimbulkan. sehingga dapat memfokuskan upaya pengoptimalan pada bagian tersebut. Perusahaan juga dapat membandingkan alternatif proses produksi untuk memilih proses mana yang lebih baik kinerjanya.

2.3.1 Manfaat dan Kegunaan LCA

Menurut Valentina (2011), adapun beberapa manfaat atau nilai penting dari Life Cycle Assessment (LCA) adalah:

1. Mampu mengestimasi bahan dan sumber energi yang digunakan.

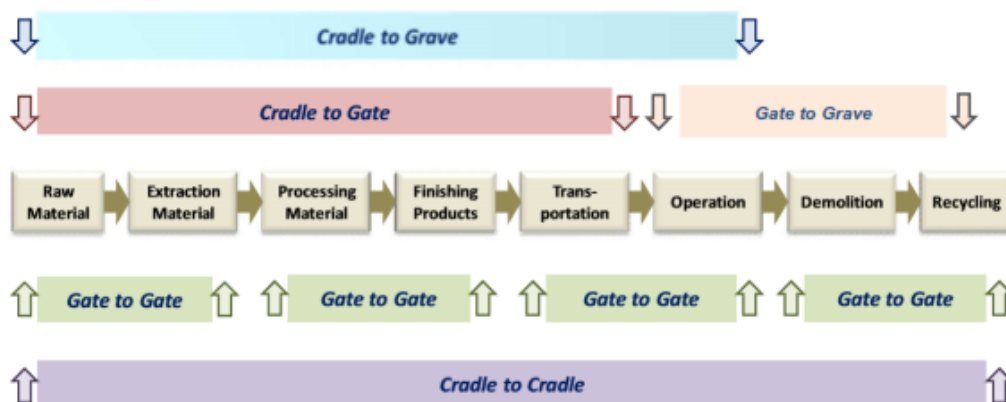
2. Mengukur tingkat keberlanjutan suatu produk atau teknologi yang digunakan (menggunakan *green technology*).
3. Dapat digunakan sebagai metode evaluasi produk perihal keberlanjutan dan biaya produksi. Hal ini diharapkan mampu mengefisiensikan penggunaan sumber daya dalam produksi produk dan meminimalisir emisi serta limbah yang mencemari lingkungan, termasuk peningkatan keasaman, keracunan air, efek rumah kaca, eutrofikasi, toksisitas manusia, penipisan ozon dan kabut juga berkurang sebagai akibat langsung dari penggunaan bahan kimia yang lebih efisien.

Sedangkan fungsi atau kegunaan dari Life Cycle Assessment (LCA) menurut ISO 14040 (2016) ialah LCA dapat membantu dalam:

1. Mengidentifikasi peluang untuk memperbaiki kinerja lingkungan dari produk di berbagai titik dalam daur hidupnya.
2. Menginformasikan kepada pengambil keputusan di industri, organisasi pemerintah atau non-pemerintah untuk mengefisiensikan semua tahapan pada siklus daur hidup produk.
3. Pemilihan indikator yang relevan dari kinerja lingkungan, termasuk teknik pengukuran hingga distribusi dan pemasaran.

2.3.2 Ruang Lingkup LCA

Menurut ISO 14040 (2016) dan Hermawan dkk. (2013), terdapat 5 batasan untuk ruang lingkup pada metode Life Cycle Assessment (LCA) yang dapat dilihat selengkapnya pada Gambar 2.3 berikut ini:



Gambar 2.3 Ruang Lingkup LCA

(Sumber: Hermawan dkk., 2013)

- a. *Cradle to grave*: dimulai dari bahan baku berupa raw material yang diambil dari alam kemudian melewati semua tahapan proses dari ekstraksi bahan baku melalui tahap produksi, transportasi, dan penggunaan hingga masa siklus hidup produk berakhir.
- b. *Cradle to gate*: dimulai dari bahan baku berupa raw material yang diambil dari alam hingga semua tahapan proses produksi dalam pabrik (sebelum dioperasikan atau didistribusikan)
- c. *Gate to gate*: ruang lingkup yang terpendek karena hanya mencakup analisa proses produksi suatu produk saja yaitu pemrosesan dari bahan baku hingga produk jadi.
- d. *Gate to grave*: meliputi proses dari distribusi dan penggunaan produk pasca produksi hingga masa siklus hidup produk berakhir.
- e. *Cradle to cradle*: bagian dari analisis daur hidup yang menunjukkan ruang lingkup dari raw material sampai pada daur ulang material (recycle).

2.3.3 Karakteristik dan Batasan LCA

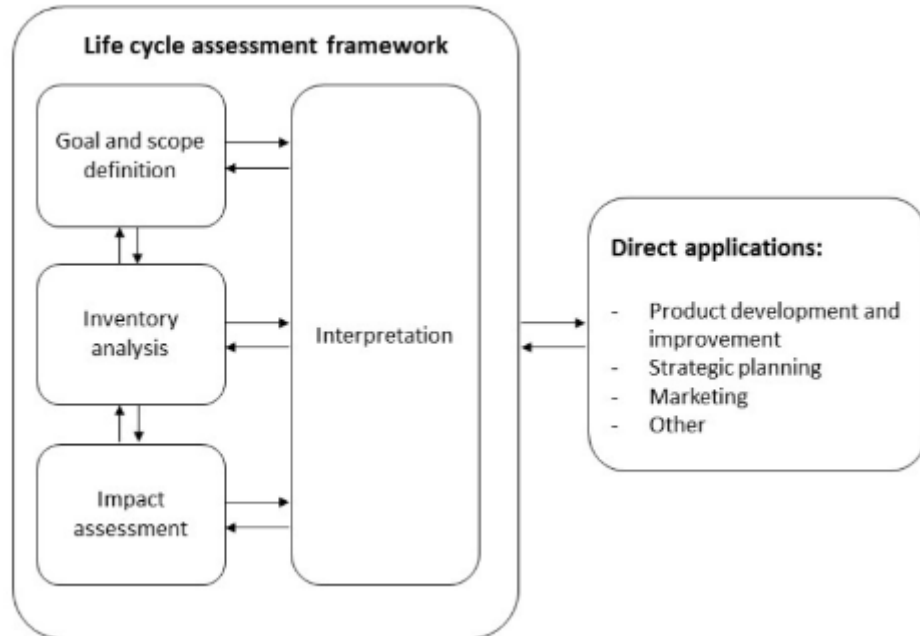
LCA memiliki karakteristik dan batasan untuk menilai siklus hidup, adapun batasan tersebut adalah sebagai berikut (Pujadi, 2013):

1. Karakteristik utama dari LCA adalah sifat analisis secara menyeluruh dan lengkap yang menjadi kekuatan utama metode ini
2. Metode LCA berfokus pada karakteristik fisik dari aktivitas industri dan proses ekonomi lainnya, dan tidak termasuk mekanisme pasar atau efek lain dalam pengembangan teknologi
3. LCA hanya berfokus pada aspek lingkungan dan tidak berkaitan dengan aspek ekonomi, aspek sosial, maupun aspek lainnya
4. LCA adalah sebuah alat analitis yang digunakan untuk menyediakan informasi untuk mendukung keputusan, namun LCA tidak dapat menggantikan proses pengambilan keputusan itu sendiri.

2.3.4 Tahapan LCA

Berdasarkan SNI ISO 14040 (2016), kajian LCA dibagi menjadi 4 tahapan yaitu tahap *goal and scope definition* (definisi tujuan dan lingkup), *inventory*

analysis (analisis inventori), *impact assessment* (penilaian dampak), dan *interpretation* (interpretasi) yang dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Tahapan LCA (SNI ISO 14040, 2016)

1. *Goal and Scope Definition* (Definisi Tujuan dan Ruang Lingkup)

Definisi *goal and scope* dirancang untuk mendapatkan spesifikasi yang diperlukan untuk kajian LCA. Dalam mendefinisikan *goal* dari kajian LCA harus ditetapkan secara jelas mengenai tujuan penerapan LCA, alasan untuk melaksanakan kajian LCA, pihak yang ditunjuk untuk mengkomunikasikan hasil kajian LCA dan apakah hasil kajian LCA akan dipublikasikan kepada masyarakat (SNI ISO 14044, 2017). Definisi *scope* dalam kajian LCA yaitu menentukan *product system* apa yang akan dinilai dan bagaimana penilaian harus dilakukan untuk memastikan konsistensi data, asumsi, dan metode serta memperkuat reproduktifitas kajian (Hauschild *et al.*, 2018). Menurut Sonnemann *et al.* (2019) untuk mendefinisikan *goal and scope* kajian LCA dapat mengikuti beberapa prosedur yaitu:

1. Mendefinisikan *goal* kajian LCA, kemudian mendefinisikan *functional unit* yang menjadi acuan kuantitatif dalam kajian.
2. Mendefinisikan *scope* kajian LCA, yang mencakup dua hal utama yaitu menetapkan *system boundaries* antara *product system* yang dikaji dengan

lingkungannya dan merincikan sistem dengan menggambarkan *reference flow* proses unitnya, dengan mempertimbangkan estimasi *input* dan *output* ke lingkungan (*elementary flow*)

3. Menentukan data yang diperlukan, yang mencakup spesifikasi data yang diperlukan untuk tahap *inventory analysis* dan tahap *impact assessment*.

Berdasarkan SNI ISO 14040 (2016), *functional unit* adalah kinerja yang terukur dari sistem produk untuk digunakan sebagai unit acuan. Satuan pada *functional unit* digunakan sebagai dasar perhitungan dan sebagai dasar perbandingan antara sistem yang berbeda namun memenuhi fungsi yang sama (Sonnemann *et al.* 2019). *System boundary* adalah rangkaian kriteria untuk menetapkan unit proses mana saja yang menjadi bagian dari sistem produk (SNI ISO 14040, 2016).

Secara umum *system boundaries* dari *scope* kajian LCA dapat dibagi menjadi 4 macam yaitu *cradle to grave*, *cradle to gate*, *gate to gate*, dan *cradle to cradle* (Bayer *et al.*, 2010). Dalam menentukan data yang diperlukan perlu dipertimbangkan terkait kualitas dari data yang akan digunakan. Kualitas data harus dinilai dan dideskripsikan dengan cara sistematis agar mempermudah praktisi lain dalam memahami kajian LCA yang dibuat (Sonnemann *et al.* 2019).

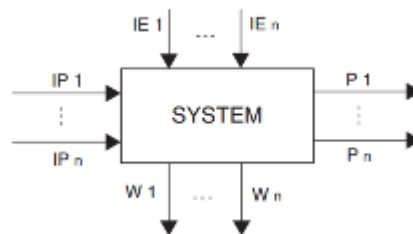
2. Life Cycle Inventory (LCI)

Life Cycle Inventory (LCI) adalah tahap dalam LCA yang meliputi kompilasi dan kuantifikasi dari *input* dan *output* untuk suatu produk sepanjang daur hidupnya SNI ISO 14040, 2016). LCI didasarkan pada definisi *goal and scope* yang telah ditentukan sebelumnya. Menurut SNI ISO 14044 (2017), langkah-langkah yang diperlukan pada tahapan LCI yaitu:

1. Pengumpulan data yang mencakup spesifikasi semua aliran *input* dan *output* dari proses dalam sistem produk (Sonnemann *et al.* 2019).
2. Validasi data harus dilakukan selama proses pengumpulan data untuk melakukan konfirmasi dan memberikan bukti bahwa persyaratan kualitas data berdasarkan tujuan kajian telah terpenuhi.
3. Alokasi yaitu sebaran emisi dan ekstraksi sumber daya dalam proses tertentu di seluruh produknya yang berbeda.
4. Menghubungkan data ke unit proses dan unit fungsi

5. Agregasi Data

Data berupa *flow input* dan *output* harus ditetapkan untuk setiap unit proses dengan membuat diagram alir. Setelah dilakukan pembuatan diagram alir untuk masing-masing unit proses kemudian masing-masing unit proses digabungkan menjadi suatu unit fungsi (Hauschild *et al.*, 2018). Setelah menjadi satu unit fungsi kemudian dilakukan agregasi data. Agregasi Data merupakan penggabungan data yang detail menggambarkan unit fungsi menjadi suatu *product system* (SNI ISO 14044, 2017). Ilustrasi dari neraca suatu *product system* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Representasi Neraca *Product System* (Sonnemann *et al.*, 2019)

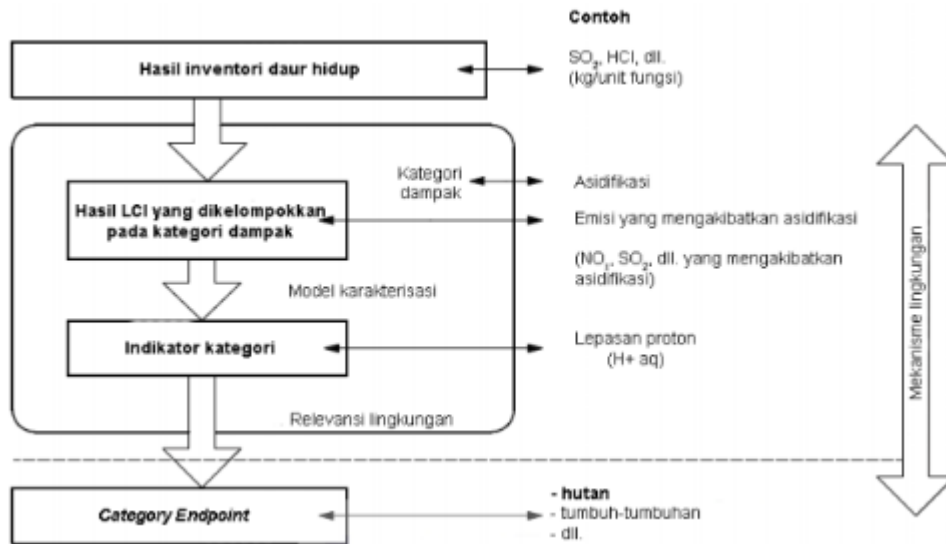
Ilustrasi tersebut menggambarkan aliran proses *input* dan *output* pada *product system*. Berbagai variasi *input* massa raw material (IP) dan *input* (IE) pada *product system* akan diproses dan menghasilkan variasi *output* limbah (W) dan produk (P) (Sonnemann *et al.*, 2019).

3. Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Life Cycle Impact Assessment (LCIA) merupakan tahapan dalam LCA yang dimaksudkan untuk memahami dan mengevaluasi besaran dan pentingnya dampak lingkungan potensial dari suatu *product system* di seluruh daur hidupnya (SNI ISO 14040, 2016). Berdasarkan ISO 14044, unsur wajib pada tahap LCIA adalah sebagai berikut:

- a. Pemilihan kategori dampak, indikator kategori dan model karakterisasi. Pemilihan kategori dampak harus merefleksikan isu-isu lingkungan yang komperhensif terkait dengan sistem produk yang dikaji, dengan mempertimbangkan *goals and scope*. Indikator kategori merupakan representasi dari suatu kategori dampak yang dapat dikuantifikasi. Model karakterisasi merefleksikan mekanisme lingkungan yang menggambarkan

hubungan antara hasil LCIA, indikator kategori, dan *category endpoint* dalam sejumlah kasus. Konsep dari kategori dampak, indikator kategori dan model karakterisasi dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Konsep dari Kategori Dampak, Indikator Kategori dan Model Karakterisasi (Sumber : SNI ISO 14044, 2017)

b. Klasifikasi (*Classification*)

Berdasarkan Hauschild *et al.* (2018) pada langkah klasifikasi, *elementary flow* dari LCI ditetapkan ke kategori dampak (misal emisi CO₂ ke udara menyebabkan dampak *global warming*). Beberapa *elementary flow* dapat memiliki banyak dampak dalam 2 mode yaitu:

1. Secara paralel yaitu suatu *elementary flow* memiliki beberapa dampak yang silmutan, seperti SO₂ yang menyebabkan *acidification* dan toksik bagi manusia saat dihirup.
2. Secara seri yaitu suatu *elementary flow* memiliki efek merugikan dan menjadi penyebab suatu dampak yang lain, seperti SO₂ yang menyebabkan *acidification* yang kemudian meyebabkan mobilisasi logam berat di tanah yang memiliki toksik bagi manusia dan ekosistem.

c. Karakterisasi (*Characterication*)

Berdasarkan Hauschild *et al.* (2018) pada langkah karakterisasi, semua *elementary flow* dari LCI dinilai menurut faktor kontribusinya pada suatu

dampak. Semua *elementary flow* (E) diklasifikasikan dalam kategori dampak tertentu (c) yang kemudian dikalikan dengan masing-masing *characterization factor* (CF) dan dijumlahkan semua intervensi yang relevan (i) yang menghasilkan *impact score* (IS) dalam kategori dampak lingkungan (dinyatakan dalam unit tertentu untuk semua aliran dasar dalam kategori dampak yang sama) dengan persamaan:

$$ISc = \sum i (CF_i \times E_i) \quad (2.1)$$

ISc = Skor dampak pada kategori dampak tertentu

CF_i = Faktor karakteristik pada suatu intervensi

E_i = *Elementary flow* pada suatu intervensi

Dalam menentukan besar dampak lingkungan pada tahap karakterisasi, terdapat dua pendekatan pada faktor karakterisasi yang dapat digunakan berdasarkan jalur dampaknya, yaitu pendekatan *midpoint* dan *endpoint*. Pendekatan *midpoint* lebih berfokus pada masalah lingkungan tunggal, seperti *climate change*, *ozone depletion*, dan lain-lain yang menggambarkan sebab akibat dampak lingkungan awal yang akan muncul berdasarkan hasil LCI. Sedangkan pada pendekatan *endpoint* menghasilkan dampak lingkungan dengan tingkat pengkategorian yang lebih tinggi dan besar, seperti *human health*, *ecosystem quality*, dan *natural resources* (Menoufi, 2011).

Berdasarkan ISO 14044, unsur opsional pada tahap LCIA adalah sebagai berikut :

a. Normalisasi (*Normalization*)

Normalisasi adalah menghitung besaran hasil indikator kategori relative terhadap informasi acuan (ISO SNI 14044, 2017). Pada umumnya metode LCIA menyediakan faktor normalisasi untuk digunakan dengan faktor karakterisasi. Faktor normalisasi harus dihitung menggunakan faktor karakterisasi yang sama untuk inventaris referensi seperti yang digunakan untuk LCI. Faktor normalisasi dari LCIA memiliki perbedaan metode sehingga tidak dapat digabungkan dengan faktor karakterisasi dari metode LCIA (Hauschild *et al.*, 2018). Normalisasi dilakukan untuk mempermudah analisis dalam membandingkan besaran dampak antar kategori dampak. Menurut Bagaswara dan Hadi, (2017)

persamaan yang digunakan untuk menghitung normalisasi adalah sebagai berikut:

$$NSc = \frac{ISc}{NFc} \quad (2.2)$$

NSc = Skor normalisasi pada kategori dampak tertentu

ISc = Skor dampak pada kategori dampak tertentu

NFc = Faktor normalisasi pada kategori dampak tertentu

b. Pengelompokan (*Grouping*)

Pengelompokan adalah penetapan kategori dampak ke dalam satu kelompok atau lebih sebagai yang ditetapkan dalam definisi *goal and scope*, dan dapat melibatkan penyortiran dan/atau pemeringkatan. Pengelompokan adalah unsur opsional dengan dua kemungkinan prosedur yang berbeda yaitu:

- Menyortir kategori dampak secara nominal (misalnya berdasarkan karakteristik input dan *output* atau skala spasial global, regional atau lokal)
- Memberi peringkat kategori dampak dalam hierarki (misalnya, prioritas tinggi, sedang, atau rendah)

c) Pembobotan (*Weighting*)

Pembobotan adalah proses mengkonversi hasil indikator dari kategori dampak yang berbeda menggunakan faktor pembobotan (ISO SNI 14044, 2017). Pembobotan dapat digunakan untuk menentukan dampak mana yang paling penting. Langkah ini hanya dapat diterapkan setelah langkah normalisasi dan memungkinkan prioritas kategori dampak dengan menerapkan bobot yang berbeda atau sama untuk setiap indikator kategori (Hauschild *et al.*, 2018). Menurut Bagaswara dan Hadi, (2017) persamaan yang digunakan untuk menghitung skor pembobotan adalah sebagai berikut:

$$WSC = NSc \times WFc \quad (2.3)$$

WSC = Skor pembobotan pada kategori dampak tertentu

NSc = Skor normalisasi pada kategori dampak tertentu

WFc = Faktor pembobotan pada kategori dampak tertentu

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 1 Tahun 2021 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup, ditetapkan kategori dampak yang dikaji meliputi 4 dampak primer dan 7 dampak sekunder. Adapun 4 dampak primer yang dikaji adalah sebagai berikut:

a. Global Warming

Global warming (pemanasan global) merupakan peningkatan suhu yang ada di bumi, yang diakibatkan oleh tertahannya radiasi matahari oleh gas rumah kaca (CO₂, CO, NO_x, CFC, fluorida sulfur, metana, hidrokarbon, uap air dan lain-lain) sehingga tidak dapat terlepas ke atmosfer. Radiasi matahari yang dipancarkan oleh matahari, sebagian akan terserap oleh permukaan bumi untuk menjaga suhu bumi agar stabil dan sebagian lainnya akan dipantulkan kembali ke atmosfer. Radiasi matahari yang dipantulkan tersebut, sebagian dapat melewati atmosfer namun sebagian lainnya terserap oleh gas rumah kaca dan dipantulkan kembali ke bumi. Tertahannya radiasi matahari oleh gas rumah kaca adalah penyebab terjadinya pemanasan global. Kategori dampak *global warming* dinyatakan dalam kg CO₂ eq sebagai dampak *midpoint*. Karakteristik dampak lingkungan ini berlandaskan oleh *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*.

b. Ozone Layer Depletion

Emisi udara seperti CFC, halon, metan, dan juga HCFC merupakan salah satu kontributor besar terhadap penipisan lapisan ozon. Terkikisnya lapisan ozon dapat mengurangi kemampuan ozon untuk mencegah ultraviolet (UV) yang bersifat karsinogenik (UVB) masuk ke dalam atmosfer bumi. Metode karakteristik dampak diambil berdasarkan *World Meteorological Organisation (WMO)*. Kategori dampak lingkungan *ozone layer depletion* dinyatakan dalam kg KFC-11 eq sebagai dampak *midpoint*. Dampak *ozone layer depletion* menyebabkan kerusakan terhadap kesehatan manusia dan kerusakannya dinyatakan dalam disability adjusted life years (DALY)/kg emisi sebagai dampak *endpoint*.

c. Potensi Hujan Asam / Acidification

Acidification merupakan proses dimana gas asam seperti sulfur dioksida (SO_2) bereaksi dengan air yang ada di atmosfer kemudian membentuk hujan asam. Gas yang menimbulkan *acid deposition* seperti amonia (NH_3), nitrogen oksida (NO_x) dan sulfur oksida (SO_x). *Acidification* termasuk kedalam kategori dampak lingkungan yang merusak ekosistem, kerusakannya dinyatakan dalam kg SO_2 eq sebagai dampak *midpoint* dan satuan *potentially disappeared fraction (PAF)*m²*years/kg emission* sebagai dampak *endpoint*.

d. Potensi Eutrophication

Eutrophication merupakan konsentrasi nutrient kimia yang ada di ekosistem yang dapat memicu pertumbuhan alga secara berlebihan. Emisi yang dapat mempengaruhi dampak ini seperti amonia, nitrat, nitrogen oksida dan fosfor yang ada di udara maupun di air yang dapat menyebabkan eutrofikasi di air. Metode karakterisasi yang digunakan berasal dari *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. *Eutrofikation* termasuk kedalam kategori dampak lingkungan yang merusak ekosistem, kerusakannya dinyatakan dalam satuan kg PO_4 eq sebagai dampak *midpoint*, dan satuan *potentially disappeared fraction (PAF)*m²*years/kg emission* sebagai dampak *endpoint*.

Adapun 7 kategori dampak sekunder yang dikaji meliputi :

a. Photochemical Oxidant

Kategori dampak ini terbentuk dari reaksi antara *volatile organic compounds (VOC)* dan nitrogen oksida yang terkena panas dan sinar matahari. Hal ini biasa disebut juga dengan *summer smog*. *Summer smog* merupakan polusi udara yang biasa ditemui di kawasan industri dan juga pada polusi kendaraan. Pada kasus *summer smog* yang ringan dapat menyebabkan sesak nafas pada penderita asma. Sedangkan pada kasus *summer smog* yang berat manusia sehat (bukan penderita asma) dapat menderita iritasi pernafasan, batuk dan susah bernafas. Karakteristik ini dilakukan dengan menggunakan *United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)*.

b. Abiotic Depletion (Fossil dan Non fossil)

Potensi penurunan abiotik baik fossil maupun non fossil dapat disebabkan karena penurunan jumlah material anorganik akibat proses ekstraksi berbagai material anorganik seperti air, logam, gambut, batubara, dll.

c. Biotic Depletion

Potensi dampak penurunan biotik dapat disebabkan oleh proses ekstraksi sumber daya alam seperti tumbuhan dan hewan. Kategori dampak ini tidak termasuk ke dalam sumber daya biotik yang diproduksi oleh proses produksi industri seperti hewan ternak, ikan dari akuakultur, tanaman pertanian, kayu dari perkebunan, dll.

d. Carcinogenic

Dampak karsinogenik disebabkan oleh emisi zat karsinogenik terhadap udara, air, dan tanah. Zat karsinogenik merupakan zat yang dapat menyebabkan kanker. Kanker disebabkan oleh perubahan yang terjadi pada DNA sel, namun tidak semua zat karsinogenik menyebabkan kanker dengan mempengaruhi DNA secara langsung, melainkan dengan cara lain seperti menyebabkan sel membelah pada tingkat yang lebih cepat dari biasanya yang dapat meningkatkan kemungkinan perubahan DNA dapat terjadi. *The International Agency for Research on Cancer (IARC, 2004)* yang merupakan bagian dari *World Health Organization (WHO)* telah mengevaluasi potensi penyebab kanker lebih dari 900 kandidat potensial dan mengelompokkannya kedalam 5 kelompok. Kelompok pertama adalah group 1 yang merupakan karsinogenik terhadap manusia, group 2A kemungkinan besar karsinogenik terhadap manusia, group 2B kemungkinan kecil karsinogenik terhadap manusia, group 3 tidak terklasifikasikan sebagai karsinogenik pada manusia, group 4 kemungkinan bukan karsinogenik terhadap manusia. Kategori dampak lingkungan karsinogenik dinyatakan dalam $\text{kg C}_2\text{H}_5\text{C}_1\text{-eq}$ sementara kerusakannya (*damage categories*) dinyatakan dalam *disability adjusted life years (DALY)/kg emisi*.

e. Toxicity

Emisi yang mempengaruhi kategori dampak toxicity seperti logam berat yang dapat berdampak di ekosistem. Kategori dampak ini diukur dalam 3 (tiga)

dampak kategori, yaitu *freshwater*, *marine*, dan *land*. Metode karakterisasi dampak kategori ini menggunakan EUSES. Sedangkan *Human toxicity* merupakan efek racun oleh bahan kimia pada manusia. Potensi kategori dampak ini dihitung berdasarkan indeks yang menunjukkan potensi bahan kimia yang dapat merusak lingkungan. Hal tersebut berdasarkan toksisitas dari zat kompon dan dosis potensial. Zat kimia seperti *hydrogen fluoride* dan *sodium dichromate* dan juga pembangkit listrik yang berasal dari bahan bakar fosil dapat mengakibatkan potensi kanker. Umumnya, kategori dampak ini terbagi menjadi 3 jenis, yaitu *human toxicity to air*, *human toxicity to water*, dan *human toxicity to soil*.

f. Land Use Change

Dampak kategori ini merupakan dampak terhadap lahan yang digunakan untuk agrikultur, pemukiman antropogenik dan pengambilan sumber daya alam. Dampak dari *land use* adalah hilangnya kesempatan bagi hewan dan tumbuhan dalam memanfaatkan lingkungan sebagai tempat tinggal dan mencari makan. Penyebab dampak lingkungan *land use* adalah pembukaan lahan baru, alih fungsi lahan, serta kerusakan hutan. Kerusakan akibat *land use* dinyatakan dalam *potentially disappeared fraction (PAF)*m² *years* yang berarti potensial kehilangan spesies per m² tiap tahunnya. Metode karakteristik berdasarkan UNEP/SETAC *land use assessment framework*.

g. Water Footprint

Water footprint adalah perhitungan total volume setiap jenis air yang digunakan pada proses produksi suatu produk. Dengan menghitung jejak air dapat diketahui volume air yang digunakan dan kontaminasi air yang terbentuk pada produksi dari setiap unit produk. *Water footprint* dapat dilakukan dengan perhitungan jumlah volume penggunaan air yang berasal dari mata air (*blue water footprint*), jumlah volume penggunaan air yang berasal dari air hujan (*green water footprint*) dan jumlah volume air yang digunakan untuk mengasimilasi atau melarutkan polutan (*grey water footprint*) pada setiap proses produksi.

4. Interpretasi Data

Interpretasi adalah tahapan LCA dimana hasil dari tahapan LCA lainnya dianalisis berdasarkan ketidakpastian dari data dan asumsi yang telah dibuat selama kajian (Hauschild *et al.*, 2018). Tujuan dari interpretasi ini adalah untuk mengidentifikasi tahap LCA yang pada keadaan tertentu dapat mengurangi *environmental impact* pada sistem atau produk dan menganalisis hal tidak pasti yang terlibat (Bagaswara dan Hadi, 2017). Pada tahapan interpretasi meliputi identifikasi masalah penting, melakukan evaluasi dan membuat kesimpulan, keterbatasan, dan rekomendasi (SNI ISO 14044, 2017). Identifikasi masalah penting dapat menggunakan *hotspot analysis*. *Hotspot analysis* adalah analisis suatu sistem produksi yang memiliki kontribusi yang signifikan terhadap dampak lingkungan. *Hotspot analysis* bermanfaat untuk mengidentifikasi lokasi diprioritaskan untuk dilakukan tindakan untuk perbaikan lingkungan (Sonnemann dan Margini, 2015).

Berdasarkan ISO 14044 evaluasi pada tahap interpretasi dilakukan dengan 3 pemeriksaan yaitu:

- Pemeriksaan kelengkapan (*completeness check*) bertujuan untuk memastikan bahwa semua informasi yang relevan dan data yang dibutuhkan tersedia dan lengkap. Jika ditemukan ketidaksesuaian informasi atau data yang dibutuhkan tidak lengkap maka *goals and scope* harus diperbaiki.
- Pemeriksaan konsistensi (*consistency check*) bertujuan untuk menentukan apakah asumsi, metode dan data konsisten dengan *goals and scope*
- Pemeriksaan sensitivitas (*sensitivity check*) bertujuan untuk menilai keandalan hasil akhir dan kesimpulan dengan bagaimana keduanya dipengaruhi oleh ketidakpastian data, metode alokasi atau perhitungan hasil indikator dan lainnya.

Hasil identifikasi masalah penting dan evaluasi kemudian dirumuskan dalam kesimpulan, keterbatasan dan rekomendasi. Tujuannya dari interpretasi adalah untuk mengambil kesimpulan, mengidentifikasi keterbatasan, dan membuat rekomendasi untuk pihak yang dituju oleh kajian LCA (SNI ISO 14044, 2017).

2.4 Pemilihan Software SimaPro untuk Analisis LCA

Terdapat beberapa *software* yang dapat mempermudah kegiatan analisis LCA. Kualitas *software* yang baik dapat dilihat berdasarkan struktur, *display of process*, transparansi, *database*, metode kalkulasi, serta metodologinya. Beberapa *software* untuk menganalisis LCA ditampilkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Software Analisis LCA

No	Aplikasi	Support Full LCI dan LCIA	Bahasa	Main Database	Special Area
1	CCaLC Tool	Ada	Inggris	CCaLC database (EcoInvent)	Tidak Ada
2	Ecoinvent waste	Tidak	Inggris	Ecoinvent Database	Waste Management
3	GaBi	Ada	Inggris	GaBi Database	Tidak Ada
4	Open LCA	Ada	Inggris	Tidak Ada	Tidak Ada
5	SimaPro	Ada	Inggris, Italia	SimaPro Database	Tidak Ada

Pemilihan *software* SimaPro didasari pertimbangan bahwa SimaPro telah menjadi perangkat lunak LCA terkemuka di dunia selama 25 tahun yang dipercaya oleh industri dan akademisi di lebih dari 80 negara (www.simapro.co.uk). SimaPro merupakan salah satu *software* yang dapat digunakan untuk melakukan analisis dampak lingkungan dari suatu sistem tertentu. Data yang dimasukkan dalam *software* SimaPro ditentukan berdasarkan deskripsi sistem yang sudah dijelaskan sebelumnya meliputi distribusi bahan baku, proses produksi, serta distribusi produk akhir (Kautzar, 2015).

SimaPro adalah *software* yang digunakan untuk mengumpulkan data, menganalisis, dan memantau kinerja keberlanjutan produk dan jasa dari suatu perusahaan. SimaPro dapat digunakan untuk penilaian siklus hidup, pembuatan laporan mengenai sustainability, desain produk, menentukan indikator kinerja utama, dan lainnya. SimaPro dikembangkan untuk membantu dalam pengumpulan fakta dan menggunakan metode LCA untuk memberikan wawasan yang diperlukan untuk menciptakan nilai yang berkelanjutan.

Software SimaPro yang biasa digunakan di dalam analisis LCA adalah SimaPro versi 9. *Software* SimaPro dengan versi terbaru ini memiliki update dari

database dari standar-standar di dalam analisis ekologi dan pada versi terbaru ini memiliki database LCA atau database eko inventori yang terbaru. Hasilnya akan mengkalkulasi inputan seperti kuantitas dan kualitas bahan baku dan menghasilkan outputan suatu nilai grafik.

SimaPro memiliki kelebihan dibandingkan software lainnya, diantaranya sebagai berikut (Pre, 2014):

- a. Bersifat fleksibel
- b. Memiliki metode dampak yang beragam (ditampilkan pada Tabel 2.5)
- c. Dapat digunakan secara *multi-user-version* sehingga dapat menginput data secara berkelompok meskipun berbeda lokasi
- d. Dapat menginventarisasi data dalam jumlah banyak
- e. Data yang didapatkan memiliki nilai transparansi yang tinggi, dimana hasil interaktif analisis dapat melacak hasil lainnya kembali ke asal-usulnya
- f. Mudah terhubung dengan perangkat lain
- g. Hadir dengan 3 versi yang diklasifikasikan berdasarkan pengguna, yaitu:
 1. SimaPro *Compact*: digunakan untuk mengatur tugas kompleks
 2. SimaPro *Analyst*: digunakan untuk melakukan permodelan siklus hidup dan berisi fitur analisis yang canggih dengan versi institusinya adalah SimaPro PhD
 3. SimaPro *Developer*: digunakan untuk pengguna yang ingin mengembangkan dedikasi LCA atau menghubungkan Simapro dengan software yang lainnya

Berdasarkan Pre (2014) beberapa kelebihan fitur yang disediakan di SimaPro yaitu:

1. Analisis ketidakpastian menggunakan analisis Monte Carlo
2. Alokasi dengan output yang lebih banyak
3. Analisis *hotspot* dalam siklus LCA menggunakan *tree process*
4. Analisis skenario pengolahan dan daur ulang limbah yang kompleks
5. Dapat mengidentifikasi bagaimana hasil LCA disajikan per proses, tahapan, atau fungsi

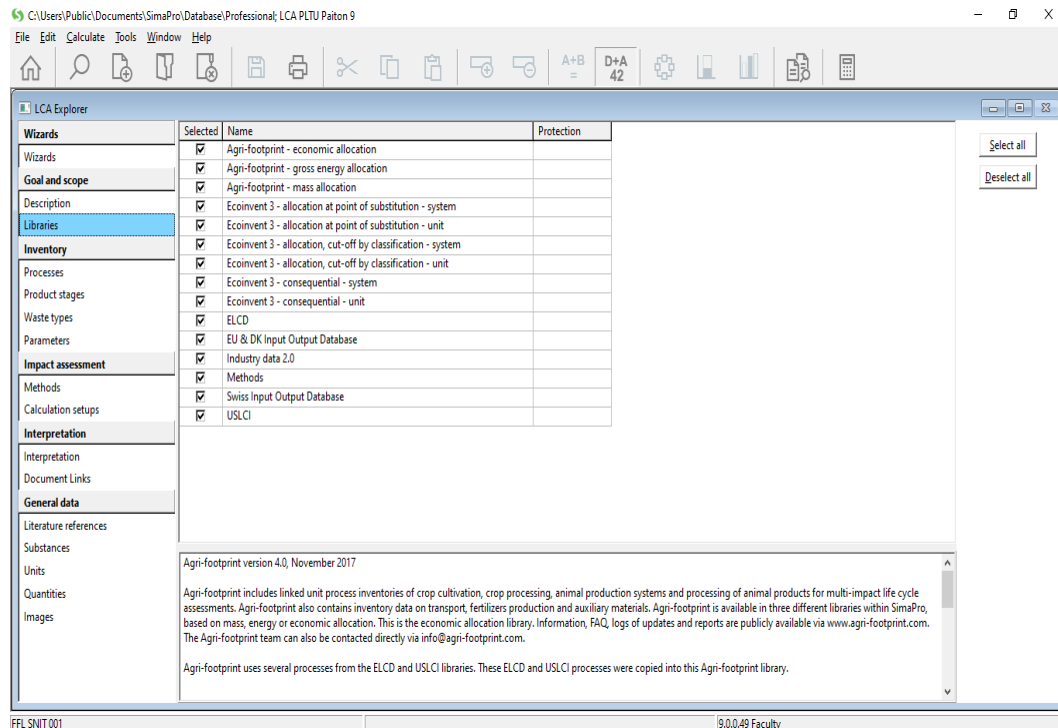
Terdapat beberapa tahapan pada SimaPro yakni:

- a. Menentukan Goal and Scope, terdiri dari :

- *Text field*, untuk menginput data pemilik, judul penelitian, tanggal, komentar, alasan dan tujuan melakukan penelitian LCA
 - Pemilihan *libraries*, memilih metoda *database* yang akan digunakan
 - *Funcional Unit*, menentukan satuan produk yang akan digunakan
- Tutorial penentuan *goal and scope* ditampilkan pada Gambar 2.7 dan Gambar 2.8.

Gambar 2.7 Penentuan Goal

Sumber : Simapro tutorial



Gambar 2.8 Penentuan Scope

Sumber : Simapro tutorial

Pada tahap ini dipilih *scope* penelitian adalah *Ecoinvent database*. *Scope* ini dipilih dikarenakan fokus terhadap:

- Input

Data input berupa penggunaan bahan bakar, bahan baku, bahan kimia dan energi pada kegiatan produksi di PLTU.

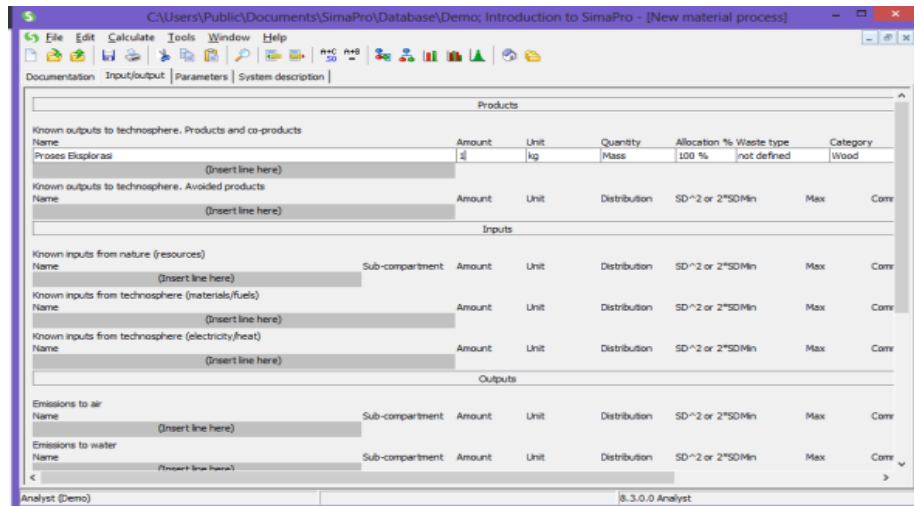
- Output

Data output berupa produk yang dihasilkan, emisi, dan limbah yang dihasilkan.

b. Melakukan inventarisasi data, terdiri dari :

- *Process*, merupakan input data mengenai input dan output, documentation, parameter, dan system description mengenai proses kegiatan industri tersebut
- *Product stages*, mendeskripsikan bagaimana suatu produk diproduksi, digunakan, dan dibuang

- *System description*, rekaman terpisah untuk mendeskripsikan struktur dari sistem
- *Waste types*, terdapat waste scenarios (material yang dibuang) dan disposal scenarios (produk yang digunakan kembali)



Gambar 2.9 Data Inventory Process

Sumber :SimaPro tutorial

Pada tahap ini dilakukan penginputan data *input* dan *output* masing-masing unit fungsi pada proses produksi listrik. Adapun data yang digunakan telah dilakukan normalisasi per satuan kWh produk listrik, dimana data ini dalam jumlah ton per tahun.

- c. Penilaian terhadap dampak, terdiri dari :
- *Methods*, yaitu memilih metode yang digunakan untuk penilaian terhadap dampak. Beberapa metode pada *software* Simapro ditampilkan pada Tabel 2.6

Tabel 2.6 Metode Dampak pada Software SimaPro

No	Metode	Keterangan
1	CML-IA	Pendekatan titik tengah
2	Ecological Scarcity 2013	Metode ini mempertimbangkan dampak lingkungan - emisi polutan dan konsumsi sumber daya.
3	EDIP 2003	Pendekatan dampak lingkungan pada kegiatan <i>industrial product</i> .
4	EPD 2013	Metode yang memiliki konsep deklarasi produk ramah lingkungan.

5	EPS 2000	Metode yang diperuntukkan bagi pengembangan produk internal perusahaan. Model dan data dibuat dari sudut pandang utilitas produk yang dikembangkan.
6	Impact 2002+	Metodologi penilaian dampak dengan implementasi pendekatan <i>midpoint/damage</i> gabungan yang sesuai, yang menghubungkan semua jenis inventaris siklus hidup
7	ReCiPe	Metode dengan mengintegrasikan pendekatan berorientasi masalah dan pendekatan berorientasikan kerusakan
8	ILCD 2011 Midpoint+	Penerapan metode koreksi
9	Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES)	Metode ini menggabungkan penilaian siklus hidup parsial dan biaya siklus hidup untuk bahan bangunan dan konstruksi menjadi alat. Metode ini membantu dalam pemilihan produk yang menyeimbangkan lingkungan dan ekonomi kerja
10	IPCC 2013	Metode berdasarkan faktor perubahan iklim dengan jangka waktu 20 dan 100 tahun

Sumber :(Santoso et al, 2012)

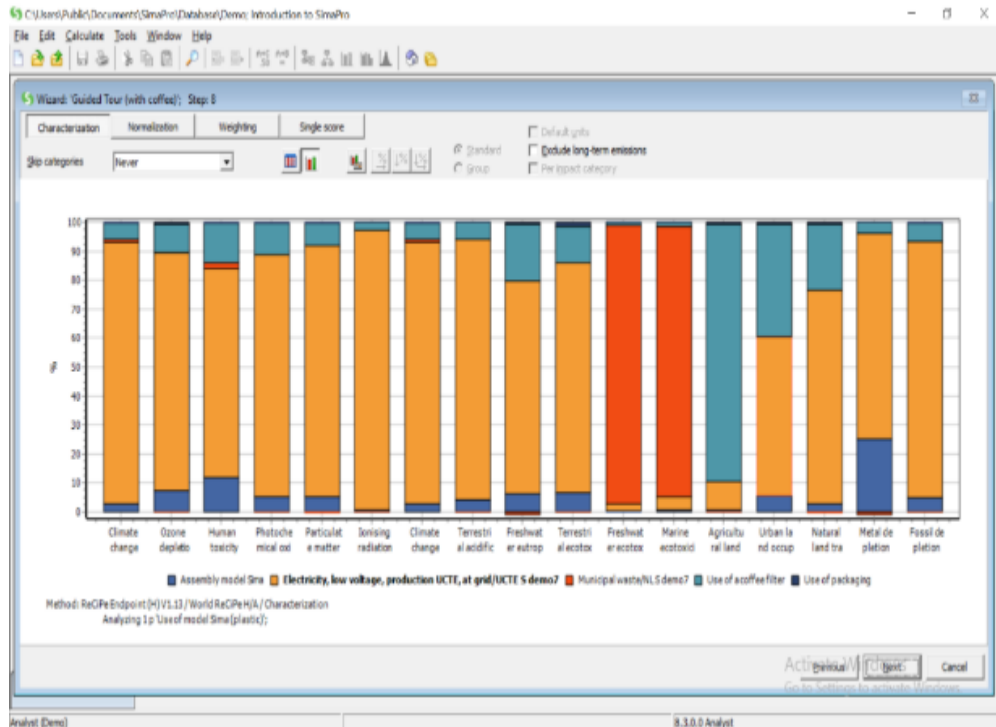
Pemilihan metode analisis dampak didasarkan pada kategori dampak yang ingin ditampilkan pada laporan LCA. Dalam penelitian ini kategori dampak akan disesuaikan dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 1 Tahun 2021, sehingga metode yang akan digunakan adalah CML-IA Baseline dan ReCiPe Midpoint 2016.

- *Network*, merupakan diagram alir masing-masing unit proses terhadap kontribusi dampak yang dihasilkan
- *Impact assessment*, merupakan hasil penilaian dampak lingkungan terdiri dari *characterization*, *normalization*, *weighting*, dan *single score*.

1. *Characterization*

Tahap *characterization* adalah mengidentifikasi dan mengelompokkan substansi yang berasal dari LCI kedalam kategori dampak yang heterogen. *Characterization* merupakan penilaian besarnya substansi yang berkontribusi sebagai kategori dampak. Nilai kontribusi dampak dari substansi dapat diketahui dengan mengalikan substansi yang berkontribusi pada dampak kategori dengan faktor karakterisasi sehingga

dihasilkan nilai karakterisasi pada 14 *impact category* yang terdapat pada LCA.

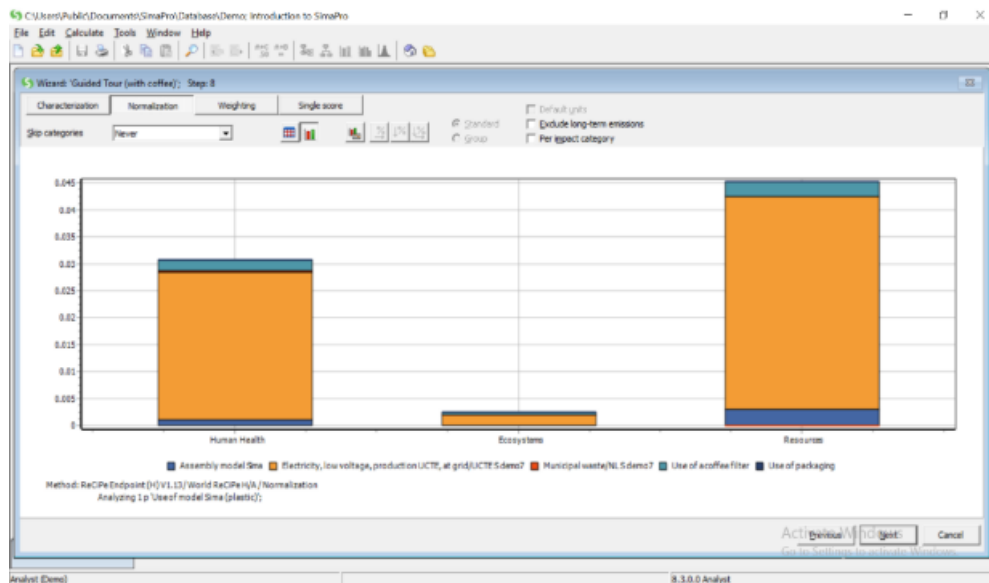


Gambar 2.10 Nilai Karakterisasi pada Kegiatan dalam 14 Kategori Dampak

Sumber : (SimaPro Tutorial)

2. Normalization

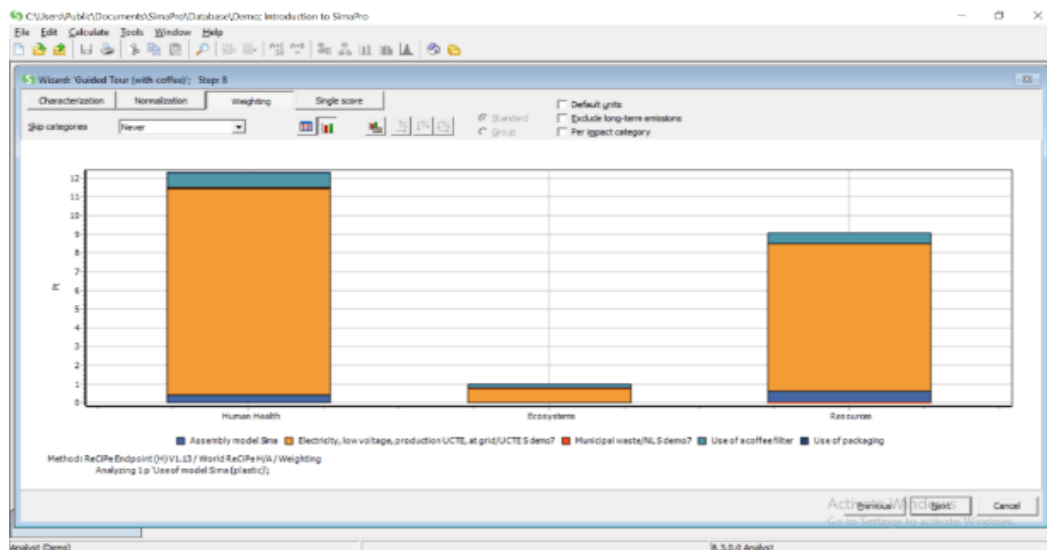
Normalization adalah tahapan yang menunjukkan kontribusi dampak pada seluruh masalah lingkungan di suatu daerah. *Normalization* dimaksudkan untuk menciptakan satuan yang seragam untuk semua kategori dampak. Nilai normalisasi dapat diketahui dengan mengalikan nilai karakterisasi dengan nilai “normal” sehingga semua kategori dampak telah memiliki unit yang sama sehingga bisa dibandingkan.



Gambar 2.11 Nilai Normalisasi pada Kegiatan dalam 14 Kategori Dampak
Sumber :(SimaPro Tutorial)

3. Weighting

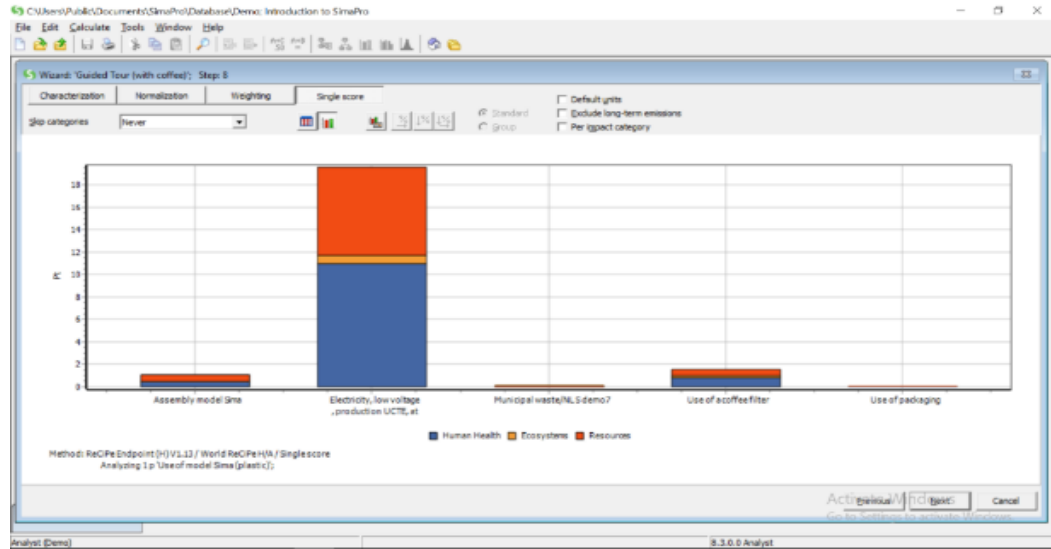
Weighting merupakan tahap pembobotan dalam kategori dampak. Hal ini berarti hasil normalisasi akan dikalikan dengan weighting factor dan akan diakumulasikan sebagai total score.



Gambar 2.12 Nilai Pembobotan pada Kegiatan dalam 14 Kategori Dampak
Sumber :(SimaPro Tutorial)

4. Single Score

Single Score digunakan untuk mengelompokkan nilai kategori dampak berdasarkan aktivitas atau proses yang terjadi. Dari nilai single score akan terlihat aktivitas mana yang berkontribusi terhadap dampak lingkungan.



Gambar 2.13 Hasil Dampak Lingkungan dari setiap Kegiatan

Sumber : (SimaPro Tutorial)

d. Interpretasi

Interpretasi adalah tahapan mengevaluasi dan meninjau kembali suatu kesimpulan untuk pengambilan keputusan terkait alternatif perbaikan pada suatu sistem untuk mengurangi nilai kontribusi dampak. Pengambilan keputusan terkait alternatif perbaikan memerlukan kebijakan dengan pendekatan tertentu untuk penentuan prioritasnya.

2.5 Analytical Hierarchy Process (AHP)

AHP merupakan suatu model pendukung keputusan yang dikembangkan oleh Thomas L. Saaty. Model pendukung keputusan ini akan menguraikan masalah multi faktor atau multi kriteria yang kompleks menjadi suatu hirarki. Hirarki didefinisikan sebagai suatu representasi dari sebuah permasalahan yang kompleks dalam suatu struktur multi level dimana level pertama adalah tujuan, yang diikuti level faktor, kriteria, sub kriteria, dan seterusnya ke bawah hingga level terakhir dari alternatif. Dengan hirarki, suatu masalah yang kompleks dapat diuraikan ke

dalam kelompok-kelompoknya yang kemudian diatur menjadi suatu bentuk hirarki sehingga permasalahan akan tampak lebih terstruktur dan sistematis (Amar, 2014).

Kelebihan AHP dibandingkan dengan lainnya adalah:

- (1) struktur yang berhirarki, sebagai konsekuensi dari kriteria yang dipilih, sampai pada subkriteria yang paling dalam,
- (2) memperhitungkan validitas sampai dengan batas toleransi inkonsistensi berbagai kriteria dan alternatif yang dipilih oleh para pengambil keputusan,
- (3) memperhitungkan daya tahan atau ketahanan output analisis sensitivitas pengambilan keputusan (Hermon, 2018).

Selain itu, Darko, dkk (2018) menambahkan keuntungan utama AHP dibandingkan metode lainnya adalah tidak memerlukan ukuran sampel yang besar untuk mencapai hasil yang kuat. AHP mempunyai kemampuan untuk memecahkan masalah yang multi obyektif dan multi-kriteria yang berdasarkan pada perbandingan preferensi dari setiap elemen dalam hirarki (Hermon, 2018).

Konsep metode AHP adalah merubah nilai-nilai kualitatif menjadi nilai kuantitatif, sehingga keputusan-keputusan yang diambil bisa lebih obyektif. Peralatan utama AHP adalah sebuah hirarki fungsional dengan input utamanya persepsi manusia (Torres dkk, 2019). Berdasarkan (Saaty, 1988), terdapat beberapa langkah penyelesaian dalam AHP, antara lain:

1. Pembuatan konstruksi model

Membangun suatu model dari permasalahan yang didasarkan pada komponen-komponen penting dalam masalah tersebut. Kriteria yang relevan dan alternative keputusan akan distrukturkan ke dalam suatu hierarki. Tingkat pertama hirarki berisi tujuan, sedangkan tingkat selanjutnya mewakili kriteria dan alternative (Darko dkk, 2018). Pembentukan atribut pada tiap level dan definisi hubungannya dibutuhkan dalam konstruksi model.

2. Penilaian kriteria dan alternatif

Kriteria dan alternatif dinilai dengan menggunakan perbandingan berpasangan. Perbandingan dilakukan berdasarkan kebijakan pembuat keputusan. Proses perbandingan berpasangan dimulai dari level hirarki paling atas yang ditunjukkan untuk memilih kriteria. Berdasarkan Saaty (2008), skala terbaik dalam mengekspresikan pendapat adalah 1-9, seperti yang disajikan pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Skala Penilaian Perbandingan Berpasangan

Tingkat Kepentingan	Definisi	Keterangan
1	Kedua elemen sama penting	Elemen A1 dan A2 sama-sama penting
3	Elemen yang satu sedikit lebih penting	Elemen A1 cukup penting dibanding A2
5	Elemen yang satu lebih penting	Elemen A1 lebih penting dibanding A2
7	Satu elemen sangat lebih penting	Elemen A1 sangat penting dibandingkan dengan A2
9	Stu elemen mutlak lebih penting	Elemen A1 mutlak lebih penting dibandingkan dengan A2
2,4,6,8	Nilai tengah di antara dua penilaian yang berdampingan	Nilai ini diberikan jika diperlukan kompromi memilih skala

Sumber: (Saaty, 2008)

3. Penentuan Prioritas

Menentukan prioritas dari elemen-elemen kriteria dapat dipandang sebagai bobot/kontribusi elemen tersebut terhadap tujuan pengambilan keputusan. AHP melakukan analisis prioritas elemen dengan metode perbandingan berpasangan antar dua elemen sehingga semua elemen yang ada tercakup. Prioritas ini ditentukan berdasarkan pandangan para pakar dan pihak-pihak yang berkepentingan terhadap pengambilan keputusan, baik secara langsung (diskusi) maupun secara tidak langsung (kuisioner)

4. Perhitungan konsistensi

Dalam proses pembobotan nilai kriteria, terdapat kemungkinan konsistensi dari perbandingan berpasangan yang telah dilakukan. Rasio konsistensi (*Consistency Ratio*) memberikan suatu penilaian numerik bagaimana ketidakkonsistenan suatu evaluasi. Indeks konsistensi (*Consistency Index*) suatu matrik perbandingan dihitung dengan Persamaan 2.1.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (2.1)$$

Dimana:

CI = *Consistency Index*

λ_{\max} = *eigenvalue* terbesar matrik perbandingan berpasangan n x n

n = jumlah item yang dibandingkan.

Rasio konsistensi diperoleh dengan membandingkan indeks konsistensi dengan suatu nilai yang sesuai dari bilangan indeks konsistensi acak (*Random Consistency Index*) yang didapatkan dengan Persamaan 2.2. Jika $CR < 0,1$ maka penilaian responden dianggap konsisten. Jika $CR = 0,1$, maka penilaian responden tidak dianggap konsisten.

$$CR = \frac{CI}{RCI} \quad (2.4)$$

Dimana:

$CR = Consistency Ratio$

$CI = Consistency Index$

$RCI = Random Consistency Index$

2.6 Pemilihan Software Expert Choice Untuk Metode AHP

Metode analisis yang digunakan untuk melakukan pemilihan solusi yang terbaik adalah metode AHP dengan aplikasi *expert choice*. AHP menggabungkan pertimbangan dan penilaian pribadi dengan cara yang logis dan dipengaruhi imajinasi, pengalaman, dan pengetahuan untuk menyusun hierarki dari suatu masalah yang berdasarkan logika, intuisi dan juga pengalaman untuk memberikan pertimbangan (Tominanto, 2012). *Expert choice* menawarkan beberapa fasilitas mulai dari input data-data kriteria, beberapa alternatif pilihan, sampai dengan penentuan tujuan (Retnoningsih, 2011).

Expert choice adalah sebuah aplikasi yang khusus digunakan sebagai alat bantu implementasi model-model dalam *decision support system* (DSS) atau yang lebih dikenal dengan sebutan sistem penunjang keputusan (SPK) dalam sebuah perusahaan ataupun untuk keperluan akademik. Perangkat lunak ini dapat digunakan untuk menentukan keputusan-keputusan yang sulit untuk dipecahkan ataupun diputuskan oleh para pengambil keputusan. Software ini memiliki tingkat keakuratan yang tinggi untuk metode AHP, bilamana didukung dengan data-data yang konsisten. Dalam memilih kriteria pada setiap masalah pengambilan keputusan perlu memperhatikan kriteria sebagai berikut:

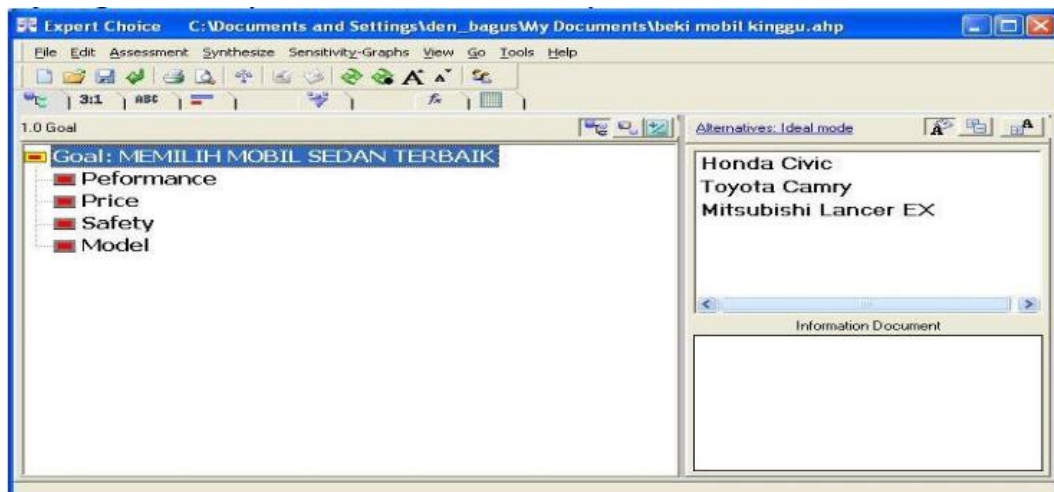
1. Lengkap, mencakup aspek penting dan digunakan dalam mengambil keputusan
2. Operasional, setiap kriteria mempunyai arti bagi pengambil keputusan

3. Tidak berlebihan, menghindari adanya kriteria yang mengandung pengertian yang sama
4. Minimum, diusahakan agar jumlah kriteria minimum untuk mempermudah pemahaman

Cara penggunaan aplikasi *Expert choice* adalah dengan cara sebagai berikut (Lestari, 2009):

1. Memasukkan *goal*, kriteria, dan alternatif

Pada kolom *goal* merupakan hal yang ingin dicapai pada penelitian dalam pemilihan suatu keputusan. Pada kolom kriteria merupakan komponen yang dijadikan pertimbangan bagi peneliti untuk pemilihan keputusan terbaik. Disisi lain, terdapat kolom alternatif yang ditulis sebagai output yang akan dipilih dalam suatu keputusan.



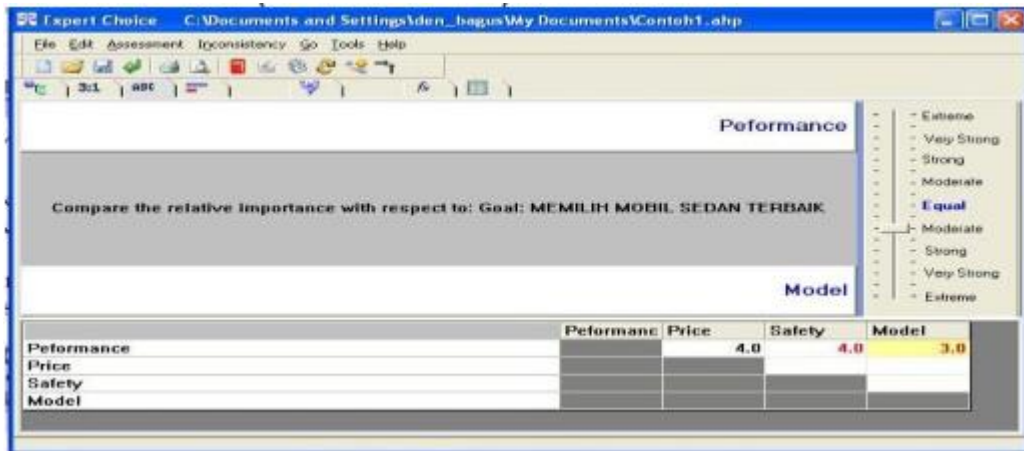
Gambar 2.14 Input *Goal* dan Kriteria

(*Expert Choice Tutorial*)

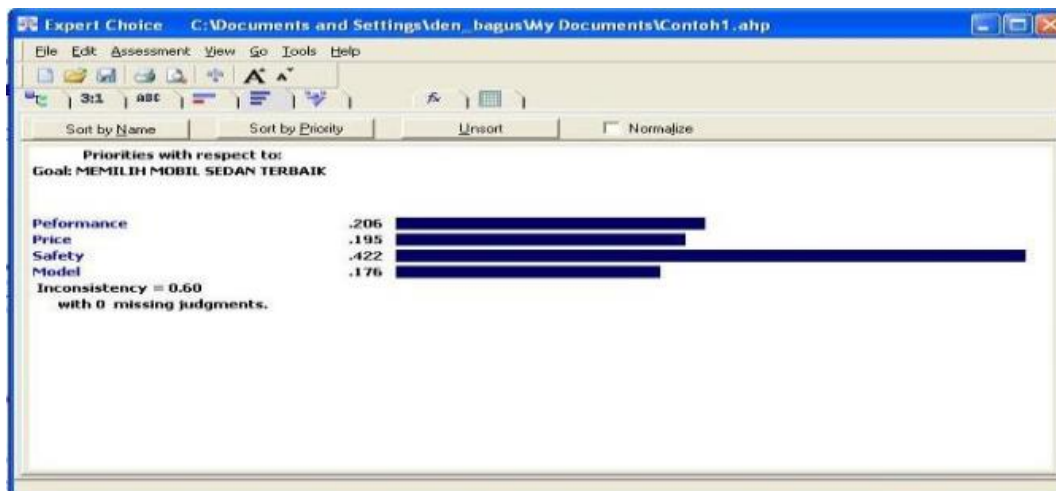
2. Pembobotan dan Skala Prioritas

Sebelum melakukan perhitungan, kriteria yang telah ditetapkan pada tahap sebelumnya akan dilakukan proses pembobotan. Pembobotan berdasarkan kebutuhan peneliti dalam melakukan penelitian kemudian dilakukan perhitungan dengan membandingkan satu kriteria terhadap kriteria lainnya. Nilai yang dimasukkan pada perhitungan merupakan angka kepentingan dimana setiap angka sudah memiliki sifat kepentingan yang berbeda (Gambar 2.15). Setelah

pembobotan, peneliti melakukan skala prioritas dari seluruh kriteria tersebut (Gambar 2.16).



Gambar 2.15 Pembobotan Perhitungan Perbandingan Antar Kriteria
(Expert Choice Tutorial)



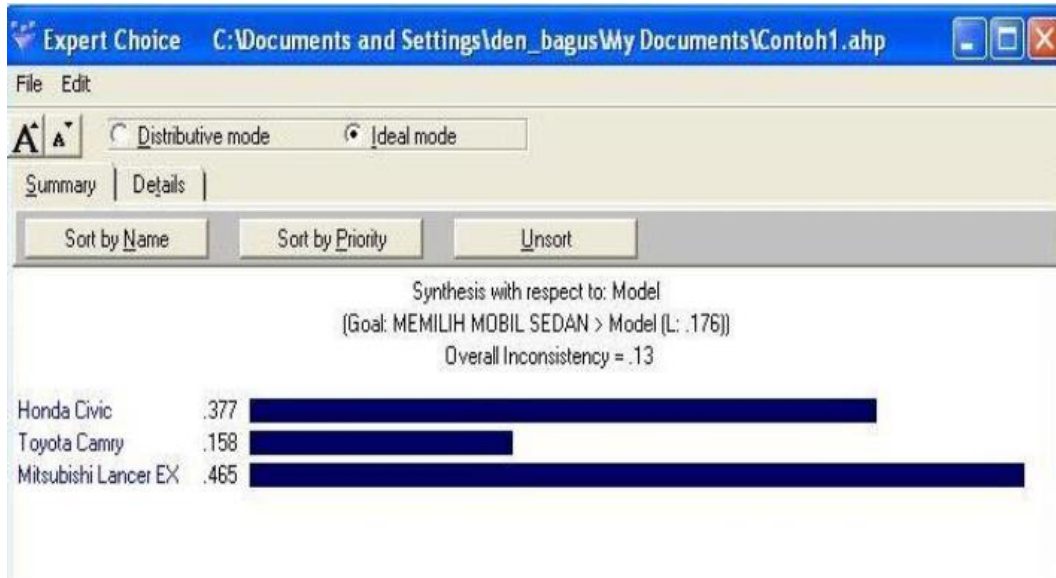
Gambar 2.16 Input Skala Prioritas Perhitungan Antar Kriteria
(Expert Choice Tutorial)

3. Menghasilkan jawaban atau keputusan yang dianjurkan

Tahap ini merupakan tahap akhir dalam pengambil keputusan dengan *Expert Choice*. Terdapat 2 tahap yakni:

- *Synthesizing* untuk mendapatkan hasil

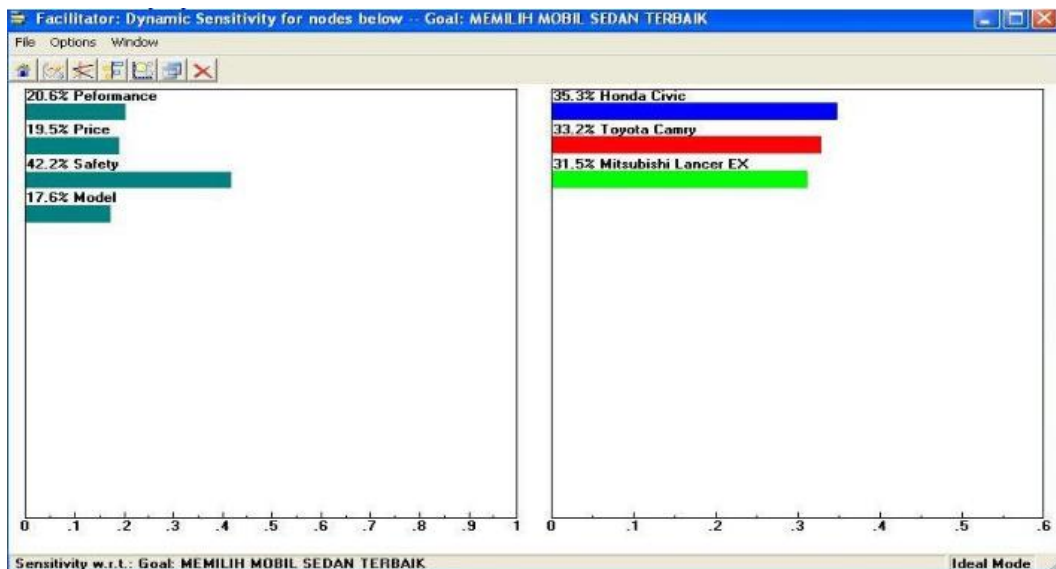
Merupakan hasil sintesa pada alternatif dimana dilakukan pembobotan terlebih dahulu sesuai dengan kebutuhan peneliti.



Gambar 2.17 Input Pembobotan Antar Alternatif
 (Expert Choice Tutorial)

- Sensitivity analysis

Sensitivity Analysis dilakukan untuk mengetahui variasi dari prioritas kriteria untuk mengamati sejauh mana efeknya terhadap prioritas alternatif.



Gambar 2.17 Sensitivity Analysis pada Expert Choice
 (Expert Choice Tutorial)

2.7 Hubungan LCA dengan AHP

LCA memungkinkan estimasi dampak lingkungan kumulatif yang dihasilkan dari semua tahapan dalam siklus hidup produk, sehingga akan diketahui bagian mana yang menimbulkan dampak terhadap lingkungan paling besar (EPA, 2006). Setelah diketahui dampaknya maka akan diperoleh beberapa alternatif perbaikan untuk masing-masing kegiatan dalam proses produksi. Alternatif yang dimunculkan didukung beberapa kriteria di AHP, sehingga dalam pengambilan keputusan akan diperoleh alternatif kebijakan yang optimal (Sitepu, 2011). Pemilihan alternatif dengan mempertimbangkan beberapa kriteria yang ada melalui pendekatan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) menggunakan pendekatan pendapat dari para ahli.

Menurut Yancadianti, *et al.*, (2015), AHP adalah sebuah kerangka untuk mengambil keputusan dengan efektif atas persoalan yang kompleks dengan menyederhanakan dan mempercepat proses pengambilan keputusan. Persoalan diatas dipecahkan dengan menata variable dalam susunan hirarki, memberi nilai numerik pada pertimbangan subjektif tentang pentingnya tiap variabel, dan mensintesis pertimbangan untuk menetapkan variabel yang memiliki prioritas dan pengaruh paling tinggi. AHP membantu memecahkan persoalan yang kompleks dengan menstruktur suatu hirarki kriteria, pihak yang berkepentingan, hasil dan dengan menarik berbagai pertimbangan guna mengembangkan bobot.

2.8 Program Penurunan Dampak Lingkungan

Perusahaan telah mengimplementasikan beberapa program pengoperasian pembangkit yang berwawaran lingkungan untuk mencegah dan mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan dari proses produksi energi listrik. Program-program tersebut berkorelasi dengan upaya meningkatkan efisiensi energi dan pengurangan pencemaran udara untuk mendukung dan memenuhi kebijakan pemerintah terkait Kebijakan Energi Nasional.

2.8.1 Program Efisiensi Energi

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No 1 tahun 2021 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup, upaya efisiensi energi adalah

upaya perusahaan untuk meningkatkan efisiensi pemakaian energi melalui kegiatan-kegiatan peningkatan efisiensi, retrofit (penggantian/perbaikan) peralatan yang ramah lingkungan, efisiensi di bangunan, dan efisiensi dalam sektor transportasi. Program-program yang telah dilakukan terkait efisiensi energi dan hasil absolut efisiensi energi ditampilkan pada Tabel 2.8

Tabel 2.8 Hasil Absolut Efisiensi Energi

No	Program	Hasil Absolut Efisiensi Energi				
		2016	2017	2018	2019	2020*
		Hasil (GJoule)	Hasil (GJoule)	Hasil (GJoule)	Hasil (GJoule)	Hasil (GJoule)
PADA PROSES PRODUKSI						
1	Tiny Oil Burner	64,743.28	65,382.37	50,242.62	62,844.18	70,621.26
2	Cleaning Tube Boiler	146,353.62	237,678.05	141,482.13	-	-
3	Pengaturan Coal to Air Ratio	181,839.08	344,698.38	224,747.85	218,940.07	112,540.43
4	Penggantian Elemen Air Preheater	-	-	498,279.97	-	-
5	Redesign HPH	-	-	13,605.79	-	-
-	Total Hasil Absolut Efisiensi Energi dari Proses Produksi	392,935.98	647,758.80	928,358.35	281,784.24	183,161.69
PADA FASILITAS PENUNJANG						
1	Penambahan Dry Fog Dust Supression Conveyor 4A	164.68	237.01	274.56	302.46	141.74
2	Penggunaan air Reuse pond untuk pendinginan Bottom Ash	435.99	454.55	457.08	331.25	331.25
3	Penampungan Reject 2nd RO	1,563.96	2,069.32	1527.25	4088.53	1785.80
4	Penggantian Lampu dari TL ke lampu LED	58.08	447.21	98850.12	2,163.44	-
5	Perubahan pola operasi LFO Pump	-	-	-	2,129.91	1,157.36
-	Total Hasil Absolut Efisiensi Energi dari Fasilitas Penunjang	2,222.71	3,208.09	101,109.01	9,015.59	3,416.15
Total		395,158.68	650,966.88	1,029,467.36	290,799.83	188,211.32

*Data Januari-Juni 2020

Sumber : Data perusahaan

Berdasarkan data pada Tabel 2.7 diketahui bahwa perusahaan telah melaksanakan beberapa program efisiensi energi sejak tahun 2016 diantaranya yaitu :

1. *Tiny oil burner*

PLTU Paiton 9 merupakan pembangkit listrik berbahan bakar batubara. Dengan menerapkan konservasi energi yaitu perubahan energi kimia menjadi energi panas yang dirubah menjadi energi gerak sehingga dapat membangkitkan energi listrik. Pada tahap start up, unit menggunakan bahan bakar *High Speed Diesel* (HSD) melalui *oil burner*. Salah satu upaya

perusahaan melakukan penghematan penggunaan HSD adalah dengan penggantian sistem *burner* yaitu dengan pemasangan *Tiny Oil Burner* yang pada pengaplikasiannya menggunakan HSD lebih sedikit daripada oil burner konvensional. Perhitungan konsumsi energi dari pemakaian HSD didapatkan dari total pemakaian HSD dalam satuan liter dikalikan dengan nilai kalor HSD per liter. Efisiensi energi yang dihasilkan dari program *tiny oil burner* pada tahun 2020 adalah sebesar 70.621,26 GJ

2. *Cleaning tube boiler*

Program *cleaning tube boiler* bertujuan untuk menghilangkan deposit di permukaan luar *tube boiler*, sehingga mencegah terjadinya over heating yang mengakibatkan konsumsi batubara meningkat sekaligus terjadinya kerusakan *tube boiler*. Parameter yang digunakan sebagai dasar keberhasilan program *cleaning tube boiler* adalah temperature inlet *Air Heater* yang terukur. Temperature yang lebih rendah dibandingkan dengan kondisi sebelum pelaksanaan program mengindikasikan bahwa program tersebut berhasil. Hal ini menandakan energi panas yang terbuang dari dalam boiler berkurang (*Heat Loss*).

3. Pengaturan *coal to air ratio*

Program Pengaturan *Coal to Air Ratio* merupakan pengaturan perbandingan antara jumlah batubara dengan udara yang digunakan saat proses pembakaran di dalam boiler. Pengaturan ini bertujuan mengoptimalkan proses pembakaran untuk mencapai pembakaran sempurna sehingga meningkatkan efisiensi Boiler. Perhitungan penghematan energi dari program pengaturan *Coal to Air Ratio* yaitu dengan cara mengalikan rata-rata efisiensi energi pertahun dengan total produksi pertahun. Efisiensi energi yang dihasilkan dari program *Coal to Air Ratio* pada tahun 2020 adalah sebesar 112.540,43 GJ.

4. Penggantian Elemen *Air Preheater*

Program penggantian elemen air preheater dilakukan pada element *cold*, *intermediate*, dan *hot* untuk meningkatkan proses perpindahan panas. Pada setiap elemen *air preheater* dilakukan pengamatan parameter *leakage* dan *effectiveness* oleh operator pada screen DCS saat *performance test*, kemudian dicatatkan pada rekap *performance test* bulanan dan dilaporkan pada Laporan

efisiensi Unit PLTU Bulanan. Nilai rerata dari kedua parameter tersebut dilaporkan sebagai *heat loss*. Perhitungan efisiensi energi dari program ini yaitu dengan membandingkan nilai *heat loss* sebelum dan sesudah dilakukan penggantian elemen *air heater* sehingga diperoleh gap *Heat Loss*.

5. *Redesign High Pressure Heater (HPH)*

HPH berfungsi untuk memanaskan air sebelum masuk ke dalam boiler, dengan menggunakan uap ekstraksi, sisa dari turbin. Sistem HPH PLTU Paiton unit 9 terdiri dari HPH 1, HPH 2 dan HPH 3. Level indikator HPH 3 seringkali menunjukkan level high, sehingga system HPH tidak dioperasikan (outservice). Kondisi ini mengakibatkan penurunan temperature air yang masuk ke dalam boiler dan meningkatkan kebutuhan energi panas di boiler yang berasal dari pembakaran batubara. Dengan demikian maka terjadi penurunan efisiensi boiler dikarenakan adanya peningkatan kebutuhan energi input batu bara, sehingga perlu dilakukan program redesign HPH 3 ini agar HPH system bisa dioperasikan (inservice). Perhitungan efisiensi energi dari program ini yaitu dengan membandingkan nilai *heat loss* sebelum dan sesudah dilakukan *redesign HPH*.

6. Penambahan Dry Fog Dust Supression Conveyor 4A

Dry Fog Dust Supression Conveyor 4A adalah program pengurangan dampak lingkungan terkait intensitas debu batubara saat transfer batubara pada *coal handling system*. Penambahan Dry Fog dust suppression dengan tingkat efektifitas lebih baik dari *dust suppression* lama dapat mengurangi pemakaian energi listrik karena kebutuhan energi yang lebih kecil. Efisiensi energi yang dihasilkan dari program Penambahan *Dry Fog Dust Supression Conveyor 4A* pada tahun 2020 adalah sebesar 141,74 GJ.

7. Penggunaan Air Reuse Pond untuk Pendinginan Bottom Ash

Penggunaan air reuse pond adalah pemanfaatan air limbah yang telah diolah dan memenuhi parameter operasi untuk mendinginkan bottom ash yang terjatuh dari hopper boiler. Implementasi program ini dapat mengurangi penggunaan air bersih yang diproduksi dari proses water treatment plant, sehingga berimplikasi pada penghematan energi yang digunakan untuk memproduksi air bersih. Penggunaan air reuse dimonitoring dari durasi operasi

pompa reuse yang dicatat pada laporan harian operator coal handling. Perhitungan efisiensi energi diperoleh dari selisih konsumsi energi listrik pompa reused dan konsumsi energi listrik dikali dengan data design flow reuse pump. Efisiensi energi yang dihasilkan dari program penggunaan air reuse pond untuk pendinginan *bottom ash* pada tahun 2020 adalah sebesar 331,25 GJ.

8. Penampungan Air *Reject 2nd RO*

Penampungan air reject 2nd RO bertujuan memanfaatkan air yang terbuang dari proses produksi 2nd RO untuk ditampung kembali ke 1st RO tank agar membantu mengurangi durasi produksi 1st RO yang melalui beberapa peralatan dengan sumber energi listrik. Penurunan durasi operasi peralatan yang dilalui untuk proses operasi 1st RO dapat menurunkan konsumsi energi listrik. Perhitungan efisiensi energi dari program ini didapatkan dari durasi operasi 1st RO dikalikan dengan besar energi listrik yang digunakan oleh peralatan. Efisiensi energi dengan adanya program penampungan reject 2nd RO adalah sebesar 1.785,80 GJ.

9. Penggantian Lampu dari TL ke LED

Penggantian spesifikasi lampu TL menjadi LED adalah upaya efisiensi energi karena lampu LED mengkonsumsi energi listrik yang lebih rendah tanpa mengurangi intensitas cahaya. Perhitungan efisiensi energi didapatkan dari selisih daya dikalikan dengan jumlah lampu yang diganti dan durasi operasi lampu.

10. Perubahan Pola Operasi LFO *Pump*

LFO *Pump* merupakan peralatan yang memompa HSD (*High Speed Diesel*) dari HSD tank menuju ke boiler untuk proses pembakaran. Program perubahan pola operasi LFO *pump* yaitu dengan mengoperasikan LFO *Pump* yang semula beroperasi secara kontinyu mengikuti durasi operasi pembangkit menjadi hanya beroperasi saat *start up unit*. Perhitungan efisiensi energi listrik didapatkan dari selisih durasi operasi lama dengan durasi operasi yang baru dikalikan dengan daya listrik LFO *Pump* saat *start up*. Efisiensi energi dengan adanya program perubahan pola operasi LFO *pump* adalah sebesar 1.157,36 GJ.

2.8.2 Program Pengurangan Pencemaran Udara

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No 1 tahun 2021 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup, upaya pengurangan pencemaran udara adalah seluruh kegiatan yang dilakukan oleh perusahaan untuk mengurangi emisi bahan pencemaran udara ke lingkungan dan upaya tersebut tidak menyebabkan pencemaran ke media lain secara signifikan. Pencemaran yang dimaksud adalah parameter pencemaran udara konvensional yaitu sulfur dioksida, partikulat, hidrokarbon, hydrogen sulfide dan parameter gas rumah kaca yaitu karbon dioksida, metan, nitrogen oksida, dan gas fluorinasi (bahan perusak ozon). Program-program yang telah dilakukan oleh perusahaan terkait pengurangan pencemaran udara dan hasil absolut pengurangan pencemaran udara ditampilkan pada Tabel 2.9

Tabel 2.9 Hasil Absolut Pengurangan Pencemaran Udara

No	Program	Hasil Absolut				
		2016	2017	2018	2019	2020*
		Hasil (Ton CO ₂ eq)	Hasil (Ton CO ₂ eq)	Hasil (Ton CO ₂ eq)	Hasil (Ton CO ₂ eq)	Hasil (Ton CO ₂ eq)
PADA PROSES PRODUKSI						
1	Tiny Oil Boiler	4,821.57	4,869.17	3,741.68	4,680.13	5,272.54
2	Perubahan Pola Operasi LFO Pump				207.68	108.02
3	Pengaturan Coal to Air Ratio	18,518.50	35,104.00	22,888.00	13,035.00	11,461.00
-	Total Hasil Absolut PPU GRK dari Proses Produksi	23,340.07	39,973.17	26,629.68	17,922.81	16,841.56
PADA FASILITAS PENUNJANG						
1	Penjemputan Karyawan Menggunakan Bus	96.29	99.20	118.55	119.68	64.45
2	Penggantian Sepeda Motor Menjadi Sepeda Angin	43.65	52.71	52.78	6.10	103.18
3	Penggantian refrigeran dari R22 ke R32	-	17.03	9.64	5.67	2.83
-	Total Hasil Absolut PPU GRK dari Fasilitas Penunjang	139.94	168.94	180.97	131.45	170.46
Total PPU GRK		23,480.01	40,142.10	26,810.65	18,054.26	17,012.02

Sumber : Data perusahaan

Berdasarkan data pada Tabel 2.7 diketahui bahwa perusahaan telah melaksanakan beberapa program pengurangan pencemaran udara sejak tahun 2016 diantaranya yaitu :

1. Tiny Oil Burner

Emisi yang ditimbulkan dari pembakaran HSD di boiler pada saat start up unit adalah salah satu penyumbang pencemaran udara, maka implementasi program tiny oil burner menggantikan tiny oil konvensional adalah upaya pengurangan pencemaran udara karena konsumsi HSD tiny oil burner menjadi lebih sedikit dari pada oil burner konvensional. Hal ini menyebabkan penurunan jumlah HSD yang digunakan sehingga dapat mengurangi emisi yang ditimbulkan. Perhitungan pengurangan pencemaran udara didapatkan mengalikan efisiensi energi (dalam joule) dalam joule dengan faktor emisi. Pengurangan pencemaran udara dari program tiny oil burner pada tahun 2020 adalah sebesar 5.272,54 Ton CO₂eq.

2. Perubahan Pola Operasi LFO Pump

Implementasi program perubahan pola operasi LFO pump dapat mengurangi konsumsi HSD karena LFO *Pump* yang semula beroperasi memompa HSD ke menuju boiler secara kontinyu mengikuti durasi operasi pembangkit menjadi hanya beroperasi saat *start up unit*. Hal ini menyebabkan penurunan jumlah HSD yang digunakan sehingga dapat mengurangi emisi yang ditimbulkan. Perhitungan pengurangan pencemaran udara didapatkan dengan cara mengalikan efisiensi energi (dalam joule) dengan faktor emisi. Pengurangan pencemaran udara dari program perubahan pola operasi LFO pump pada tahun 2020 adalah sebesar 108,02 Ton CO₂eq.

3. Pengaturan Coal to Air Ratio

Program Pengaturan *Coal to Air Ratio* merupakan pengaturan perbandingan antara jumlah batubara dengan udara yang digunakan saat proses pembakaran di dalam boiler. Optimalisasi proses pembakaran untuk mencapai pembakaran sempurna sehingga meningkatkan efisiensi Boiler. Pengaturan *coal to air ratio* bertujuan mengoptimalkan proses pembakaran untuk mencapai pembakaran sempurna sehingga meningkatkan efisiensi Boiler. Perhitungan pengurangan pencemaran udara didapatkan dengan cara mengalikan efisiensi energi (dalam

joule) dengan faktor emisi.. Efisiensi energi yang dihasilkan dari program *Coal to Air Ratio* pada tahun 2020 adalah sebesar 11.461 Ton CO₂eq.

BAB 3

METODE PENELITIAN

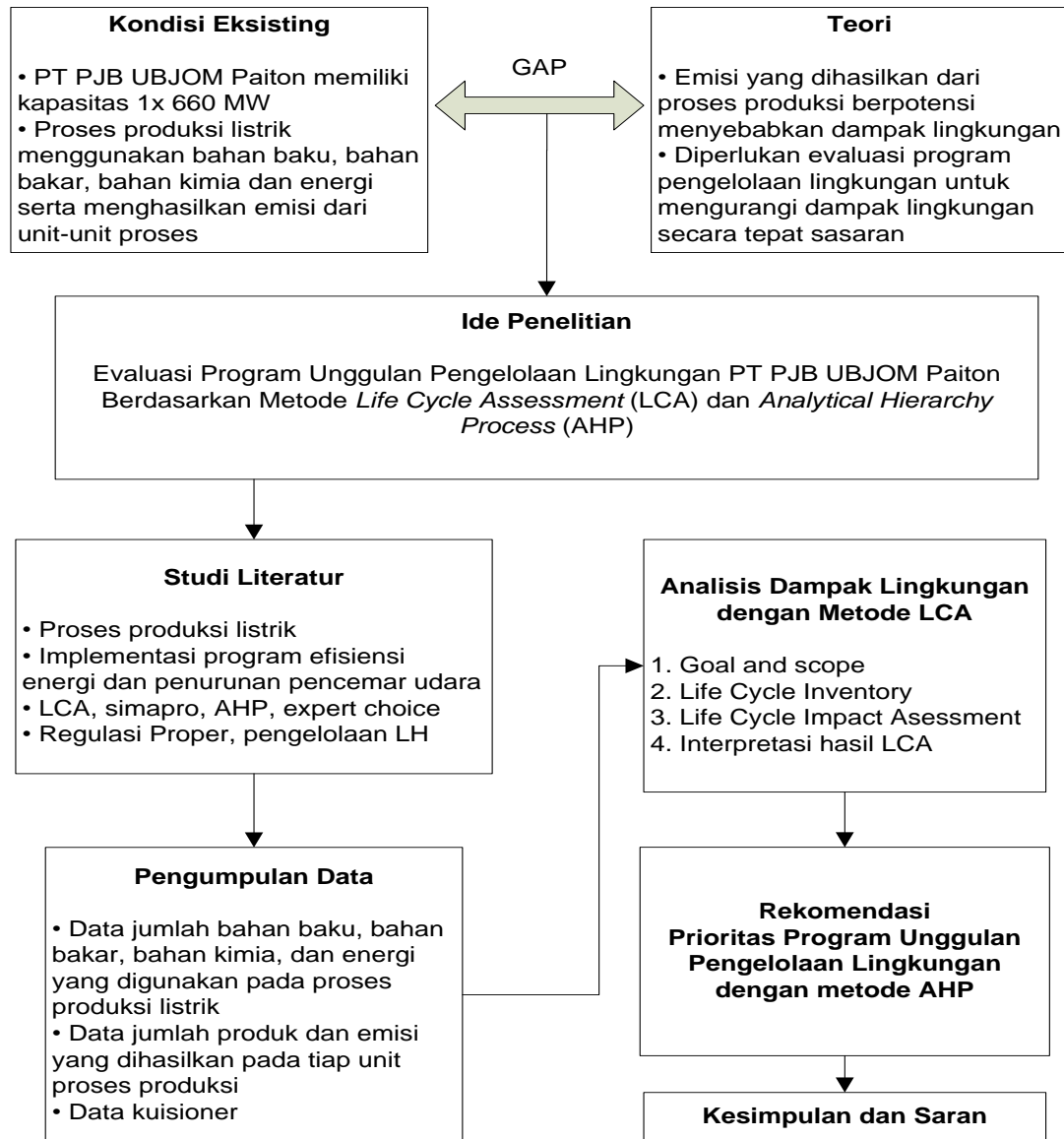
3.1 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian merupakan gambaran mengenai tahapan-tahapan yang disusun secara sistematis sebagai pedoman dalam melakukan penelitian, agar memudahkan dalam memahami penelitian yang akan dilakukan sehingga kesalahan dapat diminimalisasi. Kerangka penelitian disajikan pada Gambar 3.1.

3.2 Ide Penelitian

PT PJB UBJOM Paiton adalah unit bisnis yang melakukan jasa operasi dan maintenance pada PLTU Paiton Unit 9 dengan kapasitas produksi 1×660 MW. Dalam proses produksi energi listrik membutuhkan input berupa bahan baku, bahan bakar, energi, dan bahan kimia, sehingga menghasilkan output berupa produk, emisi, dan limbah. Kegiatan proses produksi listrik tersebut berpotensi menghasilkan emisi yang menimbulkan dampak lingkungan yang jika tidak dikelola dengan baik akan menimbulkan pencemaran udara, air, dan tanah. PT PJB UBJOM Paiton telah melaksanakan beberapa program pengoperasian pembangkit yang bertujuan untuk memperbaiki kinerja pengelolaan lingkungan, namun perlu dilakukan analisis agar dapat mengetahui dampak dan titik kritis (*hotspot*) penyebab dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses produksi.. Oleh karena itu perlu dilakukan kajian dampak lingkungan menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) terhadap produk energi listrik sehingga dapat menjadi inputan evaluasi program efisiensi energi dan pengurangan pencemar udara PT PJB UBJOM Paiton, dan kemudian merekomendasikan prioritas program pengelolaan lingkungan unggulan. Hal tersebut mendasari ide penelitian ini yaitu “Evaluasi Program Unggulan Pengelolaan Lingkungan PT PJB UBJOM Paiton Berdasarkan *Life Cycle Assessment* (LCA) dan *Analytical Hierarchy Process* (AHP)”. Hal tersebut dapat

menjadi acuan bagi perusahaan dalam menentukan rekomendasi program lingkungan yang efektif dan tepat sasaran dalam upaya penurunan dampak lingkungan.



Gambar 3.1 Kerangka Penelitian

3.3 Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk mendukung ide penelitian agar memperoleh dasar teori yang kuat dan akurat dalam mengidentifikasi masalah serta mengembangkan suatu pendekatan masalah. Sumber literatur berasal dari regulasi pemerintah, *textbook*, jurnal penelitian nasional maupun internasional, makalah seminar, *review journal*, *website*, tesis dan tugas akhir yang berhubungan dengan penelitian. Literatur yang dibutuhkan pada penelitian ini yaitu:

- a. Proses produksi energi listrik PT PJB UBJOM Paiton.
Memahami proses produksi energi listrik secara detail mulai dari proses penyediaan bahan baku dan bahan bakar hingga menghasilkan produk, serta dampak lingkungan yang diakibatkan dari proses produksi terhadap media udara, air dan tanah.
- b. Program - program pengelolaan lingkungan untuk menurunkan dampak lingkungan yang telah diimplementasikan oleh perusahaan.
- c. Kajian dampak lingkungan dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) yaitu tahapan *goal and scope*, *Life Cycle Inventory* (LCI), *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA), dan Interpretasi dengan menggunakan *software* Simapro.
- d. Metode penentuan prioritas program dengan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dengan menggunakan *software* *Expert Choice*.
- e. Regulasi yang ditetapkan pemerintah terkait program penilaian peringkat pinerja perusahaan dalam pengelolaan lingkungan hidup (PROPER), penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup serta baku mutu emisi.

3.4 Pengumpulan Data

Pengumpulan data yang dilakukan dalam penelitian ini adalah data sekunder dari internal perusahaan yang diperoleh dengan metode pengamatan di lapangan, data monitoring, perhitungan berdasarkan manual book PLTU, penyebaran kuisioner, dan wawancara. Data sekunder yang dibutuhkan untuk analisis LCA pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Kebutuhan Data Sekunder

No	Jenis Data	Metode Pengambilan Data	Durasi Data	Asal Data
1	Alur proses produksi listrik	Wawancara	-	PT PJB UBJOM Paiton bidang Rendal Operasi
2	Detail komponen masing-masing unit proses produksi	Observasi	-	Manual book PLTU Paiton unit 9
3	Bahan baku penggunaan air	Data monitoring pengukuran	1 tahun	PT PJB UBJOM Paiton bidang Produksi
	- Air demin	Data perhitungan		
	- Air laut pendingin kondensor - <i>Steam</i> (uap)	Data perhitungan		PT PJB UBJOM Paiton bidang Rendal Operasi
4	Bahan bakar :	Data monitoring pencatatan	1 tahun	PT PJB UBJOM Paiton bidang Niaga dan Bahan Bakar
	- Batu bara			
	- HSD			
5	Bahan kimia produksi :	Data monitoring pencatatan	1 tahun	PT PJB UBJOM Paiton bidang Kimia dan Lab
	- Chlorine			
	- Hidrazin			
	- Ammonia			
6	Data energi :	Data monitoring pengukuran	1 tahun	PT PJB UBJOM Paiton bidang Rendal Operasi
	- Listrik pemakaian sendiri (proses produksi)			
	- Produksi listrik gross			
	- Produksi listrik netto			
7	Emisi :	Hasil Analisa lab triwulanan, Hasil monitoring CEMS	1 tahun	PT PJB UBJOM Paiton bidang Lingkungan
	a. Emisi Udara :			
	- CO ₂			
	- N ₂ O			
	- CH ₄			
	- SO ₂			
	- NO _x			
	- Partikulat			
	b. Emisi Air :	Hasil Analisa lab bulanan		
	- Parameter Air blowdown boiler (Fe, Cu)			
- Parameter Air Limbah Pendingin Kondensor/ Outfall (Cu)				

	- Debit Air blowdown boiler	Data perhitungan	1 tahun	PT PJB UBJOM Paiton bidang Lingkungan
	- Debit Air Limbah Pendingin Kondensor/ Outfall	Data perhitungan		
8	Limbah :	Data monitoring pencatatan	1 tahun	PT PJB UBJOM Paiton bidang Lingkungan
	- Fly ash			
	- Bottom ash			

Sedangkan data yang dibutuhkan untuk analisis AHP pada penelitian ini menggunakan kuisioner *online* dengan responden yaitu personil PT PJB UBJOM Paiton yang memahami terkait implementasi program efisiensi energi dan pengurangan pencemaran udara. Responden sebanyak 30 orang meliputi perwakilan manajemen, supervisor dan staff bidang operasi, pemeliharaan, dan enjiniring dengan jenjang minimal D3. Metode AHP menggunakan aplikasi *expert choice* (EC) yang terdiri dari penetapan tujuan (*goal*), kriteria, alternatif, dan pembobotan, hingga dapat disimpulkan rekomendasi prioritas program unggulan yang mampu menurunkan dampak terhadap lingkungan.

3.5 Analisis Dampak Lingkungan dengan Metode *Life Cycle Assessment* (LCA)

3.5.1 Tahapan dalam Analisis LCA

a) *Goals and Scope Definition*

Tahapan pertama yaitu pendefinisian *goal and scope*. *Goal* adalah pembuatan pernyataan terkait tujuan yang ingin dicapai dan kepada siapa hasil LCA akan di komunikasikan. *Scope* adalah penentuan hal-hal yang perlu didetailkan dalam penelitian yaitu:

- *Funcional unit*, merupakan satuan produk yang digunakan
- *Product system*, merupakan alur produksi listrik
- *System boundaries*, merupakan ruang lingkup proses penelitian yaitu *gate to gate* mulai dari unit proses *condenser, heater, boiler, turbin*, hingga *generator-trafo* ke sistem transmisi.

b) *Life Cycle Inventory (LCI)*

Tahap kedua yaitu LCI, dimana pada tahap ini langkah-langkah yang dilakukan yaitu:

- Pengumpulan data yang mencakup spesifikasi semua aliran *input* dan *output* dari proses dalam sistem produk (yaitu *product flows*, *flow* ke proses unit lain, dan *elementary flow* dari dan ke lingkungan).
- Menghubungkan data ke unit proses dan unit fungsi terhadap produk energi listrik berupa diagram alir dengan memperhatikan kesetimbangan material (*mass balance*) antara data bahan baku yang digunakan dan data produk yang dihasilkan, energi yang digunakan, serta data emisi maupun limbah yang dihasilkan
- Agregasi Data yaitu penggabungan unit fungsi menjadi suatu *product system* terhadap produk energi listrik berupa diagram alir

Pada langkah ini dibutuhkan waktu yang cukup lama dikarenakan kualitas, akurasi dan representatif data sangat berpengaruh terhadap hasil interpretasi akhir. Pada tahap ini dilakukan rekapitulasi data bahan bakar, bahan baku, dan bahan kimia yang digunakan pada setiap unit pengolahan serta produk yang dihasilkan dari setiap unit, data emisi berdasarkan data laporan perusahaan. Untuk satuan yang belum sama, maka dilakukan konversi nilai satuan data pada setiap unit pengolahan dalam satuan yang sama untuk mempermudah penginputan dan pengolahan data pada *software SimaPro*.

c) *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*

Tahap ketiga yaitu LCIA dimana pada tahap ini langkah-langkah yang dilakukan yaitu:

- Pemilihan kategori dampak, indikator kategori dan model karakterisasi, dimana metode yang digunakan yaitu CML-1A dan ReCiPe 2016 (H). Pendekatan kategori analisis dampak pada penelitian ini, yaitu secara *midpoint*. *Midpoint* adalah pendekatan yang lebih berfokus pada masalah lingkungan tunggal, misalnya *global warming*, *ozone layer depletion*, *eutrophication*, *acidification* dan lain-lain.

- Klasifikasi, dimana data *input* dan *output* yang merupakan *elementary flow* pada tahapan LCI kemudian diklasifikasi berdasarkan kategori dampak pada metode ReCiPe 2016 (H). Contohnya seperti emisi CO₂ yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar termasuk kedalam kategori dampak *global warming* berdasarkan metode ReCiPe 2016 (H). Klasifikasi dapat digambarkan dengan diagram alir.
- Karakterisasi, dimana semua *elementary flow* dari LCI dinilai menurut faktor kontribusinya pada suatu dampak dengan dikalikan dengan *characterization factor* sesuai metode LCIA.
- Normalisasi, merupakan tahap opsional dalam LCIA. Normalisasi merupakan hasil dari karakterisasi dibagi dengan faktor normalisasi sesuai metode CML-1A dan ReCiPe 2016 (H). Normalisasi dilakukan untuk menyamakan satuan unit dampak agar mempermudah dalam membandingkan antar kategori dampak
- Pembobotan merupakan tahap opsional dalam LCIA, pembobotan adalah proses mengkonversi hasil indikator dari kategori dampak yang berbeda menggunakan faktor pembobotan metode CML-1A dan ReCiPe 2016 (H). Pembobotan dilakukan untuk mempermudah perbandingan dampak yang dihasilkan antar perbandingan produk.

d) Interpretasi Data

Tahapan terakhir dari LCA adalah interpretasi dimana langkah-langkah yang dilakukan yaitu:

- Identifikasi masalah penting dengan menggunakan *hotspot analysis*.
- *Hotspot analysis* adalah analisis suatu sistem produksi yang memiliki kontribusi yang signifikan terhadap dampak lingkungan. *Hotspot analysis* bermanfaat untuk mengidentifikasi lokasi diprioritaskan untuk dilakukan tindakan untuk perbaikan lingkungan.
- Evaluasi data dengan melakukan 3 pemeriksaan yaitu *completeness check*, *sensitivity check* dan *consistency check*
- Membuat kesimpulan dan rekomendasi.

3.5.2 Pemilihan Metode LCIA

Kategori dampak pada penelitian ini disesuaikan dengan kriteria Proper pada Peraturan Menteri KLHK No 1 tahun 2021, meliputi 4 dampak primer (*global warming potential*, potensi penipisan ozon, potensi hujan asam, dan potensi eutrofikasi) serta 7 dampak sekunder (*photochemical oxidation*, potensi terjadi penurunan abiotik, potensi terjadi penurunan biotik, karsinogenik, *toxicity*, *water footprint*, dan *land use change*). Hal tersebut mendasari metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode CML-IA dan ReCiPe 2016 Midpoint (H) yang merepresentasikan analisis terhadap 11 kategori dampak pada proses produksi. Kategori dampak CML-IA, ReCiPe Midpoint 2016 (H), dan pemilihan metode berdasarkan kriteria Proper ditampilkan pada Tabel 4.1.

Pada Tabel 4.1 dapat disimpulkan bahwa metode yang utama digunakan adalah metode ReCiPe 2016 Midpoint (H) yang merupakan hasil penyempurnaan dari ReCiPe 2008 dan sebelumnya yaitu CML 2000 dan Eco-indicator 99. Beberapa keuntungan dari metode ReCiPe dibandingkan dengan metode lain yaitu:

- √ Kumpulan kategori dampak pada level *midpoint* yang luas dengan 18 indikator dampak
- √ Memungkinkan untuk digunakan sebagai mekanisme dampak yang memiliki cakupan global
- √ Tidak seperti metode lain (Eco-Indicator 99, EPS Method, LIME, dan Impact 2002+), metode ReCiPe tidak memasukan potensi dampak dari ekstraksi masa mendatang dalam LCIA tetapi mengasumsikan bawah dampak tersebut telah dimasukan kedalam LCI.

Sedangkan beberapa kategori dampak menggunakan metode CML karena tidak tersedia pada metode ReCiPe diantaranya yaitu potensi eutrofikasi, *photochemical oxidation*, potensi penurunan abiotik, dan *toxicity*.

Penentuan dampak lingkungan dan hotspot dampak dominan pada proses produksi ditetapkan berdasarkan nilai normalisasi terbesar yang didapatkan pada masing-masing analisis metode CML-IA dan ReCiPe 2016 Midpoint (H.).

Tabel 3.2 Pemilihan Metode LCIA Berdasarkan Kategori Dampak pada PROPER

No	Kategori Dampak			Pemilihan Metode	Unit
	CML	ReCiPe	PROPER		
1	Abiotic depletion	Global warming	Dampak Primer		
2	Abiotic depletion (fossil fuels)	Stratospheric ozone depletion	1. Global Warming Potential	ReCiPe 2016	kg CO ₂ eq
3	Global warming	Ionizing radiation	2. Potensi penipisan Ozon	ReCiPe 2016	kg CFC11 eq
4	Ozone layer depletion	Ozone formation, Human health	3. Potensi Hujan Asam	ReCiPe 2016	kg SO ₂ eq
5	Human toxicity	Fine particulate matter formation	4. Potensi Eutrofikasi	CML-IA	kg PO ₄ eq
6	Fresh water aquatic ecotox.	Ozone formation, Terrestrial ecosystems	Dampak Sekunder		
7	Marine aquatic ecotoxicity	Terrestrial acidification	1. Photochemical oxidation	CML-IA	kg C ₂ H ₄ eq
8	Terrestrial ecotoxicity	Freshwater eutrophication	2. Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil dan non fossil)		
9	Photochemical oxidation	Marine eutrophication	- Abiotic depletion (fossil fuels)	CML-IA	MJ
10	Acidification	Terrestrial ecotoxicity	- Abiotic depletion	CML-IA	kg Sb eq
11	Eutrophication	Freshwater ecotoxicity	3. Potensi terjadi penurunan biotik		
12		Marine ecotoxicity	- Terrestrial ecotoxicity	ReCiPe 2016	kg 1,4-DCB
13		Human carcinogenic toxicity	- Freshwater ecotoxicity	ReCiPe 2016	kg 1,4-DCB
14		Human non-carcinogenic toxicity	- Marine ecotoxicity	ReCiPe 2016	kg 1,4-DCB
15		Land use	4. Karsinogenik	ReCiPe 2016	kg 1,4-DCB
16		Mineral resource scarcity	5. Toxicity	CML-IA	kg 1,4-DB eq
17		Fossil resource scarcity	6. Water Footprint	ReCiPe 2016	m ³
18		Water consumption	7. Land Use Change	ReCiPe 2016	m ² a crop eq

3.6 Rekomendasi Prioritas Program Unggulan dengan AHP

Pada tahap ini dilakukan penentuan rekomendasi prioritas program pengelolaan lingkungan unggulan berdasarkan hasil interpretasi pada LCA dengan menggunakan pendekatan AHP. Pemilihan program adalah berdasarkan data primer pada kuisioner responden yang berasal dari masing masing kegiatan produksi. Responden dipilih berdasarkan metode sampling tidak acak yakni *purposive sampling* dimana peneliti memilih subjek berdasarkan kemampuan subjek dalam pemilihan program terkait dengan efisiensi energi dan pengurangan pencemaran udara. Kuisioner yang tersedia merupakan pemilihan satu alternatif terbaik pada satu proses. Dari pemilihan alternatif, akan dilakukan perhitungan beban elemen dengan *expert choice*.

Penentuan rekomendasi program unggulan pengelolaan lingkungan adalah berdasarkan informasi dari 30 orang responden *experts* PT PJB UBJOM Paiton, yaitu :

1. Level manajemen, sebanyak 3 orang, terdiri dari manajer pemeliharaan, manajer enjiniring, dan manajer operasi;
2. Level supervisor, sebanyak 12 orang, terdiri dari supervisor pemeliharaan, supervisor enjiniring, dan supervisor operasi;
3. Level staf, sebanyak 15 orang, terdiri dari staf pemeliharaan, staf enjiniring, dan staf operasi.

Penelitian ini bertujuan sebagai inputan dalam pengambilan keputusan manajemen dalam implementasi program, sehingga pada analisis AHP tidak menyertakan personil operator untuk tujuan konsistensi data. Klasifikasi tingkat pendidikan adalah sebagai berikut :

1. D3 sebanyak 7 orang
2. S1 sebanyak 22 orang
3. S2 sebanyak 1 orang

Pengalaman lama bekerja di unit kerja pemeliharaan, enjiniring, dan operasi,yaitu :

1. 5 – 10 tahun sebanyak 11 orang
2. >10 – 25 tahun sebanyak 9 orang
3. > 25 tahun sebanyak 10 orang

Pengolahan jawaban responden dilakukan mengikuti tahapan pada metode AHP yang dianalisa melalui *software Expert Choice*. Terdapat beberapa tahapan dalam pengolahan data AHP, antara lain:

1. Penentuan kriteria dan alternatif

Kriteria yang ditetapkan untuk rekomendasi prioritas program unggulan pengelolaan lingkungan adalah :

- Aspek finansial meliputi biaya investasi (*capital cost*), biaya pemeliharaan (termasuk biaya teknisi dan spare part), dan biaya operasional (biaya listrik, biaya operator, dan biaya bahan baku operasi)
- Aspek teknis meliputi kemudahan operasional, kemudahan *troubleshooting*, kehandalan (*reliability*), ketersediaan bahan baku, bahan kimia, dan bahan bakar, serta ketersediaan sumber daya manusia/teknisi,
- Aspek lingkungan adalah dampak lingkungan dari suatu proses produksi yang merupakan hasil analisis LCA.

Penentuan alternatif untuk rekomendasi prioritas program unggulan pengelolaan lingkungan diperoleh berdasarkan hasil analisis LCA.

2. Pembuatan Konstruksi Model

Model keputusan terstruktur dalam bentuk hierarki, pengelompokan ke tingkat yang berbeda seperti yang disajikan pada Gambar 3.4 dan Gambar 3.5, yang digunakan untuk melakukan perbandingan berpasangan dari elemen-elemen dari masing-masing kelompok berdasarkan skala verbal

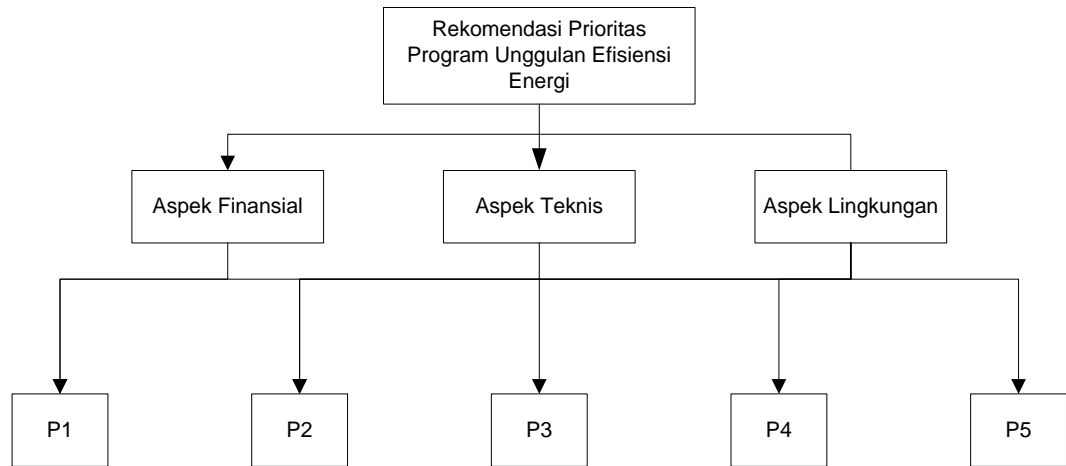
3. Penilaian Kriteria dan Alternatif

Kriteria dan alternatif dinilai dengan menggunakan perbandingan berpasangan. Nilai-nilai perbandingan kemudian diolah untuk menentukan peringkat alternatif dari seluruh alternatif untuk masing-masing strategi. *Software Expert Choice* digunakan untuk membantu pembuatan matriks perbandingan berpasangan (Ali dkk, 2015).

4. Perhitungan konsistensi

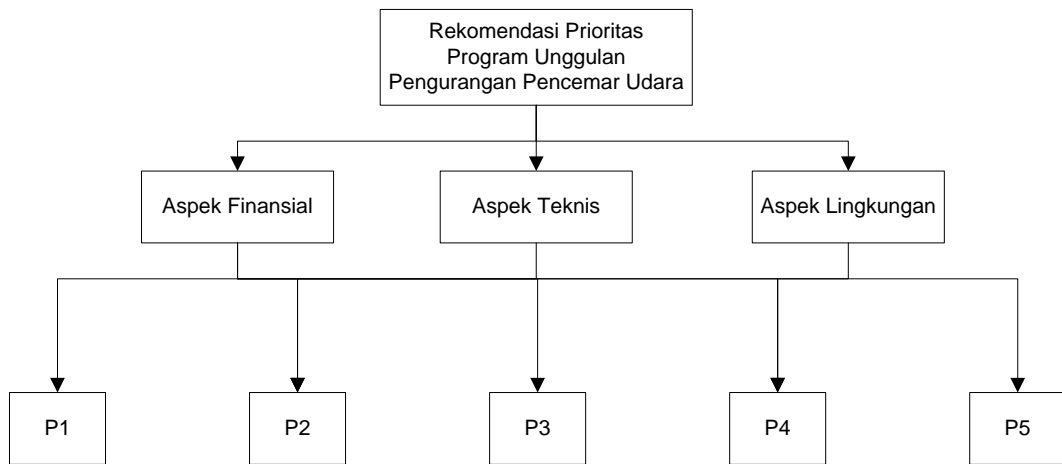
Dalam proses pembobotan nilai kriteria, terdapat kemungkinan konsistensi dari perbandingan berpasangan yang telah dilakukan. Rasio konsistensi (*Consistency Ratio*) memberikan suatu penilaian numerik bagaimana ketidakkonsistenan suatu evaluasi.

Software Expert Choice digunakan untuk memudahkan perhitungan konsistensi, jika nilai rasio konsistensi kurang dari 0,1, maka diasumsikan bahwa pakar konsisten dalam evaluasinya (Erdogan dkk, 2017). Hierarki tujuan, kriteria, dan alternatif ditampilkan pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 berikut.



Keterangan :
P = Program

Gambar 3.2 Proses AHP Program Unggulan Efisiensi Energi



Keterangan :
P = Program

Gambar 3.3 Proses AHP Program Unggulan Pengurangan Pencemar Udara

Rekomendasi berisi alternatif program-program pengelolaan lingkungan yang terbaik sebagai upaya dalam mengurangi dampak lingkungan dari aktivitas proses produksi listrik. Dasar pemilihan program perbaikan ini berdasarkan pada interpretasi hasil kajian LCA dan AHP.

3.7 Kesimpulan dan Saran

Tahap terakhir yang dilakukan yaitu, penarikan kesimpulan dan saran dilakukan setelah selesai analisis data dan pembahasan. Kesimpulan yang menyatakan ringkasan dan jawaban dari rumusan masalah penelitian. Saran diberikan untuk perbaikan penelitian dan pelaksanaan penelitian lebih lanjut. Saran yang diberikan merupakan bentuk rekomendasi untuk menyempurnakan penelitian.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis LCA

Analisis LCA adalah sebuah teknik yang digunakan untuk melakukan penilaian terhadap dampak lingkungan yang berhubungan dengan suatu produk. Tahapan penilaian dampak lingkungan terhadap proses produksi listrik dilakukan sebagai berikut ini:

4.1.1 Penentuan *Goal and Scope*

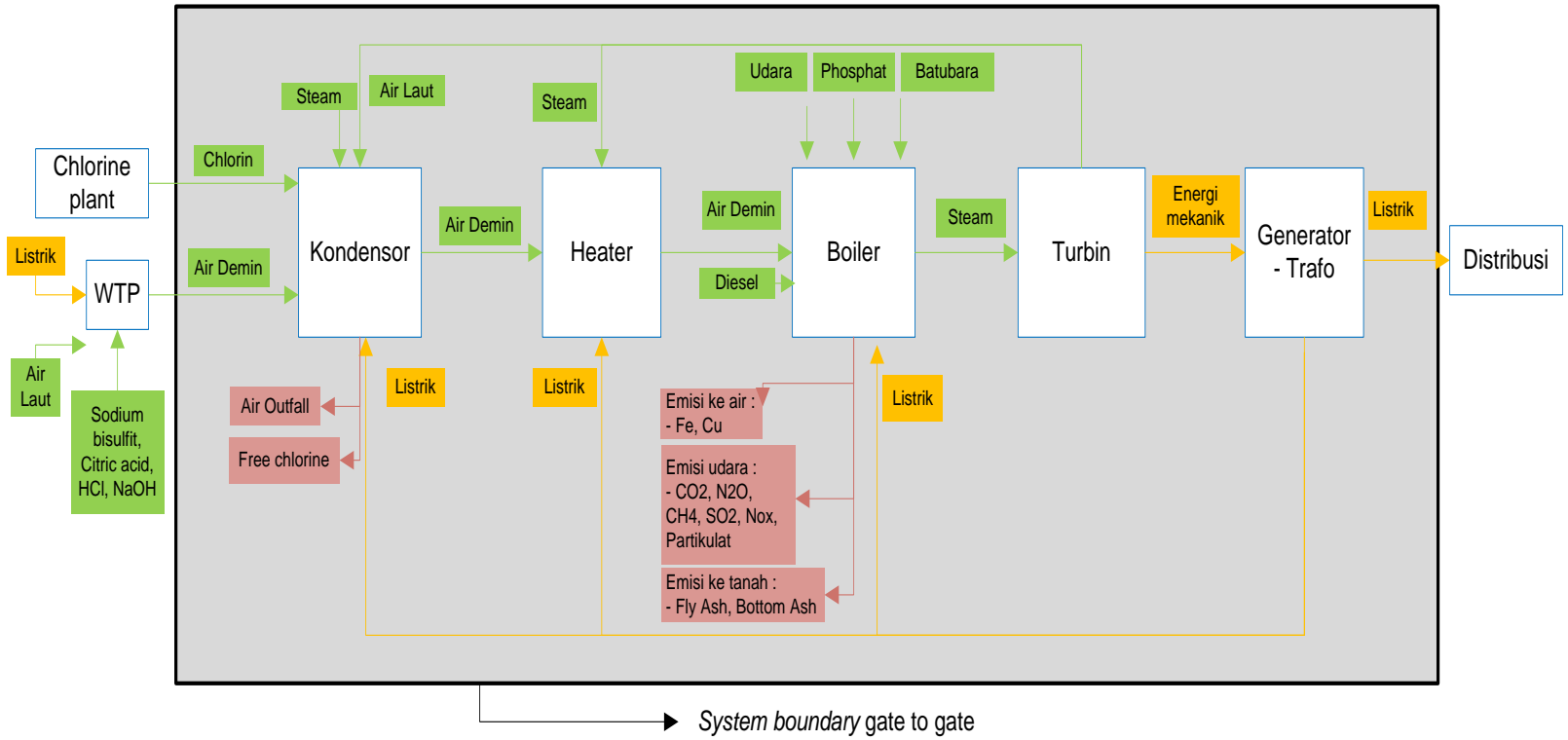
a). *Goal*

Tujuan pada kajian LCA ini adalah untuk mengidentifikasi besaran dampak lingkungan yang ditimbulkan dari proses produksi listrik PT PJB UBJOM PLTU Paiton dan melakukan evaluasi program pengelolaan yang telah dilakukan sebagai upaya penurunan besaran dampak lingkungan terkait pengurangan pencemaran udara serta peningkatan efisiensi energi.

b) *Scope*

Ruang lingkup pada kajian LCA ini dilakukan berdasarkan Asosiasi Lingkungan Ketenagalistrikan Indonesia (ALLIN) yaitu sistem *gate to gate*, dimulai dari kondensor, heater, boiler, turbin hingga generator-trafo. *Functional unit* yang digunakan adalah 1 kWh listrik, dengan sumber bahan bakar utama yaitu batubara yang berasal dari Kalimantan Selatan jenis *low rank coal (lignite)* dengan nilai kalori sekitar 3900 – 4200 Kcal/kg (7020 – 7560 BTU/lb) dan *total moisture* sebesar 33%. Data yang digunakan merupakan data sekunder dalam 1 tahun yaitu tahun 2020 meliputi data *input* berupa bahan baku, bahan kimia, bahan bakar, dan energi yang digunakan, serta data *output* berupa produk dan emisi yang dihasilkan dari proses produksi listrik. Metode LCA yang digunakan adalah ReCiPe 2016 Midpoint dan CML-IA yang diintegrasikan dengan kriteria Proper pada Peraturan Menteri KLHK No 1 tahun 2021 sehingga dapat menampilkan kategori dampak yang meliputi 4 dampak primer dan 7 dampak sekunder.

System boundary kajian LCA ini dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 System Boundary Kajian LCA

4.1.2 Life Cycle Inventory (LCI)

Dalam tahap penentuan LCI dilakukan inventarisasi data *input* dan *output* dari suatu produk di sepanjang daur hidupnya, yang didasarkan pada goal and scope yang telah ditentukan sebelumnya. Tahapan dalam LCI adalah sebagai berikut:

4.1.2.1 Pengumpulan Data

Pada proses ini dilakukan pengumpulan data kuantitatif yang meliputi *input* dan *output* dari suatu sistem produk. Pengumpulan data pada penelitian ini menggunakan data sekunder dari PT PJB UBJOM Paiton dengan periode Januari – Desember 2020.

Dalam penentuan analisis *Life Cycle Inventory* membutuhkan data *input* yang mencakup analisis bahan baku, bahan kimia, bahan bakar, dan energi yang digunakan, serta data *output* berupa produk dan emisi yang dihasilkan dari proses produksi listrik. Data yang digunakan untuk analisis LCA harus representatif, yaitu dengan memenuhi standar minimal pengumpulan data selama 1 tahun (EPA, 2006).

Pada proses pengumpulan data perlu dilakukan verifikasi data yang bertujuan untuk memastikan dan mendokumentasikan bahwa data yang digunakan sesuai dan mencerminkan data yang sebenarnya. Verifikasi data dilakukan dengan melakukan pengecekan data dengan sumber data yaitu catatan atau dokumen yang dilaporkan PT PJB UBJOM Paiton pada kondisi operasi di lapangan sesuai kebutuhan data. Hasil dari proses verifikasi terhadap data sekunder ditampilkan pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil Verifikasi Data terhadap Pengumpulan Data Sekunder

No	Kategori Data	Jenis Data	Sumber Data	Status Data
1	Penggunaan bahan baku	Air demin	Flow meter demin plant	Terverifikasi
2	Penggunaan bahan bakar	Batu bara	Log book coal handling	Terverifikasi
		HSD	Log book coal handling	Terverifikasi

		Udara	perhitungan kebutuhan udara x jam operasi	Terverifikasi
3	Pemakaian bahan kimia	Chlorine	Log book kimia dan lab	Terverifikasi
4	Penggunaan energi listrik pemakaian sendiri (proses produksi)	Listrik kondensor	Logbook produksi	Terverifikasi
		Listrik heater		
		Listrik boiler		
5	Emisi yang dihasilkan	a. Emisi Udara :		
		CO ₂	Hasil Analisa lab triwulanan	Terverifikasi
		N ₂ O		
		CH ₄		
		SO ₂	Hasil monitoring CEMS	Terverifikasi
		NO _x		
		Partikulat		
		b. Emisi Air :		
		1. Air limbah blowdown boiler		
		- Debit Air blowdown boiler	perhitungan kapasitas pompa x jam operasi	Terverifikasi
		- Parameter Air blowdown boiler (Fe, Cu)	Hasil Analisa lab bulanan	Terverifikasi
2. Air limbah bahang				
Debit Air Limbah Bahang	perhitungan kapasitas pompa x jam operasi	Terverifikasi		
- Parameter Air Limbah Bahang (<i>free chlorine</i>)	Hasil Analisa lab bulanan	Terverifikasi		
6	Limbah yang dihasilkan	- Fly ash	Log book Lingkungan	Terverifikasi
		- Bottom ash		
7	Produk	Steam	perhitungan heat balance x jam operasi	Terverifikasi
		Produksi Listrik gross	Log book Produksi	Terverifikasi
		Listrik Pemakaian Sendiri		
		Produksi Listrik netto		

Berdasarkan hasil verifikasi pengumpulan data sekunder pada Tabel 4.1 diketahui bahwa data penggunaan bahan baku air demin berasal dari pencatatan flow meter pada *demineralizer plant* setiap bulan oleh operator bidang Kimia dan Laboratorium. Bahan bakar terdiri dari batu bara dan HSD dengan menggunakan data dari pencatatan pada log book oleh operator coal handling setiap bulan yang dilaporkan kepada bidang Niaga dan Bahan Bakar. Batu bara yang digunakan berasal dari Kalimantan Selatan dengan kategori dampak yang ditimbulkan berupa potensi pemanasan global sejumlah 5.527,363 KgCO₂eq, potensi asidifikasi 21,315 KgSO₂eq dan potensi eutrofikasi 5,727 KgPO₄eq (Karlinasari et al.,2021).

Data pemakaian bahan kimia yaitu *chlorine* berasal dari pencatatan pada logbook oleh operator Kimia dan Laboratorium setiap bulan. Data penggunaan energi listrik pemakaian sendiri (proses produksi) yaitu listrik yang digunakan untuk pengoperasian condenser, heater, dan boiler berasal dari pencatatan log book oleh operator produksi yang setiap bulan dilaporkan kepada bidang Rendal Operasi.

Data emisi yang dihasilkan berupa emisi udara yaitu gas rumah kaca diantaranya CO₂, N₂O, dan CH₄ didapatkan dari hasil analisa laboratorium eksternal yang terakreditasi, sedangkan gas konvensional yaitu SO₂, NO_x, dan partikulat berasal dari data *Continuous Emission Monitoring System* (CEMS) yang dilakukan pengumpulan data setiap bulan oleh bidang Lingkungan. Data emisi air yaitu berupa parameter kualitas air *blowdown boiler* (Fe dan Cu) serta parameter kualitas air limbah pendingin kondensor/ bahang berasal dari hasil analisa laboratorium eksternal yang terakreditasi) yang dilakukan pengumpulan data setiap bulan oleh bidang Lingkungan. Data produksi listrik gross dan netto berasal dari pencatatan log book oleh operator Produksi setiap bulan yang dilaporkan kepada bidang Rendal Operasi.

Data penggunaan bahan baku berupa debit air laut pendingin kondensor berasal dari perhitungan kapasitas pompa x jam operasi unit, dimana kapasitas pompa diketahui dari manual book PLTU Paiton 9 dan jam operasi berdasarkan pencatatan log book oleh operator produksi. Sedangkan data *steam* (uap) yang merupakan output dari unit boiler menuju ke turbin dan menjadi inputan pada unit heater dan kondensor diperoleh dari perhitungan *heat balance* x jam operasi unit

boiler. Perhitungan pada data sekunder dilakukan karena tidak adanya flow meter dan pencatatan di log book.

4.1.2.2 Inventori Data

Inventori data merupakan pengumpulan data *input* dan *output* pada masing-masing unit proses produksi sesuai ruang lingkup penelitian. Beberapa jenis data pada tahap LCI memerlukan perhitungan dikarenakan tidak terdapatnya *flowmeter* pada unit proses. Berdasarkan tabel 4.1, data yang akan dilakukan perhitungan diantaranya yaitu :

1. Air limbah pendingin *condenser*

- Debit air limbah pendingin *condenser*

Unit proses *condenser* memiliki output berupa air limbah yang mengandung sisa *chlorine* karena adanya injeksi pada *intake* PLTU. Untuk mengetahui debit *output condenser* maka dilakukan perhitungan sebagai berikut.

Contoh perhitungan debit air *output condenser* pada bulan Oktober 2020 :

$$\begin{aligned} Q \text{ air limbah condenser} &= Q \text{ pompa} \times \text{service hour} \times n \text{ pompa} \quad (4.2) \\ &= 54.000 \text{ m}^3/\text{jam} \times (24 \times 31) \text{ jam/bulan} \times 2 \text{ pompa} \\ &= 80.352.000 \text{ m}^3/\text{bulan} \end{aligned}$$

- Beban pencemaran air

Beban pencemaran air yang ditimbulkan dari adanya kandungan *free chlorine* pada air limbah bahang dapat dihitung dengan menggunakan data konsentrasi *free chlorine* (C) dan debit (Q) air limbah bahang.

Contoh perhitungan beban pencemaran *Free Chlorine* bulan Oktober 2020 :

$$\begin{aligned} \text{Beban pencemaran free chlorine} &= C \text{ chlorine} \times Q \text{ air limbah} \quad (4.3) \\ &= (0,1 \text{ mg/l} \times 80.352.000 \text{ m}^3/\text{bulan}) \times 10^{-6} \\ &= 8.035 \text{ ton} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan debit dan beban pencemaran air limbah bahang pada tahun 2020 ditampilkan pada Tabel 4.2

Tabel 4.2 Data Debit dan Beban Pencemaran Unit *Condenser* Tahun 2020

Periode	Free Chlorine (mg/L)	Debit (m ³ /bulan)	Beban Pencemaran Free chlorine (ton)
Januari	0,004	77.767.000	0,31
Februari	0,004	68.688.000	274,75
Maret	0,02	80.352.000	1.607,04
April	0,006	71.280.000	427,68
Mei	0,070	48.600.000	3.402
Juni	0,50	64.368.000	32.184
Juli	0,050	62.208.000	3.110,40
Agustus	0,070	80.352.000	5.624,64
September	0,010	77.760.000	777,60
Oktober	0,100	80.352.000	8.035,20
November	0,070	77.760.000	5.443,20
Desember	0,004	80.352.000	321,41
Total pada tahun 2020		869.839.000	61.208,23

2. Steam

Unit proses boiler menghasilkan output berupa steam yang dialirkan untuk memutar turbin yang seporos dengan generator. Sisa steam yang digunakan untuk memutar turbin akan diarahkan kembali menuju ke *condenser* dan menuju ke *heater* untuk memanaskan air demin. Perhitungan kuantitas steam yang dialirkan menuju turbin, condenser, dan heater sebagai berikut :

- $Output\ steam\ boiler\ ke\ turbin = heat\ balance\ boiler \times service\ hour$ (4.6)
 $= 2.056,58\ ton/hour \times 7.476,87\ hours$
 $= 15.376.781,30\ ton$

- $Input\ steam\ ke\ heater = heat\ balance\ heater \times service\ hour$ (4.7)
 $= 610,2\ \frac{ton}{hour} \times 7.476,87\ hours$
 $= 4.562.386,07\ ton$

- $Input\ steam\ ke\ condenser = heat\ balance\ condenser \times service\ hour$ (4.8)
 $= 1.247,32\ \frac{ton}{hour} \times 7.476,87\ hours$
 $= 9.326.049,49\ ton$

Nilai heat balance didapatkan dari manual book PLTU Paiton 9, dicantumkan pada halaman Lampiran.

3. Kebutuhan Udara

Proses produksi listrik membutuhkan oksigen dari udara bebas agar batubara dapat terbakar di furnace boiler. Perhitungan kuantitas udara sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Input udara ke boiler} &= \text{total kebutuhan udara} * x \text{ service hour} & (4.9) \\ &= 2.966,15 \frac{\text{ton}}{\text{hour}} x 7.476,87 \text{ hour} \\ &= 22.177.517,95 \text{ ton} \end{aligned}$$

*Total kebutuhan udara diketahui dari tampilan pada DCS operator produksi.

4. Energi Mekanik

Unit proses turbin merubah steam menjadi energi mekanik, untuk selanjutnya menjadi input bagi generator. Perhitungan kuantitas energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Output energi mekanik dari turbin} &= \text{daya} x \text{ service hour} & (4.10) \\ &= 660 \text{ MW} x 7.476,87 \text{ hours} \\ &= 660.000.000 \text{ Joule/ sec} x (7.476,87 x 3.600) \text{ sec} \\ &= 1,7765 x 10^{-16} \text{ Joule} \\ &= 17.765.043 \text{ GJ} \end{aligned}$$

5. Energi Listrik

Energi listrik dihasilkan oleh unit generator yang diketahui besarnya dari monitoring counterflow. Selanjutnya sebelum didistribusikan ke jaringan, energi listrik disalurkan untuk suplai pemakaian sendiri diantaranya untuk proses produksi di condenser, heater, dan boiler. Perhitungan input energi listrik ke unit condenser, heater, dan boiler sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \bullet \text{ Input energi listrik ke boiler} &= \text{konsumsi listrik boiler} x \text{ service hour} & (4.11) \\ &= 15,94 \text{ MW} x 7.476,87 \text{ hours} \\ &= 119.181,31 \text{ MWh} \\ &= 119.181.308 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bullet \text{ Input energi listrik ke heater} &= \text{konsumsi listrik heater} x \text{ service hour} & (4.12) \\ &= 5,11 \text{ MW} x 7.476,87 \text{ hours} \\ &= 38.206,81 \text{ MWh} \\ &= 38.206.806 \text{ kWh} \end{aligned}$$

- $Input\ listrik\ ke\ condenser = konsumsi\ listrik\ condenser \times service\ hour$ (4.14)

$$= 6,07\ MW \times 7.476,87\ hours$$

$$= 45,384,60\ MWh$$

$$= 45.384.601\ kWh$$

Konsumsi listrik untuk peralatan boiler, condenser, dan heater diketahui dari pencatatan oleh operator Produksi melalui counter flow.

6. Emisi dari proses pembakaran

a. Gas Rumah Kaca (GRK) :

Perhitungan Total Emisi GRK menggunakan rumus berdasarkan Pedoman Penghitungan dan Pelaporan Inventarisasi GRK Bidang Energi – Sub Bidang Ketenagalistrikan Tahun 2018 oleh Direktorat Jendral Ketenagalistrikan Kementerian ESDM.

- Rumus perhitungan Total Emisi CO₂ menggunakan metode 3 tier 3 :

$$E\ CO_2 = (Fbb \times \{Car - (Aar \times Cub)\}) \times 44/12 \quad (4.15)$$

Dimana :

$E\ CO_2$ = Total emisi CO₂ (ton CO₂)

Fbb = Konsumsi batubara di tahun i (ton)

Car = Kandungan karbon, *as received* (rerata), %

Aar = Kandungan abu (*ash content*), *as received*, (rerata), %

Cub = Kandungan karbon tidak terbakar (*unburned carbon*), rerata, %

$$E\ CO_2 = 2.679.864,22\ ton \times \{4,52 - (3,55 \times 0,54)\} \times 44/12$$

$$= 4.372.726,676\ ton\ CO_2$$

- Rumus perhitungan Total Emisi CH₄ dan N₂O menggunakan metode 1, sebagai berikut :

$$E = DA \times FE \quad (4.16)$$

$$E\ CH_4 = (Fbb \times NCV) \times FE \times 10^{-6} \quad (4.17)$$

dimana:

$E\ CH_4, N_2O$: Total emisi CH₄ atau N₂O (ton)

DA : Data Aktivitas (TJ)

F : Konsumsi batubara dalam setahun (ton)

- NCV : Nilai kalor bersih batubara (weighted average, TJ/Gg)
 FE : Faktor Emisi (kg CH₄/TJ atau kg N₂O/TJ, lihat Lampiran 2)
 10-6 : Faktor pengali

$$E_{CH_4} = \left(2.679.864,22 \text{ ton} \times 15,91 \frac{TJ}{Gg} \right) \times 1 \text{ kg} \frac{CH_4}{TJ} \times 10^{-6}$$

$$= 42,64 \text{ ton}$$

$$E_{N_2O} = \left(2.679.864,22 \text{ ton} \times 15,91 \frac{TJ}{Gg} \right) \times 1,5 \text{ kg} \frac{N_2O}{TJ} \times 10^{-6}$$

$$= 63,9 \text{ ton } N_2O$$

b. Gas Konvensional

Perhitungan emisi gas konvensional (SO₂, NO_x, dan Partikulat) menggunakan rumus pada Permen No 15 Tahun 2019 lampiran XV, dengan data emisi menggunakan hasil monitoring *Continuous Emissions Monitoring System* (CEMS).

Rumus perhitungan emisi sebagai berikut :

$$E_{SO_2} = Cav \times Q \times 0,0036 \times Op. \text{ hour} \quad (4.18)$$

$$Q = Vav \times A \quad (4.19)$$

$$A = 3,14 \times r^2 \quad (4.20)$$

Dimana :

- E = Laju emisi pencemar (kg/hari)
 Cav = Konsentrasi terukur rata-rata harian (mg/Nm³)
 Q = Laju alir emisi volumetrik (m³/detik)
 0.0036 = Faktor konversi dari mg/detik ke kg/jam
 Op Hours = Jam operasi pembangkit selama 1 (satu) har
 Vav = laju alir rata-rata harian (m/detik)
 A = Luas penampang cerobong (m²)
 r = jari-jari cerobong

- Contoh perhitungan E SO₂ pada 1 Januari 2020

$$E_{SO_2} = 359,34 \frac{mg}{Nm^3} \times \left\{ 34,41 \frac{m}{detik} \times (3,14 \times 3,5 \text{ m} \times 3,5 \text{ m}) \right\} \times 0,0036 \times 24 \text{ jam}$$

$$= 41.095,7 \text{ kg/hari}$$

- Contoh perhitungan E NO_x pada 1 Januari 2020

$$E \text{ NO}_x = 229,21 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \times \left\{ 34,41 \frac{\text{m}}{\text{detik}} \times (3,14 \times 3,5 \text{ m} \times 3,5 \text{ m}) \right\} \times 0,0036 \times 24 \text{ jam}$$

$$= 26.214,25 \text{ kg/hari}$$

- Contoh perhitungan E Partikulat pada 1 Januari 2020

$$E \text{ Pm} = 18,96 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \times \left\{ 34,41 \frac{\text{m}}{\text{detik}} \times (3,14 \times 3,5 \text{ m} \times 3,5 \text{ m}) \right\} \times 0,0036 \times 24 \text{ jam}$$

$$= 2.168,35 \text{ kg/hari}$$

Selanjutnya perhitungan emisi harian SO₂, NO_x, dan Partikulat dilakukan setiap triwulan selama 1 tahun. Hasil perhitungan emisi gas konvensional selama tahun 2020 ditampilkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Emisi SO₂, NO_x, dan Partikulat Tahun 2020

Periode	E SO ₂	E NO _x	E Partikulat
Triwulan 1	3.687.928,92	2.139.395,53	146.790,93
Triwulan 2	1.344.388	647.789,20	96.204,56
Triwulan 3	3.424.778,86	2.230.182,56	498.039,88
Triwulan 4	4.360.304,18	2.080.628,47	687.401,14
Total E (kg)	12.817.399,96	7.097.995,75	1.428.436,51
Total E (ton)	12.817,40	7.098	1.428,44

7. Emisi Air Blowdown Boiler

Unit proses boiler menghasilkan output berupa air limbah blowdown boiler dengan kuantitas debit yang terukur melalui flowmeter. Sedangkan untuk mengetahui beban pencemaran air limbah Blowdown boiler yang mengandung Fe dan Cu perlu dilakukan perhitungan.

1. Parameter Fe

Parameter Fe dan Cu pada air limbah blowdown boiler telah rutin dilakukan analisa setiap 1x setiap bulan. Rumus perhitungan beban pencemaran air limbah blowdown boiler adalah sebagai berikut :

$$\text{Beban pencemaran Fe, Cu} = C_{\text{Fe, Cu}} \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) \times Q \text{ air limbah} \quad (4.21)$$

Dimana :

C_{Fe, Cu} : konsentrasi Fe dan Cu

Q : debit

- Contoh perhitungan parameter Fe pada Februari 2020

$$\begin{aligned} \text{Beban pencemaran Fe} &= 0,08 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times 401,28 \text{ m}^3 \\ &= 32,1 \text{ gram} \end{aligned}$$

- Contoh perhitungan parameter Cu pada Februari 2020

$$\begin{aligned} \text{Beban pencemaran Cu} &= 0,01 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times 401,28 \text{ m}^3 \\ &= 4,01 \text{ gram} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan beban pencemaran Fe dan Cu ditampilkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Beban Pencemaran Air Blowdown Boiler

Periode	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)	Debit (m3/bulan)	Beban Pencemaran	
				Fe (gram)	Cu (gram)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)=(2)x(4)	(6)=(3)x(4)
Januari	0,22	0,03	0	0	0
Februari	0,08	0,01	401,28	32,1024	4,0128
Maret	0,05	0,01	4009,52	210,9008	44,1047
April	0,04	0,01	2303,59	95,1384	25,3395
Mei	0,04	0,01	2679,74	110,6734	29,4772
Juni	0,12	0,02	2446,03	293,5238	48,9206
Juli	0,04	0,01	295	12,1835	3,245
Agustus	0,04	0,01	260	10,738	2,86
September	0,04	0,01	408	16,8504	4,488
Oktober	0,04	0,01	406	16,7678	4,466
November	0,04	0,04	501	20,6913	20,6913
Desember	0,01	0,01	989	10,879	10,879
Beban pencemaran (gram)				830,4489	198,4842
Beban pencemaran (ton)				0,00083	0,0001985

4.1.2.4 Validasi Data

Data yang telah terverifikasi dan terinventarisasi kemudian dilakukan validasi data dengan neraca massa yaitu sebagai berikut :

a) Neraca Massa

Untuk validasi data jumlah dan jenis bahan-bahan yang dimasukkan dalam unit proses sebagai *input* dan yang dikeluarkan sebagai *output*, maka diperlukan

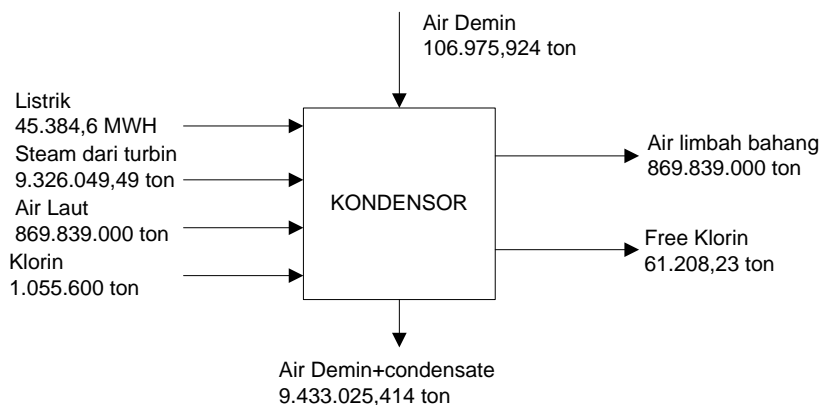
analisis kesetimbangan massa yang spesifik pada setiap unit proses. Adapun berikut ialah penentuan *Life Cycle Inventory* menggunakan kesetimbangan massa atau *mass balance* untuk tiap unit proses produksi.

Unit produksi yang termasuk dalam scope kajian LCA ini, terdiri dari :

1. Unit Kondensor

Tipe kondensor PLTU UBJ O&M Paiton adalah *surface condenser*. Cara kerja dari jenis unit ini ialah mengalirkan uap kedalam ruangan yang berisi susunan pipa dan uap tersebut akan memenuhi permukaan luar pipa sedangkan air yang berfungsi sebagai pendingin akan mengalir di dalam pipa (*tube side*), maka akan terjadi kontak antara keduanya dimana uap yang memiliki temperature panas akan bersinggungan dengan air pendingin yang berfungsi untuk menyerap kalor dari uap tersebut, sehingga temperatur *steam* (uap) akan turun dan terkondensasi.

Dalam proses ini, terdapat input berupa energi listrik dari unit generator, injeksi klorin pada intake untuk mencegah pertumbuhan mikroorganisme, aliran steam dari turbin, air demineralisasi dari *Water Treatment Plant* serta air laut sebagai air pendingin. Sedangkan output yaitu berupa air pendingin yang dibuang menuju outfall, dengan kandungan *free chlorine* sebagai sisa *chlorine* yang dapat terukur saat sampling di outfall, serta output air demin dan air dari steam terkondensasi yang dialirkan menuju heater. *Mass balance* unit kondensor ditampilkan pada Gambar 4.2.



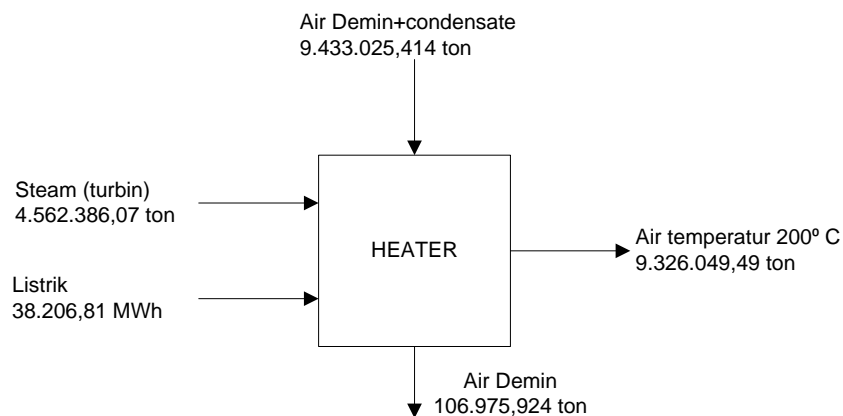
Gambar 4.2 Mass Balance Kondensor
Sumber : PT.PJB UBJ O&M PLTU Paiton

2. Unit Heater

Heater adalah alat penukar kalor yang berfungsi sebagai pemanas air umpan sebelum masuk ke boiler. Cara kerja *heater* yaitu dengan

menaikkan temperatur secara bertahap atau sebagai pemanas lanjut yang menggunakan uap ekstraksi dari turbin sebagai sumber pemanasan. Peningkatan efisiensi dari pembangkit tenaga uap dengan menambah *feedwater heater* untuk meningkatkan temperatur fluida yang akan dipanaskan pada boiler. Sehingga energi yang digunakan untuk memanaskan fluida lebih sedikit.

Dalam proses ini, terdapat input berupa air demin dari unit kondensor, *steam* dari unit turbin dan energi listrik yang ditransfer dari unit generator. Output dari *heater* berupa air demin bertemperatur 150°C yang dialirkan menuju unit *boiler* dan air bertemperatur 200°C yang dialirkan kembali ke kondensor. Mass balance unit *heater* ditampilkan pada Gambar 4.3.

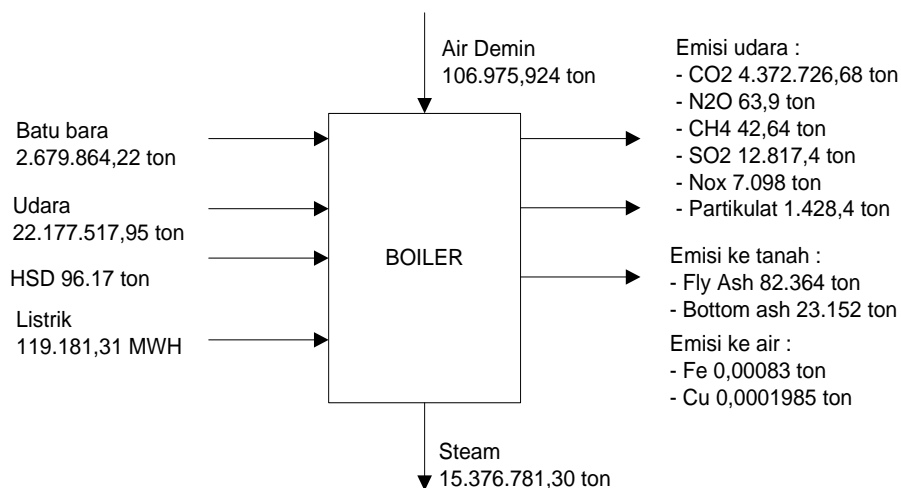


Gambar 4.3 Mass Balance Heater
 Sumber : PT.PJB UBJ O&M PLTU Paiton

3. Unit Boiler

Boiler merupakan mesin kalor (*Thermal Engeneering*) yang mentransfer energi-energi kimia atau energi otomis menjadi kerja (usaha). *Boiler* atau ketel *steam* adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan steam. Steam diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar. Secara sederhana, *boiler* berfungsi untuk merubah air menjadi uap *superheat* yang bertemperatur dan bertekanan tinggi.

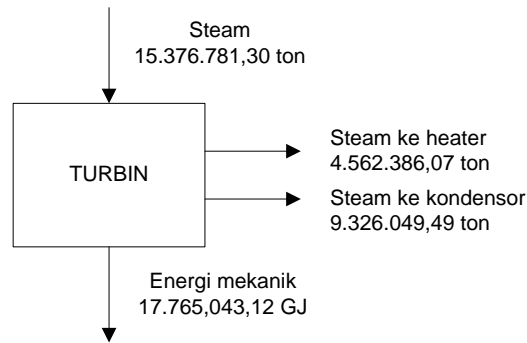
Dalam proses ini, terdapat input berupa energi listrik dari generator, batu bara sebagai bahan bakar boiler, *High Speed Diesel* (HSD) sebagai bahan bakar tambahan saat start up unit, udara yang ditambahkan untuk pembakaran sempurna, air demin sebagai bahan baku pengisian boiler. Sedangkan output yaitu berupa emisi ke udara melalui cerobong terdiri dari gas CO₂, N₂O, CH₄, SO₂, NO_x, dan partikulat. Serta emisi ke tanah yaitu berupa fly ash dan bottom ash, dan juga emisi ke air laut yaitu air limbah blowdown boiler yang berpotensi mengandung Fe dan Cu dari proses korosi instalasi boiler. Dari unit boiler terdapat produk yang dihasilkan yaitu steam yang menjadi inputan untuk menggerakkan turbin. Mass balance unit boiler ditampilkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 *Mass Balance* Boiler
Sumber : PT.PJB UBJ O&M PLTU Paiton

4. Unit Turbin

Turbin uap berfungsi untuk mengkonversi energi panas yang dikandung oleh *steam* menjadi energi putar / energi mekanik. Poros turbin dikopel dengan poros generator sehingga ketika turbin berputar generator juga ikut berputar. Dalam proses ini, terdapat input berupa steam yang dihasilkan dari unit boiler, serta terdapat output berupa steam yang juga dialirkan menuju ke kondensor dan heater. Produk dari unit turbin yaitu energi mekanik yang digunakan sebagai input bagi unit generator. Mass balance unit turbin ditampilkan pada Gambar 4.5.

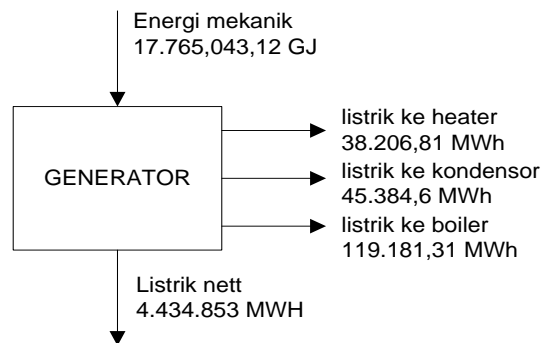


Gambar 4.5 *Mass Balance Turbin*
 Sumber : PT.PJB UBJ O&M PLTU Paiton

5. Unit Generator

Energi panas dari uap air yang diproduksi oleh boiler diubah menjadi energi mekanis berupa putaran poros pada turbin. Energi mekanik tersebut selanjutnya akan diubah menjadi energi listrik oleh generator. Generator listrik menggunakan prinsip dasar dari Hukum Faraday dimana apabila sebuah konduktor listrik dilewatkan ke sebuah medan magnet, akan timbul tegangan listrik yang terinduksi pada konduktor tersebut.

Dalam proses ini, terdapat input berupa energi mekanik dari turbin dan output berupa listrik yang dialirkan untuk pengoperasian kondensor dan heater. Produk yang dihasilkan dari unit generator yaitu energi listrik yang kemudian dialirkan ke distribusi. Mass balance unit generator-trafo ditampilkan pada Gambar 4.6.



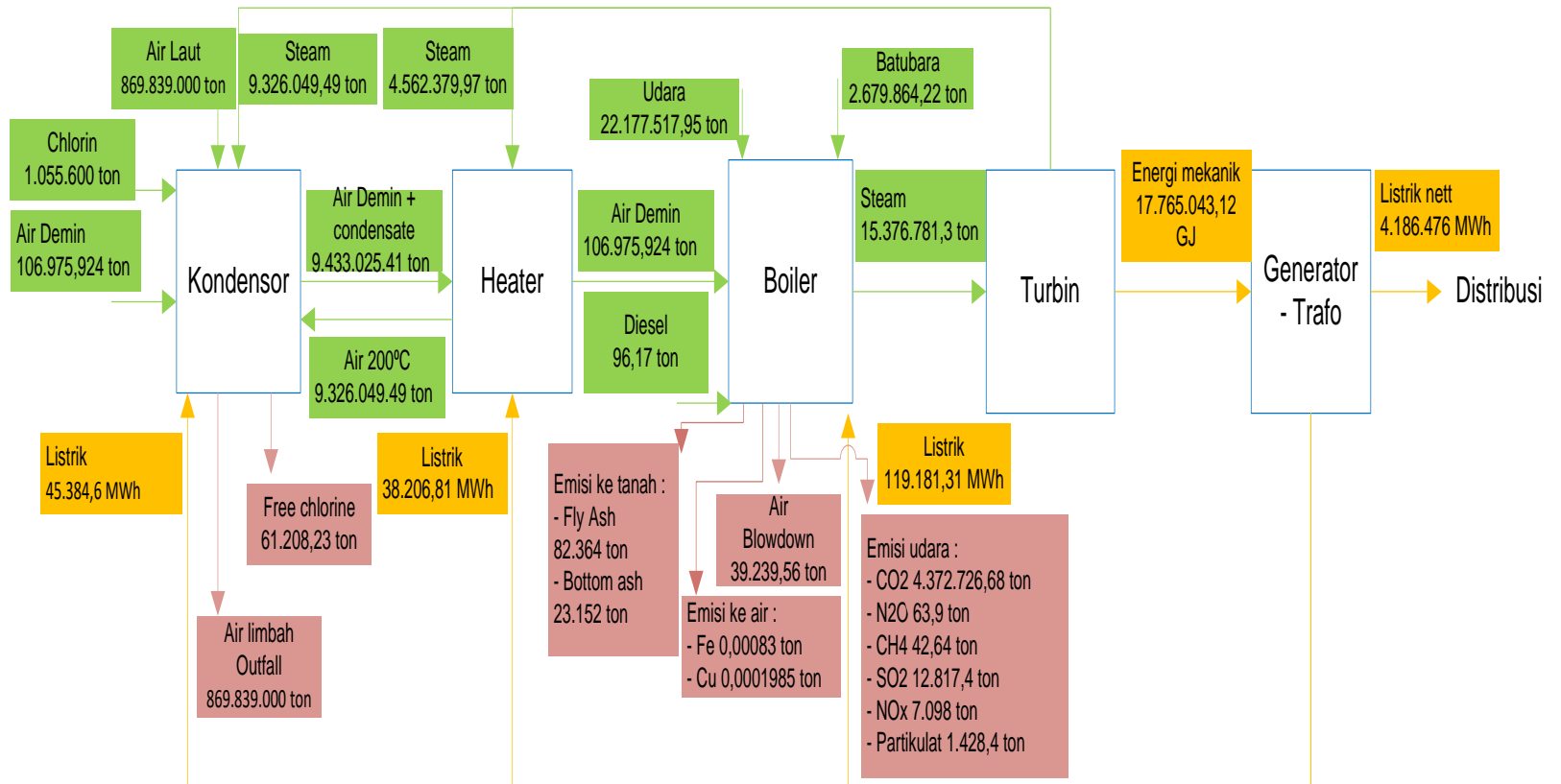
Gambar 4.6 *Mass Balance Generator*
 Sumber : PT.PJB UBJ O&M PLTU Paiton

Inventori data proses produksi energi listrik selama periode Januari – Desember 2020 dan neraca massa proses produksi listrik berdasarkan kapasitas produksi dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.7 berikut.

Tabel 4.5 Inventori Data Proses Produksi Listrik

Unit Proses	Input/ Output	Kategori Data	Jenis Data	Sumber/Ke Unit Proses	Jumlah	Satuan	Sumber data
Kondensor	Input	Raw material	Air laut	sumber : laut	869.839.000	ton	Flowmeter Circulating water pump
		Bahan Kimia	Chlorine	sumber : Chlorine plant	443,35	ton	Log book kimia dan lab
		Raw material	Air Demin	sumber : RO plant	106.975,93	ton	Flow meter demin plant
		Raw material	Steam	Sumber : turbin	9.326.049,49	ton	perhitungan heat balance x jam operasi
		Energi	Listrik	Sumber : Generator	45.384,6	MWh	Logbook produksi
	Output	Produk	Air Demin	Kondensor ke Heater	106.975,93	ton	Flow meter demin plant
		Air Limbah	Air bahang	Emisi air ke laut	869.839.000	ton	perhitungan kapasitas pompa x jam operasi
Free chlorine			Emisi air ke laut	61,52	ton	Hasil Analisa lab bulanan	
Heater	Input	Raw material	Air Demin	Kondensor ke Heater	106.975,93	ton	Flow meter
		Raw material	Steam	Turbin ke Heater	4.562.386,07	ton	perhitungan heat balance x jam operasi
		Energi	Listrik	Generator ke Heater	38.206,81	MWh	Logbook produksi
	Output	Produk	Air Demin	Heater ke Boiler	106.975,93	ton	Flow meter
Boiler	Input	Raw material	Batu bara	sumber: tambang batu bara	2.679.864,22	ton	Log book coal handling
		Raw material	Diesel	sumber : pertamina	96,17	Ton	Log book coal handling
		Energi	Listrik	Generator ke Boiler	119.181,31	MWh	Logbook produksi

		Raw material	Udara	sumber : alam	22.177.517,95	ton	perhitungan kebutuhan udara x jam operasi
		Raw material	Air Demin	Heater ke Boiler	106.975,93	ton	Flow meter
	Output	Produk	Steam	Boiler ke Turbin	15.376.781,3	ton	perhitungan heat balance x jam operasi
		Emisi	CO ₂	Emisi ke udara	4.372.726,68	ton	Hasil Analisa lab triwulanan
			N ₂ O	Emisi ke udara	63,9	ton	
			CH ₄	Emisi ke udara	42,64	ton	
			SO ₂	Emisi ke udara	12.817,4	ton	Hasil monitoring CEMS
			NO _x	Emisi ke udara	7.098	ton	
			Partikulat	Emisi ke udara	1.428,4	ton	
			Fe	Emisi air ke laut	0,00083	ton	Hasil Analisa lab bulanan
Cu	Emisi air ke laut	0,0001985	ton				
Limbah	Fly ash	Disposal ke landfill	82.364	ton	Log book lingkungan		
Turbin	Input	Raw material	Steam	Boiler ke Turbin	15.376.781,3	ton	perhitungan heat balance x jam operasi
	Output	Produk	Steam	Turbin ke Kondensor	9.326.386,07	ton	perhitungan heat balance x jam operasi
		Produk	Steam	Turbin ke Heater	4.562.379,97	ton	perhitungan heat balance x jam operasi
		Energi	Energi mekanik	Turbin ke Generator	17.765.043,12	GigaJoule	kapasitas terpasang x service hour
Generator - Trafo	Input	Energi	Energi mekanik	Turbin ke Generator	17.765.043,12	GigaJoule	kapasitas terpasang x service hour
	Output	Energi	Listrik nett	ke Distribusi	4.434.853	MWh	Log book Produksi



Gambar 4.7 Neraca Massa Proses Produksi Listrik PT PJB UBJOM Paiton Berdasarkan Kapasitas Produksi

Air demin yang dihasilkan dari *Water Treatment Plant* dipompa menuju ke *hot well kondensor*, kemudian dipompa menuju *boiler feed pump* melalui *low pressure heater* (LPH) dan selanjutnya menuju steam drum dengan melalui *High pressure heater* (HPH). Air di *steam drum* disirkulasi dengan menggunakan boiler *circulating water pump* menuju ke *wall tube boiler*. *Phospat* diinjeksikan untuk pengkondisian kualitas pH air di dalam boiler agar memenuhi batasan operasi yang diijinkan..

Air demin mengalami proses pemanasan dalam tube boiler sehingga berubah fase menjadi uap (*steam*). Selanjutnya, *steam* dialirkan menuju turbin yang digunakan untuk memutar turbin yang seporos dengan generator. Putaran generator mengubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik (*gross*). Sisa steam yang digunakan untuk memutar turbin akan diarahkan kembali menuju ke *condenser* dan menuju *heater* untuk memanaskan air demin. Kemudian *steam* pada kondensor menyentuh *tube* kondensor yang berisi air laut sehingga menyebabkan steam akan mengalami kondensasi sehingga berubah wujud menjadi air. Air tersebut ditampung dalam *hot well kondensor* dan akan mengalami resirkulasi hingga *steam drum*.

Air laut dipompa ke dalam *intake kanal* dan terlebih dahulu diinjeksi dengan klorin untuk mencegah terbawanya biota laut sepanjang saluran menuju ke *outfall*. Air laut mengalir melalui *tube kondensor* yang berfungsi sebagai pendingin uap sisa dari turbin.

Batu bara ditampung di silo kemudian melalui *coal feeder* untuk mengatur laju batu bara yang masuk ke *mill* untuk dihaluskan. Kemudian udara dihembuskan dari *PA Fan* untuk mendorong batubara masuk ke *boiler furnace*. Di dalam *furnace* dilakukan penambahan udara oleh *FD fan* agar terjadi pembakaran sempurna, dengan memperhatikan perbandingan antara jumlah batubara dan udara (*coal to air ratio*).

Di awal start up boiler, HSD dialirkan ke *boiler furnace* dan dipicu oleh *ignitor* agar HSD terbakar sehingga terbentuk nyala api dalam *furnace*, setelah timbul nyala api dalam *furnace* selanjutnya batu bara dihembuskan oleh udara ke dalam *furnace* untuk proses pembakaran.

Proses pembakaran batu bara di boiler menghasilkan sisa udara pembakaran (*flue gas*) yang dihisap oleh *ID fan* menuju ke cerobong *chimney* melalui *electrostatic presipitator* (ESP). ESP menangkap partikulat yang terkandung dalam *flue gas*, sedangkan emisi gas berupa CO₂, N₂O, CH₄, SO₂, NO_x menuju ke *chimney* dan terbuang ke udara. Partikulat yang tertangkap dalam ESP adalah *fly ash*, yang kemudian ditampung pada *ESP hopper* dan kemudian didorong dengan udara bertekanan menuju *Fly Ash silo*. Pembakaran batu bara juga menghasilkan *bottom ash* yang keluar melalui *boiler hopper* dan ditampung di *submerge scrapper conveyor* menuju *bottom ash silo*. *Bottom ash* selanjutnya dipindahkan dan ditimbun di *landfill*. Sedangkan penanganan *fly ash* adalah dimanfaatkan oleh internal dan eksternal perusahaan, dan bagian lainnya ditimbun di *landfill*.

Energi listrik *gross* yang dihasilkan dari generator disalurkan ke *unit auxiliary transformation* (UAT) untuk suplai pemakaian sendiri unit heater, condenser, boiler, WTP. Energi listrik yang telah dikurangi untuk pemakaian sendiri (energi listrik *netto*) disalurkan ke *Generator Transformer* (GT) untuk selanjutnya didistribusikan ke jaringan.

4.1.2.5 Normalisasi Data

Setelah dilakukan validasi data tahap selanjutnya adalah normalisasi terhadap produk utama yaitu energi listrik. Normalisasi yaitu data *input* dan *output* pada setiap unit proses dibagi dengan produk akhir energi listrik yang dihasilkan. Hal ini bertujuan agar semua data memiliki satuan sesuai dengan *functional unit* yaitu per 1 kWh produk dan kemudian dilakukan input data pada *software* Simapro. Berikut contoh perhitungan normalisasi data :

$$\begin{aligned} \text{Normalisasi volume air laut} &= \frac{\text{input air laut}}{\text{total produksi listrik}} \\ &= \frac{869.839.000 \text{ m}^3}{4.186.476.000 \text{ kWh}} \\ &= 0,2077 \text{ m}^3 \text{ air laut per kWh listrik} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Normalisasi volume air demin} &= \frac{\text{input air demin}}{\text{total produksi listrik}} \\ &= \frac{106.975,92 \text{ m}^3}{4.186.476.000 \text{ kWh}} \\ &= 0,0000255 \text{ m}^3 \text{ air demin per kWh listrik} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Normalisasi input batu bara} &= \frac{\text{input batu bara}}{\text{produk akhir energi listrik}} \\
 &= \frac{2.556.060,95 \text{ ton}}{4.186.476.000 \text{ kWh}} \\
 &= 0,000611 \text{ ton batu bara per kWh listrik}
 \end{aligned}$$

Pada tahap normalisasi, dilakukan pengecekan kembali apabila terdapat data input dengan besaran nilai kurang dari 5% dibandingkan keseluruhan input maka dianggap tidak signifikan sehingga tidak disertakan pada inventory data Simapro. Input data yang dianggap tidak signifikan yaitu pada bahan kimia Chlorine dengan perhitungan sebagai berikut :

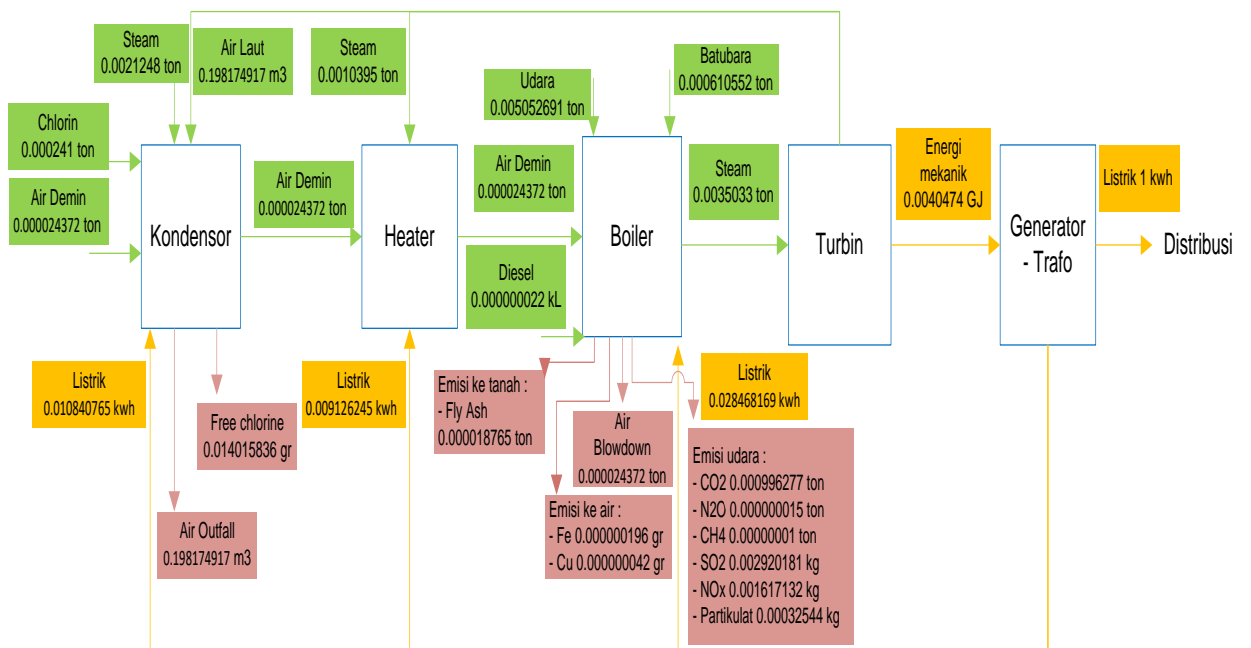
$$\begin{aligned}
 \text{Persentase input chlorine pada unit proses condenser} &= \frac{\text{jumlah chlorine}}{\text{input air laut+chlorine}} \times 100\% \\
 &= \frac{1.055.600 \text{ ton}}{(869.839.000+1.055.600) \text{ ton}} \times 100\% \\
 &= 0,1 \%
 \end{aligned}$$

Input chlorine pada air laut sebesar 0,1%, sehingga nilai chlorine dianggap tidak signifikan dalam menimbulkan dampak lingkungan. Rekap normalisasi data proses produksi energi listrik selama periode Januari – Desember 2020 dan neraca massa proses produksi listrik berdasarkan *functional unit* dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.8 berikut.

Tabel 4.6 Normalisasi Data Produksi Listrik

Unit Proses	Input/ Output	Jenis Data	Jumlah	Satuan	Normalisasi	Satuan
Kondensor	Input	Air laut	869.839.000	ton	0.19817	ton/kWh
		Air Demin	106.975,93	ton	0.00002	ton/kWh
		Steam	9.326.049,49	ton	0.00212	ton/kWh
		Listrik	45.384,6	kwh	0.01084	kWh/kWh
	Output	Air Demin	106.975,93	ton	0.00002	ton/kWh
		Air Outfall	869.839.000	ton	0.19817	ton/kWh
Heater	Input	Air Demin	106.975,93	ton	2.4E-05	ton/kWh
		Steam	4.562.386,07	ton	0.00104	ton/kWh
		Listrik	38.206,81	kwh	0.00913	kWh/kWh
	Output	Air Demin	106.975,93	ton	2.4E-05	ton/kWh
Boiler	Input	Batu bara	2.679.864,22	ton	0.00061	ton/kWh
		Listrik	119.181,31	kwh	0.02847	kWh/kWh
		Udara	22.177.517,95	ton	0.00505	ton/kWh
		Air Demin	106.975,93	ton	2.4E-05	ton/kWh
	Output	Steam	15.376.781,3	ton	0.0035	ton/kWh
		CO ₂	4.372.726,68	ton	0.001	ton/kWh
		N ₂ O	63,9	ton	1.5E-08	ton/kWh

		CH ₄	42,64	Ton	1E-08	ton/kWh
		SO ₂	12.817,4	Ton	0.00292	ton/kWh
		NO _x	7.098	Ton	0.00162	ton/kWh
		Partikulat	1.428,4	Ton	0.00033	ton/kWh
		Fe	0,00083	Ton	2E-07	ton/kWh
		Cu	0,0001985	Ton	4.2E-08	ton/kWh
		Fly ash	82.364	Ton	1.9E-05	ton/kWh
Turbin	Input	Steam	15.376.781,3	Ton	0.0035	ton/kWh
	Output	Steam	9.326.386,07	Ton	0.00212	ton/kWh
		Steam	4.562.379,97	Ton	0.00104	ton/kWh
		Energi mekanik	17.765.043,12	GigaJoule	0.00405	GJ/kWh
Generator - Trafo	Input	Energi mekanik	17.765.043,12	GigaJoule	0.00405	GJ/kWh
	Output	Listrik	4.434.853	kWh	1	kWh



Gambar 4.8 Neraca Massa Proses Produksi Listrik Berdasarkan *Functional Unit*

4.1.3 *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*

Tahapan setelah melakukan *Life Cycle Inventory* adalah melakukan penentuan *LCIA*, yaitu prakiraan dampak lingkungan potensial berdasarkan input dan output pada setiap kegiatan proses produksi. Tahap *LCIA* bertujuan untuk membuat hasil dari analisis *LCI* yang lebih mudah dipahami dan dikelola yang berkaitan dengan kesehatan manusia, ketersediaan sumber daya dan lingkungan.

Dalam kajian *LCA* ini digunakan pendekatan penilaian dampak *midpoint* dikarenakan pendekatan *midpoint* bersifat lebih spesifik dan menekankan perubahan fisik-kimia di lingkungan. Tahapan penilaian dampak yang dilakukan yaitu klasifikasi, karakterisasi, dan normalisasi dengan menggunakan metode *CML-1A Baseline* dan *ReCiPe*. Penilaian dampak ini bertujuan untuk mengidentifikasi seberapa besar kontribusi suatu proses terhadap dampak lingkungan yang dihasilkan dari suatu proses tersebut.

Tahap *LCIA* dilakukan berdasarkan pada Tabel 3.2 Pemilihan Metode *LCIA*, maka klasifikasi terhadap kategori dampak yang akan ditampilkan adalah :

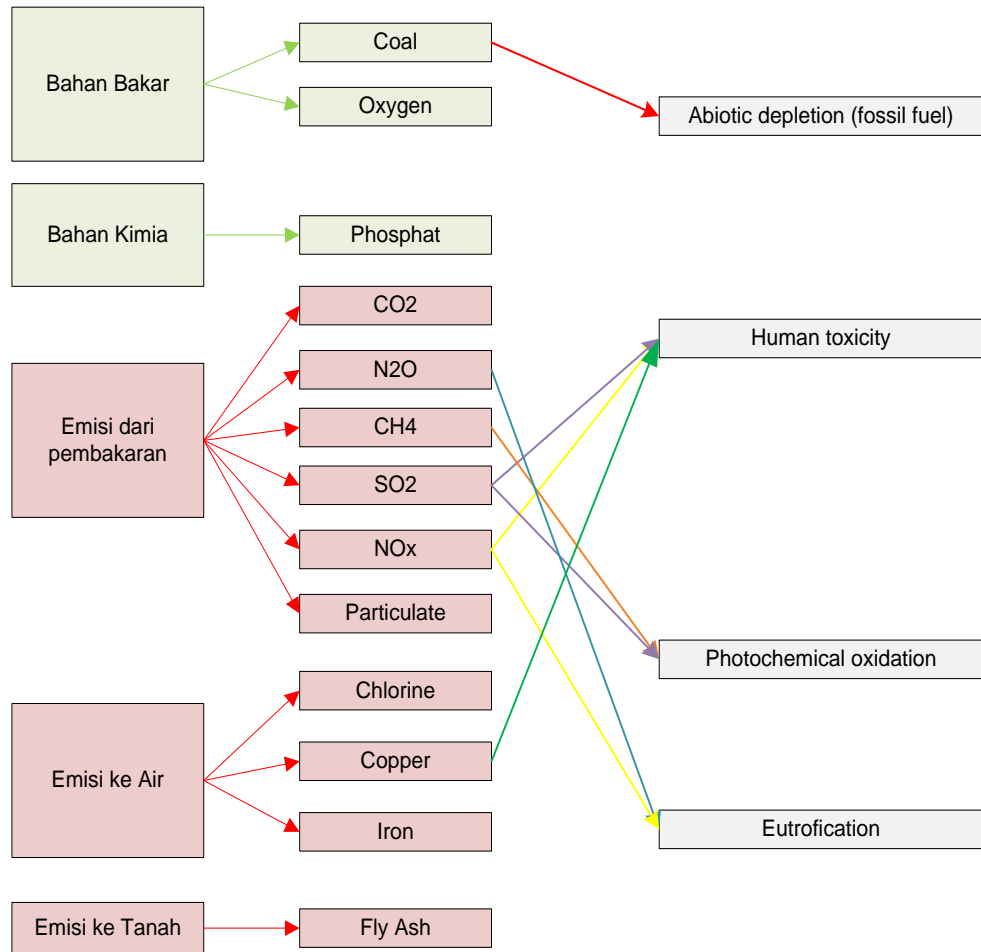
1. Metode *CML-1A Baseline*, meliputi kategori dampak :
 - a. Eutrofikasi
 - b. Photochemical oxidation
 - c. Abiotic depletion fossil fuel
 - d. Human toxicity
2. Metode *ReCiPe 2016 Baseline (H)*, meliputi kategori dampak :
 - a. Global warming
 - b. Stratospheric Ozon Depletion
 - c. Terrestrial acidification
 - d. Biotic depletion (terrestrial ecotoxicity, freshwater ecotoxicity, marine ecotoxicity)
 - e. Human carcinogenic toxicity
 - f. Land use
 - g. Water consumption

Penjabaran tahapan LCIA adalah sebagai berikut :

a. Klasifikasi

• **Metode CML-1A *Baseline***

Klasifikasi proses produksi listrik *dengan metode CML-1A Baseline* dapat dilihat pada Gambar 4.9 berikut



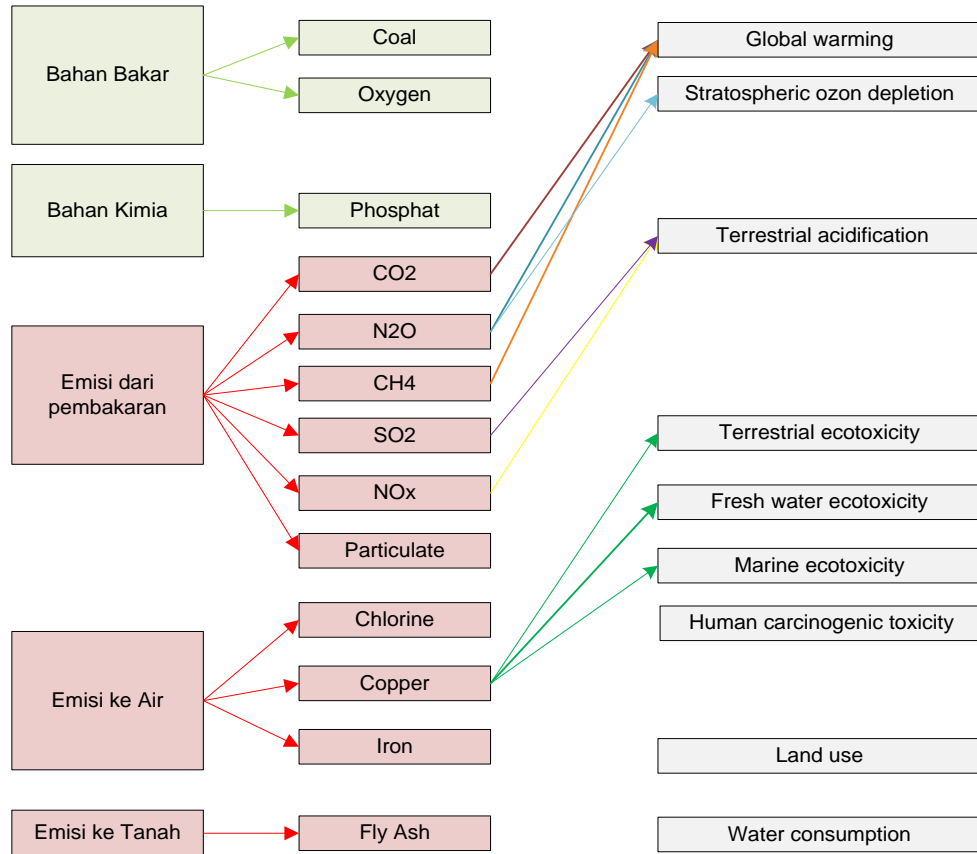
Gambar 4.9 Klasifikasi Dampak Proses Produksi Listrik Metode CML-1A

Berdasarkan hasil klasifikasi LCIA dengan metode CML-1A Baseline, diketahui bahwa kategori dampak *abiotic depletion (fossil fuel)* dihasilkan dari penggunaan bahan bakar batu bara. Kategori dampak *human toxicity* berasal dari emisi SO₂ dan NO_x yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara, serta berasal dari

parameter *copper* yang terkandung pada air limbah *blowdown boiler*. Kategori dampak *eutrofication* berasal dari emisi N_2O dan NO_x yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara. Kategori dampak *photochemical oxidation* berasal dari emisi SO_2 dan CH_4 yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara.

• **Metode ReCiPe 2016 Midpoint (H)**

Klasifikasi proses produksi listrik dengan metode *ReCiPe 2016 Midpoint (H)* dapat dilihat pada Gambar 4.10



Gambar 4.10 Klasifikasi Dampak Proses Produksi Listrik Metode ReCiPe 2016 Baseline (H)

Berdasarkan hasil klasifikasi LCIA dengan metode ReCiPe 2016 Baseline (H), diketahui bahwa kategori dampak *global warming* ditimbulkan dari pembakaran bahan bakar batu bara yang menghasilkan emisi ke udara berupa CO₂, N₂O, dan CH₄. Dampak *stratospheric ozone depletion* ditimbulkan dari emisi N₂O yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara. Kategori dampak *terrestrial acidification* berasal dari emisi NO_x dan SO₂ yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara. Kategori dampak *terrestrial ecotoxicity*, *fresh water ecotoxicity*, dan *marine ecotoxicity* berasal dari parameter *copper* yang terkandung pada air limbah *blowdown boiler*.

Kategori dampak *land use change* tidak ditimbulkan pada proses produksi listrik ini karena tidak ada pembukaan lahan baru, alih fungsi lahan, dan kerusakan hutan. Serta kategori dampak *water consumption* tidak ditimbulkan karena tidak ada penggunaan air yang berasal dari mata air, air hujan atau air limbah yang digunakan untuk mengasimilasi atau melarutkan polutan pada proses.

b. Tahap Karakterisasi

Tahap karakterisasi adalah tahap mengidentifikasi dan mengelompokkan data input yang berasal dari LCI kedalam kategori-kategori dampak yang telah ditentukan sesuai dengan metode dan database yang digunakan. Tahap ini akan mengukur kontribusi dampak suatu produk atau kegiatan pada setiap indikator dampak. Seluruh data *elementary flow* di LCI diklasifikasikan dalam kategori dampak tertentu yang kemudian dikalikan dengan faktor karakterisasi pada *database ecoinvent software SimaPro 9.0* dan dijumlahkan semua intervensi yang relevan menghasilkan skor dampak dalam kategori dampak tertentu. Faktor karakterisasi metode CML-IA *Baseline (the Netherlands 1997)* dan ReCiPe 2016 Midpoint (H) ditampilkan pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8 berikut.

Tabel 4.7 Faktor Karakterisasi Metode CML-IA *Baseline*

Abiotic Depletion Fossil Fuel Depletion				
No	Bahan bakar fosil		Unit	Faktor Karakterisasi
1	Coal		MJ	18,16
Human Toxicity				
No	Emisi	Media Lingkungan	Unit	Faktor Karakterisasi
1	SO ₂	Udara	kg 1,4-DB eq	0.096
2	NO _x	Udara	kg 1,4-DB eq	1.2
3	Copper	Air laut	kg 1,4-DB eq	5.91
Photochemical Oxidation				
No	Emisi Udara	Media Lingkungan	Unit	Faktor Karakterisasi
1	CH ₄	Udara	kg C ₂ H ₄ eq	0.006
2	SO ₂	Udara	kg C ₂ H ₄ eq	0.048
Eutrofication				
No	Emisi Udara	Media Lingkungan	Unit	Faktor Karakterisasi
1	N ₂ O	Udara	kg PO ₄ eq	0.27
2	NO _x	Udara	kg PO ₄ eq	0.13

Tabel 4.8 Faktor Karakterisasi Metode ReCiPe 2016

1	Global warming			
No	Emisi Udara	Media Lingkungan	Unit	Faktor Karakterisasi
1	CO ₂	Udara	kg CO ₂ eq	1
2	N ₂ O	Udara	kg CO ₂ eq	298
3	CH ₄	Udara	kg CO ₂ eq	34
2	Stratospheric ozon depletion			
No	Emisi	Media Lingkungan	Unit	Faktor Karakterisasi
1	N ₂ O	Udara	kg CFC11 eq	110
3	Terrestrial acidification			
No	Emisi	Media Lingkungan	Unit	Faktor Karakterisasi
1	NO _x	Udara	kg SO ₂ eq	36
2	SO ₂	Udara	kg SO ₂ eq	1
4a	Terrestrial ecotoxicity			
No	Emisi	Media Lingkungan	Unit	Faktor Karakterisasi
1	Copper	Air laut	kg 1,4-DCB	1.47E-14
4b	Fresh water ecotoxicity			
No	Emisi	Media Lingkungan	Unit	Faktor Karakterisasi
1	Copper	Air laut	kg 1,4-DCB	4.32E-20
4c	Marine ecotoxicity			

No	Emisi	Media Lingkungan	Unit	Faktor Karakterisasi
1	Copper	Air laut	kg 1,4-DCB	1570
5	Human carcinogenic toxicity			
No	Emisi	Media Lingkungan	Unit	Faktor Karakterisasi
	-			
6	Land use			
No	Emisi	Media Lingkungan	Unit	Faktor Karakterisasi
	-			
7	Water consumption			
No	Emisi	Media Lingkungan	Unit	Faktor Karakterisasi
	-			

• **Metode CML-IA *Baseline***

Nilai karakterisasi dampak lingkungan pada proses produksi listrik PT PJB UBJOM Paiton ditampilkan pada Tabel 4.9

Tabel 4.9 Nilai Karakterisasi Dampak dengan Metode CML-IA *Baseline*

Impact category	Unit	Kondensor	Heater	Boiler	Turbin	Generator	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	0	0	0	0	0	0
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	0.120198	0.101188	11.40327	0	0	11.62466
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	2.41E-05	2.03E-05	0.002284	0	0	0.002328
Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄ eq	1.52E-06	1.28E-06	0.000144	0	0	0.000147
Eutrophication	kg PO ₄ eq	2.32E-06	1.96E-06	0.00022	0	0	0.000225

Sumber: *Software* SimaPro 9.

Berdasarkan pada Tabel 4.9, untuk menghasilkan 1 kWh listrik di PLTU Paiton unit 9 menghasilkan kategori dampak *midpoint* terbesar yaitu *abiotic depletion (fossil fuel)* sebesar 11.62466 MJ ditimbulkan karena penurunan jumlah material anorganik akibat proses ekstraksi berbagai material anorganik seperti batubara dan minyak. Serta dampak *human toxicity* sebesar 0.002329 kg 1,4-DB eq yang merupakan efek racun di ekosistem yang ditimbulkan oleh bahan kimia yang mengandung logam berat, dampak ini dihasilkan dari emisi SO₂ dan NO_x dari proses pembakaran bahan bakar fosil. Dampak *photochemical oxidation* sebesar 0.000147 kg C₂H₄ eq terbentuk dari reaksi antara *volatile organic compounds* (VOC) dan nitrogen oksida yang terkena panas dan sinar matahari, dampak ini disebabkan dari emisi CH₄ dan SO₂. Dampak *eutrophication* sebesar 0.000225 kg PO₄ eq merupakan konsentrasi nutrient kimia yang ada di ekosistem yang dapat memicu pertumbuhan alga secara berlebihan, dalam hal ini ditimbulkan dari emisi N₂O dan NO_x dari proses pembakaran batu bara.

• **Metode Recepte 2016 Midpoint (H)**

Hasil penilaian dampak pada tahap karakterisasi dengan metode Recepte 2016 Midpoint (H) dapat dilihat pada Tabel 4.10 berikut.

Tabel 4.10 Nilai Karakterisasi Dampak dengan Metode ReCiPe 2016 Midpoint (H)

Impact category	Unit	Kondensor	Heater	Boiler	Turbin	Generator	Total
Global warming	kg CO ₂ eq	0.010852549	0.009136165	1.0295861	0	0	1.049575
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	1.79E-09	1.51E-09	1.70E-07	0	0	1.73E-07
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	3.80E-05	3.20E-05	0.003602054	0	0	0.003672
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	4.60E-27	3.87E-27	4.36E-25	0	0	4.45E-25
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	7.38E-11	6.21E-11	7.00E-09	0	0	7.13E-09
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	8.79E-11	7.40E-11	8.34E-09	0	0	8.50E-09
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0	0	0	0	0	0
Land use	m ² a crop eq	0	0	0	0	0	0
Water consumption	m ³	0	0	0	0	0	0

Sumber: *Software SimaPro 9.0*

Berdasarkan pada Tabel 4.10, untuk menghasilkan 1 kWh listrik di PLTU Paiton unit 9 menimbulkan kategori dampak *midpoint* yaitu :

- Dampak *global warming* sebesar 1.049575 kg CO₂ eq, dihasilkan dari pembakaran batubara yang menimbulkan emisi gas rumah kaca yaitu CO₂, CH₄, dan N₂O,
- Dampak *stratospheric ozone depletion* sebesar 1.73E-07 kg CFC11 eq, diakibatkan oleh zat perusak ozon, diantaranya CO₂, N₂O, dan CH₄ yang menyebabkan kerugian terhadap *human health* karena peningkatan radiasi Ultraviolet B (UVB).
- Dampak *terrestrial acidification* sebesar 0.003672 kg SO₂ eq, ditimbulkan oleh gas SO₂ dan NO_x dari emisi pembakaran batu bara yang bereaksi dengan air di atmosfer kemudian membentuk hujan asam.
- Dampak *terrestrial ecotoxicity* sebesar 4.45E-25 kg 1,4-DCB, *freshwater ecotoxicity* sebesar 7.13E-09 kg 1,4-DCB, dan *marine ecotoxicity* sebesar 8.50E-09 kg 1,4-DCB, dihasilkan dari pelepasan atau pembuangan suatu zat yang berpotensi bahaya terhadap lingkungan dan sumber daya laut, salah satu penyebabnya adalah emisi air *blowdown boiler* yang mengandung *Fe dan Cu*.

Dari kedua hasil karakterisasi dengan metode CML-IA Baseline dan ReCiPe 2016 Midpoint (H) selanjutnya dilakukan integrasi yang bertujuan untuk menyesuaikan dengan 11 dampak lingkungan LCA berdasarkan Peraturan Menteri No 1 Tahun 2021. Data integrasi karakterisasi ditampilkan pada Tabel 4.11 berikut.

Tabel 4.11 Integrasi Nilai Karakterisasi Proses Produksi Listrik

No	Kategori Dampak	Unit	Metode	Nilai
Dampak Primer				
1	Global Warming Potential	kg CO ₂ eq	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	1,049575
2	Potensi penipisan Ozon (Stratospheric Ozon Depletion)	kg CFC11 eq	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	1,73E-07
3	Potensi Hujan Asam (Terrestrial Acidification)	kg SO ₂ eq	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	0,003672
4	Potensi Eutrofikasi (Eutrophication)	kg PO ₄ eq	CML-IA Baseline	0,000225
Dampak Sekunder				
5	Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄ eq	CML-IA Baseline	0,000147

6	Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil dan non fossil)			
	Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	CML-IA Baseline	11,624655
	Abiotic depletion	kg Sb eq	CML-IA Baseline	0
7	Potensi terjadi penurunan biotik			
	Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	4,45E-25
	Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	7,13E-09
	Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	8,50E-09
8	Karsinogenik (carcinogenic toxicity)	kg 1,4-DCB	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	0
9	Toxicity (human toxicity)	kg 1,4-DB eq	CML-IA Baseline	0,002329
10	Water Footprint	m ³	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	0
11	Land Use Change	m ² a crop eq	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	0

Dari integrasi data karakteristik dampak lingkungan pada Tabel 4.11 dapat disimpulkan bahwa untuk menghasilkan 1 kWh listrik PLTU di PT PJB UBJOM Paiton menimbulkan 9 kategori dampak terdiri dari dampak primer yaitu dampak *global warming* yang dihasilkan sebesar 1,049575 kg CO₂ eq, potensi penipisan ozon (*stratospheric ozon depletion*) yang dihasilkan sebesar 1.73E-07 kg CFC11 eq, dampak potensi hujan asam (*terrestrial acidification*) yang dihasilkan sebesar 0,004522 kg SO₂ eq, dan potensi eutrofikasi (*eutrophication*) yang dihasilkan sebesar 0,000225 kg PO₄eq.

Dampak sekunder meliputi *photochemical oxidation* yang dihasilkan sebesar 0,000147 kg C₂H₄ eq, *abiotic depletion (fossil fuels)* yang dihasilkan sebesar 11,62466 MJ. Potensi terjadi penurunan biotik terdiri dari dampak *terrestrial ecotoxicity* yang dihasilkan sebesar 4.45E-25 kg 1,4-DCB, *freshwater ecotoxicity* yang dihasilkan sebesar 7.13E-09 kg 1,4-DCB, dan *marine ecotoxicity* yang dihasilkan sebesar 8.50E-09 kg 1,4-DCB. Dampak *human toxicity* yang dihasilkan sebesar 0,002329 kg 1,4-DB.

Sedangkan dampak *abiotic depletion (non fossil fuel)* bernilai 0 karena tidak adanya input material bersifat *non fossil fuel*, dampak *carcinogenic toxicity* bernilai 0 karena tidak adanya input penggunaan material/bahan yang bersifat karsinogen, dampak *water footprint* bernilai 0 karena tidak ada penggunaan air yang berasal dari mata air, air hujan atau air limbah yang digunakan untuk mengasimilasi atau melarutkan polutan pada proses produksi, dan dampak *land use change* bernilai 0 karena tidak ada pembukaan lahan baru, alih fungsi lahan, serta kerusakan hutan.

2) Tahap Normalisasi

Tahap normalisasi diperlukan untuk menunjukkan kontribusi relatif dari semua kategori dampak lingkungan dan dimaksudkan untuk menciptakan satuan yang seragam untuk semua kategori dampak. Nilai normalisasi dapat diketahui dengan mengalikan nilai karakterisasi dengan faktor normalisasi, dengan demikian semua kategori dampak memiliki unit satuan yang sama. Tujuan dari penyetaraan satuan ialah agar dapat membandingkan besaran dari hasil penilaian dampak (*LCIA*) pada setiap unit proses yang telah dihitung menggunakan *software* SimaPro 9.0. Faktor normalisasi metode CML-IA *Baseline (the Netherlands 1997)* dan ReCiPe 2016 Midpoint (H) ditampilkan pada Tabel 4.12 dan 4.13 berikut.

Tabel 4.12 Faktor Normalisasi Metode CML-IA Baseline

No	Kategori Dampak	Faktor Normalisasi
1	Abiotic Depletion	5.77E-06
2	Abiotic Depletion Fossil Fuel Depletion	2.82E-13
3	Human Toxicity	5.31E-12
4	Photochemical Oxidation	5.49E-09
5	Eutrofication	1.92E-09

Sumber: *Software* SimaPro 9.0

Tabel 4.13 Faktor Normalisasi Metode ReCiPe Midpoint 2016

No	Kategori Dampak	Faktor Normalisasi
1	Global warming	0.0001252
2	Stratospheric ozon depletion	16.7
3	Terrestrial acidification	0.0244
4	Terrestrial ecotoxicity	0.000965
5	Fresh water ecotoxicity	0.815
6	Marine ecotoxicity	0.969
7	Human carcinogenic toxicity	0.361
8	Land use	0.000162
9	Water consumption	0.00375

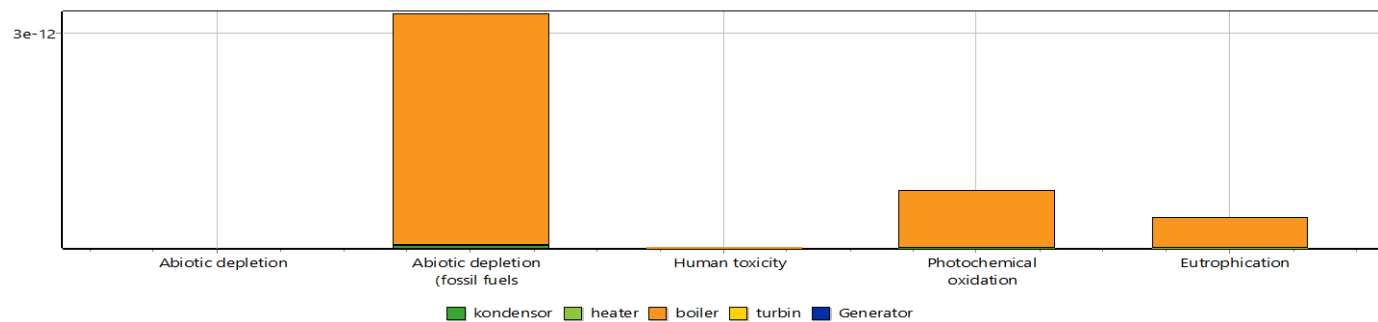
1. Metode CML-1A *Baseline*

Nilai normalisasi untuk setiap kategori dampak pada metode CML-1A *Baseline* dapat dilihat pada Tabel 4.14 dan Gambar 4.11.

Tabel 4.14 Nilai Normalisasi Dampak dengan Metode CML-IA *Baseline*

Impact category	Kondensator	Heater	Boiler	Turbin	Generator	Total
Abiotic depletion	0	0	0	0	0	0
Abiotic depletion (fossil fuels)	3.39E-14	2.85E-14	3.22E-12	0	0	3.28E-12
Human toxicity	1.28E-16	1.08E-16	1.21E-14	0	0	1.24E-14
Photochemical oxidation	8.35E-15	7.03E-15	7.92E-13	0	0	8.07E-13
Eutrophication	4.46E-15	3.75E-15	4.23E-13	0	0	4.31E-13

Sumber: *Software* SimaPro 9.0



Method: CML-IA baseline V3.05 / the Netherlands, 1997 / Normalization
Analyzing 1 p 'PLTU Paiton 9';

Gambar 4.11 Grafik Normalisasi Dampak dengan Metode CML-IA *Baseline*

Sumber: *Software* SimaPro 9.0

Berdasarkan data pada Tabel 4.12 dan Gambar 4.10, disimpulkan bahwa untuk menghasilkan 1 kWh listrik di PLTU Paiton unit 9 menghasilkan kategori dampak *midpoint* terbesar yaitu *abiotic depletion fossil fuel*, diikuti dampak lainnya meliputi *photochemical oxidation*, dan *eutrophication* dengan nilai dampak paling besar adalah dari unit boiler

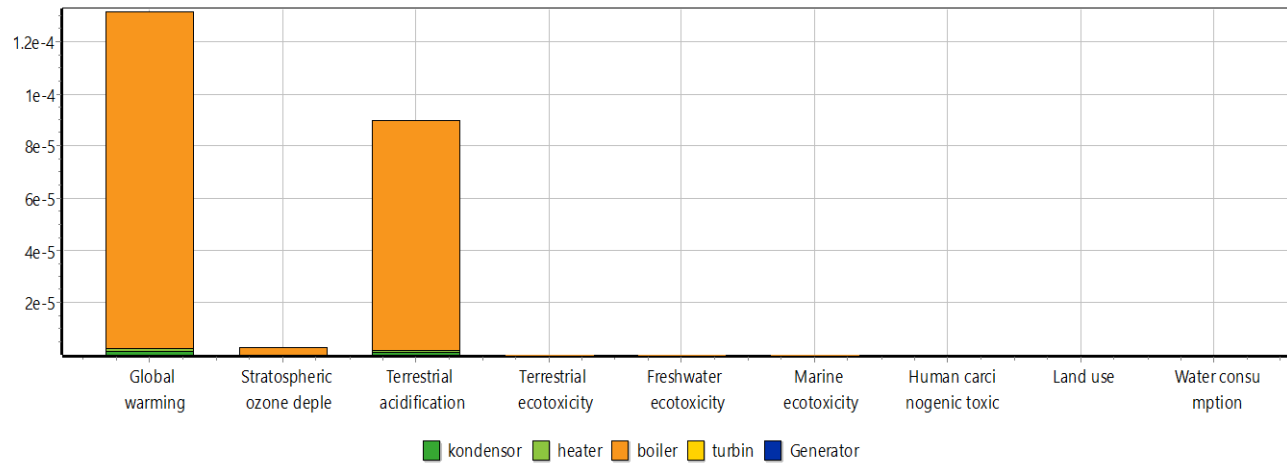
2. Metode ReCiPe 2016 Midpoint (H)

Nilai normalisasi untuk setiap kategori dampak pada metode ReCiPe 2016 Midpoint (H) dapat dilihat pada Tabel 4.15 dan Gambar 4.12

Tabel 4.15 Nilai Normalisasi Dampak dengan Metode ReCiPe 2016 Midpoint

Impact category	Total	Kondensor	Heater	Boiler	Turbin	Generator
Global warming	0.000131407	1.36E-06	1.14E-06	0.000128904	0	0
Stratospheric ozone depletion	2.89E-06	2.99E-08	2.51E-08	2.83E-06	0	0
Terrestrial acidification	8.96E-05	9.26E-07	7.80E-07	8.79E-05	0	0
Terrestrial ecotoxicity	4.29E-28	4.44E-30	3.74E-30	4.21E-28	0	0
Freshwater ecotoxicity	5.81E-09	6.01E-11	5.06E-11	5.70E-09	0	0
Marine ecotoxicity	8.24E-09	8.52E-11	7.17E-11	8.08E-09	0	0
Human carcinogenic toxicity	0	0	0	0	0	0
Land use	0	0	0	0	0	0
Water consumption	0	0	0	0	0	0

Sumber: *Software SimaPro 9.0*



Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.03 / World (2010) H / Normalization
 Analyzing 1 p 'PLTU Paiton 9';

Grafik 4.12 Grafik Normalisasi Dampak dengan Metode ReCiPe Midpoint 2016 (H)

Sumber: *Software SimaPro 9.0*

Berdasarkan Tabel 4.13 dan Gambar 4.11, untuk menghasilkan 1 kWh listrik di PLTU Paiton unit 9 menghasilkan kategori dampak *midpoint* terbesar yaitu *global warming*, diikuti dampak lainnya meliputi *terrestrial acidification*, *stratospheric ozone depletion*, *marine ecotoxicity*, *freshwater ecotoxicity*, dan *terrestrial ecotoxicity* dengan nilai dampak paling besar adalah dari unit boiler.

Dari kedua hasil normalisasi dengan metode CML-IA Baseline dan ReCiPe 2016 Midpoint (H) selanjutnya dilakukan integrasi berdasarkan 11 dampak lingkungan LCA yang bertujuan untuk menyesuaikan dampak lingkungan pada Peraturan Menteri No 1 Tahun 2021. Data integrasi normalisasi ditampilkan pada Tabel 4.16 berikut.

Tabel 4.16 Integrasi Nilai Normalisasi Proses Produksi Listrik

No	Kategori Dampak	Metode	Unit Proses				
			Kondensor	Heater	Boiler	Turbin	Generator
Dampak Primer							
1	Global Warming Potential	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	1,36E-06	1,14E-06	0,000129	0	0
2	Potensi penipisan Ozon	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	2,99E-08	2,51E-08	2,83E-06	0	0
3	Potensi Hujan	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	9,26E-07	7,80E-07	8,79E-05	0	0
4	Potensi Eutrofikasi	CML-IA Baseline	4,42E-15	3,72E-15	4,23E-13	0	0
Dampak Sekunder							
5	Photochemical oxidation	CML-IA Baseline	8,37E-15	7,05E-15	7,92E-13	0	0
6	Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil dan non fossil)						
	Abiotic depletion (fossil fuels)	CML-IA Baseline	3,39E-14	2,85E-14	3,22E-12	0	0
	Abiotic depletion	CML-IA Baseline	0	0	0	0	0
7	Potensi terjadi penurunan biotik						
	Terrestrial ecotoxicity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	4,44E-30	3,74E-30	4,21E-28	0	0
	Freshwater ecotoxicity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	6,01E-11	5,06E-11	5,70E-09	0	0
	Marine ecotoxicity	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	8,52E-11	7,17E-11	8,08E-09	0	0
8	Karsinogenik	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	0	0	0	0	0
9	Toxicity (human toxicity)	CML-IA Baseline	1,29E-16	1,08E-16	1,21E-14	0	0
10	Water Footprint	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	0	0	0	0	0
11	Land Use Change	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	0	0	0	0	0

Dari integrasi data normalisasi dampak lingkungan pada Tabel 4.14 dapat disimpulkan bahwa untuk menghasilkan 1 kWh listrik PLTU di PT PJB UBJOM Paiton menimbulkan 9 (sembilan) kategori dampak. Dampak yang dihasilkan selama proses produksi energi listrik terdiri dari dampak primer yaitu *global warming* dengan nilai 0.000129, potensi penipisan ozon (*stratospheric ozone depletion*) sebesar 2.83E-06, dampak potensi hujan asam (*terrestrial acidification*) sebesar 8.79E-05, dan potensi eutrofikasi (*eutrophication*) sebesar 4.23E-13.

Dampak sekunder meliputi *photochemical oxidation* sebesar 7.92E-13, *abiotic depletion (fossil fuels)* sebesar 3.22E-12. Potensi terjadi penurunan biotik terdiri dari dampak *terrestrial ecotoxicity* sebesar 4.21E-28, *freshwater ecotoxicity* sebesar 5.70E-09, dan *marine ecotoxicity* sebesar 8.08E-09. Dampak *human toxicity* sebesar 1.21E-14. Sedangkan besaran normalisasi dampak pada unit proses turbin dan generator bernilai 0 dikarenakan tidak adanya output/ emisi ke lingkungan saat proses produksi

4.1.4 Interpretasi Data

Interpretasi data adalah penjabaran dari hasil sebuah analisis data penelitian untuk mengetahui maksud dari data yang dikumpulkan dan menjawab permasalahan yang sedang diteliti. Berbagai macam dampak dari hasil analisis simaPro 9.0 perlu dikaji lebih dalam untuk menafsirkan data pada aplikasi SimaPro dengan data serta proses eksisting pada proses produksi listrik. Tujuan interpretasi data ini adalah untuk mengetahui titik *hotspot* atau titik dengan dampak terbesar dari serangkaian proses produksi listrik di PT.PJB UBJ O&M PLTU Paiton. Tahapan interpretasi yaitu analisis *hotspot* dan evaluasi data yang dijabarkan sebagai berikut.

1. Analisis Dampak Proses Produksi Terbesar (Hotspot)

Analisis *hotspot* dilihat berdasarkan nilai persentase terbesar dari nilai karakterisasi proses produksi listrik. Persentase karakterisasi dihitung dengan membagi skor karakterisasi kategori dampak tertentu pada masing-masing unit proses

dengan total skor karakterisasi kategori dampak tersebut dalam satuan persen. Contoh perhitungan persentase karakterisasi sebagai berikut :

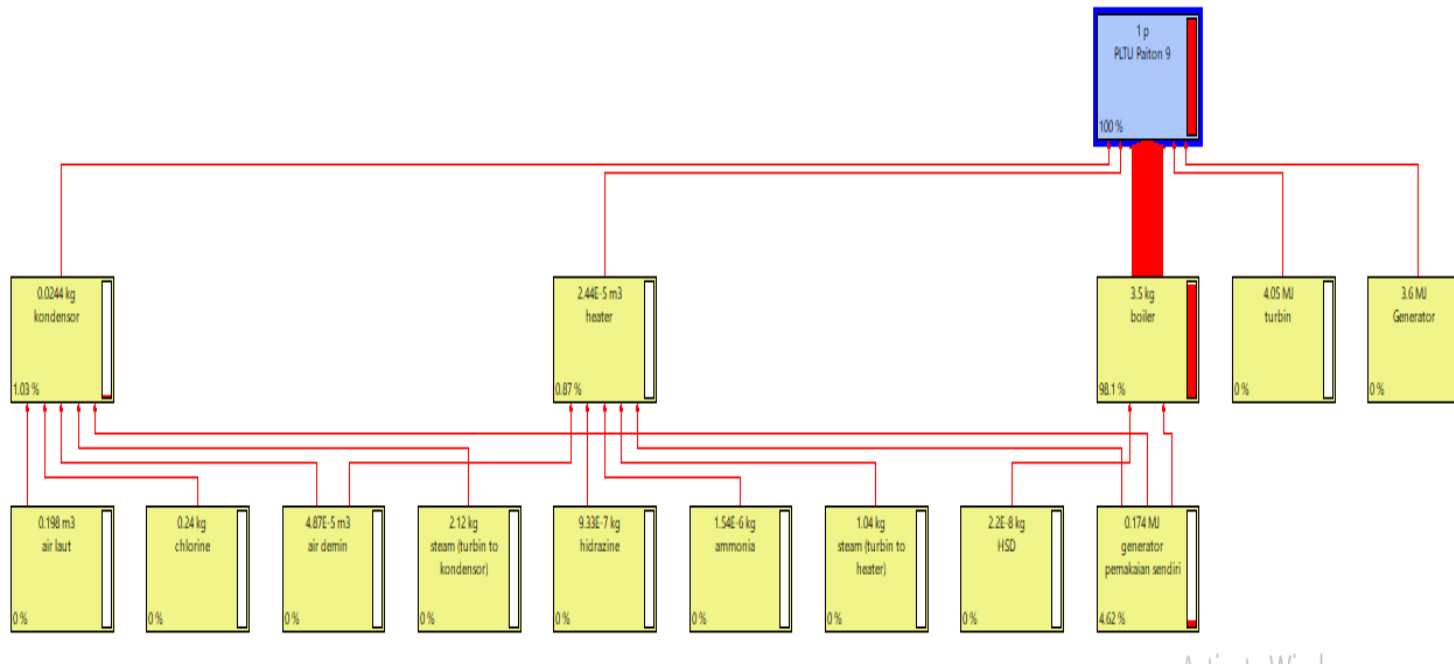
$$\% \text{ karakterisasi Global Warming Boiler} = \frac{\text{Nilai karakterisasi Global Warming unit boiler}}{\text{Total nilai Karakterisasi Global Warming Prod. Listrik}} \quad (4.22)$$

Persentase karakterisasi dampak lingkungan pada masing-masing unit proses produksi listrik dapat dilihat pada Tabel 4.17 dan Gambar 4.13 berikut.

Tabel 4.17 Persentase Karakterisasi Proses Produksi Listrik

No	Kategori Dampak	Unit	Total	Unit Proses				
				Kondensor	Heater	Boiler	Turbin	Generator
Dampak Primer								
1	Global Warming Potential	kg CO ₂ eq	1,049575	1,03%	0,87%	98,10%	0%	0%
2	Potensi penipisan Ozon	kg CFC11 eq	1,73E-07	1,03%	0,87%	98,10%	0%	0%
3	Potensi Hujan Asam	kg SO ₂ eq	0,003672	1,03%	0,87%	98,10%	0%	0%
4	Potensi Eutrofikasi	kg PO ₄ eq	0,000225	1,02%	0,86%	98,11%	0%	0%
Dampak Sekunder								
5	Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄ eq	0,000147	1,04%	0,87%	98,09%	0%	0%
Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil dan non fossil)								
6	Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	11,62466	1,03%	0,87%	98,10%	0%	0%
	Abiotic depletion	kg Sb eq	0	0%	0%	0%	0%	0%
Potensi terjadi penurunan biotik								
7	Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	4,45E-25	1,03%	0,87%	98,10%	0%	0%

	Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	7,13E-09	1,03%	0,87%	98,10%	0%	0%
	Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	8,50E-09	1,03%	0,87%	98,10%	0%	0%
8	Karsinogenik	kg 1,4-DCB	0	0%	0%	0%	0%	0%
9	Toxicity (human toxicity)	kg 1,4-DB eq	0,002329	1,04%	0,88%	98,08%	0%	0%
10	Water Footprint	m ³	0	0%	0%	0%	0%	0%
11	Land Use Change	m ² a crop eq	0	0%	0%	0%	0%	0%



Gambar 4.13 Persentase Pembobotan Proses Produksi Listrik

Berdasarkan data pada Tabel 4.15 dan Gambar 4.11, dapat disimpulkan bahwa dari 9 kategori dampak lingkungan yang ditimbulkan dari proses produksi listrik sebesar 98,1% ditimbulkan dari unit *boiler*, 1,03% dari unit *condenser*, 0,87% dari unit *heater*. Hal ini dikarenakan pada unit *boiler* memerlukan material input dan output yang paling besar selama operasional proses produksi listrik sehingga upaya implementasi pengurangan dampak lingkungan dapat difokuskan pada unit boiler.

2. Evaluasi Data

Setelah melakukan tahapan kajian LCA dan memperoleh nilai dampak lingkungan, perlu dilakukan evaluasi data. Evaluasi data bertujuan untuk meningkatkan keakuratan dan keandalan hasil kajian LCA. Berdasarkan ISO 14044, terdapat 3 pemeriksaan yaitu *completeness check*, *consistency check*, dan *sensitivity check* yang dijabarkan sebagai berikut.

a) *Completeness Check*

Completeness check adalah proses verifikasi untuk memastikan bahwa informasi dari tahapan LCA sudah cukup untuk dapat mengambil kesimpulan sesuai dengan definisi tujuan dan lingkup. Tujuan dari *completeness check* adalah untuk memastikan bahwa semua informasi yang relevan dan data yang dibutuhkan untuk interpretasi tersedia dan lengkap. Pada tahapan ini dilakukan peninjauan terkait kelengkapan inventori data proses produksi listrik. *Completeness check* proses produksi listrik dapat dilihat pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 *Completeness Check* LCA Proses Produksi Listrik

Unit Proses	Kategori Data					
	Bahan Baku	Bahan Kimia	Pemakaian energi	Pemakaian Air	Emisi	Air Limbah
Kondensor	√	√	√	√	-	√
Heater	√	√	√	√	-	-
Boiler	√	√	√	√	√	√
Turbin	√	-	√	-	-	-
Generator-Trafo	-	-	√	-	-	-

b) *Consistency check*

Consistency check merupakan proses verifikasi bahwa data inventori telah diterapkan secara konsisten dalam kajian LCA dan sesuai dengan definisi tujuan dan lingkup yang ditetapkan sebelum kesimpulan diambil. Indikator *consistency check* dalam prosedur *consistency check* meliputi sumber data, keakuratan data, usia data, cakup teknologi, cakupan waktu, dan cakupan geografis. *Consistency check* proses produksi listrik dapat dilihat pada Tabel 4.19

Tabel 4.19 *Consistency Check* LCA Proses Produksi Listrik

Indikator	Keterangan Data
Sumber Data	Data monitoring berdasarkan logbook dan hasil analisa laboratorium serta perhitungan sesuai desain pada manual book PLTU
Keakuratan Data	Data sekunder berdasarkan hasil monitoring peralatan internal yang terkalibrasi dan hasil uji dari laboratorium terakreditasi
Usia Data	Data Monitoring: 1 Tahun
Cakupan Teknologi	Skala Industri
Cakupan Waktu	Data Monitoring: data tahun 2020
Cakupan Geografis	Data Monitoring: Indonesia

c) *Sensitivity check*

Sensitivity check merupakan proses verifikasi untuk memastikan bahwa informasi yang diperoleh dari analisis sensitivitas sudah sesuai untuk mengambil kesimpulan dan merumuskan rekomendasi. Proses verifikasi digunakan pula untuk memastikan bahwa informasi yang diperoleh dari analisis sensitivitas sudah sesuai untuk mengambil kesimpulan dan merumuskan rekomendasi. Analisis sensitivitas satu arah, menentukan jumlah nilai parameter *input* individu yang perlu diubah, semua parameter lainnya dipertahankan konstan, agar nilai parameter *output* berubah dengan persentase tertentu. Dalam analisis sensitivitas, yang diperiksa biasanya pengaruh hasil variasi berbagai asumsi dan data dengan kisaran tertentu (misalnya $\pm 25\%$). Perubahan signifikan pada hasil dapat diidentifikasi jika terjadi perubahan pada hasil lebih besar dari 10% (SNI ISO 14044, 2017).

Berdasarkan pada analisis *hostpot*, faktor yang menyebabkan besarnya dampak lingkungan *abiotic depletion fossil fuel* adalah penggunaan bahan bakar, serta terdapat dampak *global warming* yang dipengaruhi oleh emisi CO₂. Oleh karena itu, skenario yang dilakukan pada analisis sensitivitas ini yaitu perubahan penggunaan bahan bakar batubara pada unit boiler dan dengan perubahan emisi CO₂ yang dihasilkan.

1. Perubahan penggunaan bahan bakar

Perubahan penggunaan bahan bakar dilakukan dengan perubahan data input yaitu penambahan 15% dan pengurangan 15% pada unit boiler. Perubahan variasi data input batu bara ditampilkan pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Variasi *Input* Kontributor Dampak *Abiotic Depletion Fossil Fuel*

Unit Proses	Substansi	Satuan	Input Kontributor Batubara		
			-25%	Basis	+25%
Boiler	Batubara	Ton	0,0007472	0,0009962	0,001245

Basis data merujuk pada kondisi normal tanpa adanya perubahan pada *input* data kontributor dampak. Kemudian setelah dilakukan analisis menggunakan aplikasi SimaPro, didapatkan hasil pemeriksaan sensitivitas potensi dampak *abiotic depletion fossil fuel* seperti pada Tabel 4.21.

Tabel 4.21 Hasil Pemeriksaan Sensitivitas Dampak *Abiotic Depletion Fossil Fuel*

Unit Proses	Substansi	Satuan	Output Kontributor Batubara			Signifikansi Terhadap Basis	
			-25%	basis	25%	-25%	25%
Boiler	Batubara	Ton	0,0007	0,00061	0,00052	14,31%	14%

2. Perubahan Emisi CO₂

Perubahan emisi CO₂ dilakukan dengan perubahan data input yaitu penambahan 25% dan pengurangan 25% emisi CO₂ pada unit boiler. Perubahan variasi data input CO₂ ditampilkan pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22 Variasi *Input* Kontributor Dampak Global Warming

Unit Proses	Substansi	Satuan	Input Kontributor CO ₂		
			-25%	Basis	+25%
Boiler	CO ₂	Ton	0,0007472	0,0009962	0,001245

Kemudian setelah dilakukan analisis menggunakan aplikasi SimaPro, didapatkan hasil pemeriksaan sensitivitas potensi dampak *global warming* seperti pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Hasil Pemeriksaan Sensitivitas Dampak *Global Warming*

Unit Proses	Substansi	Satuan	Output Kontributor CO ₂			Signifikansi Terhadap Basis	
			-25%	Basis	25%	-25%	25%
Boiler	Batubara	Ton	0,0007472	0,0009962	0,001245	23,7%	23,7%

Dari data di atas dapat disimpulkan bahwa dengan perubahan data input batu bara sebagai kontributor dampak *abiotic depletion fossil fuel* sebesar $\pm 25\%$ dan perubahan emisi CO₂ sebagai kontributor dampak *global warming* sebesar $\pm 15\%$ pada unit proses *boiler* menyebabkan perubahan pada *output* data lebih besar dari 10%. Dengan demikian data *input* dan *output* dapat dikatakan sensitif, karena menunjukkan perubahan data *output* akibat adanya perubahan data *input*.

4.2 Evaluasi Program Pengelolaan Lingkungan Berdasarkan LCA

Berdasarkan hasil analisis LCA dengan metode CML-IA dan ReCiPe 2016 Midpoint pada tahapan analisis hotspot, diketahui bahwa persentase dampak lingkungan terbesar dihasilkan dari unit proses boiler. Sedangkan dampak lingkungan terbesar ditinjau dari 2 metode yaitu :

1. Metode CML-IA Baseline

Dampak lingkungan terbesar pada proses produksi listrik PT PJB UBJOM Paiton yaitu dampak *abiotic depletion fossil fuel* sebesar 11,62466 MJ.

2. Metode ReCiPe 2016 Midpoint

Dampak lingkungan terbesar pada proses produksi listrik PT PJB UBJOM Paiton yaitu dampak *global warming* sebesar 1.049575 kg CO₂ dan dampak *terrestrial acidification* sebesar 0,003672 kg SO₂ eq.

Maka disimpulkan bahwa dampak terbesar yang ditimbulkan dari hotspot unit proses boiler dengan analisis LCA menggunakan kedua metode tersebut adalah :

1. *Terrestrial acidification*, yang ditimbulkan dari emisi SO₂ dan NO_x dari pembakaran bahan bakar batu bara sehingga berpotensi menimbulkan hujan asam.
2. *Global warming*, yang ditimbulkan dari pembakaran batubara yang menimbulkan emisi gas rumah kaca yaitu CO₂, CH₄, dan N₂O.
3. *Abiotic depletion fossil fuel*, yang disebabkan karena kelangkaan sumber daya alam berupa batu bara sebagai bahan bakar produksi

Selanjutnya, dilakukan evaluasi terhadap program efisiensi energi dan pengurangan pencemaran udara yang telah diimplementasikan PT PJB UBJOM Paiton untuk mengurangi dampak lingkungan pada sumber dampak (hotspot). Evaluasi program pengelolaan lingkungan UBJOM Paiton ditampilkan pada Tabel 4.24.

Tabel 4.24 Evaluasi Program Pengelolaan Lingkungan PT PJB UBJOM Paiton

Dampak Lingkungan Terbesar	Penyebab dampak	Program Penurunan Dampak Lingkungan	Deskripsi Program	Manfaat Program	
				Efisiensi Energi	Pengurangan Pencemaran Udara
Global Warming	Meningkatnya emisi gas rumah kaca (GRK) seperti karbon dioksida (CO ₂), metana (CH ₄), dinitrogen oksida (N ₂ O) secara berlebihan di atmosfer. Salah satu penyebab timbulnya GRK adalah dari pembakaran batu bara.	1. Pengaturan Coal to Air Ratio	Pengaturan perbandingan antara jumlah batubara dengan udara yang digunakan saat proses pembakaran di dalam boiler.	Meningkatkan efisiensi Boiler	Meminimalkan emisi GRK dari pembakaran batu bara
Terrestrial Acidification	Dampak acidification disebabkan karena gas asam bereaksi dengan air yang ada di atmosfer kemudian membentuk hujan asam. Gas yang menimbulkan acid deposition seperti sulfur dioksida (SO ₂). Salah satu	2. Cleaning Tube Boiler	Menghilangkan deposit di permukaan luar tube boiler, sehingga mencegah terjadinya over heating yang mengakibatkan konsumsi batubara meningkat sekaligus terjadinya kerusakan tube boiler	Penghematan penggunaan energi listrik	-

	penyebabnya pelepasan zat SO ₂ ke udara.				
		3. Penggantian Elemen Air Preheater	Program penggantian elemen air preheater dilakukan pada element cold, intermediate, dan hot untuk meningkatkan proses perpindahan panas.	Penghematan penggunaan energi listrik	-
Fossil resource scarcity	Kelangkaan sumber daya fosil yang diakibatkan dari meningkatnya proses ekstraksi sumber daya fosil sebagai sumber utama pemenuhan energi nasional maupun dunia.	4. Tiny Oil Burner	Penggantian sistem burner yaitu dengan pemasangan Tiny Oil Burner yang pada pengaplikasiannya menggunakan HSD lebih sedikit daripada oil burner konvensional.	Pengurangan penggunaan HSD	Pengurangan emisi GRK

		5. Perubahan Pola Operasi LFO Pump	Implementasi program perubahan pola operasi LFO pump yang semula beroperasi memompa HSD ke menuju boiler secara kontinu mengikuti durasi operasi pembangkit menjadi hanya beroperasi saat start up unit.	Pengurangan penggunaan HSD	Pengurangan emisi GRK
--	--	------------------------------------	--	----------------------------	-----------------------

Pada Tabel 4.21 diketahui bahwa PT PJB UBJOM Paiton telah mengimplementasikan beberapa program terkait efisiensi energi dan pengurangan pencemaran udara yang telah sesuai dengan tujuan untuk mengurangi dampak lingkungan terbesar yang dihasilkan dan berkaitan dengan unit proses di boiler. Selanjutnya dilakukan analisis AHP untuk mendapatkan rekomendasi prioritas program unggulan pengelolaan lingkungan yang dapat menjadi fokus perusahaan dalam penentuan keputusan keberlanjutan dan konsistensi implementasi program sebagai upaya pengurangan dampak lingkungan.

4.3 Rekomendasi Prioritas Program Unggulan dengan AHP

Hasil analisis LCA PT PJB UBJOM Paiton menunjukkan bahwa unit *boiler* adalah hotspot proses sehingga menjadi fokus program perbaikan terhadap lingkungan, sedangkan dampak lingkungan terbesar pada unit *boiler* yaitu dampak *global warming*, *terrestrial acidification*, dan *abiotic depletion fossil fuel*.

Berdasarkan Tabel 4.21 diketahui bahwa program pengelolaan lingkungan ditetapkan berdasarkan 2 tujuan yaitu :

1. Efisiensi energi

Efisiensi energi adalah upaya yang dilakukan dengan tujuan untuk mengurangi jumlah energi yang dibutuhkan dalam memproduksi listrik. Alternatif program yang dilaksanakan terkait dengan efisiensi energi yaitu :

1. Tiny oil burner
2. Cleaning tube boiler
3. Pengaturan coal to air ratio
4. Penggantian elemen air heater

2. Pengurangan Pencemaran Udara

Pengurangan pencemaran udara adalah upaya yang dilakukan dengan tujuan untuk mengurangi emisi gas yang dihasilkan dari proses produksi yang dapat mengakibatkan menurunnya kualitas lingkungan. Alternatif program yang dilaksanakan terkait dengan pengurangan pencemaran udara yaitu:

1. Tiny oil burner
2. Pengaturan coal to air ratio
3. Perubahan pola operasi LFO pump

Rekomendasi prioritas program unggulan pengelolaan lingkungan didapatkan dari program yang telah diimplementasikan oleh perusahaan yang akan dianalisis dengan menggunakan metode AHP menggunakan aplikasi *expert choice* yang melibatkan responden sebanyak 30 orang experts. Tahapan dalam analisis ini adalah sebagai berikut:

4.3.1 Identifikasi Kriteria

Terdapat 3 kriteria yang digunakan untuk menganalisis alternatif program hingga mendapatkan rekomendasi prioritas, yaitu terdiri dari :

a. Aspek Finansial

Aspek finansial adalah pertimbangan penentuan rencana investasi melalui perhitungan biaya dan manfaat yang diharapkan, dengan membandingkan antara pengeluaran dan pendapatan, seperti ketersediaan dana, biaya modal, dan kemampuan proyek untuk membayar kembali dana tersebut dalam waktu yang telah ditetapkan. Bagi perusahaan, pertimbangan aspek finansial tidak hanya berupa proyeksi keuntungan, namun juga berapa besar tingkat pengembalian usaha terhadap modal yang diinvestasikan. Perhitungan pada aspek finansial meliputi biaya investasi (*capital cost*), biaya pemeliharaan (termasuk biaya teknisi dan spare part), dan biaya operasional (biaya listrik, biaya operator, dan biaya bahan baku operasi).

b. Aspek Teknis

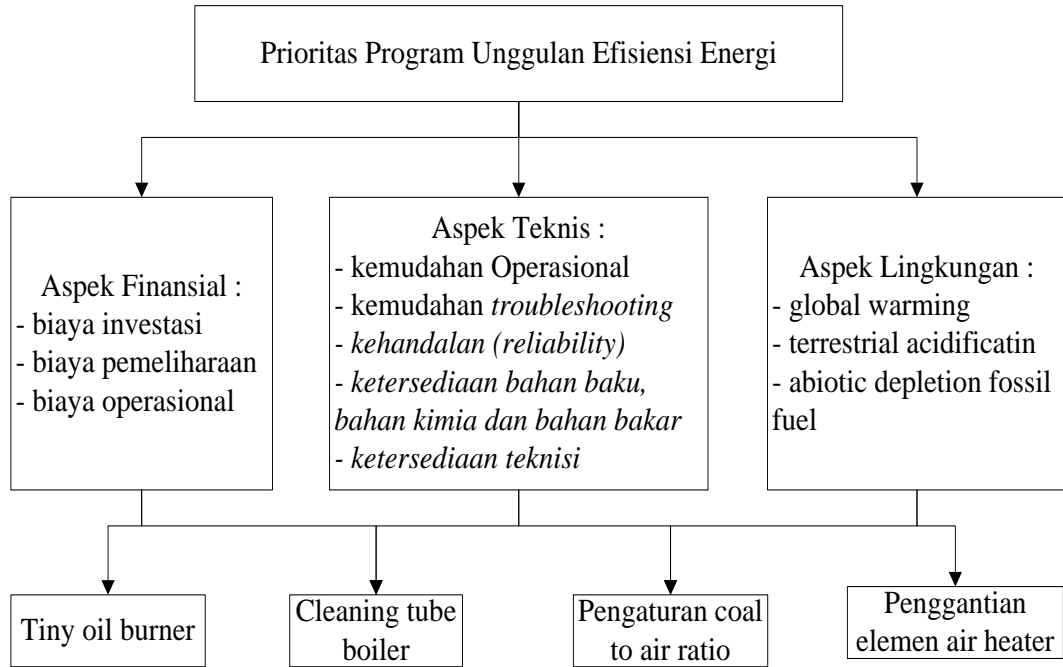
Aspek teknis adalah faktor operasional yang mempengaruhi keberlangsungan implementasi suatu program, diantaranya yaitu kemudahan operasional, kemudahan *troubleshooting*, kehandalan (*reliability*), ketersediaan bahan baku, bahan kimia, dan bahan bakar, serta ketersediaan sumber daya manusia/teknisi.

c. Aspek Lingkungan

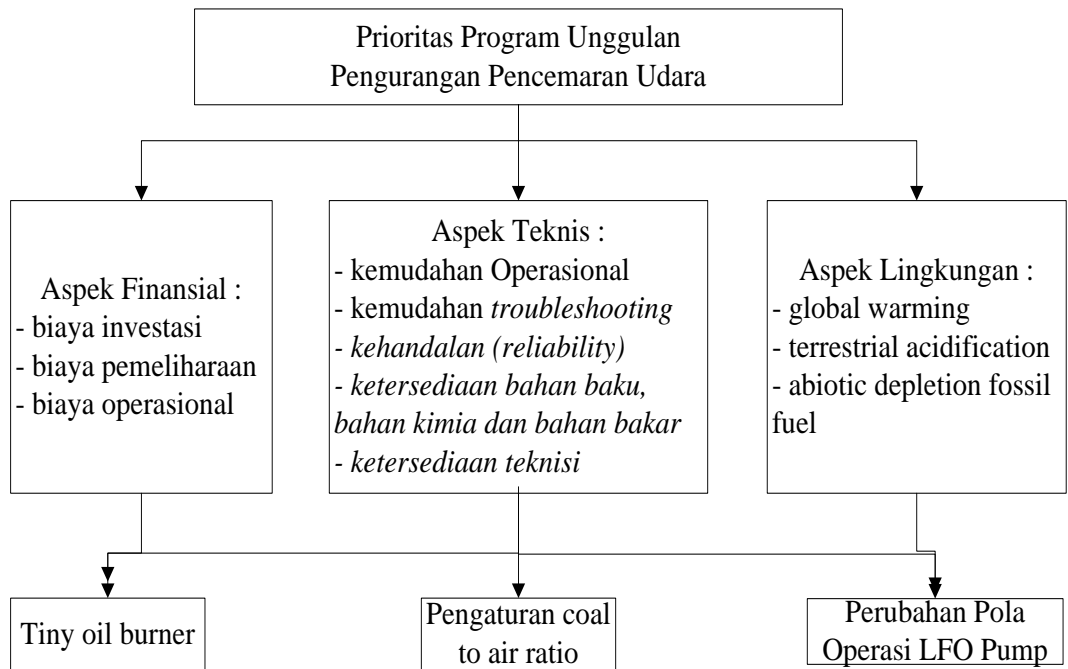
Aspek lingkungan adalah dampak lingkungan dari suatu proses produksi yang dapat dikurangi dengan adanya implementasi suatu program. Berkaitan dengan hasil analisis LCA, maka dampak lingkungan yang menjadi fokus pengurangan adalah *acidification*, *global warming*, dan *fossil resource scarcity*.

4.3.2 Menyusun hirarki kriteria dan alternatif

Dari kriteria dan alternatif program telah ditentukan sebelumnya, kemudian dibuat model hirarki Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 yang selanjutnya dilakukan penilaian kriteria dan alternatif dengan menggunakan software *expert choice*.



Gambar 4.14 Hirarki Prioritas Program Unggulan Efisiensi Energi



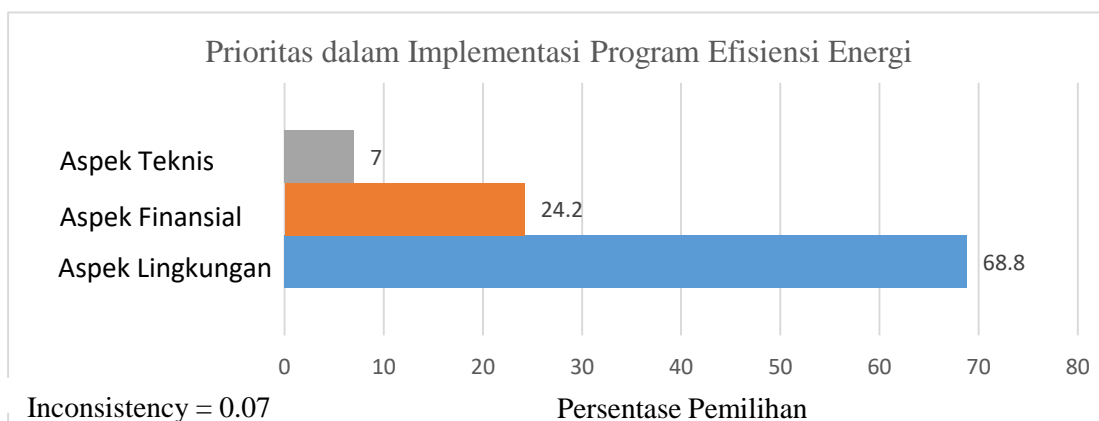
Gambar 4.15 Hirarki Prioritas Program Unggulan Pengurangan Pencemaran Udara

4.3.3 Penentuan Bobot Prioritas dengan Perbandingan Antar Alternatif

Kriteria dan alternatif dinilai dengan menggunakan perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) dengan bantuan *software expert choice*. Untuk memeriksa tingkat konsistensi dari responden, dapat dilihat dari nilai *inconsistency ratio*. Jika nilai *inconsistency ratio* kurang dari 0,1, maka dapat disimpulkan responden tersebut konsisten dalam menjawab alternatif program unggulan pengelolaan lingkungan PT PJB UBJOM Paiton.

a. Analisis Prioritas Program Unggulan Efisiensi Energi

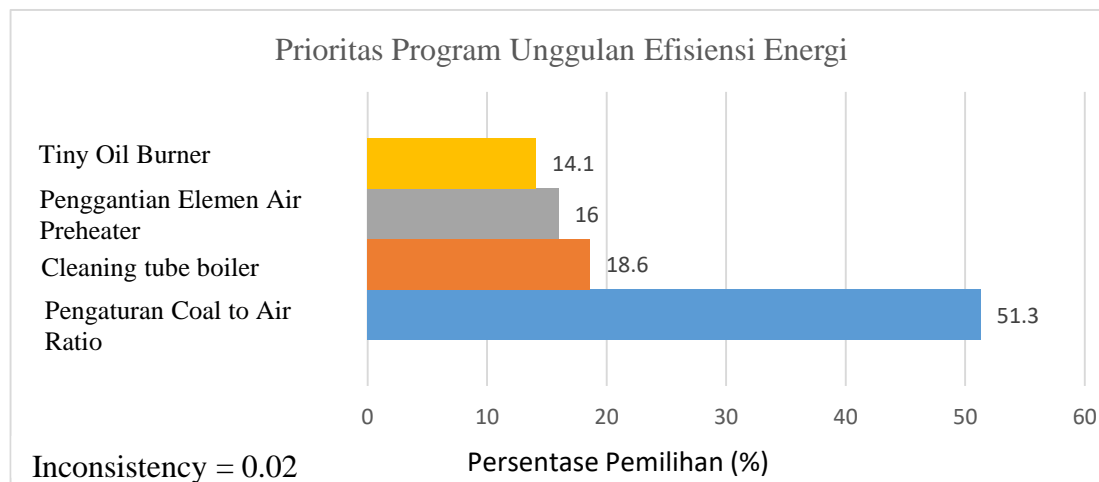
Hasil analisis program unggulan efisiensi energi disajikan pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Hasil Analisis Kriteria Program Efisiensi Energi

Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa dalam penentuan implementasi suatu program, perusahaan selalu mempertimbangkan agar program tersebut dapat mencegah atau mengurangi dampak lingkungan, hal tersebut dinyatakan dengan nilai bobot sebesar 68,8%. Sedangkan pertimbangan biaya investasi dengan bobot sebesar 24,2% dan kemudahan operasi sebesar 7%.

Selanjutnya dilakukan analisis terhadap alternatif program unggulan efisiensi energi yang dapat mengurangi dampak terhadap lingkungan dari *hotspot* sehingga didapatkan prioritas program unggulan efisiensi energi yang ditampilkan pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Hasil Analisis Prioritas Program Unggulan Efisiensi Energi

Dari Gambar 4.16, diketahui nilai inconsistency ratio dari responden yang terlibat menunjukkan nilai 0,02 yang artinya responden tersebut konsisten dalam menjawab poin kriteria dan alternatif program efisiensi energi. Dari Gambar 4.16 juga dapat disimpulkan bahwa prioritas program unggulan efisiensi energi yang berpengaruh terhadap pengurangan dampak pada boiler adalah pengaturan coal to air ratio, cleaning tube boiler, penggantian elemen air preheater, dan tiny oil burner. Kecondongan responden untuk memilih program tersebut, karena telah diimplementasikan di PT PJB UBJOM Paiton dan dapat menurunkan penggunaan energi.

Perhitungan Aspek Finansial Program Efisiensi Energi

Salah satu kriteria yang mempengaruhi pemilihan alternatif program yang akan diimplementasikan oleh perusahaan adalah aspek finansial. Aspek finansial meliputi biaya investasi, biaya operasi dan pemeliharaan, serta manfaat finansial berupa penghematan yang dapat diperoleh dari implementasi suatu program. Dalam hal ini, akan dilakukan perhitungan *net present value* (NPV) dan *internal rate of return* (IRR) pada program yang memiliki biaya investasi, sedangkan pada program tanpa biaya

investasi yaitu kegiatan operasi dan pemeliharaan rutin yang dilakukan oleh operator dan teknisi internal akan dilakukan perhitungan manfaat penghematan finansial.

1. Pengaturan Coal to Air Ratio

Pengaturan *Coal to Air Ratio* merupakan prosedur pengaturan perbandingan antara jumlah batubara dengan udara yang digunakan pada saat proses pembakaran di dalam boiler. Hal ini bertujuan untuk mengoptimalkan proses pembakaran untuk mencapai pembakaran sempurna sehingga meningkatkan efisiensi boiler. Program pengaturan coal to air ratio mulai diimplementasikan pada tahun 2015.

A. Perhitungan Efisiensi Energi

Pada implementasi pengaturan coal to air ratio terdapat nilai efisiensi energi listrik yang menjadi inputan pada perhitungan aspek finansial. Rumus perhitungan efisiensi energi listrik adalah sebagai berikut :

$$\eta \text{ energi} = (s \text{ HR} \times 0,00000418) \times T_p$$

Dimana :

η energi = Efisiensi energi, dalam 1 tahun

s HR = standar deviasi Heat rate (kCal/kWh)

0,00000418 = faktor konversi kCal ke GJ

T_p = total produksi listrik, dalam 1 tahun

Heat rate adalah nilai kalor yang dibutuhkan untuk membangkitkan 1 kWh listrik. Standar deviasi Heat rate adalah selisih antara heat rate saat performance test dengan heat rate saat commissioning. Performance test dilakukan 1x/ bulan untuk memonitoring performa peralatan dengan mengamati parameter operasi. Salah satu parameter operasi yang diamati adalah *O₂ content* yaitu kandungan O₂ pada outlet boiler. Dalam implementasi program coal to air ratio dinyatakan bahwa terdapat penghematan energi / efisiensi energi apabila heat rate saat performance test lebih kecil daripada heat rate saat commissioning. Semakin kecil konsentrasi O₂ di outlet boiler saat performance test menandakan

pembakaran di dalam boiler semakin baik, heat rate semakin kecil, dan berarti bahwa semakin besar penghematan penggunaan energi. Nilai standar deviasi heat rate ditampilkan pada Tabel 4.24.

Contoh perhitungan efisiensi listrik pada tahun 2019 :

$$\begin{aligned}\eta &= 11,9 \frac{kCal}{kWh} \times 0,00000418 \times 4.401.215.883 kWh \\ &= 218.940,07 GJ\end{aligned}$$

B. Perhitungan Aspek Finansial

Program pengaturan *coal to air ratio* tidak memiliki unsur biaya investasi karena berupa prosedur teknis yang dilakukan oleh operator boiler. Implementasi program ini menghasilkan efisiensi energi yang berkorelasi terhadap penghematan finansial. Penghematan energi didapatkan dengan mengkonversikan efisiensi energi ke dalam rupiah dengan cara mengalikan dengan harga jual energi listrik pertahun dalam satuan Rp./GJ.

Contoh perhitungan penghematan finansial program pengaturan *coal to air ratio* pada tahun 2019 :

$$Penghematan\ finansial = \eta\ energi \times (Tl : 0,0036)$$

Dimana :

η energi = Efisiensi energi, dalam 1 tahun

Tl = tarif listrik (Rp/kWh)

0,0036 = faktor konversi kWh ke GJ

Maka didapatkan :

$$\begin{aligned}Penghematan\ finansial &= 218.940,07 GJ \times (Rp \frac{685}{kWh} : 0,0036) \\ &= 218.940,07 GJ \times Rp 190.277,78/GJ \\ &= Rp 41.659.429.078,-\end{aligned}$$

Hasil perhitungan efisiensi energi dan penghematan finansial program pengaturan *coal to air ratio* pada tahun 2015 – 2020 ditampilkan pada Tabel 4.25

Tabel 4.25 Efisiensi Energi dan Penghematan Finansial Program Pengaturan
Coal to Air Ratio

TAHUN	PRODUKSI	PENGHEMATAN ENERGI			HARGA ENERGI LISTRIK		PENGHEMATAN FINANSIAL
	(KWH)	(KCAL/KWH)	(GJ/KWH)	(GJ)	(Rp./KWH)	(Rp./GJ)	(Rp.)
A	B	C	$D = C \times 0,00000418$	$E = D \times B$	F	$G = F : 0,0036$	$H = G \times E$
2015	4.398.816.358,00	9,56	0,00	175.794,86	653,00	181.388,89	31.887.234.612,06
2016	3.324.265.680,00	13,09	0,00	181.839,08	684,00	190.000,00	34.549.424.807,74
2017	4.326.958.099,00	19,06	0,00	344.698,38	685,00	190.277,78	65.588.441.263,28
2018	3.699.169.397,36	14,54	0,00	224.752,14	685,00	190.277,78	42.765.338.060,76
2019	4.401.215.883,00	11,90	0,00	218.940,07	685,00	190.277,78	41.659.429.078,88
2020	4.434.852.610,00	13,71	0,00	254.228,89	685,00	190.277,78	48.374.107.618,28

2. Program Tiny Oil Burner

Sistem penyalaan awal atau start up boiler yang terpasang pada kondisi eksisting adalah menggunakan oil gun konvensional, yang membutuhkan HSD dalam jumlah yang cukup banyak agar dapat mencapai kestabilan *pressure* dan temperature di ruang bakar. Semakin banyak penggunaan HSD untuk proses pembakaran berarti bahwa efisiensi semakin rendah. Maka, untuk tujuan efisiensi energi diterapkan teknologi yang ramah lingkungan dengan menggunakan tiny oil burner dengan bertujuan untuk mengurangi jumlah pemakaian HSD saat penyalaan awal atau startup boiler

Perhitungan Aspek Finansial

Perhitungan NPV dan IRR dari Program Pengadaan dan Pemasangan *Tiny Oil Burner* adalah sebagai berikut :

Diketahui :

- Biaya investasi sebesar Rp 18.238.883.741
- Proyek akan memberi keuntungan (*profit*) setelah satu tahun berjalan, yang didapatkan dari penghematan (*saving*) penggunaan HSD sebesar Rp 9,044,700,000 per tahun
- Umur ekonomis peralatan *tiny oil burner* adalah sebesar 5 tahun
- *Discount rate* sebesar 10%

Rumus perhitungan :

$$NPV = (PV_1 + PV_2 + PV_3 + \dots + PV_t) - C_0$$

$$PV = \frac{Ct}{(1+r)^t}$$

$$Ct = \text{saving} - SLD$$

$$SLD = \frac{C_0}{n}$$

Dimana :

NPV = *Nett Present Value* (Rupiah)

PV = *Present Value* (Rupiah)

C₀ = Nilai investasi awal pada tahun ke 0 (rupiah)

C_t = Arus kas per tahun pada periode t, atau disebut dengan *profit* (Rupiah)

r = Suku bunga atau *discount rate* (%)

t = tahun ke-

SLD = *straight line depreciation*

N = Umur ekonomis (*project life years*)

Perhitungan PV pada tahun ke 1 sebagai berikut :

$$\begin{aligned} PV1 &= \frac{\text{Rp } 9,044,700,000 - \frac{\text{Rp } 18.238.883.741}{5}}{(1 + 10\%)^1} \\ &= \text{Rp } 4.906.657.502 \end{aligned}$$

Selanjutnya nilai PV dan NPV ditampilkan pada Tabel 4.26 berikut.

Tabel 4.26 Nilai Present Value Program *Tiny Oil Burner*

<i>Discount Rate (%)--></i>	10%		5	<--Project Life Years		
Tahun :	0	1	2	3	4	5
Biaya :						
Biaya investasi	18.236.883.741	0	0	0	0	0
Biaya pemeliharaan	0	0	0	0	0	0
Savings:						
Penghematan HSD		9.044.700.000	9.044.700.000	9.044.700.000	9.044.700.000	9.044.700.000
NPV & IRR Calculations:	0	1	2	3	4	5
Total biaya	18.236.883.741	0	0	0	0	0
Penghematan		9.044.700.000	9.044.700.000	9.044.700.000	9.044.700.000	9.044.700.000
Straight Line Depreciation		3.647.376.748	3.647.376.748	3.647.376.748	3.647.376.748	3.647.376.748
Profit		5.397.323.252	5.397.323.252	5.397.323.252	5.397.323.252	5.397.323.252
Discount Factor (1+10%) ^t		0,9091	0,8264	0,7513	0,6830	0,6209
Present Value		4.906.657.502	4.460.597.729	4.055.088.844	3.686.444.404	3.351.313.094
Net Present Value	2,223,217,832					

$$NPV = (PV_1 + PV_2 + PV_3 + \dots + PV_t) - C_0$$

$$= \text{Rp} (4.906.657.502 + 4.460.597.729 + 4.055.088.844 + 3.686.444.404 + 3.351.313.094) - \text{Rp} 18.236.883.741$$

NPV = Rp **2.223.217.832** > 0, maka investasi program dianggap layak (*feasible*) untuk dilakukan.

3. Penggantian Elemen Air Preheater

Elemen air preheater merupakan komponen utama yang berfungsi untuk mentransfer energi panas ke ruang bakar. Apabila terjadi gangguan penyumbatan kerak pada elemen air preheater maka akan berdampak pada terganggunya proses pembakaran dan sistem kerja pada unit proses selanjutnya akan menjadi lebih berat. Hal ini dapat memberikan dampak kerugian seperti unit derating maupun unit loss production Sehingga apabila elemen air preheater telah mulai mengalami kerusakan maka harus segera dilakukan penggantian.

A. Aspek Finansial

Aspek finansial dihitung berdasarkan keterangan berikut :

- Biaya Investasi : Rp 37.000.000.000,-
- Annual Cost (bongkar pasang basket) : Rp 1.543.515.000,-
- Diskon Rate : 10%
- Annual Saving yang dihitung dari besarnya biaya Kerugian akibat tidak bisa naik beban (*Derating*) apabila tidak dilakukan penggantian : Rp 87.600.000.000,-
- Penggantian elemen air preheater dilakukan setiap 2 tahun sekali

Perhitungan NPV dan IRR dari Program Penggantian Elemen Air Preheater

Perhitungan PV pada tahun ke 2 pada saat dilakukan penggantian elemen air preheater adalah sebagai berikut :

$$PV2 = \frac{Rp\ 87.600.000,000 - \frac{Rp\ 37.000.000.000}{5}}{(1 + 10\%)^1}$$
$$= Rp\ 64.452.417.355$$

Selanjutnya nilai PV per tahun ditampilkan pada Tabel 4.27

Tabel 4.27 Nilai *Present Value* Program Penggantian Elemen Air *Preheater*

<i>Discount Rate (%)--></i>	10%	<--Project Life Years				
Tahun :	0	1	2	3	4	5
Biaya Perolehan :						
Biaya investasi	37.000.000,000	0	0	0	0	0
Annual Cost (bongkar pasang basket)	1.543.515.000	2.212.575.000	2.212.575.000	2.212.575.000	2.212.575.000	2.212.575.000
Savings:						
Penghematan dari terhindarnya derating		0	87.600.000.000	0	87.600.000.000	0
NPV & IRR Calculations:	0	1	2	3	4	5
Total biaya perolehan	37.000.000.000					
Straight Line Depreciation		7.400.000.000	7.400.000.000	7.400.000.000	7.400.000.000	7.400.000.000
Profit		-9.612.575.000	77.987.425.000	-9.612.575.000	-852.575.000	-9.612.575.000
Discount Factors @ 10%		1,1	1,21	1,331	1,4641	1,61051
Present Value		-8.738.704.545	64.452.417.355	-7.222.069.872	-582.320.197	-5.968.652.787

$$NPV = (PV_1 + PV_2 + PV_3 + \dots + PV_t) - C_0$$

$$= Rp ((-8.738.704.545) + 64.452.417.355 + (-7.222.069.872) + (-582.320.197) + (-5.968.652.787)) - Rp 37.000.000.000$$

NPV = Rp **4.940.669.954** > 0, maka investasi program dianggap layak (*feasible*) untuk dilakukan.

4. Cleaning Tube Boiler

Cleaning tube boiler adalah kegiatan pemeliharaan rutin yang dilakukan berupa pembersihan tube boiler pada saat PLTU melaksanakan overhaul. Program ini bertujuan untuk menghilangkan deposit kerak di permukaan luar tube boiler agar mencegah terjadinya over heating yang mengakibatkan konsumsi batubara berlebih saat proses menghasilkan energi panas. Parameter yang digunakan sebagai dasar keberhasilan program cleaning tube boiler adalah temperatur inlet Air Heater yang terukur. Temperatur yang lebih rendah dibandingkan dengan kondisi sebelum pelaksanaan program mengindikasikan bahwa program tersebut berhasil. Hal ini menandakan energi panas yang terbuang dari dalam boiler berkurang dan dinyatakan sebagai penghematan energi.

a. Perhitungan Efisiensi Energi

$$\eta \text{ energi} = (s \text{ HR} \times 0,00000418) \times T_p$$

Dimana :

η energi = Efisiensi energi, dalam 1 tahun

s HR = standar deviasi Heat Rate (kCal/kWh), dalam 1 tahun

0,00000418 = faktor konversi kCal ke GJ

T_p = total produksi, dalam 1 tahun

Contoh perhitungan penghematan energi dari program *cleaning tube boiler* pada tahun 2018 :

$$\begin{aligned} \eta &= 9,15 \frac{\text{kCal}}{\text{kWh}} \times 0,00000418 \times 3.699.169.397,36 \text{ kWh} \\ &= 141.482,13 \text{ GJ} \end{aligned}$$

b. Perhitungan Aspek Finansial

Program *cleaning tube boiler* tidak memiliki unsur biaya investasi karena berupa prosedur teknis yang dilakukan oleh operator boiler. Implementasi program ini menghasilkan efisiensi energi yang berkorelasi terhadap penghematan finansial.

Rumus perhitungan penghematan finansial program *cleaning tube boiler* :

$$\text{Penghematan finansial} = \eta \text{ energi} \times (\text{TI} : 0,0036)$$

Dimana :

η energi = Efisiensi energi, dalam 1 tahun

TI = tarif listrik (Rp/kWh)

0,0036 = faktor konversi kWh ke GJ

Maka didapatkan :

$$\begin{aligned} \text{Penghematan finansial} &= 141.482,13 \text{ GJ} \times \left(\text{Rp} \frac{685}{\text{kWh}} : 0,0036\right) \\ &= 141.482,13 \text{ GJ} \times \text{Rp } 190.277,78/\text{GJ} \\ &= \text{Rp } 26.920.905.660 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan efisiensi energi dan penghematan finansial program cleaning tube boiler pada tahun 2015 – 2020 ditampilkan pada Tabel 4.28

Tabel 4.28 Efisiensi Energi dan Penghematan Program *Cleaning Tube Boiler*

Tahun	s Heat Rate	Produksi	Harga Jual Listrik		Penghematan	
					Energi	Rp.
	(kCal/kWH)	(kWH)	(Rp./kWH)	Rp. /GJ	(GJ)	
1	2	3	4	5 = 4 : 0,0036	6 = 2 x 3 x 0,00000418	7 = 6 x 5
2016	10.53	3,324,265,680.00	684.00	190,000.00	146,353.62	27,807,188,215.69
2017	12.19	4,663,243,919.00	684.00	190,000.00	237,678.05	45,158,829,564.96
2018	9.15	3,699,169,397.36	685.00	190,277.78	141,482.13	26,920,905,660.96
2019	-	4,401,215,883.00	685.00	190,277.78	-	-
2020	-	4,434,852,610.00	685.00	190,277.78	-	-

Program cleaning tube boiler dilakukan rutin mulai tahun 2016, dilanjut pada tahun 2017 dan 2018. Di tahun 2019 s.d 2020 cleaning tube boiler belum terlaksana dikarenakan tidak terlaksananya jadwal unit untuk over haul.

Setelah dilakukan perhitungan pada 4 alternatif program pengurangan pencemaran udara, selanjutnya rekap nilai efisiensi energi dan penghematan finansial ditampilkan pada Tabel 4.29 dan Tabel 4.30 berikut.

Tabel 4.29 Nilai Efisiensi Energi tahun 2016 - 2020

No	Program	Hasil Absolut					Satuan	Efisiensi energi (GJ)
		2016	2017	2018	2019	2020		
		Hasil (GJoule)	Hasil (GJoule)	Hasil (GJoule)	Hasil (GJoule)	Hasil (GJoule)		
PADA PROSES PRODUKSI								
1	Tiny Oil Boiler	64.743,28	65.382,37	50.242,62	62.844,18	64.728,22	GJ	347.736,45
2	Cleaning Tube Boiler	146.353,62	237.678,05	141.482,13	0,00	0,00	GJ	525.513,8
3	Pengaturan Coal to Air Ratio	181.839,08	344.698,38	224.747,85	218.940,07	254.228,89	GJ	1.400.249,11
4	Penggantian Elemen Air Preheater	0,00	0,00	498.279,97	0,00	0,00	GJ	498.280,0
-	Total Hasil Absolut Efisiensi Energi dari Proses Produksi	392.935,98	647.758,80	914.752,56	281.784,24	183.161,69	.	2.771.779,33

Tabel 4.30 Nilai Penghematan Program Efisiensi Energi Tahun 2016 - 2020

No	Program						Penghematan Total (Rp)
		2016	2017	2018	2019	2020	
		Penghematan (Rp)	Penghematan (Rp)	Penghematan (Rp)	Penghematan (Rp)	Penghematan (Rp)	
PADA PROSES PRODUKSI							
1	Tiny Oil Boiler	16.457.143.681,86	16.619.595.091,09	12.771.211.000,18	15.974.409.068,36	16.453.333.963,35	88.391.413.773,75
2	Cleaning Tube Boiler	27.807.188.215,69	45.158.829.564,96	26.920.905.660,96	0,0	0,0	99.886.923.441,61
3	Pengaturan Coal to Air Ratio	34.549.424.807,74	65.492.691.713,99	42.702.090.674,80	41.659.429.078,88	48.374.107.618,28	264.664.978.505,75
4	Penggantian Elemen Air Preheater	0,0	0,0	94.811.604.909,79	0,0	0,0	94.811.604.909,79
-	Total Hasil Absolut Efisiensi Energi dari Proses Produksi	78.813.756.705,30	127.271.116.370,04	177.205.812.245,72	57.633.838.147,25	39.365.222.098,28	547.754.920.630,89

Perbandingan Antara Hasil Perhitungan Program Efisiensi Energi dengan Rekomendasi AHP

Perbandingan hasil perhitungan efisiensi energi dengan hasil rekomendasi AHP dilakukan untuk menganalisis konsistensi antara pendapat *experts* dengan perhitungan program efisiensi energi yang telah diimplementasikan di perusahaan. Hasil perbandingan ditampilkan pada Tabel 4.31 berikut.

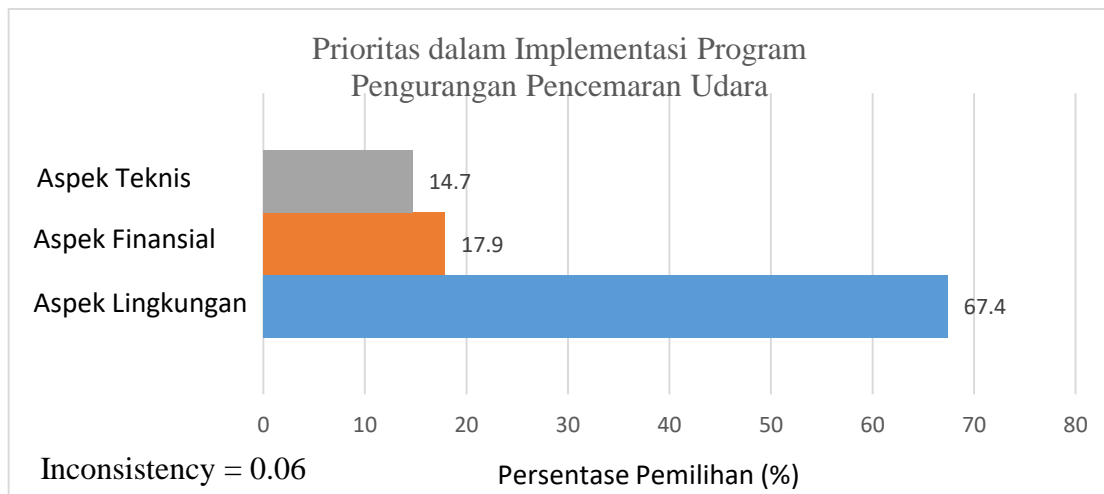
Tabel 4.31 Perbandingan Konsistensi Hasil AHP dengan Perhitungan Efisiensi Energi

No	Urutan Program Berdasarkan Perhitungan Efisiensi Energi dan Aspek Finansial	Prioritas Program Menggunakan <i>Analytical Hierarchy Process</i> (AHP)
1	Pengaturan Coal to Air ratio	Pengaturan Coal to Air ratio
2	Cleaning Tube Boiler	Cleaning Tube Boiler
3	Penggantian Elemen Air Preheater	Penggantian Elemen Air Preheater
4	Tiny Oil Burner	Tiny Oil Burner

Dari Tabel 4.30 diketahui bahwa rekomendasi prioritas program unggulan pengelolaan lingkungan yang diolah menggunakan metode AHP telah sesuai dengan urutan program berdasarkan perhitungan efisiensi energi dan aspek finansial. Sehingga dinyatakan bahwa hasil AHP telah konsisten dengan hasil perhitungan program efisiensi energy PT PJB UBJOM Paiton.

b. Analisis Prioritas Program Pengurangan Pencemaran Udara

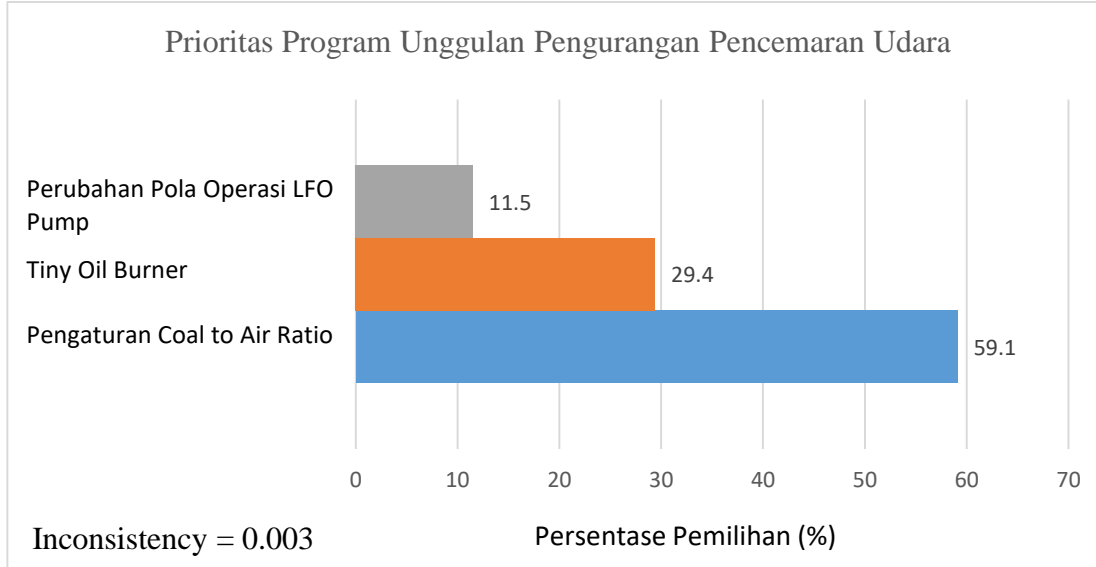
Hasil analisis kriteria program pengurangan pencemaran udara disajikan pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Hasil Analisis Kriteria Program Pengurangan Pencemaran Udara

Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa dalam penentuan implementasi suatu program, perusahaan selalu mempertimbangkan agar program tersebut dapat mencegah atau mengurangi dampak lingkungan, hal tersebut dinyatakan dengan nilai bobot sebesar 67,4%. Sedangkan pertimbangan biaya investasi dengan bobot sebesar 17,9% dan kemudahan operasional sebesar 14,7%.

Selanjutnya dilakukan analisis terhadap 135actor135tive program pengurangan pencemaran udara yang dapat mengurangi dampak terhadap lingkungan dari *hotspot* sehingga didapatkan prioritas program unggulan efisiensi energi yang ditampilkan pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Hasil Analisis Prioritas Program Unggulan Pengurangan Pencemaran Udara

Dari Gambar 4.18, diketahui nilai *inconsistency ratio* dari responden yang terlibat menunjukkan nilai 0,06 yang artinya responden tersebut konsisten dalam menjawab poin kriteria dan 136actor136tive program pengurangan pencemaran udara. Dari Gambar 4.18 juga dapat disimpulkan bahwa program unggulan pengurangan pencemaran udara yang berpengaruh terhadap pengurangan dampak pada boiler adalah pengaturan coal to air ratio dengan bobot sebesar 59,1%, program tiny oil burner dengan bobot sebesar 29,4%, dan program perubahan pola operasi LFO pump dengan bobot sebesar 11,5%. Kecondongan responden untuk memilih program tersebut, karena telah diimplementasikan di PT PJB UBJOM Paiton.

Perhitungan Aspek Finansial Program Pengurangan Pencemaran Udara

Perhitungan aspek finansial pada program penurunan pencemaran udara dihitung berdasarkan potensi penghematan finansial yang dapat dihasilkan dari implementasi masing-masing program. Pada program pengurangan pencemaran udara tidak dilakukan perhitungan NPV, hal ini disebabkan karena program yang termasuk didalamnya adalah kegiatan pemeliharaan rutin sehingga tidak terdapat biaya investasi.

1. Perubahan Pola Operasi LFO Pump

LFO pump merupakan peralatan yang berfungsi untuk memompa HSD dari HSD tank menuju ke boiler untuk proses pembakaran pada saat awal operasi. Saat kondisi unit sudah normal beroperasi, bahan bakar sepenuhnya menggunakan batubara sehingga pengoperasian LFO *pump* tidak diperlukan. Sesuai dengan desain awal, durasi operasi LFO pump mengikuti durasi unit beroperasi. Setelah pelaksanaan program perubahan pola operasi LFO pump pada tahun 2019, LFO pump hanya beroperasi memompa HSD ke boiler saat start up unit. Implementasi program tersebut mempengaruhi pengurangan pencemaran udara melalui penggunaan bahan bakar batu bara yang digunakan untuk memproduksi listrik termasuk listrik pemakaian sendiri. Tahapan perhitungan penurunan beban emisi serta penghematan aspek finansial dijelaskan sebagai berikut.

A. Perhitungan Penurunan Beban Emisi

Tahapan perhitungan :

1. Menghitung penghematan (efisiensi) energi listrik

$$\begin{aligned}\eta \text{ energi listrik} &= (\text{konsumsi listrik sebelum program} - \text{sesudah program}) \\ &= ((P \times SH \text{ pump sebelum}) - (P \times SH \text{ pump sesudah}))\end{aligned}$$

Dimana :

η energi listrik = efisiensi energy listrik, dalam 1 tahun

P = daya LFO *pump*, sebesar 90 kW

SH = *service hour* LFO pump

Contoh perhitungan efisiensi energi dari program pengaturan pola operasi LFO *pump* pada tahun 2020 :

Diketahui :

SH sebelum program = 8.784 jam

SH setelah program = 144 jam

$$\begin{aligned}\eta \text{ energi listrik} &= ((90 \text{ kW} \times 8.784 \text{ jam}) - (90 \text{ kW} \times 144 \text{ jam})) \\ &= (790.560 \text{ kWh} - 12.960 \text{ kWh}) \\ &= 777.600 \text{ kWh}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{konversi kWh ke GJ, dengan 138actor konversi} = 0.0036 \\ & = 777.600 \text{ kWh} \times 0.0036 \\ & = 2799,36 \text{ GJ} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan efisiensi energi program pengaturan pola operasi LFO *Pump* tahun 2019 – 2020 ditampilkan pada Tabel 4.32.

Tabel 4.32 Efisiensi energi Program Pengaturan Pola Operasi LFO *Pump*

TAHUN	DAYA	DURASI OPERASI		PENGHEMATAN ENERGI	
		Sebelum	Sesudah	(KWH)	(GJ)
	(KW)	(JAM)	F = (B x C) – (B x D)		
A	B	C	D		
2019	90	8.760	169	773.190	2.783,46
2020	90	8.784	144	777.600	2.799,36

2. Menghitung konsumsi bahan bakar batu bara

Rumus perhitungan :

$$\text{Pemakaian batu bara} = \frac{\eta \text{ energi listrik}}{\text{HHV batubara}}$$

Diketahui :

HHV batubara = 4200 kCal/kg

Faktor konversi kCal ke kilojoule = 4,184

HHV batubara = 4200 kCal/kg x 4,184

$$= 17.572,8 \text{ kJ/kg}$$

$$= 0,017573 \text{ TJ/ton}$$

Perhitungan pemakaian batubara pada tahun 2020 :

$$\text{Pemakaian batu bara} = \frac{(2.799,36 \text{ GJ}/1000)}{0,017573 \text{ TJ/ton}}$$

$$= 159,3 \text{ ton}$$

Hasil perhitungan konsumsi bahan bakar batu bara Program Pengaturan Pola Operasi LFO *Pump* tahun 2019 – 2020 ditampilkan pada Tabel 4.33

Tabel 4.33 Konsumsi Batu Bara saat Program Pengaturan Pola Operasi LFO *Pump*

TAHUN	PENGHEMATAN			HHV batubara	Pemakaian Batu bara
	ENERGI				
	(KWH)	(GJ)	TJ	TJ/ton	ton
A	$F = (B \times C) - (B \times D)$	$G = F \times 0,0036$	$H = G/1000$	I	$J = H/I$
2019	773.190	2.783,46	2.78	0.017573	158,4
2020	777.600	2.799,36	1.8	0.017573	159,3

3. Menghitung penurunan beban emisi pencemaran udara

Perhitungan penurunan beban emisi pencemaran udara gas rumah kaca dan konvensional dilakukan dengan cara mengalikan nilai efisiensi energi dengan nilai faktor emisi.

$$Emisi = \sum \eta \text{ energi} \times \text{faktor emisi}$$

Faktor emisi yang digunakan berdasarkan data referensi dari IPCC 2006, Corinair, dan IEA 1992a ditampilkan pada Tabel 4.34 dan Tabel 4.35

Tabel 4.34 Faktor Emisi Konvensional

No	Beban Emisi Manual	Faktor Emisi
1	SO ₂	645 gram/GJ
2	NO _x	540 gram/GJ
3	Total Partikulat	1.6 Kg/ton

Tabel 4.35 Faktor Emisi Gas Rumah Kaca

Bahan bakar	Faktor Emisi (ton CO ₂ /TJ)			NCV (TJ/Gg)	%C
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O		
Gas alam	56.100	1	0,1	48	73,4%
LPG	63.100	1	0,1	47,3	81,4%
Biodiesel	70.800	3	0,6	27	52,1%
Jet Kerosene	71.500	3	0,6	44,1	86,0%
Kerosen lainnya	71.900	3	0,6	43,8	85,9%
Minyak diesel	74.100	3	0,6	43	86,9%
Minyak residu	77.400	3	0,6	40,4	85,3%
Batubara antrasit	98.300	10	1,5	26,7	71,6%
Batubara bituminous	94.600	10	1,5	25,8	66,6%
Batubara sub-bituminous	96.100	10	1,5	18,9	49,5%
Lignit	101.000	10	1,5	11,9	32,8%
Kayu/limbah kayu	112.000	30	4	15,6	47,7%
Biomassa padat lainnya	100.000	30	4	11,6	31,6%
Black liquor	95.300	3	2	11,8	30,7%
Coke	107.000	10	1,5	28,2	82,3%

Contoh Perhitungan beban emisi tahun 2019:

$$\text{Emisi GRK} = \text{Emisi CO}_2 + \text{Emisi CH}_4 + \text{Emisi N}_2\text{O}$$

$$= (\sum \text{Eff} \times \text{Faktor emisi CO}_2) + (\sum \text{Eff} \times \text{Faktor emisi CH}_4) + (\sum \text{Eff} \times \text{Faktor emisi N}_2\text{O})$$

$$= (2,78 \text{ TJ} \times 101.000 \text{ kg/TJ}) + (2,78 \text{ TJ} \times 10 \text{ kg/TJ}) + (2,78 \text{ TJ} \times 1,5 \text{ kg/TJ})$$

$$= 283,01 \text{ Ton CO}_2\text{eq}$$

$$\text{Emisi Konvensional SO}_2 = \sum \text{Eff} \times \text{Faktor Emisi SO}_2$$

$$= 2,78 \text{ TJ} \times 645 \text{ g/GJ}$$

$$= 1,795 \text{ Ton}$$

$$\text{Emisi Konvensional NO}_x = \sum \text{Eff} \times \text{Faktor Emisi NO}_x$$

$$= 2,78 \text{ (TJ)} \times 540 \text{ (g/GJ)}$$

$$= 1,50 \text{ Ton}$$

$$\text{Emisi Konvensional Partikulat} = \sum \text{Eff} \times \text{Faktor Emisi (Partikulat)}$$

$$= 2,78 \text{ (TJ)} \times 1,60 \text{ (g/GJ)}$$

$$= 0,25 \text{ Ton}$$

Hasil perhitungan penurunan beban emisi konvensional dan GRK ditampilkan pada Tabel 4.36 dan tabel 4.37

Tabel 4.36 Perhitungan Penurunan Beban Emisi Konvensional

Thn	Bahan bakar	Energy consumption			Sox Emission Factor		NOx Emission Factor		TSP Emission Factor	
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
		Consumption	Conversion Factor ^(b)	Consumption	Sox Emission Factor	Sox Emissions	NOx Emission Factor	NOx Emissions	TSP Emission Factor	TSP Emissions
		TON	TJ/ton	(TJ)	(Ton/TJ)	(Ton)	(Ton/TJ)	(Ton)	(Kg/Ton)	(Ton)
				C=A*B		E=C*D		G=C*F		I=A*H
2019	BB	158,4	0,017573	2,78	0,65	1,8	0,54	1,5	1,60	0,25
2020	BB	159,3	0,017573	2,8	0,65	1,81	0,54	1,51	1,60	0,25

Tabel 4.37 Beban emisi GRK Menggunakan Perhitungan IPCC 2006

THN	BAHAN BAKAR	Energy consumption			CO ₂		CH ₄			N ₂ O			L	M		
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K				
		Consumption	Conversion Factor ^(b)	Consumption	CO ₂ Emission Factor	CO ₂ Emissions	CH ₄ Emission Factor	CH ₄ Emissions		N ₂ O Emission Factor	N ₂ O emissions				CO ₂ eq (Gg CO ₂ e)	CO ₂ eq (Ton CO ₂ e)
		TON	TJ/ton	(TJ)	(kg CO ₂ /TJ)	(Gg CO ₂)	(kg CH ₄ /TJ)	(Gg CH ₄)	(Gg CO ₂ e)	(kg N ₂ O / TJ)	(Gg N ₂ O)	(Gg CO ₂ e)				
				C=A*B		E=C*D/10⁶		G=C*F/10⁶	H=GWP*G		I=C*H/10⁶	K=GW P*J			L=E+H+K	
2019	BB	158,4	0,017573	2,78	101.000	0,28	10	0	0	1,50	0,000004	0	0,28	283,01		
2020	BB	159,3	0,017573	2,8	101.000	0,28	10	0	0	1,50	0,000004	0	0,28	284,62		

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.35 dan Tabel 4.36 maka didapatkan rekap hasil penurunan beban emisi tahun 2019-2020 sebagai berikut:

Tabel 4.38 Rekapitulasi Penurunan Beban Emisi

No	Beban Emisi I	2019	2020	Satuan
1	SO ₂	1,8	1,81	ton
2	NO _x	1,5	1,51	ton
3	Total partikulat	0,25	0,25	ton
4	CO ₂	283,01	284,62	ton CO ₂ eq

B. Perhitungan Aspek Finansial

Program perubahan pola operasi LFO *pump* tidak memiliki unsur biaya investasi karena berupa prosedur teknis yang dilakukan oleh operator boiler. Implementasi program ini menghasilkan penghematan finansial yang dihitung dari data pengurangan beban emisi dikali dengan harga jual CO₂, sebagai berikut.

Diketahui :

Harga CO₂/ton : EUR 60/Ton berdasarkan Effective Carbon Rates 2021 OECD

Kurs Rupiah terhadap dolar : Rp 17.115,02

Harga CO₂/ton dalam Rupiah : Rp 1.026.901,20

(sumber : <https://www.oecd.org/tax/tax-policy>)

Perhitungan :

Penghematan = E CO₂ x Harga CO₂/ton

Penghematan pada tahun 2020 = 283,01 (ton CO₂ eq) x Rp 1.026.901,20

= Rp 290.624.064,1

Hasil perhitungan penghematan finansial dari implementasi Program Pengaturan Pola Operasi LFO *Pump* tahun 2019 – 2020 ditampilkan pada Tabel 4.39

Tabel 4.39 Penghematan Finansial Program

Pengaturan Pola Operasi LFO Pump

No	Tahun	Beban Emisi CO ₂ (ton CO ₂ eq)	Harga CO ₂ /ton (Rp)	Penghematan finansial
		A	B	C = A x B
1	2019	283,01	1.026.901,20	290.624.064,1
2	2020	284,62	1.026.901,20	292.281.680,11

2. Tiny Oil Burner

Program *tiny oil burner* dapat mengurangi pencemaran udara yang ditimbulkan pada saat proses produksi listrik karena terdapat pengurangan konsumsi HSD untuk proses pembakaran. Program pemasangan *tiny oil burner* dimulai pada bulan Mei tahun 2015, maka monitoring data dimulai pada tahun 2014 pada saat kondisi eksisting menggunakan *oil gun* konvensional sebagai data pembandingan.

A. Perhitungan Penurunan Beban Emisi

Tahapan perhitungan :

1. Mengkonversi penggunaan HSD dari liter ke ton

Penggunaan bahan bakar HSD pada tahun 2014 = 2.008.259,82 liter

Massa jenis HSD : 0.85 kg/l

Konsumsi bahan bakar (Ton) = konsumsi bahan bakar x (massa jenis/1000)

$$= 2.008.259,82 \text{ liter} \times (0.85 \text{ kg/l} : 1000)$$

$$= 1.707,02 \text{ ton}$$

Rekap data penggunaan bahan bakar HSD tahun 2014 – 2020 ditampilkan pada

Tabel 4.40

Tabel 4.40 Pemakaian HSD Program Tiny Oil Burner

TAHUN	PEMAKAIAN HSD	
	LITER	TON
2014	2.008.259,82	1.707,02
2015	943.447,08	801,93
2016	275.928,90	234,54

2017	258,828.76	220
2018	663,921.82	564.33
2019	326,743.07	277.73
2020	276,300.84	234.86

2. Mengkonversi penggunaan bahan bakar HSD dari ton menjadi satuan Joule
 Berdasarkan IPCC 2006, Faktor emisi dan NCV bahan bakar HSD (Solar) sebagai berikut :

Tabel 4.41 Faktor Emisi Metode Tier 1

Pencemar	Premium	Solar
TSP (g/kg) ^(a)	2,2	1,52
NOx (g/kg) ^(a)	6,64	14,91
CO (g/kg) ^(a)	497,7	7,4
HC (g/mile) ^(b)	0,184	0,29
CO ₂ (kg/TJ) ^(c)	69.300	74.100
CH ₄ (kg/TJ) ^(c)	33	3,9
N ₂ O (kg/TJ) ^(c)	3,2	3

Sumber: ^(a)CORINAIR (2009); ^(b)US EPA (1995); ^(c)IPCC (2006)

Secara perhitungan NCV Bahan bakar HSD adalah :

$$\begin{aligned}
 \text{Kalori HSD} &= 8941.03 \text{ kcal/L} \\
 \text{Konversi kcal ke kjoule} &= 4.1868 \\
 \text{kalori HSD} &= 37434.3044 \text{ kJ/L} \\
 \text{Massa jenis} &= 0.85 \text{ kg/l} \\
 \text{HHV dalam kg} &= 44041.688 \text{ kJ/kg} \\
 \text{HHV dalam Ton} &= 0,044041688 \text{ Tj/ton} \\
 \text{Konsumsi bahan bakar HSD tahun 2014} &= 1.707,02 \text{ ton} \times 0,044042 \text{ TJ/ton} \\
 &= 75,18 \text{ TJ}
 \end{aligned}$$

3. Menghitung penurunan beban emisi pencemaran udara

Perhitungan penurunan beban emisi pencemaran udara gas rumah kaca dan konvensional dilakukan dengan cara mengalikan nilai efisiensi energi dengan nilai faktor emisi.

$$Emisi = \sum \eta \text{ energi} \times \text{faktor emisi}$$

Contoh Perhitungan beban emisi tahun 2014:

$$\begin{aligned} \text{Emisi GRK} &= \text{Emisi CO}_2 + \text{Emisi CH}_4 + \text{Emisi N}_2\text{O} \\ &= (\sum \text{Eff} \times \text{Faktor emisi CO}_2) + (\sum \text{Eff} \times \text{Faktor emisi CH}_4) + (\sum \text{Eff} \times \text{Faktor emisi N}_2\text{O}) \\ &= (75,18 \text{ TJ} \times 74.100 \text{ kg/TJ}) + (75,18 \text{ TJ} \times 3 \text{ kg/TJ}) + (75,18 \text{ TJ} \times 0,6 \text{ kg/TJ}) \\ &= 5.589.564 \text{ kg CO}_2\text{eq} \\ &= 5.589,564 \text{ Ton CO}_2\text{eq} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisi Konvensional SO}_2 &= \sum \text{Eff} \times \text{Faktor Emisi SO}_2 \\ &= 75,18 \text{ TJ} \times 1,4 \text{ ton/TJ} \\ &= 104,88 \text{ Ton} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisi Konvensional NO}_x &= \sum \text{Eff} \times \text{Faktor Emisi NO}_x \\ &= 75,18 \text{ TJ} \times 0,18 \text{ ton/TJ} \\ &= 13,53 \text{ Ton} \end{aligned}$$

Rekap Beban emisi GRK dan konvensional yang dihasilkan dari tahun ke tahun menggunakan perhitungan IPCC 2006 ditampilkan pada Tabel 4.42 dan Tabel 4.43

Tabel 4.42 Rekap Beban emisi GRK Program Tiny Oil Burner

Thn	Bahan bakar	Energy consumption			CO ₂		CH ₄			N ₂ O			CO ₂ Ekuivalen (Gg CO ₂ e)	CO ₂ Ekuivalen (Ton CO ₂ e)
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K		
		Consumption	Conversion Factor ^(b)	Consumption	CO ₂ Emission Factor	CO ₂ Emissions	CH ₄ Emission Factor	CH ₄ Emissions		N ₂ O Emission Factor	N ₂ Oemissions			
		TON	TJ/ton	(TJ)	(kg CO ₂ /TJ)	(Gg CO ₂)	(kg CH ₄ /TJ)	(Gg CH ₄)	(Gg CO ₂ e)	(kg N ₂ O /TJ)	(Gg N ₂ O)	(Gg CO ₂ e)		
				C=A*B		E=C*D/10⁶		G=C*F/10⁶	H=GWP*G		I=C*H/10⁶	K=GWP*J	L=E+H+K	
2013	HSD	1.535,32	0,044042	67,62	74.100	5,01	3	0.00	0.00	0,60	0,000041	0,01	5,03	5027,32
2014	HSD	1.707,02	0,044042	75,18	74.100	5,57	3	0.00	0.00	0,60	0,000045	0,01	5,59	5589,56
2015	HSD	801,93	0,044042	35,32	74.100	2,62	3	0.00	0.00	0,60	0,000021	0,01	2,63	2625,89
2016	HSD	234,54	0,044042	10,33	74.100	0,77	3	0.00	0.00	0,60	0,000006	0,00	0,77	767,99
2017	HSD	220,0	0,044042	9,69	74.100	0,72	3	0.00	0.00	0,60	0,000006	0,00	0,72	720,39
2018	HSD	564,33	0,044042	24,85	74.100	1,84	3	0.00	0.00	0,60	0,000015	0,00	0,92	1847,88
2019	HSD	277,73	0,044042	12,23	74.100	0,91	3	0.00	0.00	0,60	0,000007	0,00	0,65	921,50
2020	B30	234,86	0,038927	9,14	70.800	0,59	4	0.00	0.00	1,60	0,000015	0,00	0,65	652,38

Tabel 4.43 Beban Emisi Konvensional Program Tiny Oil Burner

Tahun	BAHAN BAKAR	Energy consumption			Sox Emission Factor		NOx Emission Factor		TSP Emission Factor	
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
		Consumption	Conversion Factor ^(b)	Consumption	Sox Emission Factor	Sox Emissions	NOx Emission Factor	NOx Emissions	TSP Emission Factor	TSP Emissions
		TON	TJ/ton	(TJ)	(Ton/TJ)	(Ton)	(Ton/TJ)	(Ton)	(Kg/Ton)	(Ton)
				C=A*B		E=C*D		G=C*F		I=A*H
2013	HSD	1.535,316	0,044042	67,62	1,40	95,58	0,18	12,33	0,00	0,00
2014	HSD	1.707,021	0,044042	75,18	1,40	106,27	0,18	13,71	0,00	0,00
2015	HSD	801,93	0,044042	35,32	1,40	49,92	0,18	6,44	0,00	0,00
2016	HSD	234,54	0,044042	10,33	1,40	14,60	0,18	1,88	0,00	0,00
2017	HSD	220,0	0,044042	9,69	1,40	13,70	0,18	1,77	0,00	0,00
2018	HSD	564,33	0,044042	24,85	1,40	35,13	0,18	4,53	0,00	0,00
2019	HSD	277,73	0,044042	12,23	1,40	17,29	0,18	2,23	0,00	0,00
2020	B30	234,86	0,038927	9,14	1,40	12,75	0,18	1,65	0,00	0,00

4. Menghitung Penurunan beban emisi setelah menggunakan *tiny oil burner*

Emisi CO₂ tahun 2014 = 5.589,564 ton CO₂ eq

Emisi CO₂ tahun 2015 = 2.625,884 ton CO₂ eq

Penurunan beban emisi CO₂ = Emisi CO₂ tahun 2014 – Emisi CO₂ tahun 2015

$$= (5.589,564 - 2.625,884) \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

$$= 2.963,68 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

Rekap Penurunan beban emisi setelah menggunakan *tiny oil burner* ditampilkan pada Tabel 4.44

Tabel. 4.44 Penurunan Emisi dari Program Tiny Oil Burner

TAHUN	2015	2016	2017	2018	2019	2020*
Penurunan beban emisi (ton CO ₂ eq)	2.963,68	4821,57	4.869,17	3.741,68	4.680,13	5.011,19

B. Perhitungan Aspek Finansial

Program *tiny oil burner* tidak memiliki unsur biaya investasi karena berupa prosedur teknis yang dilakukan oleh operator boiler. Implementasi program ini menghasilkan penghematan finansial yang dihitung dari data pengurangan beban emisi dikali dengan harga jual CO₂, sebagai berikut.

Diketahui :

Harga CO₂/ton : EUR 60/Ton berdasarkan Effective Carbon Rates 2021 OECD

Kurs Rupiah terhadap dolar : Rp 17.115,02

Harga CO₂/ton dalam Rupiah : Rp 1.026.901,20

(sumber : <https://www.oecd.org/tax/tax-policy>)

Perhitungan :

Penghematan = Pengurangan beban emisi CO₂ x Harga CO₂/ton

Penghematan pada tahun 2015 = 2.963,68 (ton CO₂ eq) x Rp 1.026.901,20
= Rp 3.083.808.790,99

Hasil perhitungan penghematan finansial dari implementasi Program *Tiny Oil Burner* tahun 2015 – 2020 ditampilkan pada Tabel 4.45

Tabel 4.45 Penghematan Finansial Program *Tiny Oil Burner*

TAHUN	Penurunan beban emisi (ton CO ₂ eq)	Harga CO ₂ (Rp)	Penghematan (Rp)
2015	2.963,68	1.026.901,20	3.083.808.790,99
2016	4.821,57	1.026.901,20	5.017.011.097,55
2017	4.869,17	1.026.901,20	5.066.534.911,56
2018	3.741,68	1.026.901,20	3.893.343.131,45
2019	4.680,13	1.026.901,20	4.869.835.231,59
2020	5.011,19	1.026.901,20	5.145.996.060,49

3. Pengaturan Coal to Air ratio

Program Pengaturan Coal to Air Ratio merupakan prosedur pengaturan perbandingan antara jumlah batubara dengan udara yang digunakan saat proses pembakaran di dalam boiler. Pengaturan coal to air ratio bertujuan mengoptimalkan proses pembakaran untuk mencapai pembakaran sempurna sehingga meningkatkan efisiensi boiler. Peningkatan efisiensi boiler berdampak pada pengurangan pencemaran udara berupa emisi gas dari proses pembakaran.

A. Perhitungan Penurunan Beban Emisi

Perhitungan penurunan beban emisi program pengaturan coal to air ratio dapat diperoleh dengan cara mengalikan nilai efisiensi energi program dengan nilai factor emisi berdasarkan data referensi dari IPCC 2006, Corinair, dan IEA 1992a.

Contoh perhitungan tahun 2015 :

$$\text{Emisi} = \sum \text{Eff} \times \text{Faktor Emisi}$$

$$\text{Emisi GRK} = \text{Emisi CO}_2 + \text{Emisi CH}_4 + \text{Emisi N}_2\text{O}$$

$$= (\sum \text{Eff} \times \text{Faktor emisi CO}_2) + (\sum \text{Eff} \times \text{Faktor emisi CH}_4) + (\sum \text{Eff} \times \text{Faktor emisi N}_2\text{O})$$

$$= (176,08 \text{ TJ} \times 101.000 \text{ kg/TJ}) + (176,08 \text{ TJ} \times 10 \text{ kg/TJ}) + (176,08 \text{ TJ} \times 1,5 \text{ kg/TJ})$$

$$= 17.903,02 \text{ Ton CO}_2\text{eq}$$

$$\text{Emisi Konvensional SO}_2 = \sum \text{Eff} \times \text{Faktor Emisi SO}_2$$

$$= 176,08 \text{ TJ} \times 645 \text{ g/GJ}$$

$$= 113,57 \text{ Ton}$$

$$\text{Emisi Konvensional NO}_x = \sum \text{Eff} \times \text{Faktor Emisi NO}_x$$

$$= 176,08 \text{ TJ} \times 540 \text{ g/GJ}$$

$$= 95,08 \text{ Ton}$$

$$\text{Emisi Konvensional Partikulat} = \sum \text{Eff} \times \text{Faktor Emisi (Partikulat)}$$

$$= 176,08 \text{ TJ} \times 1,60 \text{ g/GJ}$$

$$= 16,03 \text{ Ton}$$

Rekap hasil Perhitungan penurunan beban emisi konvensional dan GRK ditampilkan pada Tabel 4.46 dan Tabel 4.47

Tabel 4.47 Penurunan Beban Emisi Konvensional Program Pengaturan *Coal to Air Ratio*

Tahun	BAHAN BAKAR	Energy consumption			Sox Emission Factor		NOx Emission Factor		TSP Emission Factor	
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
		Consumption	Conversion Factor ^(b)	Consumption	Sox Emission Factor	Sox Emissions	NOx Emission Factor	NOx Emissions	TSP Emission Factor	TSP Emissions
		TON	TJ/ton	(TJ)	(Ton/TJ)	(Ton)	(Ton/TJ)	(Ton)	(Kg/Ton)	(Ton)
				C=A*B		E=C*D		G=C*F		I=A*H
2015	BB	10.020,08	0,017573	176,08	0,65	113,57	0,54	95,08	1,60	16,03
2016	BB	10.364,59	0,017573	182,13	0,65	117,48	0,54	98,35	1,60	16,58
2017	BB	19.647,36	0,017573	345,26	0,65	222,69	0,54	186,44	1,60	31,44
2018	BB	12.810,34	0,017573	225,11	0,65	145,20	0,54	121,56	1,60	20,50
2019	BB	12.478,46	0,017573	219,28	0,65	141,44	0,54	118,41	1,60	19,97
2020	BB	13.306,42	0,017573	233,83	0,65	150,82	0,54	47,95	1,60	8,09

Tabel 4.48 Penurunan Beban Emisi GRK Program Pengaturan *Coal to Air Ratio*

Tahun	BAHAN BAKAR	Energy consumption			CO ₂		CH ₄			N ₂ O			L	M		
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K				
		Consumption	Conversion Factor ^(b)	Consumption	CO ₂ Emission Factor	CO ₂ Emissions	CH ₄ Emission Factor	CH ₄ Emissions		N ₂ O Emission Factor	N ₂ Oemissions				CO ₂ Ekivalen (Gg CO ₂ e)	CO ₂ Ekivalen (Ton CO ₂ e)
		TON	TJ/ton	(TJ)	(kg CO ₂ /TJ)	(Gg CO ₂)	(kg CH ₄ /TJ)	(Gg CH ₄)	(Gg CO ₂ e)	(kg N ₂ O /TJ)	(Gg N ₂ O)	(Gg CO ₂ e)				
		C=A*B		E=C*D/10⁶		G=C*F/10⁶	H=GWP*G		I=C*H/10⁶	K=GWP*J	L=E+H+K					
2015	BB	10.020,08	0.017573	176,08	101.000	17,78	10	0	0,04	1,50	0,000264	0,08	17,90	17.903,02		
2016	BB	10.364,59	0.017573	182,13	101.000	18,40	10	0	0,04	1,50	0,000273	0,08	18,52	18.518,57		
2017	BB	19.647,36	0.017573	345,26	101.000	34,87	100	0	0,07	1,50	0,000518	0,16	35,10	35.104,22		
2018	BB	13.090,8	0.017573	230,04	101.000	23,23	10	0	0,05	1,50	0,000345	0,11	23,39	23.389,52		
2019	BB	12.479,42	0.017573	219,30	101.000	22,15	10	0	0,05	1,50	0,000329	0,10	22,30	22.296,94		
2020	BB	13.306,42	0.017573	233,83	101.000	23,62	10	0	0,05	1,50	0,000351	0,11	23,77	23.774,77		

B. Perhitungan Aspek Finansial

Program pengaturan *coal to air ratio* tidak memiliki unsur biaya investasi karena berupa prosedur teknis yang dilakukan oleh operator boiler. Implementasi program ini menghasilkan penghematan finansial yang dihitung dari data pengurangan beban emisi dikali dengan harga jual CO₂, sebagai berikut.

Diketahui :

Harga CO₂/ton : EUR 60/Ton berdasarkan Effective Carbon Rates 2021 OECD

Kurs Rupiah terhadap dolar : Rp 17.115,02

Harga CO₂/ton dalam Rupiah : Rp 1.026.901,20

(sumber : <https://www.oecd.org/tax/tax-policy>)

Perhitungan :

Penghematan finansial = Pengurangan beban emisi CO₂ x Harga CO₂/ton

Penghematan pada tahun 2015 = 17.903,02 ton CO₂ eq x Rp 1.026.901,20
= Rp 1.043.144.525

Hasil perhitungan penghematan finansial dari implementasi program pengaturan *coal to air ratio* tahun 2015 – 2020 ditampilkan pada Tabel 4.49

Tabel 4.49 Penghematan Finansial Program Pengaturan *Coal to Air Ratio*

No	Tahun	Pengurangan Beban Emisi (ton CO ₂ eq)	Harga CO ₂	Penghematan
		A	B	C = A x B
1	2015	17.903,02	1.043.144.525	18.384.632.492,59
2	2016	18.518,57	1.043.144.525	19.016.736.842,2
3	2017	35.104,22	1.043.144.525	36.048.567.822,56
4	2018	23.389,52	1.043.144.525	24.018.721.254,53
5	2019	22.296,94	1.043.144.525	22.896.759.332,5
6	2020	23.744,77	1.043.144.525	24.414.337.711,26

Setelah dilakukan perhitungan pada 3 alternatif program pengurangan pencemaran udara, selanjutnya rekap hasil absolut pengurangan pencemaran udara dan penghematan finansial ditampilkan pada Tabel 4.50 s/d Tabel 4.53 berikut.

Tabel 4.50 Hasil Pengurangan Pencemaran Udara Emisi Gas Rumah Kaca

No	Program	Hasil Absolut					Satuan	Total Hasil (Ton CO ₂ eq)
		2016	2017	2018	2019	2020		
		Hasil (Ton CO ₂ eq)	Hasil (Ton CO ₂ eq)	Hasil (Ton CO ₂ eq)	Hasil (Ton CO ₂ eq)	Hasil (Ton CO ₂ eq)		
PADA PROSES PRODUKSI								
1	Tiny Oil Burner	4.821,57	4.869,17	3.741,68	4.680,13	5.011,19	Ton CO ₂ e	23,385.10
2	Perubahan Pola Operasi LFO Pump	-	-	-	207.68	108.02	Ton CO ₂ e	315.70
3	Pengaturan Coal to Air Ratio	18.518,57	35.104,22	23.389,52	22.296,94	23.774,77	Ton CO ₂ e	101,006.50
-	Total Hasil Absolut PPU GRK dari Proses Produksi	23,340.07	39,973.17	26,629.68	17,922.81	16,841.56		124,707.30

Tabel 4.51 Penghematan Program Pengurangan Pencemaran Udara Emisi Gas Rumah Kaca

No	Program	Hasil Absolut					Penghematan (Rp)
		2016	2017	2018	2019	2020	
		Penghematan (Rp)	Penghematan (Rp)	Penghematan (Rp)	Penghematan (Rp)	Penghematan (Rp)	
PADA PROSES PRODUKSI							
1	Tiny Oil Burner	5.017.011.097	5.066.534.911	3.893.343.131	4.869.835.231	5.145.996.060	23.992.720.430
2	Perubahan Pola Operasi LFO Pump	-	-	-	290.624.064	292.281.680	582.905.744
3	Pengaturan Coal to Air Ratio	19.016.736.842	36.048.567.822	24.018.721.254	22.896.759.332	24.414.337.711	126.399.122.961
-	Total Hasil Absolut PPU GRK dari Proses Produksi	24.033.747.939	41.115.102.733	27.912.064.385	28.057.236.627	29.852.615.451	150.974.749.135

Tabel 4.52 Data Pengurangan Pencemaran Udara Emisi Gas Konvensional

No	Program	Polutan	Hasil Absolut					Satuan	Total Polutan
			2016	2017	2018	2019	2020*		
			Hasil (Ton polutan)	Hasil (Ton polutan)	Hasil (Ton polutan)	Hasil (Ton polutan)	Hasil (Ton polutan)		
PADA PROSES PRODUKSI									
1	Tiny Oil Boiler	SO ₂	90.47	91.36	70.2	87.81	104.88	Ton Polutan	445
		NO _x	11.67	11.79	9.06	11.33	12.73		57
		Partikulat	-	-	-	-	-		-
2	Perubahan Pola Operasi LFO Pump	SO ₂	-	-	-	1.32	0.69	Ton Polutan	2
		NO _x	-	-	-	1.1	0.57		2
		Partikulat	-	-	-	-	-		-
3	Pengaturan Coal to Air Ratio	SO ₂	117.48	222.69	145.2	141.44	72.71	Ton Polutan	700
		NO _x	98.35	186.44	121.56	118.41	60.87		586
		Partikulat	16.58	31.44	20.5	19.97	10.36		99
-	Total Hasil Absolut PPU Konvensional dari Proses Produksi	SO ₂	207.95	314.05	215.40	230.57	178.28	Ton Polutan	1,889
		NO _x	110.02	198.23	130.62	130.84	74.17		
		Partikulat	16.58	31.44	20.50	19.97	10.36		

Keterangan: *Data hingga Juni 2020

Tabel 4.53 Data Penghematan Program Pengurangan Pencemaran Udara Emisi Gas Konvensional

No	Program	Polutan						Penghematan (Rp)
			2016	2017	2018	2019	2020*	
			Penghematan (Rp)	Penghematan (Rp)	Penghematan (Rp)	Penghematan (Rp)	Penghematan (Rp)	
PADA PROSES PRODUKSI								
1	Tiny Oil Boiler	SO ₂	280,935,780	283,708,947	218,014,146	272,694,426	307,212,132	1,362,565,431
		NOx						
		Partikulat						
2	Perubahan Pola Operasi LFO Pump	SO ₂	-	-	-	12,100,574	6,293,961	18,394,535
		NOx						
		Partikulat						
3	Pengaturan Coal to Air Ratio	SO ₂	1,079,010,128	2,045,396,647	1,333,625,338	759,541,106	667,800,702	5,885,373,921
		NOx						
		Partikulat						
-	Total Hasil Absolut PPU Konvensional dari Proses Produksi	SO ₂	1,359,945,908	2,329,105,594	1,551,639,484	1,044,336,106	981,306,795	7,266,333,887
		NOx						
		Partikulat						

Keterangan: *Data hingga Juni 2020

Perbandingan Antara Hasil Perhitungan Program Pengurangan Pencemaran Udara dengan Rekomendasi AHP

Perbandingan hasil perhitungan program pengurangan pencemaran udara dengan hasil rekomendasi AHP dilakukan untuk menganalisis konsistensi antara pendapat *experts* dengan perhitungan program program pengurangan pencemaran udara yang telah diimplementasikan di perusahaan. Hasil perbandingan ditampilkan pada Tabel 4.54 berikut.

Tabel 4.54 Perbandingan Konsistensi Hasil AHP dengan Program Pengurangan Pencemaran Udara

No	Urutan Program Berdasarkan Perhitungan Efisiensi Energi dan Aspek Finansial	Prioritas Program Menggunakan <i>Analytical Hierarchy Process</i> (AHP)
1	Pengaturan Coal to Air ratio	Pengaturan Coal to Air ratio
2	Tiny Oil Burner	Tiny Oil Burner
3	Perubahan Pola Operasi LFO Pump	Perubahan Pola Operasi LFO Pump

Perbandingan hasil pada Tabel 4.49 dan Tabel 4.53 menunjukkan bahwa terdapat kesamaan dengan rekomendasi prioritas program unggulan pengurangan pencemaran udara dengan menggunakan AHP. Sehingga dapat dinyatakan bahwa hasil AHP telah konsisten dengan hasil perhitungan program pengurangan pencemaran udara di PT PJB UBJOM Paiton.

4.4 Sensitivity check Program Unggulan Pengelolaan Lingkungan

Setelah mendapatkan rekomendasi prioritas program unggulan efisiensi energi dan pengurangan pencemaran udara, selanjutnya dilakukan *sensitivity check* untuk menghitung besar pengurangan dampak lingkungan setelah imlementasi program. Pengurangan dampak lingkungan dihitung dengan membandingkan antara besar dampak lingkungan sebelum implementasi program pada tahun 2020 (lihat Tabel 4.11) dengan besar dampak lingkungan setelah implementasi program tahun 2021.

Sensitivity check dilakukan pada program Pengaturan *Coal to Air Ratio* dan Perubahan Pola Operasi LFO *Pump* dengan dampak lingkungan yang dianalisis yaitu *global warming* dan *acidification*. Pengujian ini menggunakan *software* Simapro dengan metode ReCiPe 2016 Midpoint (H). Hasil *sensitivity check* ditampilkan pada Tabel 4.55 dan Tabel 4.56 berikut.

1. Program Pengaturan *Coal to Air Ratio*

Tabel 4.55 *Sensitivity Check* Program Pengaturan *Coal to Air Ratio*

	Tahun	Input batubara (ton)	Global warming (kg CO ₂ eq)	Acidification (kg SO ₂ eq)
Basis	2020	2.679.864,22	1,049575	0,003672
Setelah implementasi program	2021	2.347.985,22	0,293729	0,001266
selisih besaran dampak			0,755846	0,002406
% pengurangan dampak			72,01%	65,52%

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 4.55 diketahui bahwa dengan implementasi program Pengaturan *Coal to Air Ratio* terdapat pengurangan input penggunaan batubara untuk proses pembakaran yaitu dari 2.679.864,22 ton pada tahun 2020 menjadi 2.347.985,22 ton pada tahun 2021. Hal tersebut berpengaruh pada besaran dampak lingkungan yang ditimbulkan, yaitu *global warming* dari 1,049575 kg CO₂ eq pada tahun 2020 (Tabel 4.11) menjadi 0,293729 kg CO₂ eq pada tahun 2021. Serta dampak *acidification* dari 0,003672 kg SO₂ eq (Tabel 4.11) pada tahun 2020 menjadi 0,001266 kg SO₂ eq pada tahun 2021. Disimpulkan bahwa dengan implementasi program Pengaturan *Coal to Air Ratio* terjadi pengurangan dampak *global warming* sebesar 71,01% (0,755846 kg CO₂ eq) dan pengurangan dampak *Acidification* sebesar 65,52% (0,002406 kg SO₂ eq) .

2. Program Perubahan Pola Operasi LFO *Pump*

Tabel 4.56 *Sensitivity Check* Program Perubahan Pola Operasi LFO *Pump*

	Tahun	Input listrik (kWh)	Global warming (kg CO ₂ eq)	Acidification (kg SO ₂ eq)
Basis	2020	119.181.307,8	1,049575	0,003672
Setelah implementasi program	2021	118.538.331,8	0,293684	0,001266
selisih besaran dampak			0,755891	0,002406
% pengurangan dampak			72,02 %	65,53%

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 4.56 diketahui bahwa dengan implementasi program Perubahan Pola Operasi LFO *Pump* terdapat pengurangan pada input penggunaan listrik untuk pengoperasian LFO pump yaitu dari 119.181.307,8 kWh pada tahun 2020 menjadi 118.538.331,8 kWh pada tahun 2021. Hal tersebut berpengaruh pada besaran dampak lingkungan yang ditimbulkan, yaitu *global warming* dari 1,049575 kg CO₂ eq pada tahun 2020 menjadi 0,293684 kg CO₂ eq pada tahun 2021. Serta dampak *acidification* dari 0,003672 kg SO₂ eq pada tahun 2020 menjadi 0,001266 kg SO₂ eq pada tahun 2021. Disimpulkan bahwa dengan implementasi program Perubahan Pola Operasi LFO Pump terjadi pengurangan dampak global warming sebesar 72,02 % (0,755891 kg CO₂ eq) dan pengurangan dampak Acidification sebesar 65,53% (0,002406 kg SO₂ eq) .

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Berdasarkan analisis LCA dengan metode CML-IA Baseline dan ReCiPe 2016 Midpoint (H), diketahui bahwa dampak lingkungan yang ditimbulkan dari proses produksi listrik PT PJB UBJOM Paiton dengan acuan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 1 tahun 2021 terdiri dari :

• 4 dampak primer

1. *Global Warming Potential*, sebesar 1,049575 kg CO₂ eq
2. Potensi penipisan ozon, sebesar 1,73E-07 kg CFC11 eq
3. Potensi hujan asam, sebesar 0,004522 kg SO₂ eq
4. Potensi eutrofikasi, sebesar 0,000225 kg PO₄ eq

• 4 dampak dari 7 dampak sekunder

1. *Photochemical oxidation*, sebesar 0,000147 kg C₂H₄ eq
2. Potensi terjadi penurunan abiotik, yaitu *abiotic depletion (fossil fuel)*, sebesar 11,6246 MJ
3. Potensi terjadi penurunan biotik, meliputi :
 - *Terrestrial ecotoxicity*, sebesar 4,45E-25 kg 1,4-DCB
 - *Freshwater ecotoxicity*, sebesar 7,13E-09 kg 1,4-DCB
 - *Marine ecotoxicity*, sebesar 8,50E-09 kg 1,4-DCB
4. *Toxicity*, sebesar 0,002329 kg 1,4-DB eq

Unit proses yang memberikan kontribusi dampak lingkungan yang paling dominan dari proses produksi listrik per 1 kWh listrik adalah boiler dan dampak terbesar pada sistem boiler berdasarkan metode CML-IA Baseline yaitu *abiotic depletion fossil fuel* sebesar 11,62466 MJ dan berdasarkan metode ReCiPe 2016 Midpoint yaitu dampak *global warming* sebesar 1.049575 kg CO₂ dan dampak *terrestrial acidification* sebesar 0,003672 kg SO₂ eq.

2. Berdasarkan analisis dengan metode AHP, dapat disimpulkan bahwa :
- a. Penentuan keputusan implementasi program efisiensi energi dipengaruhi aspek lingkungan sebesar 68,8%, aspek finansial 24,2% dan aspek teknis 7%. Rekomendasi program efisiensi energi yang dapat mengurangi dampak lingkungan yaitu :
 1. Pengaturan Coal to Air Ratio
 2. Cleaning Tube Boiler
 3. Penggantian Elemen Air Preheater
 4. Tiny Oil Burner
 - b. Penentuan keputusan implementasi program pengurangan pencemaran udara dipengaruhi aspek lingkungan sebesar 67,4%, aspek finansial 17,9% dan aspek teknis 14,7%. Rekomendasi program pengurangan pencemaran udara yang dapat mengurangi dampak lingkungan yaitu:
 1. Pengaturan coal to air ratio
 2. Tiny Oil Burner
 3. Perubahan Pola Operasi LFO Pump
 - c. Implementasi program pengaturan *coal to air ratio* berpengaruh pada pengurangan dampak *global warming* sebesar 71,01% (0,755846 kg CO₂ eq) dan pengurangan dampak *acidification* sebesar 65,52% (0,002406 kg SO₂ eq). Serta implementasi program perubahan pola operasi LFO *pump* berpengaruh pada pengurangan dampak *global warming* sebesar 72,02% (0,755891 kg CO₂ eq) dan pengurangan dampak *acidification* sebesar 65,53% (0,002406 kg SO₂ eq).

5.2 Saran

Saran dari kajian ini adalah:

1. Perlu dilakukan kajian LCA dengan memperluas ruang lingkup (*scope boundary*) agar dapat dilakukan analisis LCA mulai dari penambangan dan pengangkutan batu bara dan pada beberapa unit proses diantaranya yaitu *coal*

handling facility (CHF), water treatment plant (WTP), waste water treatment plant (WWTP), hingga ke transmisi sehingga mendapatkan hasil kajian yang lebih komprehensif dan dapat melengkapi rekomendasi program untuk mengurangi dampak terhadap lingkungan.

2. Perusahaan memiliki potensi untuk pengurangan dampak *abiotic depletion fossil fuel* dan *global warming* yaitu dengan implementasi program :
 - a. *co-firing* PLTU yaitu penambahan biomassa sebagai bahan bakar pengganti batu bara ke dalam boiler untuk mengurangi emisi yang ditimbulkan dari pembakaran batu bara.
 - b. Penggunaan Biodiesel B30 yaitu pencampuran 30% biodiesel dengan 70% bahan bakar minyak solar yang digunakan untuk mengurangi emisi yang ditimbulkan dari pembakaran HSD.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM C618. 2014. Standar Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- Amar, S. 2014. **Sistem Pendukung Keputusan Pengukur Kualitas Software Dengan Menerapkan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP)**. Tugas Akhir Universitas Dian Nuswantoro. Semarang.
- Bagaswara M.E.A, dan Hadi, Y. 2017. Analisis dan Rekayasa Proses Produksi untuk Mengendalikan Environmental Impact Menggunakan Metode LCA. *Jurnal Metris*. 18 : 95-104.
- Bayer, C., Gambel, M., Gentry, R., dan Joshi, S. 2010. *AIA Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice*. The American Institute of Architects. New York.
- Bruijn, H.D., Duin, V.R., dan Huijbregts, M.A.J. 2002. *Handbook on Life Cycle Assessment*. Kluwer Academic Publisher: New York.
- Budianto, Wakhyono. 2008. **Analisis Hubungan Kualitas Udara Ambien dengan Kejadian Penyakit ISPA**. Depok: Universitas Indonesia.
- Ciencewicki, J., Jaspers, I. 2007. Air pollution and respiratory viral infection. *Inhalation Toxicology*. Nov;19(14):1135-46.
- Darko, A., Chan, A. P. C., Ameyaw, E. E., Owusu, E. K., Parn, E., dan Edwards, D. J. (2018). "Review of Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) in Contruction." *Intrnational Journal of Construction Management* 19 (5): 1–17.
- EPA. 2006. *Life Cycle Assesment: Principles and Practice*.
- Haas, G., Geier,U.,Frieben,B., dan Kopke,U. 2005. **Estimation of Environmental Impact of Conversion to Organis Agriculture in Hamburg Using The Life-Cycle-Assessment Method**. University of Bonn. Germany.
- Hauschild, M.Z., Rosenbaum., R.K., dan Olsen., S.I. 2018. *Life Cycle Assessment Theory and Practice*. Springer. Switzerland.
- Hermawan., Marzuki, P. F., Abduh, M., dan Driejana, R. 2013. **Peran Life Cycle Analysis (Lca) Pada Material Konstruksi Dalam Upaya Menurunkan**

- Dampak Emisi Karbon Dioksida Pada Efek Gas Rumah Kaca (031K).**
Konferensi Nasional Teknik Sipil 7 (KoNTekS 7).
- Hermon, D. 2018. Mitigasi Perubahan Iklim. Padang: Raja Grafindo Persada.
- Karlinasari, L., Hanafi, J., dan Damanik, M., 2021. **Life Cycle Assessment (LCA) Cradle to Gate Produksi Batu Bara di PT XYZ Kalimantan Selatan.** IPB. Bogor.
- Karunia, Dwicahyo. 2019. **Pengaruh Aktivitas Manusia Terhadap Perubahan Kualitas Udara.** Jakarta: Universitas Trisakti.
- Kautzar, Galuh Zuhria, *et al.* 2015. **Analisis Dampak Lingkungan Pada Aktivitas Supply Chain Produk Kulit Menggunakan Metode LCA dan ANP.** Malang: Universitas Brawijaya.
- Latayansa, L., Widodo, S., Anshariah. 2017. Analisis Emisi SO₂ Hasil Pembakaran Batubara pada PLTU Jeneponto. *Jurnal Geomine*. Vol.5 No 2.
- Kloepffer, W. 1997. Life Cycle Assessment from the Beginning to the Current State. **Environmental Science and Pollution Research**. 4(4), hal 223-228.
- Klöpffer W, Grahl B. 2014. **Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice.** Weinheim (DE): WileyVCH Verlag GmbH.
- Lestari, D., R., dan Yudihanto, D. 2013. Pengolahan Lumpur Tinja Pada Sludge Drying Bed IPLT Keputih Menjadi Bahan Bakar Alternatif dengan Metode Biodrying. 2(2), hal 133137.
- Menoufi, K.A.I. 2011. *Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment Methodologies: A State of the Art.* Universitat de Lleida. Spanyol.
- Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral. 2018. Pedoman Penghitungan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca. Indonesia.
- Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2019. **Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 15 Tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal.** Indonesia.

- Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2021. **Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 22 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Lampiran IV.** Indonesia.
- Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2019. Berdasarkan Izin Pembuangan Air Limbah ke Laut PT PJB UBJOM Paiton No. SK.434/Menlhk/Setjen/PKL.1/7/2019. Indonesia
- Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2021. **Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 1** Tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup. Indonesia.
- Naganathan, S., Mohamed, A. Y. O., & Mustapha, K. N. (2015). Performance of Bricks Made Using Fly Ash and Bottom Ash. *Construction and Building Materials*, 96, 576– 580.doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.068
- Pre. 2014. All About SimaPro 8. <URL : <https://www.presustainability.com/>
- Pujadi. 2013. Analisis Sustainability Packaging dengan Metode Life Cycle Assessment (LCA).
- Putri, P., H. 2017. Life Cycle Assessment (LCA) Emisi Pada Proses Produksi Bahan Bakar Minyak (BBM) Jenis Bensin Dengan Pendekatan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP). Tugas Akhir Departemen Teknik Lingkungan FTSLK ITS.
- Retnoningsih, D. 2012. Pemanfaatan Aplikasi Expert Choice sebagai Alat Bantu dalam Pengambilan Keputusan (Studi Kasus : Pemilihan Program Studi di Universitas Sahid Surakarta). Surakarta. Program Studi Teknik Informatika. Universitas Sahid Surakarta.
- Riebeek, H. 2010. Global Warming. Earthobservatory.nasa.gov
- Roy, P.O., Deschenes, L., dan Margni, M. 2012. Life Cycle Impact Assessment of Terrestrial Acidification: Modeling Spatially Explicit Soil Sensitivity at the Global Scale. *Environmental Science and Technology*. 46(15): 8270-8.

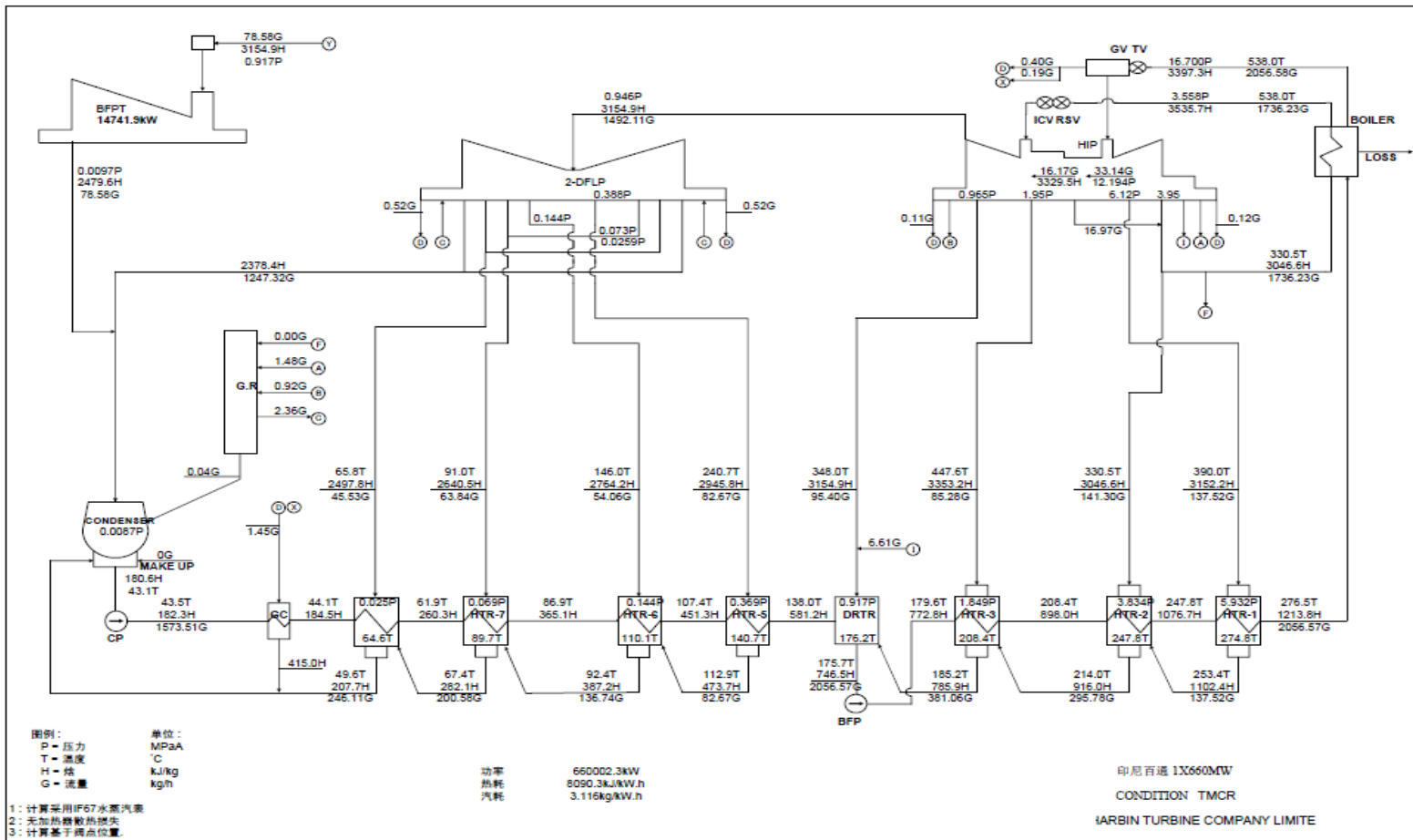
- Saaty, T. L. (1988). "Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process." Vol. 48.
- Saaty, Thomas L. 2008. *Decision Making with The Analytic Hierarchy Process*. International Journal Services Sciences, Vol. 1 No. 1, 83-98.
- Sitepu, H. 2011. **Model Pengembangan Rusunawa Ramah Lingkungan Melalui Optimasi Pelaksanaan Green Construction di Batam**. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- SNI ISO 14040. 2016. Manajemen Lingkungan - Penilaian Daur Hidup – Prinsip dan Kerangka Kerja. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI ISO 14044. 2017. Manajemen Lingkungan - Penilaian Daur Hidup – Persyaratan dan Panduan. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Sonnemann, G., dan Margni, M. 2015. *Life Cycle Management*. Springer. Netherlands
- Sulistiyono. 2010. "Pemanasan Global (Global Warming) dan Hubungannya dengan Penggunaan Bahan Bakar Fosil. **Forum Teknologi**, Vol. 02 No. 02.
- Tominanto. 2012. **Sistem Pendukung Keputusan Dengan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP) Untuk Penentuan Prestasi Kinerja Dokter Pada RSUD Sukoharjo**. APIKES Citra Medika Surakarta. Surakarta.
- Torres, M. A. O., Kallas, Z., Herrera, S. I. O., dan Guesmi, B. (2019). "Is Technical Efficiency Affected by Farmers' Preference for Mitigation and Adaptation Actions against Climate Change? A Case Study in Northwest Mexico Miguel." *Sustainability* 11 (3291): 1–15.
- Triana, V. 2008. Pemanasan Global. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*. 2 (2).
- Utina, Ramli. 2008. **Pemanasan Global: Dampak dan Upaya Meminimalisasinya**. Gorontalo: Fakultas MIPA, Universitas Negeri Gorontalo.
- Valentina, Novia. 2011. **Life Cycle Anaysis dan Ecological Footprint sebagai Model Pendukung Pembangunan Berkelanjutan**. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.

- Yancadianti, Khairunnisa Hanan. 2015. *Analisa Pemilihan GreenSupplier dengan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP) Pada PT X*. Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro. Semarang.
- Zein, Ahmad L. El dan Nour A. Chehayeb. 2015. "The Effect of Greenhouse Gases on Earth's Temperature". **International Journal of Environmental Monitoring and Analysis**, 3 (2): 74-79.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 1

HEAT BALANCE DIAGRAM PLTU PAITON 9







LAMPIRAN 2

TAMPILAN DATA MONITORING HARIAN CONTINUOUS EMISSION MONITORING SYSTEM

PROCESS	SYSTEM	HISTORY	SAMPLE FLOW SCH.	PARAMETER	SHUTDOWN
7/14/2021 1:39:34 PM					
CONTINUOUS EMISSION MONITORING SYSTEM					
PT. PEMBANGKITAN JAWA BALI UBJ O&M PLTU PAITON					
SO2	479.0	mg/m3	SO2 @25°C	446.0	mg/m3
NOx	248.0	mg/m3	NOx @25°C	231.0	mg/m3
CO	24.0	mg/m3	CO @25°C	22.0	mg/m3
DUST	27.0	mg/m3			
OPACITY	33.0	%			
OXIGEN	5.0	%			
SO2 - Corr	390.0	mg/Nm3			
NOx - Corr	202.0	mg/Nm3			
CO - Corr	19.0	mg/Nm3			
DUST - Corr	24.0	mg/Nm3			
GAS FLOW	947.0	m3/s			
TEMPERATURE	162.0	°C			
AUTO PURGE RUN DOWN		1.0 H	50.0 M		
GAS FLOW					

LAMPIRAN 3

KALIBRASI GAS ANALYZER PADA CEMS

	PT. PJB UNIT BISNIS JASA OPERASI DAN PEMELIHARAAN PLTU INTEON		No Dokumen : FM - C - 0.8.08 - 001		
	PJB INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM		No. Revisi : 00		
	FORM TEST DAN KALIBRASI		Tanggal Terbit :		
	PEMELIHARAAN		Revisi :		
No. WO	238127				
Tag name	CONTINUOUS EMISSION MONITORING SYSTEM				
Deskripsi	Kalibrasi SO ₂ , NO, dan CO				
Range Kalibrasi		Tipe Peralatan	GAS ANALYZER		
Set 1 / Reset 1		Merk	SIEMENS		
Set 2 / Reset 2		Model / Part No.	ULTRAMAT 23		
Action 1 / Action 2		Range			
Kontak 1 / Kontak 2		Lokasi			
KALIBRASI PERALATAN ANALOG					
INPUT		SEBELUM KALIBRASI		SESUDAH KALIBRASI	
Standart Gas (mg/m ³)	GAS	INDIKATOR 1	INDIKATOR 2	INDIKATOR 1	INDIKATOR 2
		(Local)	(CCR)	(Local)	(CCR)
817.55	SO ₂		809 mg/m ³		817 mg/m ³
797.18	NO		792 mg/m ³		797 mg/m ³
410.26	CO		411 mg/m ³		410 mg/m ³
Akurasi :		Maksimal Error :			
RANGKAIAN TEST			CATATAN		
Gas Standart yang digunakan :					
NO : 797.18 mg/m ³					
SO ₂ : 817.55 mg/m ³					
CO : 410.26 mg/m ³					
Di uji oleh :			Mengetahui :		
Tgl Pengujian : 30 Juli 2020			Spy Senior Har & C		
					
ARDI PANDU		ARDI PRANATA		(JOKO PURWANTO)	

LAMPIRAN 4

HASIL UJI LABORATORIUM EMISI BOILER



LAPORAN HASIL PENGUJIAN

Nomor : LPUP07322

Nama pelanggan : PT. PJB UBJOM PAITON
 Alamat : Jl. Raya Surabaya-Situbondo, Paiton Km. 141 Paiton-Probolinggo
 No. identifikasi contoh : 07322-15
 Uraian contoh : Emisi
 Sumber emisi : Boiler PLTU Unit 9
 Dimensi cerobong :
 - Diameter cerobong : 7,5 m
 - Tinggi cerobong : 275 m
 - Jumlah lubang sampling : 4
 - Posisi lubang sampling : 2D - 8D
 Bahan bakar : Batubara
 Koordinat : S 07° 42' 35,95" E 113° 34' 13,53"
 Metode pengambilan contoh : KEP. 205/BAPEDAL/07/1996
 Tanggal pengambilan : 21 Juli 2020
 Tanggal diterima di lab. : 03 Agustus 2020
 Tanggal pengujian : 03 Agustus 2020 sampai 12 Agustus 2020

Hasil Pengujian

NO.	PARAMETER	SATUAN	KADAR MAKSIMUM ¹⁾	HASIL			METODE
				TERUKUR	TERKOREKSI 7%	TERKOREKSI 8%	
1	Sulfur Dioksida (SO ₂) ²⁾	mg/m ³	550	17	26	-	LP K.24.01.01 (Combustion gas analyzer)
2	nitrogen Dioksida (NO ₂) dinyatakan sebagai NO _x ²⁾	mg/m ³	550	157	286	-	LP K.24.01.01 (Combustion gas analyzer)
3	Partikulat (PM) ²⁾	mg/m ³	130	1	1	0	SN 19-1117 12-2005
4	Merkuri (Hg)	mg/m ³	0,03	<0,01	<0,01	-	SN 1111 20-2009
5	Oksigen ²⁾	%	-	<0,1	-	-	SN 19-1117 11-2005
6	Karbon Dioksida (CO) ²⁾	%	-	9,0	12,4	-	LP K.24.01.01 (Combustion gas analyzer)
7	Karbon Monoksida (CO) ²⁾	mg/m ³	-	56	91	-	LP K.24.01.01 (Combustion gas analyzer)
8	Efisiensi Pembakaran (EP)	%	-	92,94	92,94	-	Perhitungan
9	Velocity ²⁾	m/detik	-	<7,60	-	-	LP K.21.01.77 (Hot tube anemometer)
10	Oksigen ²⁾	%	-	11,9	-	-	LP K.24.01.01 (Combustion gas analyzer)

Keterangan: 1) PERMENDIK No. 15/MEN/HR/SET/ENKUM/14/2019, Lampiran I A - Bahan Bakar Batubara
 2) Semua parameter dikoreksi dengan O₂ 7% untuk batubara, 8% untuk keadaan kering
 3) PERGUB Jawa Timur Nomor 10 Tahun 2009 Lampiran 1G Berbahaya Bahan Bakar Batubara
 - Konsentrasi partikulat dikoreksi sebesar 0% oksigen
 - Volume gas dalam keadaan standar (25 °C dan tekanan 1 atm)
 *) Parameter akreditasi oleh KAN No. LP-145-12N
 - Lihat hasil

Data Perhitungan
 - Efisiensi : 92,94 %

Jakarta, 13 Agustus 2020
 PT. UNILAB PERDANA

LAMPIRAN 5
HASIL UJI LABORATORIUM AIR

No. 28.21/PP
 Revisi: 1



PEMERINTAH PROVINSI JAWA TIMUR
DINAS LINGKUNGAN HIDUP
UNIT PELAKSANA TEKNIS LABORATORIUM LINGKUNGAN
 Jl. Wisata Menanggal 38 SURABAYA Telp. (031) 8541807 Fax. (031) 8530482

Sertifikat pengujian ini hanya berlaku untuk jenis dan kode contoh uji yang tertera serta tidak boleh dipergunakan lagi untuk keperluan lain tanpa persetujuan dari laboratorium

SERTIFIKAT HASIL PENGUJIAN
 NO : 660 / C2333/ 1116 / 2020

I. U M U M

1. Kode Laboratorium	1. ALN/III/2020/C2333
2. Kode Air Limbah Industri	1. P10 KI
3. Alamat	1. Probolinggo
4. Telp / Fax	1. -
5. Jenis Industri	1. PULU Batu Bara
6. Jenis Contoh Uji	1. Air Balung
7. Rentang Pengujian	1. 15-Agu-20 s.d. 26-Agu-20

II. DATA PENGIRIM CONTOH UJI

1. Nama Instansi	1. Dinas Lingkungan Hidup Kab. Probolinggo
2. Alamat	1. Jl. Raya Dringu No. 81 Probolinggo
3. Pengas Pengirim Contoh	1. M. SYAMSUD
4. Tanggal / Jam pengambilan	1. 13 Agustus 2020 / 10:21
5. Tanggal / Jam diterima Laboratorium	1. 13 Agustus 2020 / 14:30
6. Lokasi / Titik pengambilan contoh uji	1. Pondolin (Bekang)
7. Metode Pengambilan Contoh Uji	1. SNI 6986.59 - 2009
8. Koordinat	1. -
9. Data Lapangan	1. -

- Debit rata-rata limbah cair selama pemantauan : 2.646.802 M³/hari
- Produksi/Penggunaan bahan baku rata-rata selama bulan pemantauan : < 100/hari
- Suhu pada waktu pengambilan dengan bejana suhu 40°C : 35,0 °C
- pH pada waktu pengambilan : 8,68

III. HASIL PENGUJIAN

NO	PARAMETER	SATUAN	BAKU MUTU	MDL	HASIL UJI	ACUAN METODE	KETERANGAN
	Volume Limbah Cair per satuan produk	m ³ /ton produk	-	-	-	-	
1	Residual Cl ₂	mg/l	0,5	0,004 (*)	0,07	US EPA Method 650 / Revisi 1 Tahun 1995	

Catatan: *) Rentang Pengujian Terendah

IV. INTERPRETASI HASIL PENGUJIAN
 Kualitas limbah cair tersebut :
 Memenuhi Baku Mutu Izin Penerimaan Air Limbah ke Laut berdasarkan Kep. Men LHK RI No. SK 434/Men/04/Setjen/PR/ 1/7/2019





LAMPIRAN 6
KUESIONER PENELITIAN
ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

JUDUL THESIS:

EVALUASI PROGRAM UNGGULAN PENGELOLAAN LINGKUNGAN
PT PJB UBJ O&M PAITON DENGAN MENGGUNAKAN *LIFE CYCLE*
ANALYSIS (LHA) DAN *ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS* (AHP)

Survei ini dilakukan untuk memperoleh data penunjang program pasca sarjana Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Data-data dibutuhkan hanya untuk kepentingan studi, dan kami sanggup menjaga kerahasiaan setiap data yang anda berikan. Mohon kiranya kuisisioner ini diisi dengan keadaan yang sebenarnya

Oleh:

MAYA MAHARANI

NRP. 03211950030001

PROGRAM MAGISTER TEKNIK LINGKUNGAN

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN, DAN KEBUMIHAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

2021

**PETUNJUK PENGISIAN KUISIONER REKOMENDASI PROGRAM
UNGGULAN PENGELOLAAN LINGKUNGAN
DI PT PJB UBJ O&M PAITON**

Dalam penentuan rekomendasi program unggulan pengelolaan lingkungan terkait efisiensi energi dan pengurangan pencemar udara di PT PJB UBJ O&M Paiton, pendapat Bapak/Ibu yang lebih diutamakan. Bapak/Ibu dapat memberi penilaian terhadap masing-masing kriteria sesuai tingkat kepentingan dengan skala 1 sampai 9. Nilai dan definisi pendapat skala perbandingan dapat dilihat pada tabel sebagai berikut.

Intensitas	Keterangan
1	Kriteria/ Alternatif A sama penting dengan kriteria/alternatif B
3	A sedikit lebih penting dari B
5	A jelas lebih penting dari B
7	A sangat jelas lebih penting dari B
9	A mutlak lebih penting dari B
2,4,6,8	Apabila ragu-ragu antara dua nilai berdekatan

Contoh:

Dalam penilaian “prioritas penggunaan jenis masker di ruangan fasilitas umum dalam upaya pencegahan penyebaran virus covid 19”, bagaimana penilaian Bapak/Ibu berdasarkan kriteria jenis masker di bawah ini:

Masker kain	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Masker medis
----------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----------------

Cara menjawab :

- Pilih 1 opsi dan berikan tanda pada angka penilaian jawaban, opsi lainnya harus diisi "Tidak")

	✓	Cara menjawab benar								
	tidak	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Masker kain	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Masker Medis	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Masker kain	tidak	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Masker kain	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Masker Medis	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

X

Cara menjawab **salah**, karena AHP merupakan perbandingan berpasangan, sehingga dipilih salah satu saja dan yang lain dipilih "**tidak**"

Dari jawaban diatas berarti bahwa kriteria masker kain **jelas lebih penting** untuk digunakan di ruangan fasilitas umum dari pada kriteria masker medis.

A. Karakteristik Responden

1. Nama :
2. Instansi :
3. Jabatan :
4. Jenis Kelamin : Laki-laki/Perempuan
5. Usia :Tahun
6. Pengalaman dan lama bekerja:
 - a.
 - b.
7. Tingkat Pendidikan Terakhir:
 - a. D3
 - b. D4/S1
 - c. S2
 - d. S3
8. Apa saja kendala yang dihadapi dalam membuat kebijakan terkait efisiensi energi?
 - a.
 - b.
9. Apa saja kendala yang biasa dihadapi dalam membuat kebijakan terkait Pengurangan Pencemar Udara?
 - a.
 - b.
10. Apakah terdapat saran untuk meningkatkan implementasi program Efisiensi Energi di PT PJB UBJ O&M Paiton?
 - a.
 - b.

11. Apakah terdapat saran untuk meningkatkan implementasi program Pengurangan pencemar udara di PT PJB UBJ O&M Paiton?

- a.
- b.

B. Pertanyaan:

“Isilah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan memberikan tanda X pada salah satu kolom, dengan pertimbangan apa yang lebih diutamakan untuk menentukan program unggulan pengelolaan lingkungan terkait efisiensi energi di PT PJB UBJ O&M Paiton”

I. Program Efisiensi Energi

1. Dalam menentukan prioritas program efisiensi energi yang diimplementasikan di PT PJB UBJ O&M Paiton, bagaimana penilaian Bapak/Ibu berdasarkan kriteria-kriteria di bawah ini.

Biaya Operasional	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Kemudahan implementasi
Biaya Operasional	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Dampak Lingkungan
Kemudahan implementasi	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Dampak Lingkungan

2. Berdasarkan **kriteria biaya operasional**, program manakah yang lebih memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi energi di PT PJB UBJ O&M Paiton.

Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cleaning tube boiler
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater

Cleaning tube boiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Cleaning tube boiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater
Pengaturan coal to air ratio	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater

3. Berdasarkan **kriteria kemudahan implementasi**, program manakah yang lebih memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi energi di PT PJB UBJ O&M Paiton.

Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cleaning tube boiler
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater
Cleaning tube boiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Cleaning tube boiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater
Pengaturan coal to air ratio	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater

4. Berdasarkan **kriteria dampak lingkungan**, program manakah yang lebih memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi energi di PT PJB UBJ O&M Paiton.

Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cleaning tube boiler
-----------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----------------------

Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater
Cleaning tube boiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Cleaning tube boiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater
Pengaturan coal to air ratio	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater

II. Program Pengurangan Pencemar Udara

1. Dalam menentukan prioritas program pengurangan pencemar udara yang diimplementasikan di PT PJB UBJ O&M Paiton, bagaimana penilaian Bapak/Ibu berdasarkan kriteria-kriteria di bawah ini.

Biaya Operasional	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Kemudahan implementasi
Biaya Operasional	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Dampak Lingkungan
Kemudahan implementasi	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Dampak Lingkungan

2. Berdasarkan **kriteria biaya operasional**, implementasi program manakah yang lebih memberikan pengaruh signifikan terhadap pengurangan pencemar udara di PT PJB UBJ O&M Paiton.

Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Perubahan pola operasi LFO pump

Pengaturan coal to air ratio	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Perubahan pola operasi LFO pump
------------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---------------------------------

3. Berdasarkan **kriteria kemudahan implementasi**, implementasi program manakah yang lebih memberikan pengaruh signifikan terhadap pengurangan pencemar udara di PT PJB UBJ O&M Paiton.

Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Perubahan pola operasi LFO pump
Pengaturan coal to air ratio	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Perubahan pola operasi LFO pump

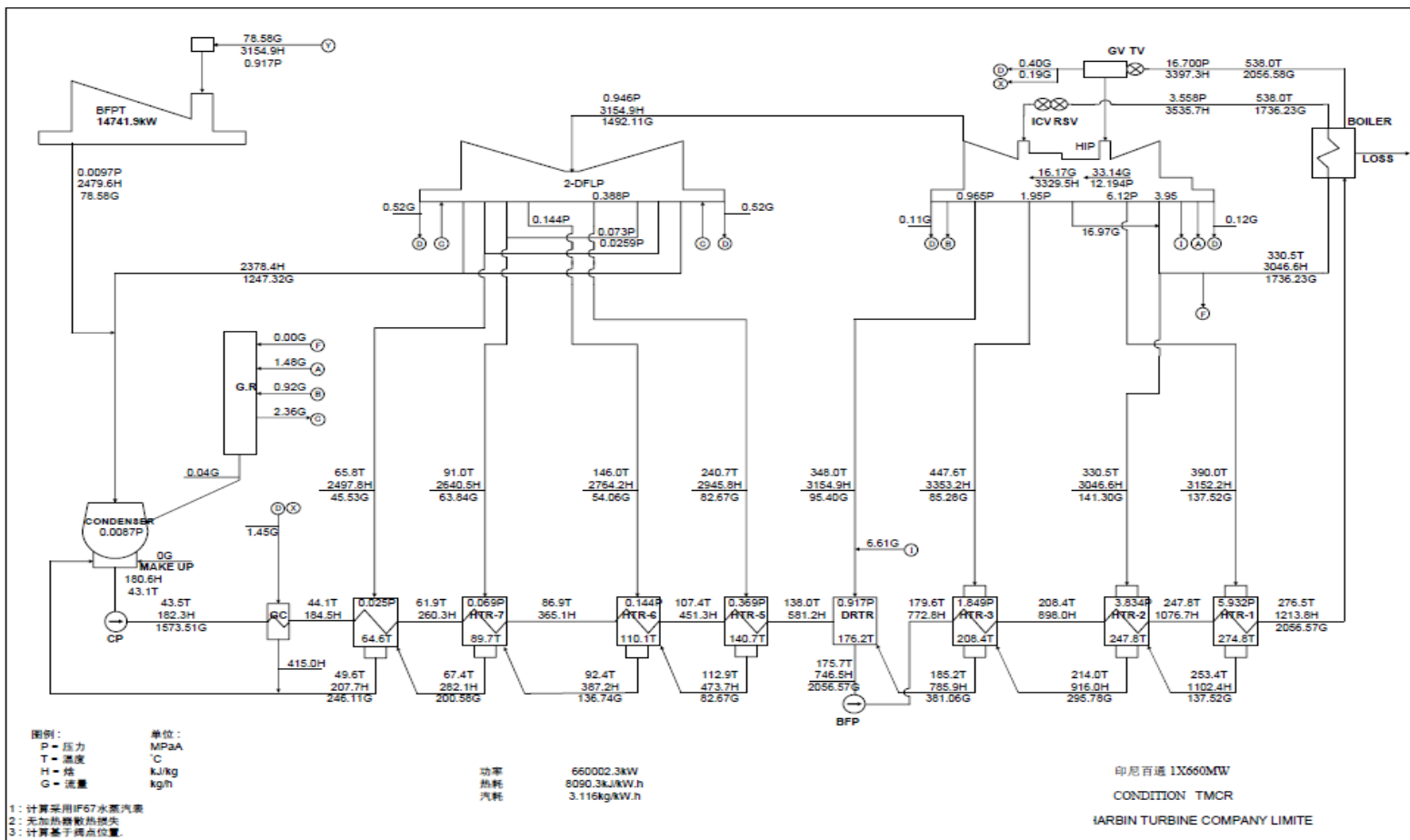
4. Berdasarkan **kriteria dampak lingkungan**, implementasi program manakah yang lebih memberikan pengaruh signifikan terhadap pengurangan pencemar udara di PT PJB UBJ O&M Paiton.

Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Perubahan pola operasi LFO pump
Pengaturan coal to air ratio	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Perubahan pola operasi LFO pump

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 1

HEAT BALANCE DIAGRAM PLTU PAITON 9







LAMPIRAN 2

TAMPILAN DATA MONITORING HARIAN CONTINUOUS EMISSION MONITORING SYSTEM

PROCESS	SYSTEM	HISTORY	SAMPLE FLOW SCH.	PARAMETER	SHUTDOWN
7/14/2021 1:39:34 PM					
CONTINUOUS EMISSION MONITORING SYSTEM					
PT. PEMBANGKITAN JAWA BALI UBJ O&M PLTU PAITON					
SO2	479.0	mg/m3	SO2 @25°C	446.0	mg/m3
NOx	248.0	mg/m3	NOx @25°C	231.0	mg/m3
CO	24.0	mg/m3	CO @25°C	22.0	mg/m3
DUST	27.0	mg/m3			
OPACITY	33.0	%			
OXIGEN	5.0	%			
SO2 - Corr	390.0	mg/Nm3			
NOx - Corr	202.0	mg/Nm3			
CO - Corr	19.0	mg/Nm3			
DUST - Corr	24.0	mg/Nm3			
GAS FLOW	947.0	m3/s			
TEMPERATURE	162.0	°C			
AUTO PURGE RUN DOWN		1.0 H	50.0 M		
GAS FLOW					

LAMPIRAN 3

KALIBRASI GAS ANALYZER PADA CEMS

	PT. PJB UNIT BISNIS JASA OPERASI DAN PEMELIHARAAN PLTU INTEON		No Dokumen : FM - C - 0.8.08 - 001		
	PJB INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM		No. Revisi : 00		
	FORM TEST DAN KALIBRASI		Tanggal Revisi :		
	PEMELIHARAAN		Revisi :		
No. WO	238127				
Tag name	CONTINUOUS EMISSION MONITORING SYSTEM				
Deskripsi	Kalibrasi SO ₂ , NO, dan CO				
Range Kalibrasi		Tipe Peralatan	GAS ANALYZER		
Set 1 / Reset 1		Merk	SIEMENS		
Set 2 / Reset 2		Model / Part No.	ULTRAMAT 23		
Action 1 / Action 2		Range			
Kontak 1 / Kontak 2		Lokasi			
KALIBRASI PERALATAN ANALOG					
INPUT		SEBELUM KALIBRASI		SESUDAH KALIBRASI	
Standart Gas (mg/m ³)	GAS	INDIKATOR 1	INDIKATOR 2	INDIKATOR 1	INDIKATOR 2
		(Local)	(CCR)	(Local)	(CCR)
817.55	SO ₂		809 mg/m ³		817 mg/m ³
797.18	NO		792 mg/m ³		797 mg/m ³
410.26	CO		411 mg/m ³		410 mg/m ³
Akurasi :		Maksimal Error :			
RANGKAIAN TEST			CATATAN		
Gas Standart yang digunakan :					
NO : 797.18 mg/m ³					
SO ₂ : 817.55 mg/m ³					
CO : 410.26 mg/m ³					
Di uji oleh :			Mengetahui :		
Tgl Pengujian : 30 Juli 2020			Spy Senior Har & C		
					
ARDI PANDU		ARDI PRANATA		JOKO PURWANTO	

LAMPIRAN 4

HASIL UJI LABORATORIUM EMISI BOILER



LAPORAN HASIL PENGUJIAN

Nomor : LPUP07322

Nama pelanggan : PT. PJB UBJOM PAITON
 Alamat : Jl. Raya Surabaya-Situbondo, Paiton Km.141 Paiton-Probolinggo
 No. identifikasi contoh : 07322-15
 Uraian contoh : Emisi
 Sumber emisi : Boiler PLTU Unit 9
 Dimensi cerobong :
 - Diameter cerobong : 7,5 m
 - Tinggi cerobong : 275 m
 - Jumlah lubang sampling : 4
 - Posisi lubang sampling : 2D - 8D
 Bahan bakar : Batubara
 Koordinat : S 07° 42' 35,95" E 113° 34' 13,53"
 Metode pengambilan contoh : KEP. 205/BAPEDAL/07/1996
 Tanggal pengambilan : 21 Juli 2020
 Tanggal diterima di lab. : 03 Agustus 2020
 Tanggal pengujian : 03 Agustus 2020 sampai 12 Agustus 2020

Hasil Pengujian

NO.	PARAMETER	SATUAN	KADAR MAKSIMUM ¹⁾	HASIL			METODE
				TERUKUR	TERKOREKSI 7%	TERKOREKSI 8%	
1	Sulfur Dioksida (SO ₂) ²⁾	mg/m ³	550	17	26	-	LP K.24.01.01 (Combustion gas analyzer)
2	nitrogen Dioksida (NO ₂) dinyatakan sebagai NO _x ²⁾	mg/m ³	550	157	286	-	LP K.24.01.01 (Combustion gas analyzer)
3	Partikulat (PM) ²⁾	mg/m ³	130	1	1	0	SNI 19-1117-12-2005
4	Merkuri (Hg)	mg/m ³	0,03	<0,01	<0,01	-	SNI 1111-20-2009
5	Oksigen ²⁾	%	-	<0,1	-	-	SNI 19-1117-11-2005
6	Karbon Dioksida (CO) ²⁾	%	-	9,0	12,4	-	LP K.24.01.01 (Combustion gas analyzer)
7	Karbon Monoksida (CO) ²⁾	mg/m ³	-	56	91	-	LP K.24.01.01 (Combustion gas analyzer)
8	Efisiensi Pembakaran (EP)	%	-	92,94	92,94	-	Perhitungan
9	Velocity ²⁾	m/detik	-	<7,60	-	-	LP K.21.01.77 (Hot tube anemometer)
10	Oksigen ²⁾	%	-	11,9	-	-	LP K.24.01.01 (Combustion gas analyzer)

Keterangan: 1) 1) PERMENDIK No. 15/MEN/HR/SET/ENKUM/14/2019, Lampiran I A - Bahan Bakar Batubara

• Semua parameter dikoreksi dengan O₂ 7% untuk batubara, 8,00% untuk lignit

2) PERGUB Jawa Timur Nomor 10 Tahun 2009 Lampiran 1G Berbahaya Bahan Bakar Batubara

• Konsentrasi partikulat dikoreksi sebesar 0% oksigen

• Volume gas dalam keadaan standar (25 °C dan tekanan 1 atm)

*) = Parameter akreditasi oleh KAN No. LP-195-12N

= Lahan uji

Data Pembakaran

• Efisiensi = 92,94 %

Jakarta, 13 Agustus 2020
 PT. UNILAB PERDANA

LAMPIRAN 5
HASIL UJI LABORATORIUM AIR

No. 28.21/PP
Revisi: 1



PEMERINTAH PROVINSI JAWA TIMUR
DINAS LINGKUNGAN HIDUP
UNIT PELAKSANA TEKNIS LABORATORIUM LINGKUNGAN
Jl. Wisata Menanggal 38 SURABAYA Telp. (031) 8541807 Fax. (031) 8530482

Sertifikat pengujian ini hanya berlaku untuk jenis dan kode contoh uji yang tertera serta tidak boleh dipergunakan lagi untuk keperluan lain tanpa persetujuan dari laboratorium

SERTIFIKAT HASIL PENGUJIAN
NO : 660 / C2333/ 1116 / 2020

I. U M U M

1. Kode Laboratorium	1. ALN/III/2020/C2333
2. Kode Air Limbah Industri	1. P10 KI
3. Alamat	1. Probolinggo
4. Telp / Fax	1. -
5. Jenis Industri	1. PULU Batu Bara
6. Jenis Contoh Uji	1. Air Balung
7. Rentang Pengujian	1. 15-Agu-20 s.d. 26-Agu-20

II. DATA PENGIRIM CONTOH UJI

1. Nama Instansi	1. Dinas Lingkungan Hidup Kab. Probolinggo
2. Alamat	1. Jl. Raya Dringu No. 81 Probolinggo
3. Pengas Pengirim Contoh	1. M. SYAMSUD
4. Tanggal / Jam pengambilan	1. 13 Agustus 2020 / 10:21
5. Tanggal / Jam diterima Laboratorium	1. 13 Agustus 2020 / 14:30
6. Lokasi / Titik pengambilan contoh uji	1. Pondolin (Bekang)
7. Metode Pengambilan Contoh Uji	1. SNI 6986.59 - 2009
8. Koordinat	1. -
9. Data Lapangan	1. -

- Debit rata-rata limbah cair selama pemantauan : 2.646.802 M³/hari
- Produksi/Penggunaan bahan baku rata-rata selama bulan pemantauan : < 100/hari
- Suhu pada waktu pengambilan dengan bejana suhu 40°C : 35,0 °C
- pH pada waktu pengambilan : 8,68

III. HASIL PENGUJIAN

NO	PARAMETER	SATUAN	BAKU MUTU	MDL	HASIL UJI	ACUAN METODE	KETERANGAN
	Volume Limbah Cair per satuan produk	m ³ /ton produk	-	-	-	-	
1	Residual Cl ₂	mg/l	0,5	0,004 (*)	0,07	US EPA Method 650 / Revisi 1 Tahun 1995	

Catatan: *) Rentang Pengujian Terendah

IV. INTERPRETASI HASIL PENGUJIAN
Kualitas limbah cair tersebut :
Memenuhi Baku Mutu Izin Penerimaan Air Limbah ke Laut berdasarkan Kep. Men LHK RI No. SK 434/Men/04/Setjen/PR/ 1/7/2019

Surabaya, 28 Agustus 2020

 Manajer Teknis



LAMPIRAN 6
KUESIONER PENELITIAN
ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

JUDUL THESIS:

EVALUASI PROGRAM UNGGULAN PENGELOLAAN LINGKUNGAN
PT PJB UBJ O&M PAITON DENGAN MENGGUNAKAN *LIFE CYCLE*
ANALYSIS (LHA) DAN *ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS* (AHP)

Survei ini dilakukan untuk memperoleh data penunjang program pasca sarjana Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Data-data dibutuhkan hanya untuk kepentingan studi, dan kami sanggup menjaga kerahasiaan setiap data yang anda berikan. Mohon kiranya kuisisioner ini diisi dengan keadaan yang sebenarnya

Oleh:

MAYA MAHARANI

NRP. 03211950030001

PROGRAM MAGISTER TEKNIK LINGKUNGAN

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN, DAN KEBUMIHAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

2021

**PETUNJUK PENGISIAN KUISIONER REKOMENDASI PROGRAM
UNGGULAN PENGELOLAAN LINGKUNGAN
DI PT PJB UBJ O&M PAITON**

Dalam penentuan rekomendasi program unggulan pengelolaan lingkungan terkait efisiensi energi dan pengurangan pencemar udara di PT PJB UBJ O&M Paiton, pendapat Bapak/Ibu yang lebih diutamakan. Bapak/Ibu dapat memberi penilaian terhadap masing-masing kriteria sesuai tingkat kepentingan dengan skala 1 sampai 9. Nilai dan definisi pendapat skala perbandingan dapat dilihat pada tabel sebagai berikut.

Intensitas	Keterangan
1	Kriteria/ Alternatif A sama penting dengan kriteria/alternatif B
3	A sedikit lebih penting dari B
5	A jelas lebih penting dari B
7	A sangat jelas lebih penting dari B
9	A mutlak lebih penting dari B
2,4,6,8	Apabila ragu-ragu antara dua nilai berdekatan

Contoh:

Dalam penilaian “prioritas penggunaan jenis masker di ruangan fasilitas umum dalam upaya pencegahan penyebaran virus covid 19”, bagaimana penilaian Bapak/Ibu berdasarkan kriteria jenis masker di bawah ini:

Masker kain	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Masker medis
----------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----------------

Cara menjawab :

- Pilih 1 opsi dan berikan tanda pada angka penilaian jawaban, opsi lainnya harus diisi "Tidak")

	✓	Cara menjawab benar								
	tidak	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Masker kain	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Masker Medis	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Masker kain	tidak	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Masker kain	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Masker Medis	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

X

Cara menjawab **salah**, karena AHP merupakan perbandingan berpasangan, sehingga dipilih salah satu saja dan yang lain dipilih "**tidak**"

Dari jawaban diatas berarti bahwa kriteria masker kain **jelas lebih penting** untuk digunakan di ruangan fasilitas umum dari pada kriteria masker medis.

A. Karakteristik Responden

1. Nama :
2. Instansi :
3. Jabatan :
4. Jenis Kelamin : Laki-laki/Perempuan
5. Usia :Tahun
6. Pengalaman dan lama bekerja:
 - a.
 - b.
7. Tingkat Pendidikan Terakhir:
 - a. D3
 - b. D4/S1
 - c. S2
 - d. S3
8. Apa saja kendala yang dihadapi dalam membuat kebijakan terkait efisiensi energi?
 - a.
 - b.
9. Apa saja kendala yang biasa dihadapi dalam membuat kebijakan terkait Pengurangan Pencemar Udara?
 - a.
 - b.
10. Apakah terdapat saran untuk meningkatkan implementasi program Efisiensi Energi di PT PJB UBJ O&M Paiton?
 - a.
 - b.

11. Apakah terdapat saran untuk meningkatkan implementasi program Pengurangan pencemar udara di PT PJB UBJ O&M Paiton?

- a.
 b.

B. Pertanyaan:

“Isilah pertanyaan-pertanyaan berikut dengan memberikan tanda X pada salah satu kolom, dengan pertimbangan apa yang lebih diutamakan untuk menentukan program unggulan pengelolaan lingkungan terkait efisiensi energi di PT PJB UBJ O&M Paiton”

I. Program Efisiensi Energi

1. Dalam menentukan prioritas program efisiensi energi yang diimplementasikan di PT PJB UBJ O&M Paiton, bagaimana penilaian Bapak/Ibu berdasarkan kriteria-kriteria di bawah ini.

Biaya Operasional	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Kemudahan implementasi
Biaya Operasional	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Dampak Lingkungan
Kemudahan implementasi	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Dampak Lingkungan

2. Berdasarkan **kriteria biaya operasional**, program manakah yang lebih memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi energi di PT PJB UBJ O&M Paiton.

Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cleaning tube boiler
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater

Cleaning tube boiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Cleaning tube boiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater
Pengaturan coal to air ratio	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater

3. Berdasarkan **kriteria kemudahan implementasi**, program manakah yang lebih memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi energi di PT PJB UBJ O&M Paiton.

Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cleaning tube boiler
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater
Cleaning tube boiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Cleaning tube boiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater
Pengaturan coal to air ratio	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater

4. Berdasarkan **kriteria dampak lingkungan**, program manakah yang lebih memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi energi di PT PJB UBJ O&M Paiton.

Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Cleaning tube boiler
-----------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----------------------

Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater
Cleaning tube boiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Cleaning tube boiler	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater
Pengaturan coal to air ratio	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Penggantian elemen air heater

II. Program Pengurangan Pencemar Udara

1. Dalam menentukan prioritas program pengurangan pencemar udara yang diimplementasikan di PT PJB UBJ O&M Paiton, bagaimana penilaian Bapak/Ibu berdasarkan kriteria-kriteria di bawah ini.

Biaya Operasional	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Kemudahan implementasi
Biaya Operasional	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Dampak Lingkungan
Kemudahan implementasi	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Dampak Lingkungan

2. Berdasarkan **kriteria biaya operasional**, implementasi program manakah yang lebih memberikan pengaruh signifikan terhadap pengurangan pencemar udara di PT PJB UBJ O&M Paiton.

Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Perubahan pola operasi LFO pump

Pengaturan coal to air ratio	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Perubahan pola operasi LFO pump
------------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---------------------------------

3. Berdasarkan **kriteria kemudahan implementasi**, implementasi program manakah yang lebih memberikan pengaruh signifikan terhadap pengurangan pencemar udara di PT PJB UBJ O&M Paiton.

Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Perubahan pola operasi LFO pump
Pengaturan coal to air ratio	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Perubahan pola operasi LFO pump

4. Berdasarkan **kriteria dampak lingkungan**, implementasi program manakah yang lebih memberikan pengaruh signifikan terhadap pengurangan pencemar udara di PT PJB UBJ O&M Paiton.

Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Pengaturan coal to air ratio
Tiny oil burner	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Perubahan pola operasi LFO pump
Pengaturan coal to air ratio	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Perubahan pola operasi LFO pump

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Maya Maharani lahir di Tangerang pada tanggal 06 September 1986 yang merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Baratajaya Surabaya, SMPN 06 Surabaya, dan SMAN 05 Surabaya. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan S1 di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan (FTSP) ITS Surabaya pada tahun 2004 – 2008. Pada tahun 2019, penulis melanjutkan pendidikan S2 di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan (FTSPK), ITS Surabaya.

Penulis aktif sebagai staff Departemen Hubungan Masyarakat Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan ITS periode 2010 – 2011, dan aktif di berbagai kegiatan baik di dalam maupun di luar kampus ITS. Penulis memiliki sertifikasi Manajer Pengendalian Pencemaran Air (MPPA), Manajer Pengendalian Pencemaran Udara (MPPU), dan Life Cycle Assessment yang terakreditasi dari Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP). Sertifikasi telah menempuh training Sistem Manajemen Lingkungan ISO 14001:2015, Internal Auditor GHG ISO 14064-1:2018, dan Pengelolaan Limbah B3. Setelah lulus pendidikan S1, penulis bekerja di konsultan lingkungan berbasis sanitasi tahun 2008-2009, kemudian memulai karir di PT PJB Unit Pembangkitan Brantas, dan PT PJB UBJOM PLTU Paiton, hingga saat ini berprofesi sebagai Analis Lingkungan di PT Pembangkitan Jawa Bali Kantor Pusat. Untuk korespondensi, Penulis dapat dihubungi melalui email maya.maharani@ptjpb.com