



TUGAS AKHIR - RE 184804

**KAJIAN DAMPAK PROSES PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA UAP (PLTU) DI PT. PJB UBJ O&M
PROBOLINGGO TERHADAP LINGKUNGAN DENGAN
MENGUNAKAN METODE LIFE CYCLE ASSESSMENT
(LCA)**

BIMA SAKTI Satria Wibawa
0321154000052

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - RE 184804

**KAJIAN DAMPAK PROSES PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA UAP (PLTU) DI PT. PJB UBJ O&M
PROBOLINGGO TERHADAP LINGKUNGAN DENGAN
MENGUNAKAN METODE LIFE CYCLE ASSESSMENT
(LCA)**

**BIMA SAKTI Satria Wibawa
0321154000052**

**DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019**



FINAL PROJECT – RE 184804

**STUDY OF THE IMPACT OF THE STEAM POWER PLANT
PROCESS AT PT. PJB UBJ O&M PROBOLINGGO ON
ENVIRONMENT USING LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)
METHOD**

**BIMA SAKTI SATRIA WIBAWA
0321154000052**

**ADVISOR
Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T.**

**DEPARTEMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Faculty of Civil, Environmental and Geo-Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019**

LEMBAR PENGESAHAN

KAJIAN DAMPAK PROSES PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) DI PT. PJB UBJ O&M PROBOLINGGO TERHADAP LINGKUNGAN DENGAN MENGGUNAKAN METODE LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memenuhi Gelar
Sarjana Teknik

Pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

BIMA SAKTI SATRIA WIBAWA
NRP. 0321154000052

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir



Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T.
NIP. 19660116 199703 1 001



KAJIAN DAMPAK PROSES PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) DI PT. PJB UBJ O&M PAITON PROBOLINGGO TERHADAP LINGKUNGAN DENGAN MENGGUNAKAN METODE *LIFE CYCLE ASSESSMENT* (LCA)

Nama Mahasiswa : Bima Sakti Satria Wibawa
NRP : 03211540000052
Departemen : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T.

ABSTRAK

Kegiatan proses produksi energi listrik dengan menggunakan bahan bakar batu bara dimulai dari proses pembentukan energi panas menjadi energi mekanik yang akan menggerakkan turbin dan generator menghasilkan listrik. Beberapa unit proses kegiatan menghasilkan emisi yang dapat menimbulkan dampak lingkungan. Emisi yang dihasilkan antara lain CO₂, CH₄, N₂O, SO_x, NO_x, dan *Particulate Matter* (PM). Emisi tersebut berpotensi meningkatkan pemanasan global dan penurunan kualitas udara yang berdampak pada lingkungan dan manusia. Penelitian ini mengidentifikasi dampak yang terjadi dari kegiatan produksi energi listrik dengan batu bara menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA). LCA merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengevaluasi dan membandingkan dampak lingkungan dari suatu produk. Identifikasi dampak lingkungan tersebut dilakukan dengan menggunakan *software* SimaPro 8.5.2. Adapun siklus kegiatan produksi batu bara yang dianalisis meliputi *coal bunker*, *coal mill*, *boiler*, turbin dan *generator*.

Hasil perhitungan beban emisi didapatkan pada proses produksi unit *boiler* pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) di PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON Probolinggo yaitu sebesar 1,085 kgCO₂/kWh; 1,01 x 10⁻⁵ kgCH₄/kWh; 1,52 x 10⁻⁵ kgN₂O/kWh; 3,18 x 10⁻⁴ kgSO_x/kWh; 1,12 x 10⁻⁴ kgNO_x/kWh; 1,19 x 10⁻⁵ kgPM/kWh. Sedangkan analisis pada SimaPro 8.5.2 menghasilkan besarnya dampak lingkungan yang terjadi dari kegiatan yang dianalisis seperti *global warming 100a*, *ecotoxicity*, *smog*, *acidification*, *carcinogenic*, *respiratory effect*, *fossil fuel depletion*, dan

eutrophication. Dampak paling besar berasal dari proses produksi akibat adanya kegiatan pada unit *boiler* yaitu sebesar 91,2%. Setelah diketahui dampaknya maka dilakukan analisa alternatif yang dapat digunakan pada masing-masing kegiatan. Alternatif perbaikan yang dapat diterapkan pada PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON Probolinggo ada 3 yaitu substitusi biodiesel sebagai bahan bakar *start up boiler*, penggantian boiler superkritikal dan penggantian sistem boiler *pressurized bed fluidized combustion* (PFBC). Alternatif ini dapat menurunkan dampak yang terjadi pada proses produksi listrik di PT. PJB UBJ O&M PLTU Probolinggo.

Kata kunci : batu bara, dampak lingkungan, gas rumah kaca, LCA, SimaPro 8.5.2

STUDY OF THE IMPACT OF THE STEAM POWER PLANT PROCESS AT PT. PJB UBJ O & M PAITON PROBOLINGGO ON ENVIRONMENT USING LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) METHOD

Name : Bima Sakti Satria Wibawa
NRP : 0321154000052
Departement : Teknik Lingkungan
Supervisor : Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T.

ABSTRACT

The production process of electricity by using coal started from the process of forming heat energy into mechanical energy which will drive turbines and generators to produce electricity. Some activities produce emissions that can cause environmental impacts. Emissions produced include CO₂, CH₄, N₂O, SO_x, dan Particulate Matter (PM). These emissions have the potential to increase global warming and decrease air quality which affects the environment and human. This study identifies the impacts that occur from the activities of electricity production with coal using the Life Cycle Assessment (LCA) approach. LCA is an analytical meethod that used to evaluate and compare the environmental impact of a product. Identification of environmental impacts are carried out using the SimaPro 8.5.2 software. The cycles of coal production activities analyzed include coal bunkers, coal mills, boilers, turbines, and generators.

The results of the calculation of the emission are obtained in the production process of the steam power plant boiler unit at PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON Probolinggo is sebesar 1,085 kgCO₂/kWh; $1,01 \times 10^{-5}$ kgCH₄/kWh; $1,52 \times 10^{-5}$ kgN₂O/kWh; $3,18 \times 10^{-4}$ kgSO_x/kWh; $1,12 \times 10^{-4}$ kgNO_x/kWh; $1,19 \times 10^{-5}$ kgPM/kWh. While the analysis on SimaPro 8.5.2 generates the value of environmental impacts that occur from activities analyzed such as global warming 100a, ecotoxicity, smog, acidification, carcinogenic, respiratory effect, fossil fuel depletion, and eutrophication.

The biggest impact comes from the production process due to the activities of the boiler unit which is equal to 91.2%. after the impact is known, an alternative analysis can be used in each activities. Alternative improvements that can be applied to PT. PJB UBJ O&M Probolinggo PAITON PLTU, There are 3 namely biodiesel substitution as start-up boiler fuel, supercritical boiler replacement and replacement of pressurized fluidized combustion (PFBC) boiler system. This alternative can reduce the impact that occurs in the electricity production process at PT. PJB UBJ O & M Probolinggo PLTU.

Keywords: coal, environmental impact, greenhouse gas, LCA, SimaPro 8.5.2

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan ilmu, perlindungan, rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul "Kajian Dampak Proses Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di PT. PJB UBJ O&M Paiton Probolinggo Terhadap Lingkungan Dengan Menggunakan Metode *Life Cycle Assessment* (LCA)". Atas arahan dan bimbingan yang telah diberikan hingga terselesaikannya tugas akhir ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T. selaku dosen pembimbing tugas akhir, terima kasih atas arahan, bimbingan, ilmu, kesabaran, dan motivasi yang telah diberikan selama ini.
2. Ibu Atik Moesriati, M.Kes., Bapak Abdu Fadli Assomadi, S. Si., M.T. dan Bapak Arie Dipareza Syafe'i S.T., MPEM. selaku dosen pengarah, terima kasih atas arahan, kritik yang membangun dan saran yang telah diberikan.
3. Ibu, Ayah, dan kedua saudara penulis atas segala dukungan do'a, motivasi dan semangat yang telah diberikan.
4. Teman-teman Teknik Lingkungan, khususnya angkatan 2015 yang telah memberikan semangat dan bantuan moril dan materil dalam melaksanakan penelitian.
5. Pembimbing lapangan Ibu Maya dan Ibu Aynin yang telah membantu dalam proses pengambilan data penelitian.
6. Sahabat-sahabat penulis yang telah memberikan motivasi dan semangat untuk menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis menyadari masih jauh dari kata sempurna dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat di kemudian hari.

Surabaya, Juni 2019

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Ruang Lingkup	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Proses Produksi	5
2.2 Pencemaran Udara	5
2.3 Sumber Emisi	7
2.3.1 Karbon Dioksida (CO ₂)	7
2.3.2 Metan (CH ₄)	8
2.3.3 Sulfur Oksida (SO _x)	8
2.3.4 Nitrogen Dioksida (NO _x)	8
2.3.5 <i>Particulate Matter</i> (PM)	9
2.4 Pemanasan Global	9
2.5 Gas Rumah Kaca	10
2.6 Asbut atau <i>Smog</i>	12
2.7 Ekotoksitas	12
2.8 Asidifikasi	13
2.9 Eutrofikasi	13
2.10 Karsinogenik	14
2.11 <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA)	14
2.12 Simapro 8.5.2	16
2.13 Metode <i>Midpoint</i> dengan TRACI	20
2.14 Penelitian Terdahulu	20
BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1 Pendahuluan	25
3.2 Profil Perusahaan	25
3.3 Proses Produksi Listrik	26
3.4 Kerangka Penelitian	29
3.5 Tahap Pendahuluan	31

3.6 Tahap Pengumpulan Data.....	31
3.7 Tahap Pengolahan Data.....	31
3.7.1 Analisis Beban Emisi CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SO ₂ , NO ₂ , dan Partikulat.....	32
3.7.2 Analisis <i>Life Cycle Assessment</i> dengan Aplikasi SimaPro.....	33
3.7.3 Analisis Alternatif yang Direkomendasikan.....	35
3.8 Kesimpulan dan Saran.....	35
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	36
4.1 Analisis Perhitungan Beban Emisi.....	37
4.1.1 Data Bahan Baku dan Produksi.....	37
4.1.2 Perhitungan Beban Emisi.....	37
4.1.3 Emisi yang dihasilkan dalam 1 KWh listrik.....	44
4.2 Analisis <i>Life Cycle Assessment</i>	48
4.3 Alternatif Perbaikan.....	77
BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN.....	83
5.1 Kesimpulan.....	83
5.2 Saran.....	84
DAFTAR PUSTAKA.....	85
BIODATA PENULIS.....	91

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Data Penelitian Terdahulu	21
Tabel 3.1 Data-Data yang Diperlukan	32
Tabel 4.1 Faktor Emisi CO ₂ , CH ₄ , dan N ₂ O	39
Tabel 4.2 Perhitungan Beban Emisi CO ₂ , CH ₄ , dan N ₂ O.....	41
Tabel 4.3 Data Pengukuran Manual Parameter SO _x , NO _x , dan partikulat.....	42
Tabel 4.4 Perhitungan Beban Emisi SO _x , NO _x , dan Partikulat....	45
Tabel 4.5 Emisi yang dihasilkan setiap 1 kWh produk listrik.....	46
Tabel 4.6 Data Intensitas Emisi PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton dan Perusahaan Pembanding Skala Internasional.....	48
Tabel 4.7 Nilai Karakterisasi Dampak Proses Produksi PLTU....	56
Tabel 4.8 Nilai Normalisasi Dampak Proses Produksi PLTU.....	57
Tabel 4.9 Nilai Karakterisasi Dampak pada Unit Boiler	63
Tabel 4.10 Faktor Normalisasi	64
Tabel 4.11 Nilai Normalisasi Dampak pada Unit Boiler	68
Tabel 4.12 Penambahan 10% Nilai Input.....	70
Tabel 4.13 Pengurangan 10% Nilai Input.....	70
Tabel 4.14 Perbandingan Dampak Lingkungan antara Sebelum dan Sesudah Alternatif Perbaikan Skenario I.....	80
Tabel 4.15 Perbandingan Dampak Lingkungan antara Sebelum dan Sesudah Alternatif Perbaikan Skenario II.....	81

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Alur Proses PLTU Paiton	6
Gambar 2.2 Proses Terjadi Pemanasan Global.....	10
Gambar 2.3 Gas Rumah Kaca di Indonesia Hingga Tahun 2020	11
Gambar 2.4 Bagan Alir Tahapan LCA.....	15
Gambar 3.1 Letak Geografis PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton ..	27
Gambar 3.2 Proses Produksi Listrik PT. PJBUBJ O&M PLTU Paiton	28
Gambar 3.3 Kerangka penelitian.....	30
Gambar 4.1 <i>Material Balance</i> PLTU PT. PJB UBJ O&M Probolinggo	38
Gambar 4.2 Benchmarking Intensitas Emisi PT.PJB UBJ O&M PLTU Paiton Skala Internasional.....	47
Gambar 4.3 <i>Mass Balance Coal Bunker</i>	49
Gambar 4.4 <i>Mass Balance Coal Mill</i>	50
Gambar 4.5 <i>Mass Balance Boiler</i>	51
Gambar 4.6 <i>Mass Balance Turbin dan Generator</i>	51
Gambar 4.7 <i>Network</i> Proses Produksi PLTU.....	55
Gambar 4.8 <i>Network pada Unit Boiler</i>	59
Gambar 4.9 Diagram Perhitungan Karakterisasi	62
Gambar 4.10 Diagram Perhitungan Normalisasi.....	67
Gambar 4.11 Nilai Perbandingan Dampak <i>Carcinogenics</i>	70
Gambar 4.12 Nilai Perbandingan Dampak <i>Ecotoxicity</i>	71
Gambar 4.13 Nilai Perbandingan Dampak <i>Global warming</i>	72
Gambar 4.14 Nilai Perbandingan Dampak <i>Acidification</i>	73
Gambar 4.15 Nilai Perbandingan Dampak <i>Eutrophication</i>	74
Gambar 4.16 Nilai Perbandingan Dampak <i>Respiratory effect</i>	75
Gambar 4.17 Nilai Perbandingan Dampak <i>Smog</i>	76
Gambar 4.18 Nilai Perbandingan Dampak <i>Fossil Fuel Depletion</i>	77
Gambar 4.19 Diagram Perbandingan Dampak Lingkungan antara Sebelum dan Sesudah Alternatif Perbaikan Skenario I.....	81
Gambar 4.20 Diagram Perbandingan Dampak Lingkungan antara Sebelum dan Sesudah Alternatif Perbaikan Skenario II.....	82

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penyediaan energi listrik dalam pertumbuhan ekonomi dewasa ini sangat dibutuhkan seiring berkembangnya sektor industri dan jumlah penduduk yang semakin besar di Indonesia. Dengan bertambahnya jumlah penduduk maka jumlah pemakaian listrik semakin meningkat pula. Pertumbuhan listrik di Indonesia pada tahun 2013-2017 mengalami peningkatan 26% dilihat dari jumlah pelanggan, dengan rasio elektrifikasi sebesar 95,35%. Kapasitas energi listrik yang terjual pada tahun 2017 menurut statistik PT. PLN (Persero) di Indonesia mencapai 221.574,66 GWh naik sebesar 2,58% persen terhadap kondisi tahun 2016 (Statistik Ketenagalistrikan, 2018).

Unit Pembangkit (UP) Paiton Probolinggo adalah salah satu produsen listrik nasional terbesar dengan kapasitas terpasang 660 MW. Produksi listrik dari PLTU Paiton Probolinggo hingga saat ini menggunakan bahan bakar batubara. Volume batubara yang digunakan mencapai 2.127.062 ton pada tahun 2012 (Laporan Keberlanjutan PT. PJB, 2012). Di sisi lain, terdapat dampak yang perlu diperhatikan dengan adanya produksi listrik dari PLTU. Semakin meningkatnya penggunaan batubara akan menyebabkan semakin meningkat pula emisi polutan (bahan pencemar) seperti SO₂, NO_x, dan partikel yang dapat berdampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan, serta emisi gas rumahkaca CO₂ yang berdampak pada pemanasan global (Suarna, 2011)

Menurut Status Lingkungan Hidup Indonesia 2010, kontribusi kegiatan PLTU terhadap pencemar udara berupa karbon dioksida (CO₂) sebesar 11.279,621 ton/tahun (Kementerian Lingkungan Hidup, 2010). Gas CO₂ merupakan salah satu gas rumah kaca (GRK) yang diyakini memberi andil paling besar terhadap peningkatan rata-rata suhu bumi. Dalam rangka penurunan emisi GRK maka telah dikeluarkan Peraturan Presiden No. 61 Tahun 2011 tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN-GRK) dan Peraturan Presiden No. 71 Tahun 2011 tentang Penyelenggaraan

Inventarisasi GRK Nasional. Indonesia menargetkan penurunan emisi GRK agar dapat mencapai sebesar 26% dari tingkat *Business as Usual* (BaU) dengan usaha sendiri yang akan dicapai pada tahun 2020 atau 41% apabila mendapat dukungan internasional (Fadhila, 2016).

Berdasarkan kondisi diatas, perlu adanya alternatif atau suatu cara untuk mereduksi emisi yang dikeluarkan dari proses produksi PLTU yaitu dengan cara memodifikasi mesin dan sistem operasi yang ada (Erdhiyan, 2018). Salah satu metode yang digunakan untuk menganalisa kegiatan proses produksi adalah *Life Cycle Assessment* (LCA) (Jatmiko, 2017). LCA memberikan informasi dampak yang dibuang ke lingkungan dari siklus produk dari ekstrasi bahan mentah, proses produksi, penggunaan produk dan *waste* dari produk yang dihasilkan dari kegiatan produksi (Hermawan, 2013). LCA dikembangkan salah satunya adalah untuk mengkaji dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh pabrik dan proses produksi seperti *global warming*, *ecotoxicity* dan *smog formation* (Haas, 2005). Pada pelaksanaannya digunakan software SimaPro 8.5.2 digunakan sebagai perangkat untuk menganalisis penghematan energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca, audit energi dan lingkungan global yang berfokus pada siklus hidup suatu produk, serta efisiensi penggunaan sumberdaya berupa tanah, air, energi dan sumberdaya alam lainnya. LCA juga dapat digunakan untuk menentukan potensi pemanasan global dari setiap proses pemanfaatan biomasa (Rosmeika, et al, 2010). Dalam analisis software Simapro 8.5.2, metode midpoint TRACI digunakan untuk menganalisis dampak lingkungan seperti *global warming 100a*, *ecotoxicity*, *smog*, *acidification*, *carcinogenic*, *respiratory effect*, *fossil fuel depletion*, dan *eutrophication*.

Setelah mengetahui emisi yang dihasilkan dari setiap proses produksi, dipilih satu proses yang menimbulkan emisi terbesar pada LCA. Hal ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar dampak yang dihasilkan dan penanganan apa saja yang dapat dilakukan guna mereduksi dampak dari produksi listrik. Dengan demikian, alternatif perbaikan yang dibuat berdasarkan analisis LCA ini diharapkan dapat mengurangi potensi dampak yang terjadi dari proses produksi listrik PT. PJB UBJ O&M Paiton Probolinggo.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Berapa beban emisi yang dihasilkan pada proses Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON Probolinggo?
2. Bagaimana dampak lingkungan yang ditimbulkan dari kegiatan produksi listrik melalui pendekatan LCA?
3. Alternatif apa yang dapat dilakukan guna mereduksi emisi yang dihasilkan dari proses produksi listrik?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menentukan beban emisi yang dihasilkan dari proses kegiatan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) di PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON Probolinggo.
2. Menganalisis dampak lingkungan yang timbul menggunakan metode LCA.
3. Menganalisis alternatif yang dapat dilakukan guna mereduksi emisi dari hasil penelitian.

1.4 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi mengenai dampak lingkungan yang dihasilkan dari setiap tahap proses produksi listrik.
2. Memberikan solusi berupa alternatif-alternatif dalam mereduksi emisi berdasarkan dari hasil analisis LCA.
3. Sebagai bahan evaluasi perusahaan dalam menganalisa aktivitas proses produksi yang ramah lingkungan.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah:

1. Pengambilan data dilakukan pada PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON Probolinggo.
2. Data yang digunakan berupa data sekunder yang berasal dari perusahaan.
3. Lingkup analisis sistem proses adalah *gate to gate*, dimulai dari bunker batubara sampai dengan generator. Dengan pembakaran sempurna di unit boiler.

4. Proses analisis *life cycle assessment* menggunakan program SimaPro 8.5.2.
5. *Life cycle impact assessment* (LCIA) adalah *global warming 100a*, *ecotoxicity*, *smog*, *acidification*, *carcinogenic*, *respiratory effect*, *fossil fuel depletion*, dan *eutrophication*.
6. Indikator emisi yang dianalisis yaitu karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄) dan nitrogen dioksida (N₂O) sebagai emisi gas rumah kaca, sedangkan untuk indikator pencemar udara menggunakan parameter SO_x, NO_x, dan PM.
7. Metode yang digunakan dalam menjalankan SimaPro 8.5.2 yaitu TRACI.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

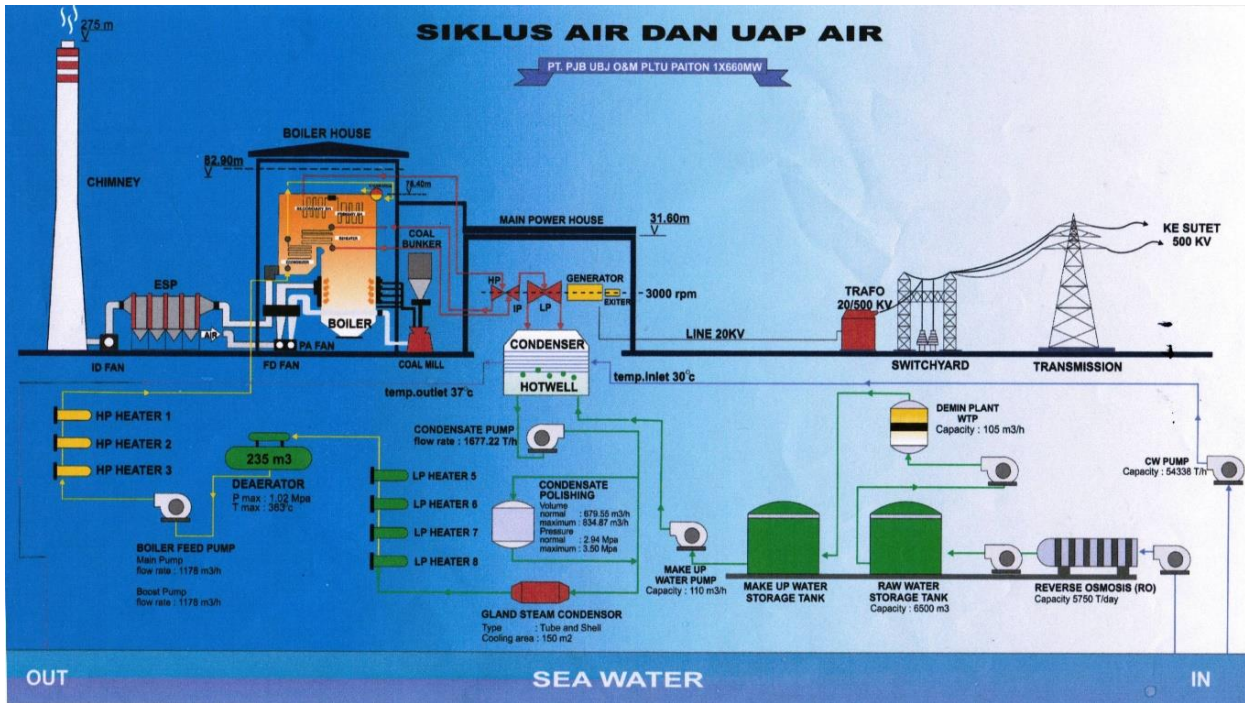
2.1 Proses Produksi

Batubara dari *coalyard* dikeruk dan diangkut menuju *coal bunker* dan diteruskan ke *coal feeder* yang berfungsi mengatur jumlah aliran ke *pulverizer* dimana batubara digiling sesuai dengan kebutuhan menjadi serbuk yang sangat halus. Serbuk batubara ini dicampur dengan udara panas dari *primary air fan* (PA Fan) dan dibawa ke *coal burner* yang menghembuskan serbuk batubara tersebut ke dalam ruang bakar untuk proses pembakaran dan terbakar seperti gas untuk mengubah air menjadi uap. Udara panas yang digunakan oleh PA Fan dipasok dari FD Fan yang menekan udara panas setelah dilewatkan melalui *Air Heater*. FD Fan juga memasok udara ke *coal burner* untuk mendukung proses pembakaran.

Panas yang dihasilkan akan diserap oleh pipa-pipa uap (*waterwalls*) menjadi uap jenuh/uap basah yang selanjutnya dipanaskan dengan *superheater*. Kemudian uap tersebut dialirkan ke turbin tekanan tinggi (*H.P.Turbine*), dimana uap tersebut akan ditekan melalui *nozzle* ke sudu-sudu turbin. Tenaga dari uap menghantam sudu-sudu turbin dan membuat turbin berputar. Setelah melalui *H.P.Turbine*, uap dikembalikan ke *boiler* untuk dipanaskan ulang di *reheater* sebelum uap tersebut digunakan di *I.P.Turbine* dan *L.P.Turbine*. Poros turbin tekanan rendah dikopel dengan rotor generator. Generator dibungkus dalam stator generator. Stator ini digulung dengan menggunakan batang tembaga. Listrik dihasilkan dalam batangan tembaga pada stator oleh elektromagnet rotor melalui perputaran dari medan magnet. Perputaran Rotor ini yang akan menggerakkan Generator dan akhirnya oleh generator energi mekanis akan diubah menjadi energi listrik (Hanafi, 2016).

2.2 Pencemaran Udara

Pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, atau energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara ambie oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun sampai ketinggian tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya (Peraturan Pemerintah RI no 41, 1999)



Gambar 2.1 Alur Proses PLTU Paiton
 Sumber: PT. PJB UBJ O&M Paiton Probolinggo

.Menurut Astuti (2018) polusi adalah masalah yang berbahaya bagi aktivitas kehidupan manusia baik di dalam maupun di luar ruangan. Polusi udara memiliki implikasi negatif bagi kesehatan manusia secara umum. Terdapat beberapa unsur pencemar yang dapat mengakibatkan dampak negatif bagi kesehatan dan mempengaruhi keseimbangan udara normal. Beberapa gas tersebut antara lain *Sulfur dioksida* (SO₂), *Carbon monoksida* (CO), *Particulat Matter*, *Hydrocarbon* (HC), *Nitrogen dioksida* (NO₂), *Photochemical Oxidant*, Timah (Pb), Ozon dan *Volatile Organic Compound* (VOC) (Ali, 2007).

2.3 Sumber Emisi

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.

Dalam rangkaian sistem operasi pembangkit listrik tenaga uap, disamping menghasilkan energi listrik, juga dihasilkan bahan buangan (limbah) baik padat, cair, gas, dan panas (UKL UPL PLTU Batubara Tanjung-Tabalong, 2007). Menurut Syarifah (2016), emisi penggunaan bahan bakar batubara unit 1&2 adalah 4.949,63 kTonCO₂/tahun. Sedangkan emisi CH₄ yang dihasilkan dari sektor penggunaan bahan bakar batubara sumber stationer yaitu 0,05 kTonCH₄/tahun.

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 karakteristik emisi:

2.3.1 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, gas CO₂ yang terlalu berlebihan di bumi dapat mengikat panas matahari sehingga suhu bumi panas. Pemanasan global di bumi akibat CO₂ disebut juga sebagai efek rumah kaca. Pemanasan global sudah lama menjadi perbincangan, namun belum juga ada cara yang efektif untuk menghilangkannya atau setidaknya untuk mengurangnya (Ghaziyad, 2015).

2.3.2 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. Metan 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 pemanasan global 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).

2.3.3 Sulfur Oksida (SO_x)

Pencemaran oleh sulfur oksida terutama disebabkan oleh dua komponen sulfur bentuk gas yang tidak berwarna yaitu sulfur dioksida (SO₂) dan Sulfur trioksida (SO₃), dan kedua disebut sulfur oksida (SO_x), Sulfur dioksida mempunyai karakteristik bau yang tajam dan tidak mudah terbakar di udara, sedangkan sulfur trioksida adalah komponen yang tidak reaktif. Pencemaran SO_x menimbulkan dampak pada manusia dan hewan, kerusakan pada tanaman terjadi pada kadar 0,5 ppm. Pengaruh utama polutan SO_x pada manusia adalah iritasi sistem pernafasan pada kadar 5 ppm.

2.3.4 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).

2.3.5 Particulate Matter (PM)

Particulate Matter adalah campuran partikel dan tetesan di udara, terdiri dari berbagai komponen seperti senyawa organik, logam, asam, tanah, dan debu (Ciencewicki 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. PM-10 yang asam juga dapat merusak bahan buatan manusia dan merupakan penyebab utama berkurangnya jarak pandang.

2.4 Pemanasan Global

Pemanasan global atau *global warming* adalah suatu bentuk ketidakseimbangan ekosistem di bumi akibat terjadinya proses peningkatan suhu rata-rata atmosfer, laut, dan daratan di bumi. Pemanasan global sendiri merupakan fenomena peningkatan temperatur global dari tahun ke tahun karena terjadinya efek rumah kaca atau *greenhouse effect* yang disebabkan oleh meningkatnya emisi gas-gas seperti karbondioksida (CO₂), metana (CH₄), dinitroksida (N₂O), dan CFC sehingga sinar matahari terperangkap dalam atmosfer bumi (Forest , 2017).

Menurut, Susandi (2008) Perubahan iklim global sebagai implikasi dari pemanasan global telah mengakibatkan ketidakstabilan atmosfer di lapisan bawah terutama yang dekat dengan permukaan bumi. Pemanasan diperkirakan akan terus terjadi karena karbon dioksida (CO₂) diperkirakan memiliki umur di atmosfer 50 sampai 200 tahun (Venkataramanan dan Smitha, 2011).

2.5 Gas Rumah Kaca

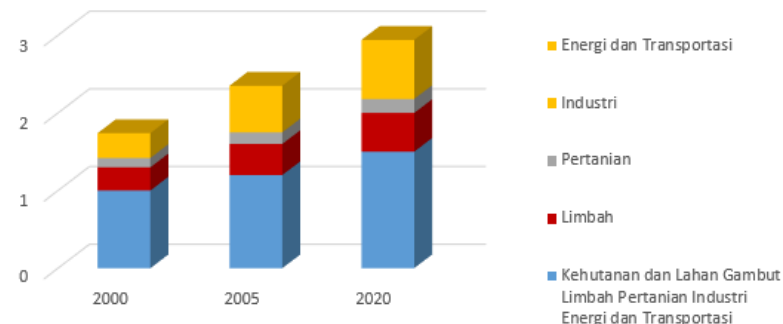
Gas Rumah Kaca (GRK) merupakan gas di atmosfer yang berfungsi menyerap radiasi inframerah dan ikut menentukan suhu atmosfer. Gas Rumah Kaca diartikan sebagai gas yang terkandung dalam atmosfer, baik alami maupun dari kegiatan manusia (antropogenik), yang menyerap dan memancarkan kembali radiasi inframerah. Sebagian radiasi matahari dalam bentuk gelombang pendek yang diterima permukaan bumi dipancarkan kembali ke atmosfer dalam bentuk radiasi gelombang panjang (radiasi inframerah). Radiasi gelombang yang tertahan akibat adanya gas rumah kaca akan menimbulkan efek panas yang disebut “Efek Rumah Kaca”. Penjelasan mengenai efek rumah kaca digambarkan melalui Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Proses Terjadi Pemanasan Global

GRK utama yang ada di permukaan bumi adalah CO_2 , CH_4 , dan N_2O . Dari ketiga jenis gas tersebut, yang paling besar kandungannya di atmosfer ialah CO_2 sedangkan yang lainnya sangat sedikit sekali. Konsentrasi CO_2 saat ini di atmosfer ialah sekitar 383 ppm (part per million) atau sekitar 0.0383% volume atmosfer. Sedangkan CH_4 dan N_2O masing-masing 1745 ppb dan 314 ppb (part per billion) atau sekitar 0.000175% dan 0.0000314% volume atmosfer. Adanya berbagai aktivitas manusia khususnya

sejak era pra-industri, emisi gas rumah kaca ke atmosfer mengalami peningkatan yang sangat tinggi sehingga meningkatkan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Hal ini menyebabkan timbulnya masalah pemanasan global dan perubahan iklim (Kementerian Lingkungan Hidup, 2012). Kadar emisi karbondioksida di Indonesia berkisar pada angka 430-440 juta ton, diperkirakan akan mencapai angka 820.830 juta ton pada tahun 2035. Jumlah tersebut merupakan jumlah yang sangat besar, dibandingkan dengan negara ASEAN lainnya (*International Energy Agency*, 2011).



Gambar 2.3 Gas Rumah Kaca di Indonesia Hingga Tahun 2020

(Sumber: International Energy Agency)

Berdasarkan grafik diatas tingkat emisi di Indonesia diperkirakan akan meningkat dari 1,72 Gton CO₂-e pada tahun 2000 menjadi 2,95 Gton CO₂-e pada tahun 2020. Dimana terdapat 2 skenario penurunan target emisi gas rumah kaca. Saat ini Pemerintah Indonesia telah menargetkan penurunan emisi gas rumah kaca sebesar 26% yang dicapai pada tahun 2020 tanpa bantuan negara lain dan sebesar 41% bila memperoleh bantuan dari negara lain (Fadhila, 2016). Hal tersebut merupakan langkah yang dilakukan pemerintah Indonesia dalam menanggapi adanya perubahan iklim. Bukti bahwa perubahan iklim yang sudah terjadi dalam laporan yang dikeluarkan *World Wide Fund, Climate Change: Implications for Humans and Nature* (2007), dipaparkan

bukti bahwa perubahan iklim sudah terjadi di Indonesia, diantaranya:

- Temperatur suhu di Indonesia meningkat sebesar 0,3 °C
- Pola cuaca berubah, bagian Sumatra dan Borneo akan lebih basah 10-30% pada 2080 di bulan Desember Februari. Sedangkan Jakarta diprediksikan akan lebih menghangat 5-15% pada Juni-Agustus.
- Angin musim akan datang terlambat 30 hari, curah hujan meningkat 10% (April-Juni) dan 75% curah hujan menurun/kemarau (Juli-September).

2.6 Asbut atau Smog

Asbut adalah kabut pengoksidasi yang terbentuk dari reaksi fotokimia nitrogen oksida dan hidrokarbon organik yang mudah menguap, yang merupakan polutan utama dilepaskan dari pembakaran bahan bakar fosil di mobil, pembangkit listrik, dan lain-lain (Jeffrey, 2008). Gas-gas itu tersebut selanjutnya akan mengalami reaksi fotokimia yaitu reaksi yang terjadi adanya foton (cahaya). Reaksi fotokimia ini menghasilkan polutan sekunder yang mengandung gas NO₂ dan ozon (O₃) yang akhirnya membentuk smog (Mark Z, 2002).

Paparan ozon dapat menyebabkan serangan asma, radang paru-paru dan penyakit pernapasan lainnya. Tingginya kadar polusi ozon menyebabkan ketidaknyamanan bagi orang-orang dengan asma atau penyakit paru-paru lainnya. Ozon dapat merusak jaringan paru-paru bahkan pada orang sehat. Itu membuat mata kita gatal, luka bakar dan berair. Bahkan orang sehat dapat terpengaruh jika mereka berolahraga di luar ruangan (Richard dalam Gusnita, 2014).

2.7 Ekotoksitas

Ekotoksitas adalah kecenderungan bahan uji untuk menimbulkan dampak buruk secara biokimia, fisiologi ataupun terhadap perilaku makhluk hidup. Ekotoksitas dapat terjadi secara alami maupun oleh ulah manusia. Berbagai macam racun yang sekarang relatif umum di masyarakat termasuk beberapa zat beracun yang disebut sebagai *ecotoxicants* (Connell, 2005). Zat *ecotoxicants* ditimbul oleh pembuatan, penggunaan, dan pembuangannya, yang mengarah pada distribusi di lingkungan

alami dan paparan ekosistem alami padanya. Namun, pada era sekarang efek ekotoksitas sering terjadi akibat tindakan manusia seperti penggunaan bahan bakar untuk kendaraan, industri dan lain-lain (Tarazona, 2014). Zat tersebut dapat berupa pelepasan dari industri (hidrokarbon minyak bumi, logam berat, asam, alkali, pelarut), pembangkit listrik, pertanian (herbisida, insektisida), kegiatan domestik (pestisida, minyak bumi), atau kegiatan lain yang mengakibatkan pelepasan ke lingkungan. Polusi yang disebabkan oleh tindakan manusia sering disebut polusi antropogenik. Studi ekotoksitas digunakan untuk mencegah dan mengurangi efek ekotoksitas yang timbul akibat perilaku manusia.

2.8 Asidifikasi

Asidifikasi adalah proses meningkatnya keasaman pada lingkungan yang diakibatkan oleh masuknya zat asam ke lingkungan. Zat-zat penyebab asidifikasi yaitu SO_x dan NO_x . Ketika zat tersebut bereaksi dengan air akan menghasilkan asam. Asam-asam terbawa oleh air hujan turun kebumi dan dapat meresap ke dalam tanah, akhirnya masuk ke dalam sumur (Sutanto, 2011). Selain zat SO_x dan NO_x , CO_2 juga dapat menyebabkan *ocean acidification*.

Pengasaman laut (*ocean acidification*) merupakan istilah yang diberikan untuk proses turunnya kadar pH air laut yang kini tengah terjadi akibat kenaikan penyerapan karbon dioksida (CO_2) di atmosfer yang dihasilkan dari berbagai kegiatan manusia. Peningkatan rilis antropogenik CO_2 akan menghasilkan terus pengasaman permukaan laut selama abad ini dan itu meramalkan bahwa rata-rata pH lautan dapat menurun lebih jauh 0,4 unit pada tahun 2100 (Turley, 2008). Hal ini dapat terjadi karena ketika CO_2 bereaksi dengan air laut, terjadi perubahan kimia yang menyebabkan konsentrasi ion bikarbonat (HCO_3^-) dan asam karbonat (H_2CO_3) meningkat seiring meningkatnya konsentrasi CO_2 di atmosfer, sedangkan jumlah ion karbonat (CO_3^{2-}) dan pH rata-rata air laut berkurang.

2.9 Eutrofikasi

Eutrofikasi adalah proses pengayaan air oleh nutrisi yang menyebabkan suatu percepatan pertumbuhan alga dan bentuk-

bentuk kehidupan tanaman yang lebih tinggi sehingga menghasilkan gangguan yang tidak diinginkan terhadap kualitas air dan keseimbangan organisme yang ada di dalam air (OSPAR, 2003). Penyebab eutrofikasi yaitu masuknya zat N dan P yang berlebihan pada badan air. Terdapat dua fase dampak akibat adanya eutrofikasi yaitu dampak primer dan sekunder. Pada dampak primer umumnya memerlukan lonjakan awal dalam biomassa mikroalga, makroalga dan/atau epifit yang terkait dengan pemuatan nutrisi antropogenik. Pada fase dampak kedua perkembangan dampak menjadi lebih parah seperti hilangnya vegetasi air yang terendam, penipisan oksigen, perkembangbiakan ganggang berbahaya, jaring makanan yang tidak seimbang, berkurangnya keanekaragaman hayati, perubahan siklus biogeokimia, kematian ikan dan pembentukan zona mati (Ferreira et al., 2011).

2.10 Karsinogenik

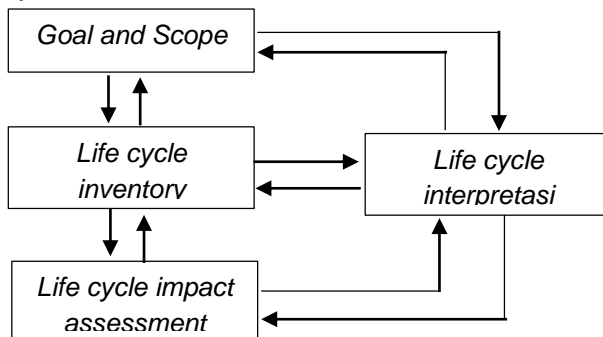
Karsinogenik adalah kecenderungan bahan uji untuk menimbulkan penyakit kanker pada makhluk hidup terutama manusia. Salah satu penyebab penyakit kanker adalah *particulate matter* (PM). Menghirup partikulat dapat menyebabkan beberapa penyakit berbahaya, termasuk kronis penyakit paru obstruktif (PPOK) dan kanker paru-paru (Cornell, 2016). Penelusuran dari 1993 hingga 2003 mengindikasikan dampak yang besar dari emisi industri seperti pembangkit listrik, produksi semen dan pelabuhan pada kematian akibat kanker, khususnya hubungan positif antara perkiraan PM₁₀ dari pabrik industri dan kematian dikarenakan kanker pankreas, pleura, ginjal (Ancona et al., 2016). Serangkaian besar polutan yang memprihatinkan yang dipancarkan oleh pembakaran batu bara seperti polutan gas, partikel, benzena, hidrokarbon aromatik polisiklik, dan logam berat (Piersanti et al., 2018).

2.11 Life Cycle Assessment (LCA)

LCA adalah sebuah teknik yang digunakan untuk melakukan penilaian terhadap dampak lingkungan yang berhubungan dengan suatu produk. Tahap pertama pada LCA adalah menyusun dan menginventarisasi masukan dan keluaran yang berhubungan dengan produk yang akan dihasilkan

(Hermawan, et. al., 2013). LCA adalah pendekatan "*cradle-to-grave*" untuk menilai sistem industri. "*Cradle-to-grave*" dimulai dengan pengumpulan bahan baku dari bumi untuk menciptakan produk dan berakhir pada titik ketika semua bahan dikembalikan ke bumi. 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 (Putri et al., 2014). Esensi dari *life cycle assessment* adalah evaluasi dampak teknologi, ekonomi dan lingkungan, yang relevan dengan bahan mentah (material), proses dan/atau produk, sepanjang siklus hidup mulai dari pembuatannya hingga menjadi limbah (Soemarmo, dkk., 2013).

Setelah diketahui dampak kritis dari seluruh kegiatan terhadap lingkungan maka akan diperoleh beberapa alternatif perbaikan untuk masing-masing kegiatan dalam supply chain. Alternatif perbaikan yang diusulkan untuk masing-masing rantai dapat digunakan sebagai dasar pembuatan alternatif untuk *life cycle* yang ada sehingga didapatkan *supply chain* yang sesuai dengan konsep *green supply chain management* (Putri, et. al., 2014). Terdapat beberapa tahapan untuk melakukan identifikasi dan evaluasi produk menggunakan LCA. Berikut adalah tahapannya:



Gambar 2.4 Bagan Alir Tahapan LCA

1. Definisi tujuan dan cakupan (*goal and scope definition*)
Merupakan petunjuk yang dapat membantu konsistensi dari penelitian LCA. Tujuan harus menunjukkan alasan

dilakukannya penelitian dan untuk apa penelitian tersebut. Ruang lingkup penjelasan penelitian metode yang dipakai, asumsi, dan batasan.

2. Tahap input analisis inventori (*life cycle inventory*) Melakukan inventarisasi masukan dan keluaran yang berhubungan dengan ruang lingkup studi. Tujuan analisis ini adalah untuk menunjukkan pengaruh lingkungan per bagian *life cycle*.
3. Tahap perdugaan dampak (*life cycle impact assessment*) Evaluasi terhadap dampak potensi terhadap lingkungan dengan menggunakan hasil dari *life cycle inventory* dan menyediakan informasi untuk menginterpretasikan pada fase terakhir.
4. Tahap interpretasi (*life cycle interpretation*) Tahap akhir analisis daur hidup memberikan simpulan, rekomendasi, dan pengambilan keputusan.

2.12 Simapro 8.5.2

SimaPro merupakan salah satu *software* yang dapat digunakan untuk melakukan analisis dampak lingkungan dari suatu sistem amatan tertentu. Data yang dimasukkan dalam *software* SimaPro ditentukan berdasarkan deskripsi sistem amatan yang sudah dijelaskan sebelumnya meliputi distribusi bahan baku, proses produksi, serta distribusi produk akhir (Kautzar, 2015). *Software* SimaPro yang digunakan di dalam analisis LCA ini adalah SimaPro versi 8.5.2 *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):

- Bersifat fleksibel
- Dapat digunakan secara multi-user-version sehingga dapat menginput data secara berkelompok meskipun berbeda lokasi
- Memiliki metode dampak yang beragam
- Dapat menginventarisasi data dalam jumlah banyak

- Data yang didapatkan memiliki nilai transparansi yang tinggi, dimana hasil interaktif analisis dapat melacak hasil lainnya kembali ke asal-usulnya

Menurut Tamara (2017), dalam menggunakan *software* ini terdapat beberapa tahapan pada SimaPro yaitu sebagai berikut :

a) Menentukan *Goal and Scope*

- *Text field*, untuk menginput data pemilik, judul penelitian, tanggal, komentar, alasan dan tujuan melakukan penelitian LCA
- Pemilihan *libraries*, memilih metoda yang akan digunakan

Pada tahap ini dipilih *scope* penelitian yang dipilih adalah *TRACI* data 2.0. *Scope* ini dipilih dikarenakan fokus terhadap:

- Input

Input data ini berupa material dan energi yang digunakan pada kegiatan industri listrik.

- Output

Output pada kegiatan batubara berupa emisi gas rumah kaca dan gas pencemar udara.

b) Melakukan inventarisasi

- *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 dibuang) dan *disposal scenarios* (produk yang digunakan kembali).

Pada tahap ini diinput data, seperti proses pada produksi solar yang menghasilkan emisi gas rumah

kaca. Kemudian dimasukkan beban emisi yang dihasilkan, dimana data ini dalam jumlah per tahun.

c) Penilaian terhadap cemaran

Pada penentuan prakiraan dampak dipilih metode yang sesuai dengan *goal and scope* pada penelitian. Metode yang digunakan sebagai model pendekatan dari dampak yang dihasilkan terdiri dari 3 cara yaitu dengan pendekatan *midpoint*, *endpoint* dan perpaduan keduanya. Pendekatan *midpoint* digunakan agar mengetahui permasalahan yang muncul dari dampak yang ditimbulkan (*problem oriented*) seperti *global warming*, *ecotoxicity*, *smog formation*. Pada TRACI kategori dampak yang dapat dianalisis dengan pendekatan ini meliputi *global warming 100a*, *ecotoxicity*, *smog*, *acidification*, *carcinogenic*, *respiratory effect*, *fossil fuel depletion*, dan *eutrophication*. Peneliti dapat membatasi prakiraan dampak sesuai dengan yang akan diteliti. Pada penelitian ini dibatasi 3 batasan prakiraan dampak yaitu:

- *Global warming*: membahas mengenai dampak yang dihasilkan dari peningkatan suhu permukaan bumi seperti adanya perubahan iklim. Dampak ini diakibatkan meningkatnya gas rumah kaca di atmosfer.
- *Ecotoxicity*: membahas mengenai potensi efek toksik (racun), yang disebabkan polutan kepada ekosistem seperti hutan dan laut.
- *Smog formation*: membahas mengenai potensi terbentuknya asbut di udara yang mengandung NO_2 dan O_3 , sehingga dapat mengganggu aktivitas dan kesehatan makhluk hidup.
- *Acidification*: membahas mengenai dampak ini membahas mengenai zat asam yang masuk ke dalam lingkungan (asam nitrit dan asam sulfat). Sehingga menyebabkan keasaman dilingkungan meningkat.
- *Carcinogenic*: membahas mengenai dampak zat kimia yang mempengaruhi lingkungan manusia. Sehingga menimbulkan potensi penyakit kanker.

- *Respiratory Effect*: membahas mengenai dampak yang dihasilkan dari peningkatan jumlah partikulat di atmosfer. Sehingga mempengaruhi kesehatan manusia.
- *Fossil Fuel Depletion*: membahas mengenai potensi menipisnya sumber daya alam akibat pemborosan energi fosil. Dimana dampaknya dapat memengaruhi kerusakan alam dan ekosistem. Satuan dari *impact* ini adalah MJ surplus.
- *Eutrophication*: membahas mengenai pencemaran lingkungan khususnya air yang disebabkan oleh munculnya nutrient yang berlebihan ke dalam ekosistem. Satuan dari *impact* ini adalah kg N eq.

Penilaian dampak diatas akan melewati 4 tahap sebagai berikut:

- *Characterization*, merupakan senyawa kimia pada suatu proses yang memiliki kontribusi pada 14 *impact category* yang terdapat pada LCA. Pada *characterisation* akan disajikan nilai prosentase masing-masing emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh sub proses terhadap 1 *impact category*.
- *Normalization*, merupakan penilaian dengan membandingkan hasil dari *impact category indicator* dengan nilai normal. Hal ini bertujuan menyetarakan satuan sesuai ketentuan satuan masing-masing *impact category* secara internasional. Seperti pada *global warming*, hasil emisi dikonversi menjadi CO₂-e.
- *Weighting*, merupakan proses mengkalikan *impact category indicator* dengan *weighting score* dan diakumulasikan sebagai *total score*.
- *Single score*, merupakan proses yang memperlihatkan proses produksi yang mempunyai dampak terhadap lingkungan.

- d) Interpretasi data, mengevaluasi suatu kesimpulan untuk digambarkan dan bagaimana dapat dipertanggung jawabkannya.

2.13 Metode *Midpoint* dengan TRACI

Metode *midpoint* merupakan metode yang menggambarkan sebab-akibat dampak lingkungan awal yang akan muncul dari data yang dimasukkan dalam tahap *life cycle inventory* (LCI). TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts*) merupakan metodologi yang berorientasi titik tengah (*midpoint*) yang dikembangkan oleh *Environmental Protection Agency* (EPA) di USA, dengan tujuan membantu dalam penilaian dampak pada desain proses dan mencapai pencegahan polusi. Beberapa kategori dampak yang dapat dianalisis dengan pendekatan TRACI ini meliputi *global warming, smog formation, acidification, eutrophication, human health cancer, human health non cancer, human health criteria pollutants, eco-toxicity*, dan *fossil fuel depletion*. Faktor normalisasi dari TRACI berdasarkan laporan emisi tahunan dan sumber daya dari US pada tahun 1999 (Menoufi, 2011). TRACI dipilih karena memiliki analisis dampak yang akan dikaji oleh peneliti seperti *global warming, ecotoxicity* dan *smog formation*.

2.14 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu ini menjadi salah satu referensi dan bahan kajian dalam melakukan penelitian. Beberapa penelitian membahas mengenai metode LCA dalam melakukan suatu kajian produk. Pada sub-bab ini akan diuraikan mengenai tiga penelitian yang berkaitan dengan metode LCA. Untuk beberapa penelitian terdahulu yang menggunakan metode LCA dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Data Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti (Tahun Penelitian)	Judul Penelitian	Isi Penelitian
1.	Annisa Tamara Sari (2017)	Life Cycle Assessment (LCA) emisi proses produksi Bahan Bakar Minyak (BBM) jenis solar dengan pendekatan Analytical Hierarchy Process (AHP).	<p>Penelitian ini mengidentifikasi dampak dari emisi kegiatan industri minyak dan gas menggunakan LCA. LCA digunakan untuk melakukan penilaian terhadap dampak lingkungan dengan metode EDIP 2003. Dampak paling besar berasal dari proses pengolahan sebesar 94,6% akibat adanya kegiatan pada unit crude distilasi. Sedangkan pada masing-masing proses dampak paling besar diakibatkan oleh, sumur produksi pada proses eksplorasi dan produksi, kegiatan penunjang pada proses distribusi, dan pemakaian BBM solar. Setelah diketahui dampaknya maka dilakukan analisa alternatif menggunakan AHP. Alternatif kegiatan sumur produksi yang dapat digunakan adalah enhanced oil/gas recovery. Alternatif kegiatan crude distilasi yang dapat digunakan adalah disalter design sebagai gas inert. Alternatif kegiatan penunjang yang dapat digunakan adalah peningkatan pemakaian bahan bakar low sulphur. Alternatif kegiatan pemakaian BBM solar yang dapat digunakan adalah pemakaian eco-driving.</p>

No.	Peneliti (Tahun Penelitian)	Judul Penelitian	Isi Penelitian
2.	Erdhyan Saputri, (2018)	Kajian Dampak Proses Pengolahan Minyak Bumi di Pertamina RU IV Balongan Terhadap Lingkungan dengan Menggunakan Metode <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA)	Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi dampak pencemaran udara yang terjadi pada proses pengolahan minyak bumi di PT. Pertamina RU IV Balongan. Identifikasi dampak lingkungan ini dilakukan dengan pendekatan LCA menggunakan software SimaPro 8.4. Proses yang diperiksa dari <i>crude oil</i> hingga terbentuk bensin, solar, dan IDF. Dari hasil LCA, diketahui bahwa produksi gasoline (bensin) memberikan dampak terbesar yaitu 81,89 ton CO ₂ /produk. Alternatif terpilih untuk mengurangi dampak dari emisi yaitu penggunaan <i>preflash coloumn</i> atau <i>preflash drum</i> pada kolom destilasi.
3.	Nadia Andistiara, (2018)	Kajian Dampak Proses Eksplorasi dan Produksi Gas Alam Terhadap Lingkungan dengan Menggunakan Metode <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA)	Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi dampak pencemaran udara yang terjadi pada proses eksplorasi dan produksi JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi. Identifikasi dampak lingkungan ini dilakukan dengan pendekatan LCA menggunakan software SimaPro 8.4. Proses yang diperiksa yaitu unit GTG, unit hot oil heater, unit combustor, dan unit flare. Dari hasil LCA, diketahui bahwa beban emisi paling besar dihasilkan dari unit hot oil heater dengan beban CO ₂ , CH ₄ , dan N ₂ O berturut-turut sebesar 2.628.315,144 ton

No.	Peneliti (Tahun Penelitian)	Judul Penelitian	Isi Penelitian
			CO ₂ /hari, 47,018 ton CH ₄ /hari, dan 4,071 ton N ₂ O/hari. Alternatif terpilih untuk mengurangi dampak dari emisi yaitu penggunaan kembali LP fuel gas excess ke dalam unit production separator dengan proses kompresi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Pendahuluan

Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi dampak produksi listrik dari PLTU batubara dengan menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini yaitu mengetahui jumlah beban emisi (CO₂, CH₄, SO₂, NO₂, dan partikulat) dari proses produksi PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON, serta identifikasi dampak lingkungan yang terjadi pada proses produksi PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON. Perhitungan beban emisi didasarkan pada reaksi-reaksi yang terlibat di dalam proses produksi. Metode yang bisa digunakan yaitu melalui perhitungan stokiometri reaksi dan kesetimbangan neraca massa serta menggunakan metode faktor emisi IPCC. Kemudian untuk mengidentifikasi dampak yang ditimbulkan dari proses produksi digunakan metode LCA. Analisis yang dilakukan dalam penelitian ini mencakup analisis bahan baku dan bahan bakar yang digunakan, emisi serta produk yang dihasilkan dari kegiatan produksi gas alam. Dalam analisis LCA menggunakan aplikasi SimaPro 8.5.2. Prakiraan dampak hasil analisis LCA menggunakan SimaPro 8.5.2 seperti *warming 100a*, *ecotoxicity*, *smog*, *acidification*, *carcinogenic*, *respiratory effect*, *fossil fuel depletion*, dan *eutrophication* akan dikuantifikasi berdasarkan besar kecilnya pengaruh dampak ke lingkungan. Hasil dari analisis LCA tersebut digunakan untuk memprakirakan alternatif perbaikan yang dapat dilakukan untuk mereduksi dampak yang terjadi, yang kemudian dipilih oleh pihak perusahaan menggunakan metode kuesioner. Pemilihan prakiraan alternatif didapatkan dari hasil analisis dan hasil diskusi dengan pihak terkait yang bekerja pada proses produksi listrik di PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton serta dosen pembimbing. Keluaran penelitian ini adalah beberapa alternatif perbaikan yang dapat diterapkan untuk mereduksi dampak yang terjadi.

3.2 Profil Perusahaan

PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton atau PLTU Unit 9 merupakan pembangkit yang dimiliki PT. PLN (Persero) yang didirikan untuk menanggulangi krisis energi di Indonesia. Secara

umum pembangunan PLTU ini bertujuan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dalam berbagai kepentingan pembangunan khususnya di Pulau Jawa, Madura dan Bali. Pembangunan PLTU Paiton Unit 9 ini merupakan pelaksanaan program pemerintah yang telah dicanangkan dalam intensifikasi, diversifikasi dan konversi energi. Dalam hal pemanfaatan potensi batubara yang ada di Indonesia sebagai sumber energi dan mengurangi ketergantungan pada minyak bumi.

Pada awalnya selama *First Year Inspection* (FYI) semua peralatan dilakukan perawatan dan perbaikan oleh Harbin Power Engineering Co. Ltd. (HPE) dari pihak China, kemudian setelahnya menjadi milik PT. PLN (Persero). PT. PLN adalah pemilik yang menentukan kebijakan kerja dan target kerja, sedangkan PT. PJB (Pembangkit Jawa Bali) adalah anak perusahaan PT. PLN (Persero) dibidang pembangkitan sebagai Asset Manager yang bertanggung jawab terhadap kinerja perusahaan pembangkitan. Sedangkan PT. PJBS (Pembangkit Jawa Bali Service) adalah anak perusahaan dari PT. PJB sebagai asset operator yang bertanggung jawab melaksanakan operasi dan pemeliharaan pada PLTU yang biasa disebut PT. PJB UBJ O&M PLTU.

PLTU Paiton Unit 9 memiliki kapasitas terpasang 660 MW dioperasikan menggunakan bahan bakar Low Rank Coal (4200 kCal/kg), dengan kebutuhan batubara mencapai 2,2 juta ton/tahun. Pada tahun 2018 PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton mampu memproduksi listrik sebesar 3.699.169.397,4 kWh, yang disalurkan melalui jaringan 500 kV ke sistem interkoneksi Jawa-Bali. PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton terletak berbatasan dengan Selat Madura di bagian utara, Jalan Raya Probolinggo Situbondo di bagian selatan, Unit 1-8 untuk bagian timur, serta area garis pantai dibagian barat, PLTU ini memiliki area seluas 42 ha, berlokasi di desa Bhinoe, Kecamatan Paiton, Kabupaten Probolinggo, Jawa Timur dan berjarak sekitar 141 km dari Surabaya. Letak Geografis PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton dapat dilihat pada Gambar 3.1.

3.3 Proses Produksi Listrik

Cakupan studi yang dianalisis pada penelitian ini adalah Central Plant ,PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton. Sedangkan untuk

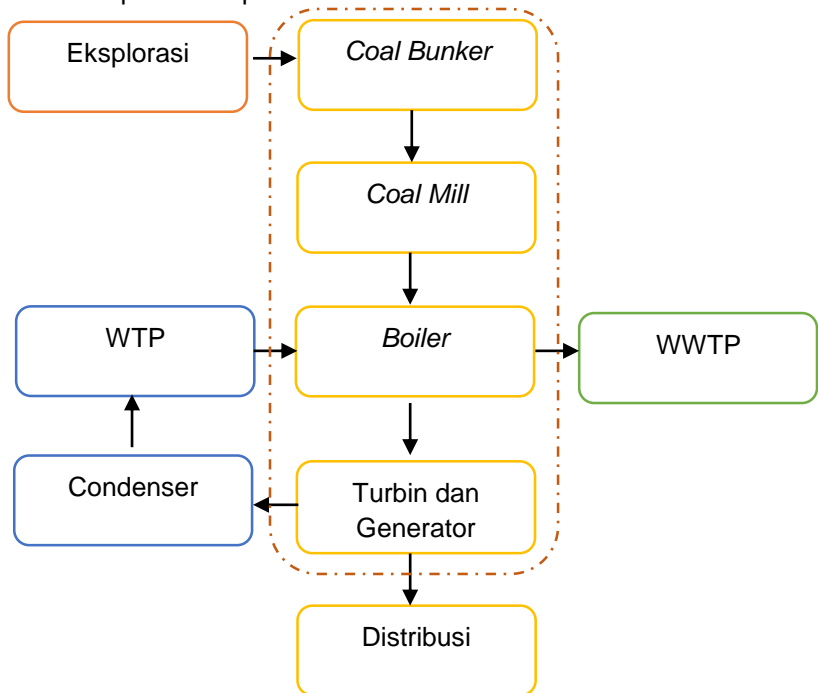


Gambar 3. 1 Letak Geografis PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton
Sumber : Google Earth, 2019

Jetty Area, Water Treatment Plant (WTP), Waste Water Treatment Plant (WWTP) tidak dilakukan analisis. Hal tersebut dikarenakan pada area tersebut bukan termasuk proses utama dari produksi listrik oleh PLTU. Proses utama pada produksi PLTU terjadi pada unit *coal bunker, coal mill, boiler*, turbin dan generator. Produksi listrik pada PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton menggunakan batubara jenis *lignite (low rank)* yang diambil dari penambangan batubara di Kalimantan.

Batubara dari *coal bunker* diangkut menggunakan conveyor dan diteruskan ke *coal mill* yang berfungsi mengatur dan menggiling batubara sesuai dengan kebutuhan menjadi serbuk yang sangat halus yaitu sebesar 200 mesh. Serbuk batubara ini dicampur dengan udara panas dari *primary air fan (PA Fan)* dan dibawa ke *coal burner* yang menghembuskan serbuk batubara tersebut ke dalam ruang bakar untuk proses pembakaran dan terbakar seperti gas untuk mengubah air menjadi uap. Udara panas yang digunakan oleh PA Fan dipasok dari FD Fan yang menekan udara panas setelah dilewatkan melalui *Air Heater*. FD Fan juga memasok udara ke *coal burner* untuk mendukung proses pembakaran. Panas yang dihasilkan akan diserap oleh pipa-pipa

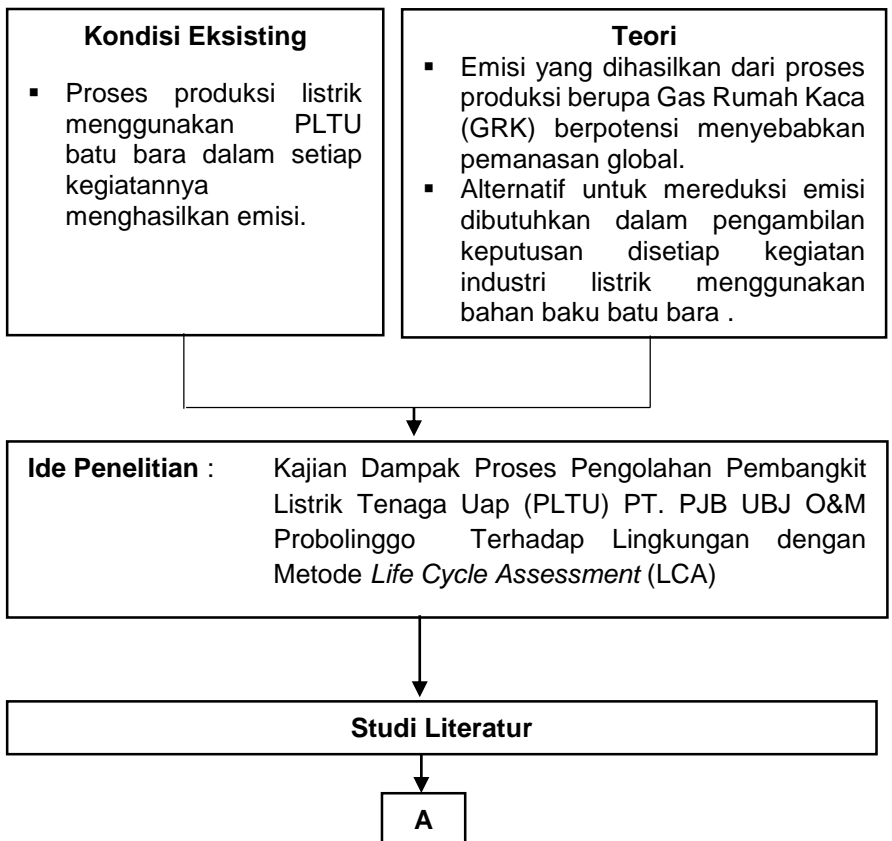
uap (*waterwalls*) menjadi uap jenuh/uap basah yang selanjutnya dipanaskan dengan *superheater*. Kemudian uap tersebut dialirkan ke turbin. Poros turbin bertekanan dikopel dengan rotor generator. Generator dibungkus dalam stator generator. Sehingga listrik dihasilkan dalam batangan tembaga pada stator oleh elektromagnet rotor melalui perputaran dari medan magnet. Perputaran rotor ini yang akan menggerakkan generator dan akhirnya oleh generator energi mekanis akan diubah menjadi energi listrik. Proses produksi listrik PT.PJB UBJ O&M PLTU Paiton dapat dilihat pada Gambar 3.2.

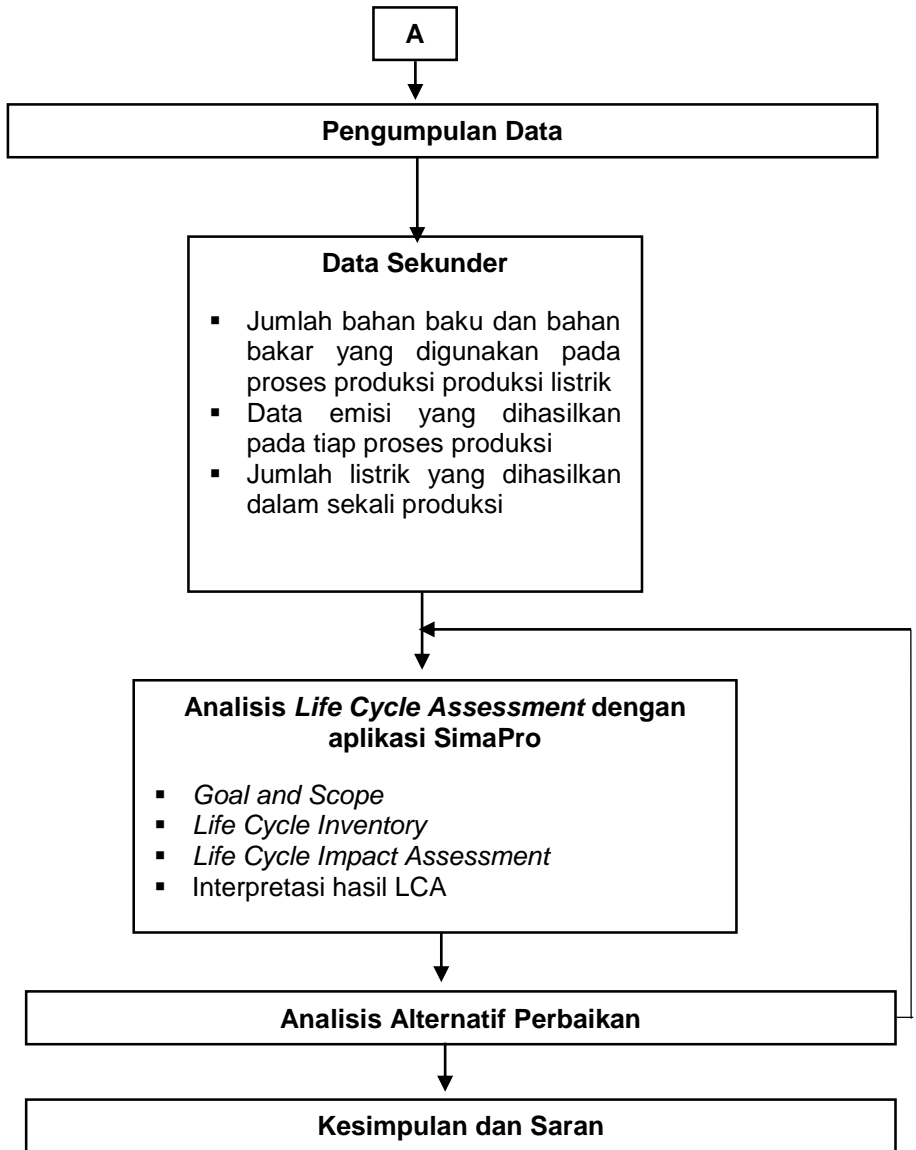


Gambar 3. 2 Proses Produksi Listrik PT. PJBUBJ O&M PLTU Paiton

3.4 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian ini disusun berdasarkan tujuan penelitian. Dari tujuan tersebut, dikembangkan menjadi ide penelitian, studi literatur, pengumpulan data lapangan, analisis beban emisi, analisis dampak lingkungan dengan *Life Cycle Assessment* (LCA) menggunakan aplikasi SimaPro. Kerangka penelitian selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 3.3.





Gambar 3.3 Kerangka penelitian

3.5 Tahap Pendahuluan

Tahap pendahuluan pada penelitian ini terdiri dari:

1. Kajian literatur yang dilakukan terhadap:
 - Proses produksi
 - Pencemaran udara
 - Sumber emisi pada industri PLTU
 - Pemanasan Global
 - Gas Rumah Kaca
 - Asbut atau *Smog*
 - Ekotoksisitas
 - Asidifikasi
 - Eutrofikasi
 - Karsinogenik
 - *Life Cycle Assessment*
 - SimaPro 8.5.2
 - Metode Midpoint dengan TRACI
 - Penelitian terdahulu mengenai LCA
2. Melakukan perizinan untuk kepentingan pengumpulan data pada pihak PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton.
3. Membuat perizinan untuk mendapatkan lisensi aplikasi SimaPro.

3.6 Tahap Pengumpulan Data

Pengumpulan data yang dibutuhkan adalah data sekunder.

- Pengumpulan Data Sekunder

Data sekunder merupakan data yang didapatkan dari *history* proses produksi di PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton. Untuk data yang diperlukan dalam penelitian ini secara lebih rinci dapat dilihat pada Tabel 3.1.

3.7 Tahap Pengolahan Data

Analisis data dilakukan dalam rangka memprakirakan beban emisi CO₂, CH₄, N₂O, NO₂, dan SO₂, identifikasi dampak lingkungan yang terjadi, dan pemilihan alternatif perbaikan yang akan direkomendasikan.

Tabel 3.1 Data-Data yang Diperlukan

No	Jenis Data	Metode Pengambilan Data	Durasi Data	Asal Data
1	Emisi CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SO ₂ , NO ₂ , dan partikulat pada unit produksi	Data Sekunder	2 tahun	PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton.
2	Data jumlah bahan bakar dan bahan baku.	Data Sekunder	2 tahun	PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton.
3	Data jumlah produk listrik yang dihasilkan dari produksi batu bara	Data Sekunder	2 tahun	PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton.

3.7.1 Analisis Beban Emisi CO₂, CH₄, N₂O, SO₂, NO₂, dan Partikulat

Data yang akan dianalisis adalah data beban emisi CO₂, CH₄, N₂O, SO_x, NO_x, dan partikulat. Analisis yang akan dilakukan mencakup data konsentrasi CO₂, CH₄, N₂O, SO_x, NO_x, dan partikulat dalam 2 tahun setiap 6 bulan sekali, serta jumlah bahan bakar yang digunakan pada setiap unit pengolahan selama 2 tahun. Dalam melakukan analisis beban emisi CO₂, CH₄, N₂O, SO_x, NO_x, dan partikulat dilakukan hal-hal sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi sumber-sumber emisi tidak bergerak yang ada di PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON.
2. Merekapitulasi data hasil pengukuran pada sumber emisi tidak bergerak untuk beban emisi CO₂, CH₄, N₂O, SO_x, NO_x, dan partikulat selama 2 tahun terakhir berdasarkan data laporan PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON.

3. Mengidentifikasi unit-unit pengolahan yang menggunakan bahan bakar, lama operasionalnya, dan laju alir bahan bakar berdasarkan data laporan kegiatan produksi PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON.
4. Merekapitulasi data penggunaan bahan bakar pada setiap unit-unit pengolahan yang menggunakan bahan bakar dalam operasinya berdasarkan data laporan kegiatan produksi PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON. Kemudian dilakukan perhitungan *Low Heating Value* (LHV) / *Net Caloric Value* (NCV) bahan bakar.

Energi bahan bakar = LHV x laju alir bahan bakar x waktu operasi

(Persamaan 3.1)

5. Mencari data faktor emisi sesuai dengan bahan bakar yang digunakan.
6. Menghitung beban emisi dengan menggunakan metode faktor emisi IPCC dan API *Compendium*

$$E = A \times EF$$

(Persamaan 3.2)

Keterangan:

E = Jumlah emisi (kg).

A = Energi bahan bakar (TJ).

EF = Faktor emisi (kg/TJ).

Hasil dari analisis ini adalah data beban emisi untuk gas CO₂, CH₄, N₂O, SO_x, NO_x, dan partikulat dari setiap unit pengolahan dalam kegiatan produksi listrik di PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON. Hasil dari analisis beban emisi ini nantinya akan digunakan dalam analisis LCA.

3.7.2 Analisis *Life Cycle Assessment* dengan Aplikasi SimaPro

Untuk analisis dampak yang terjadi dari setiap kegiatan yang dianalisis maka digunakan metode LCA. Analisis yang akan dilakukan mencakup data bahan bakar, bahan baku, bahan kimia,

produk, dan emisi yang dihasilkan dalam proses produksi. Dalam melakukan analisis dampak yang terjadi dengan metode LCA digunakan *software* SimaPro. Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam menganalisis dampak dengan metode LCA menggunakan *software* SimaPro adalah sebagai berikut:

1. Menjumlahkan data-data yang telah direkap dan mengambil data rata-rata dengan membagi hasil penjumlahan setiap data dengan jumlah data yang terkumpul.
2. Menentukan tujuan (*goal*) analisis dengan memasukan tujuan penelitian ke dalam *software* SimaPro 8.5.2 Tujuan penelitian yang dimasukkan adalah mengidentifikasi dampak lingkungan yang terjadi pada kegiatan produksi listrik di PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton.
3. Menentukan batasan (*scope*) analisis dengan memilih *database* yang akan digunakan dalam penelitian pada *software* SimaPro.
4. Memasukkan data-data berupa bahan bakar, bahan baku, bahan kimia, produk, dan emisi yang telah dirata-rata ke dalam *software* SimaPro.
5. Melakukan pemilihan metode dampak lingkungan yang digunakan dalam penelitian pada *software* SimaPro.
6. Melakukan pemilihan kategori dampak yang akan dianalisis.
7. Melakukan tahapan *characterisation* pada *software* SimaPro, yang mana terjadi pengalihan faktor karakterisaasi dengan data-data yang telah di input pada tahap sebelumnya. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui kontribusi nilai dampak dari setiap kegiatan pada tiap kategori dampak.
8. Malakukan tahapan *normalization* pada *software* SimaPro dengan membagi hasil tahapan karakterisasi dengan faktor normalisasi. Hal tersebut bertujuan untuk menyetarakan nilai dampak guna mengetahui perbandingan nilai dampak pada tiap kategori dampak.
9. Melakukan Intepretasi data pada *software* SimaPro.

Dari data-data yang dimasukkan pada *software* SimaPro, maka akan terlihat dampak yang paling besar dari setiap kegiatan yang dianalisis sesuai dengan kategori dampak yang dipilih.

3.7.3 Analisis Alternatif yang Direkomendasikan

Alternatif perbaikan yang akan direkomendasikan sesuai dengan hasil kuesioner yang dilakukan. Dalam analisis alternatif perbaikan dilakukan hal-hal sebagai berikut:

1. Dari hasil analisis LCA dengan mengetahui dampak yang terjadi, maka dilakukan studi literatur mengenai alternatif perbaikan yang dapat diterapkan untuk mereduksi dampak yang terjadi.
2. Melakukan rekapitulasi alternatif perbaikan mengenai cara kerja dan fungsinya sesuai dengan hasil studi literatur.
3. Membuat skenario berisi alternatif perbaikan yang akan dipilih sesuai dengan studi literatur dan diskusi dengan pihak perusahaan yang telah dilakukan.
4. Melakukan *running* kembali menggunakan aplikasi simaPro 8.5.2. dengan skenario alternatif perbaikan yang telah dibuat.
5. Membuat grafik persentase penurunan dampak terhadap lingkungan terkait sebelum adanya alternatif perbaikan dan sesudah dilakukannya skenario alternatif perbaikan.

Hasil dari analisis ini adalah alternatif perbaikan yang dapat diterapkan pada industri yang menjadi objek penelitian sesuai dengan masukan dari pihak perusahaan dan ahli udara berdasarkan hasil analisis.

3.8 Kesimpulan dan Saran

Tahap terakhir yang dilakukan, yaitu penarikan kesimpulan dan saran. Kesimpulan dibuat untuk menjawab tujuan dari penelitian yang dilakukan. Sedangkan saran ditujukan untuk memberi petunjuk dan pengembangan terhadap penelitian sejenis yang mungkin akan dilakukan. Saran yang diberikan merupakan bentuk rekomendasi untuk menyempurnakan penelitian.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Perhitungan Beban Emisi

Perhitungan beban emisi yang dikaji dalam analisis ini hanya mencakup proses utama (*main process*) dari produksi listrik oleh PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton. Dalam sistem *boundaries* yang terdapat pada Gambar 3.2 proses utama dimulai dari pengangkutan batubara dari *bunker*, *coal mill*, boiler, turbin dan generator. Parameter yang yang dihitung dalam analisis ini yaitu CO₂, CH₄, N₂O, SO_x, NO_x, dan partikulat.

4.1.1 Data Bahan Baku dan Produksi

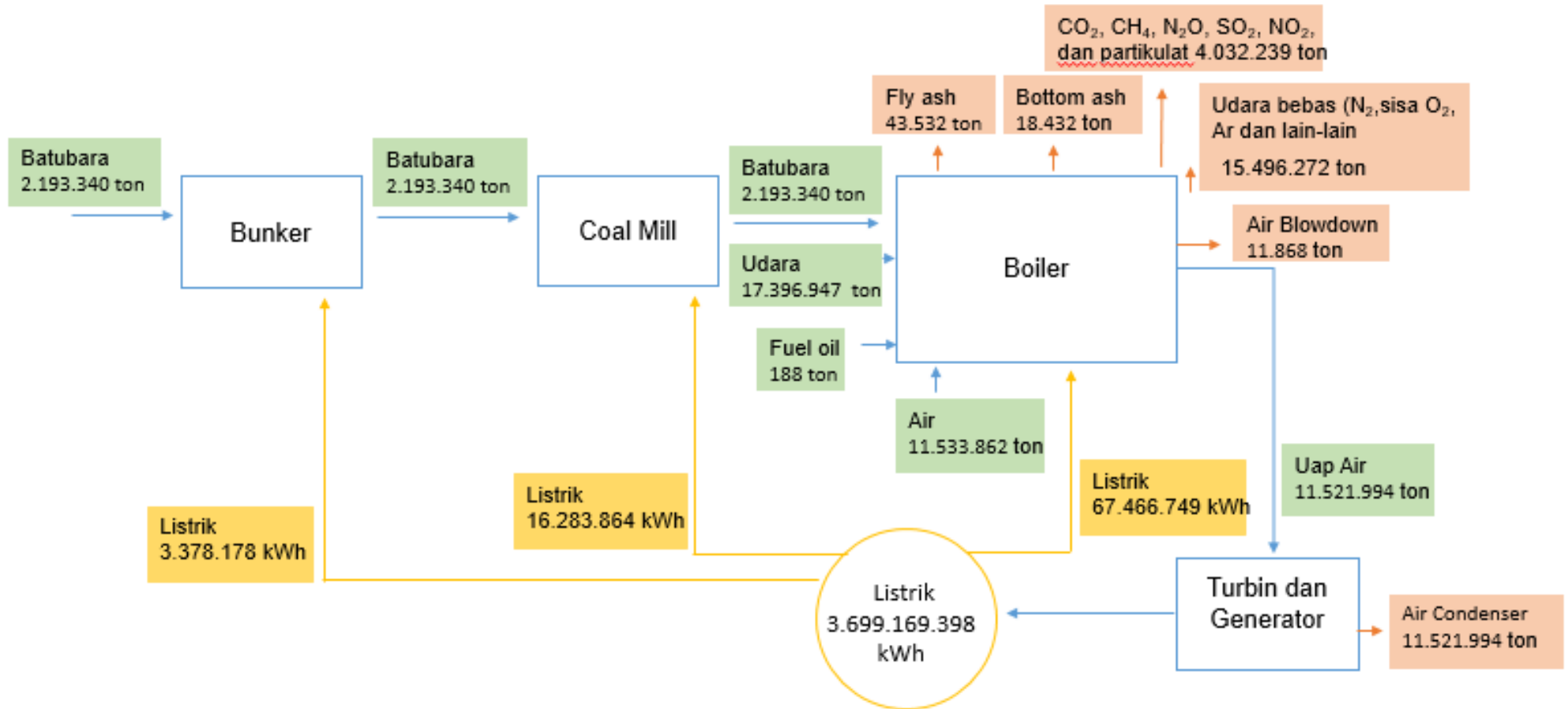
Kegiatan produksi mencakup jumlah bahan baku, nama unit yang digunakan serta jumlah produk yang dihasilkan. Selain itu dalam operasionalnya digunakan bahan bakar atau energi dalam unitnya. Data jumlah bahan baku, unit, dan bahan bakar atau energi yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.1. Masing-masing kegiatan dan jumlah bahan baku, bahan bakar atau energi serta produk dari masing-masing material dibawah akan dijelaskan lebih lanjut pada sub bab 4.3.2 penentuan *life cycle inventory*.

4.1.2 Perhitungan Beban Emisi

Perhitungan beban emisi dilakukan untuk mengetahui emisi yang terbentuk selama proses produksi berlangsung hingga dihasilkan satuan produk. Akan didapat dua hasil perhitungan emisi, secara utuh yaitu beban emisi total selama proses berlangsung pada tiap pencemar dan perhitungan dalam satuan produk. Berikut ini adalah contoh perhitungan beban emisi dari unit *boiler* menggunakan bahan bakar batubara dan bahan bakar *Industrial Diesel Oil* (IDO).

4.1.2.1 Perhitungan beban emisi CO₂, CH₄, dan N₂O.

Rumus yang digunakan dalam perhitungan emisi CO₂, CH₄, N₂O adalah:



Gambar 4.1 *Material Balance* PLTU PT. PJB UBJ O&M Probolinggo

$$\text{Energi bahan bakar} = \text{Nilai Kalor} \times \text{laju alir bahan bakar} \times \text{waktu operasi}$$

(Persamaan 3.1)

$$E = A \times EF$$

(Persamaan 3.2)

Keterangan:

- E = Jumlah emisi (kg)
- A = Energi bahan bakar (TJ)
- EF = Faktor emisi (kg/TJ)

Tabel 4. 1 Faktor Emisi CO₂, CH₄, dan N₂O

Emisi	Faktor Emisi (kg/TJ)	
	Batubara	IDO
CO ₂	101700	74100
CH ₄	0,95	2,85
N ₂ O	1,42	0,57

Sumber: API Compendium, 2009

Diketahui pada *boiler* pemakaian bahan bakar batubara dan IDO masing-masing sebesar 2.193.340.000 kg/tahun dan 225.450 L/tahun. Berdasarkan API Compendium didapatkan faktor emisi untuk masing-masing bahan bakar dapat dilihat pada Tabel 4.1. Karena faktor emisi berbasis energi maka konsumsi bahan bakar harus dikonversi ke konsumsi energi dengan cara mengalikan dengan nilai kalornya berdasarkan API Compendium 2009. Nilai kalor untuk bahan bakar batubara sebesar $1,8 \times 10^{-5}$ TJ/kg, sedangkan untuk bahan bakar IDO sebesar $3,8 \times 10^{-5}$ TJ/L. Sehingga:

a. Perhitungan untuk bahan bakar batubara

$$\text{Energi bahan bakar} = \text{Nilai Kalor (TJ/L)} \times \text{laju alir bahan bakar (L/tahun)}$$

$$\begin{aligned}
&= 1,8 \times 10^{-5} \text{ TJ/kg} \times 2.193.340.000 \text{ kg/tahun} \\
&= 39480,12 \text{ TJ/tahun} \\
E_{\text{CO}_2} &= A \times EF \\
&= 39480,12 \text{ TJ/tahun} \times 101700 \text{ kg/TJ} \\
&= 4.015.128.204 \text{ kg/tahun} \\
E_{\text{CH}_4} &= A \times EF \\
&= 39480,12 \text{ TJ/tahun} \times 0,95 \text{ kg/TJ} \\
&= 37.506,11 \text{ kg/tahun} \\
E_{\text{N}_2\text{O}} &= A \times EF \\
&= 39480,12 \text{ TJ/tahun} \times 1,42 \text{ kg/TJ} \\
&= 56.061,77 \text{ kg/tahun}
\end{aligned}$$

b. Perhitungan untuk bahan bakar IDO

$$\begin{aligned}
\text{Energi bahan bakar} &= \text{Nilai Kalor (TJ/L)} \times \text{laju alir bahan bakar (L/tahun)} \\
&= 3,8 \times 10^{-5} \text{ TJ/L} \times 225.450 \text{ L/tahun} \\
&= 8,56 \text{ TJ/tahun} \\
E_{\text{CO}_2} &= A \times EF \\
&= 8,56 \text{ TJ/tahun} \times 74100 \text{ kg/TJ} \\
&= 634.822 \text{ kg/tahun} \\
E_{\text{CH}_4} &= A \times EF \\
&= 8,56 \text{ TJ/tahun} \times 2,85 \text{ kg/TJ} \\
&= 37506,11 \text{ kg/tahun} \\
E_{\text{N}_2\text{O}} &= A \times EF \\
&= 8,56 \text{ TJ/tahun} \times 0,57 \text{ kg/TJ} \\
&= 56061,77 \text{ kg/tahun}
\end{aligned}$$

Selanjutnya untuk hasil perhitungan CH₄ dan N₂O dapat dilihat pada Tabel 4.2.

4.1.2.2 Perhitungan beban emisi SO_x, NO_x, dan partikulat.

Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.12 tahun 2012 rumus yang digunakan dalam perhitungan emisi SO_x, NO_x, dan partikulat adalah:

$$\begin{aligned}
C_{\text{corr}} &= C_{\text{terukur}} \times (21 - O_2_{\text{corr}}) / (21 - O_2_{\text{terukur}}) \\
Q &= v \cdot A \\
E_{\text{SO}_2} &= C_{\text{corr}} \times Q \times 0,0036 \times \text{waktu operasi (jam)}
\end{aligned}$$

(Persamaan 3.3)

Tabel 4. 2 Perhitungan Beban Emisi CO₂, CH₄, dan N₂O

Coal Lignite				
Emisi	Faktor Emisi (kg/TJ)	Nilai Kalor (TJ/kg)	Konsumsi Energi (TJ)	Beban emisi (kg/tahun)
CO ₂	101700	0,000018	39480,12	4.015.128.204
CH ₄	0,95	0,000018	39480,12	37506,11
N ₂ O	1,42	0,000018	39480,12	56061,77

Industrial Diesel Oil				
Emisi	Faktor Emisi (kg/TJ)	Nilai Kalor (TJ/L)	Konsumsi Energi (TJ)	Beban emisi (kg/tahun)
CO ₂	74100	0,000038	8,56	634.822
CH ₄	2,85	0,000038	8,56	24,42
N ₂ O	0,57	0,000038	8,56	4,88

Sumber : Hasil Perhitungan

Keterangan :

- C_{corr} = konsentrasi dengan koreksi O₂ (mg/Nm³).
C_{terukur} = konsentrasi terukur sebelum dikoreksi dengan koreksi O₂ (mg/Nm³).
O₂_{corr} = koreksi O₂ yang ditetapkan dalam baku mutu emisi(%).
O₂_{terukur} = prosentase O₂ diukur langsung dalam gas emisi(%).
E = Jumlah emisi (kg/tahun).
Q = Laju alir emisi volumetrik (m³/detik).
0,0036 = faktor konversi dari mg/detik ke kg/jam.
Opr. Hours = lama operasi sumber emisi selama 1 tahun (jam).
V = Laju alir (m/detik).
A = Luas penampang stack (m²)

Tabel 4. 3 Data Pengukuran Manual Parameter SO_x, NO_x, dan partikulat

Emisi	Konsentrasi
	mg/Nm ³
SO _x	417
NO _x	148
Total Partikel	15,6

Sumber : PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton

Diketahui konsentrasi beban emisi dari pengukuran manual untuk parameter SO_x, NO_x, dan partikulat seperti pada Table 4.3. Dengan O₂ terkoreksi sebesar 0 dan O₂ terukur sebesar 5%, serta laju alir sebesar 23,53 m/s dan diameter stack 7 m. Selanjutnya dilakukan perhitungan beban emisi menggunakan persamaan 3.3.

Sehingga :

a. Perhitungan Emisi SO₂

Konsentrasi SO₂ = 417 mg/Nm³

O₂ *correction* = 0

$$\begin{aligned}
\text{O}_2 \text{ terukur} &= 5\% \\
\text{Laju alir} &= 23,53 \text{ m/s} \\
\text{Diameter stack} &= 7 \text{ m} \\
\text{Jam operasi} &= 6598 \text{ jam} \\
\text{Ccorr} &= \text{Cterukur} \times (21-\text{O}_2\text{corr}) / (21-\text{O}_2\text{terukur}) \\
&= 417 \text{ mg/Nm}^3 \times (21-0) / (21-5) \\
&= 547,31 \text{ mg/Nm}^3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q &= v.A \\
&= 23,53 \text{ m/s} \times 3,14 \times (0,5 \times 7)^2 \\
&= 905,08 \text{ m}^3/\text{s}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{E}_{\text{SO}_2} &= \text{Ccorr} \times Q \times 0,0036 \times \text{waktu operasi (jam/tahun)} \\
&= 547,31 \text{ mg/Nm}^3 \times 905,08 \text{ m}^3/\text{s} \times 0,0036 \times 6598 \text{ jam/tahun} \\
&= 11.766.244 \text{ kg/tahun}
\end{aligned}$$

b. Perhitungan Emisi NO₂

$$\begin{aligned}
\text{Konsentrasi NO}_2 &= 148 \text{ mg/Nm}^3 \\
\text{O}_2 \text{ correction} &= 0 \\
\text{O}_2 \text{ terukur} &= 5\% \\
\text{Laju alir} &= 23,53 \text{ m/s} \\
\text{Diameter stack} &= 7 \text{ m} \\
\text{Jam operasi} &= 6598 \text{ jam} \\
\text{Ccorr} &= \text{Cterukur} \times (21-\text{O}_2\text{corr}) / (21-\text{O}_2\text{terukur}) \\
&= 148 \text{ mg/Nm}^3 \times (21-0) / (21-5) \\
&= 194,25 \text{ mg/Nm}^3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q &= v.A \\
&= 23,53 \text{ m/s} \times 3,14 \times (0,5 \times 7)^2 \\
&= 905,08 \text{ m}^3/\text{s}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{E}_{\text{NO}_2} &= \text{Ccorr} \times Q \times 0,0036 \times \text{waktu operasi (jam/tahun)} \\
&= 194,25 \text{ mg/Nm}^3 \times 905,08 \text{ m}^3/\text{s} \times 0,0036 \times 6598 \\
&\text{jam/tahun} \\
&= 4.176.029 \text{ kg/tahun}
\end{aligned}$$

c. Perhitungan Emisi Partikulat

$$\begin{aligned}
\text{Konsentrasi Partikulat} &= 15,6 \text{ mg/Nm}^3 \\
\text{O}_2 \text{ correction} &= 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{O}_2 \text{ terukur} &= 5 \% \\
\text{Laju alir} &= 23,53 \text{ m/s} \\
\text{Diameter stack} &= 7 \text{ m} \\
\text{Jam operasi} &= 6598 \text{ jam} \\
\text{Ccorr} &= \text{Cterukur} \times (21 - \text{O}_2\text{corr}) / (21 - \text{O}_2\text{terukur}) \\
&= 15,6 \text{ mg/Nm}^3 \times (21 - 0) / (21 - 5) \\
&= 20,48 \text{ mg/Nm}^3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q &= v.A \\
&= 23,53 \text{ m/s} \times 3,14 \times (0,5 \times 7)^2 \\
&= 905,08 \text{ m}^3/\text{s}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{\text{SO}_2} &= \text{Ccorr} \times Q \times 0,0036 \times \text{waktu operasi (jam)} \\
&= 20,48 \text{ mg/Nm}^3 \times 905,08 \text{ m}^3/\text{s} \times 0,0036 \times 6598 \text{ jam/tahun} \\
&= 440.176 \text{ kg/tahun}
\end{aligned}$$

Selanjutnya untuk ringkasan hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.4.

4.1.3 Emisi yang dihasilkan dalam 1 KWh listrik

Pada proses produksi telah diketahui bahwa jumlah produk yang dihasilkan yaitu sebesar 3.699.169.397 kWh/tahun. Maka dilakukan perhitungan beban emisi dalam satuan kWh/produk. Perhitungan dalam 1 kWh dilakukan dengan cara membagi beban emisi yang terbentuk dengan total produk yang dihasilkan. Berikut perhitungan dari beban emisi proses pengolahan:

Perhitungan total emisi CO₂ per produk :

$$\begin{aligned}
\text{Jumlah emisi} &= \text{Emisi} / \text{Jumlah produk} \\
&= \frac{4.015.763.026 \text{ kg CO}_2/\text{tahun}}{3.699.169.397 \text{ kWh/tahun}} \\
&= 1,085 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}
\end{aligned}$$

Selanjutnya untuk hasil perhitungan parameter emisi per produk lainnya dapat dilihat pada Tabel 4.4

Berdasarkan Tabel 4.5 dapat diketahui bahwa nilai CO₂-equivalent (CO₂-eq) dari emisi gas rumah kaca (GRK) yaitu CO₂, CH₄, dan N₂O. *Global Warming Potential* (GWP) dari GRK menunjukkan jumlah gas yang berpotensi menyebabkan pemanasan global dalam kurun waktu 100 tahun.

Tabel 4.4 Perhitungan Beban Emisi SO_x, NO_x, dan Partikulat

Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Stack	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	m	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	Kg/tahun	Ton/tahun
SO ₂	417	0	5	23,53	7	547,31	905,08	6598	11.766.244	11.766
NO ₂	148	0	5	23,53	7	194,25	905,08	6598	4.176.029	4.176
Total Partikel	15,6	0	5	23,53	7	20,48	905,08	6598	440.176	440

Sumber : Hasil Perhitungan

Tabel 4. 5 Emisi yang dihasilkan setiap 1 kWh produk listrik

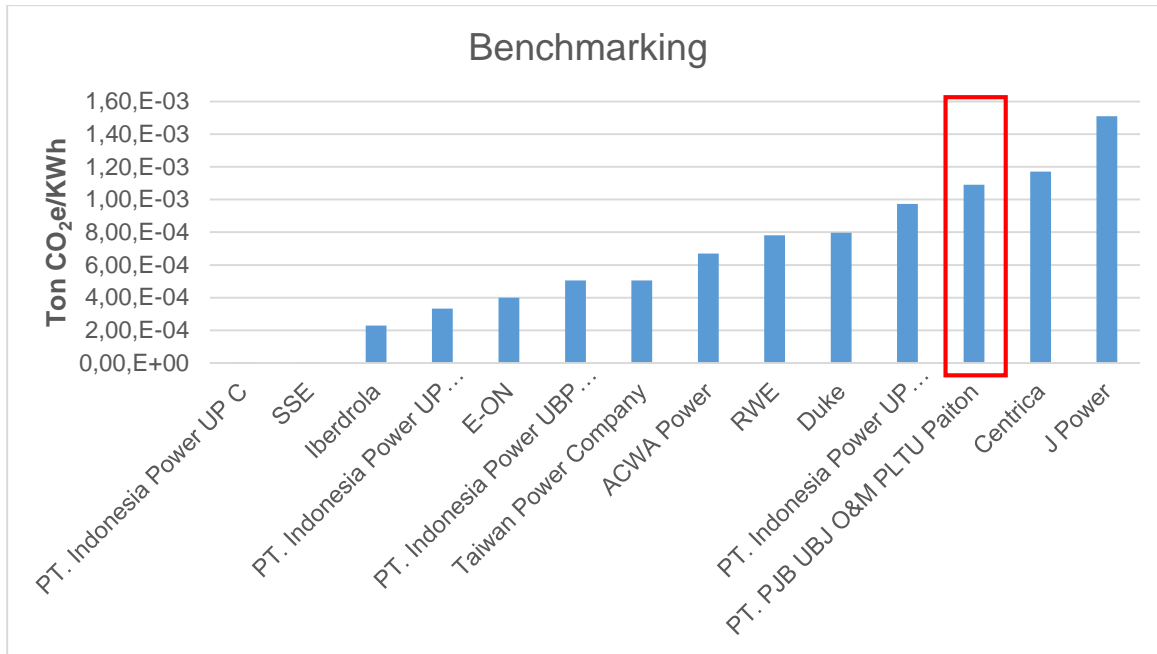
Jumlah produk (kWh/tahun)	Jumlah emisi yang dihasilkan (kg/tahun)					
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO _x	NO _x	PM
3.699 x 10 ⁶	4.016x10 ⁶	38x10 ³	56x10 ³	117x10 ⁵	42x10 ⁵	44x10 ⁴
	Jumlah emisi yang dihasilkan per satuan produk (kg/kWh)					
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO _x	NO _x	PM
	1,085	1x10 ⁻⁵	1,5x10 ⁻⁵	3,1x10 ⁻⁴	1,12x10 ⁻⁴	1,2x10 ⁻⁵

Sumber: Hasil Perhitungan

Menurut IPCC tahun 2007, GWP merupakan indeks GRK dengan CO₂ yang mempunyai nilai 1, CH₄ mempunyai nilai 25, dan N₂O mempunyai nilai 298. Sehingga perhitungan nilai CO₂-eq sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \text{CO}_2\text{-eq} &= (1,085 \text{ kg/kWh CO}_2 \times 1) + \\
 &\quad (1 \times 10^{-5} \text{ kg/kWh CH}_4 \times 25) + \\
 &\quad (1,5 \times 10^{-5} \text{ kg/kWh N}_2\text{O} \times 298) \\
 &= 1,09 \times 10^{-3} \text{ ton CO}_2\text{-eq/kWh}
 \end{aligned}$$

Jadi nilai dari CO₂-eq dari beban emisi yang dihasilkan dalam 1 kWh listrik PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton sebesar 1,09x10⁻³ CO₂-eq/kWh. Untuk mengetahui emisi CO₂-eq/kWh PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton berada diatas atau dibawah rata-rata pembangkit listrik dunia, maka dilakukan *benchmarking* terhadap emisi CO₂-eq/kWh yang dihasilkan oleh beberapa pembangkit listrik yang ada dunia. Hasil dari *benchmarking* dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan Tabel 4.6, dimana PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton berada pada peringkat 12 dari 16 perusahaan PLTU dari seluruh dunia. Benchmarking intensitas emisi PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton skala internasional dilakukan terhadap 14 perusahaan, termasuk diantaranya 7 skala asia dan 6 skala internasional lainnya.



Gambar 4.2 Benchmarking Intensitas Emisi PT.PJB UBJ O&M PLTU Paiton Skala Internasional

Tabel 4. 6 Data Intensitas Emisi PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton dan Perusahaan Pembanding Skala Internasional

No	Perusahaan	Negara	Intensitas Emisi Udara (Ton CO ₂ e/KWh)
1	PT. Indonesia Power UP C	Indonesia	3,35. E-07
2	SSE	Inggris	4,54. E-06
3	Iberdrola	Spanyol	2,30. E-04
4	PT. Indonesia Power UP Perak-Grati	Indonesia	3,33. E-04
5	E-ON	Jerman	4,00. E-04
6	PT. Indonesia Power UBP Semarang	Indonesia	5,05. E-04
7	Taiwan Power Company	Taiwan	5,05. E-04
8	ACWA Power	Saudi Arabia	6,70. E-04
9	RWE	Jerman	7,82. E-04
10	Duke	Amerika	7,97. E-04
11	PT. Indonesia Power UP Suralaya	Indonesia	9,74. E-04
12	PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton	Indonesia	1,09. E-03
13	Centrica	British	1,17. E-03
14	J Power	Jepang	1,51. E-03
15	Endesa	Spanyol & Portugal	1,11. E-02

Sumber: Laporan Verifikasi dan Benchmarking PT. Indonesia Power UP Suralaya, (2017), dengan modifikasi

4.2 Analisis Life Cycle Assessment

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:

4.2.1 Penentuan *Goal and Scope*

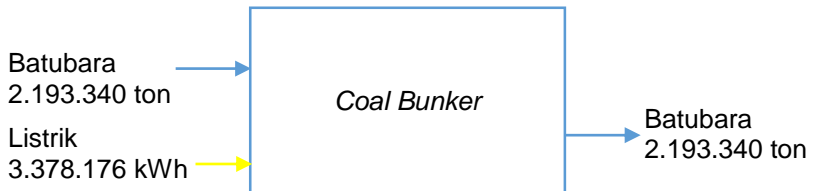
Penelitian ini salah satunya bertujuan untuk menganalisis dampak lingkungan yang ditimbulkan akibat gas rumah kaca dan pencemar udara selama proses produksi listrik. Dengan batasan penelitian adalah proses utama dari produksi listrik, yang mana dimulai dari bunker, coal mill, *boiler* hingga turbin dan generator. Metode yang digunakan adalah TRACI dengan batasan dampak yang dikaji dalam penelitian ini yaitu *global warming 100a*, *ecotoxicity*, *smog*, *acidification*, *carcinogenic*, *respiratory effect*, *fossil fuel depletion*, dan *eutrophication*.

4.2.2 Penentuan *Life Cycle Inventory*

Analisis data membutuhkan input data yang meliputi kestimbangan massa dan spesifik data yang didapat dari perusahaan yang bersangkutan. Berikutnya analisis dari life cycle inventory:

1. *Coal Bunker*

Bunker adalah unit penampung batubara dari *jetty* yang akan didistribusikan ke coal mill menggunakan conveyor. Tujuan adanya *coal bunker* selain menampung batubara adalah sebagai penyedia stok batubara.



Gambar 4.3 Mass Balance Coal Bunker

Sumber : PT.PJB UBJ O&M PLTU Paiton

Dalam proses ini jumlah batubara yang diinputkan dan yang keluar dari *coal bunker* sama besar karena tidak ada pengurangan material dalam proses ini.

2. *Coal Mill*

Coal Mill adalah alat yang digunakan untuk menggiling batubara yang berukuran besar menjadi serbuk batubara.

Tujuan penggilingan ini adalah mempermudah batubara dihembuskan ke *coal burner* untuk dibakar dengan udara panas. Batubara di giling dengan ukuran 200 mesh. Pada ukuran tersebut batubara akan mudah terbakar.



Gambar 4.4 Mass Balance Coal Mill

Sumber : PT.PJB UBJ O&M PLTU Paiton

Dalam proses ini jumlah batubara dan yang keluar sama karena dalam proses penggilingannya tidak terdapat *waste* atau produk sisa proses.

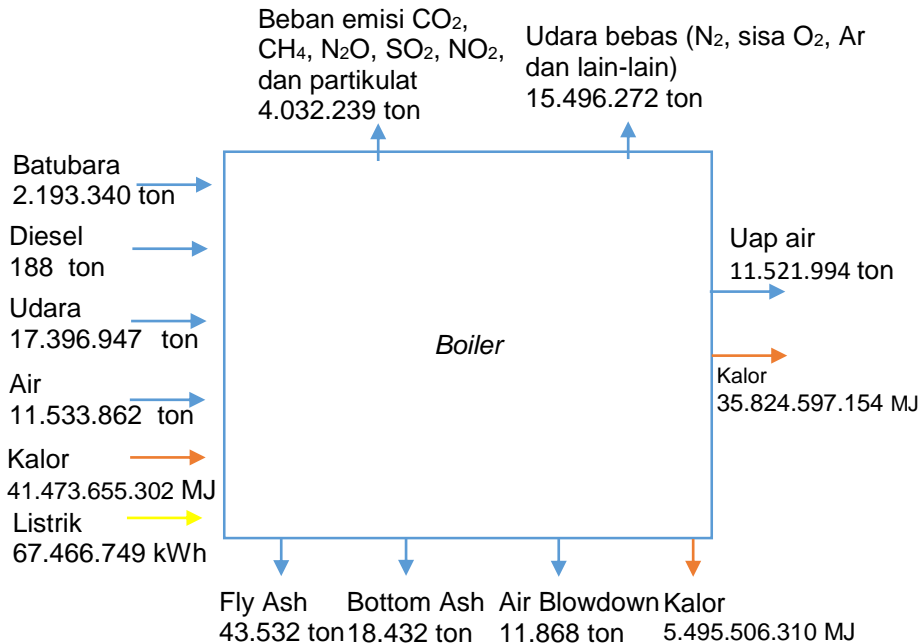
3. *Boiler*

Boiler atau ketel *steam* adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan *steam*. *Steam* atau uap air terbentuk oleh proses pemanasan air dengan memanaskankan *boiler* menggunakan bahan bakar seperti batubara. Uap air nantinya akan disalurkan ke turbin guna menggerakkan turbin dan generator. Dalam proses pemanasan air dalam *boiler* akan menghasilkan emisi berupa CO_2 , CH_4 , N_2O , SO_x , NO_x , dan partikulat yang berasal dari proses pembakaran batubara dan *fuel oil*. Selain itu proses ini juga menghasilkan *fly ash* dan *bottom ash*. *Mass balance boiler* dapat dilihat pada Gambar 4.5.

4. Turbin dan generator

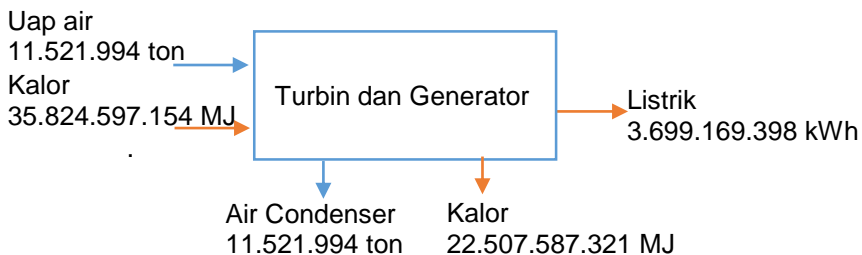
Turbin adalah alat yang digunakan untuk mengubah tenaga dari uap air menjadi energi mekanik. Selanjutnya dari putaran turbin (energi mekanik) akan diubah menjadi

energi listrik oleh generator. *Mass balance* turbin dan generator dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.5 Mass Balance Boiler

Sumber : PT.PJB UBJ O&M PLTU Paiton



Gambar 4.6 Mass Balance Turbin dan Generator

Sumber : PT.PJB UBJ O&M PLTU Paiton

Dalam proses ini akan menghasilkan tenaga listrik dan mengeluarkan uap air yang nantinya disalurkan ke kondenser untuk didinginkan agar menjadi air kembali.

4.2.3 Penentuan *Life Cycle Impact Assessment*

Tahap setelah melakukan tahapan *Life Cycle Inventory* adalah melakukan tahap *Life Cycle Impact Assessment*. Prakiraan dampak berdasarkan input dan output pada setiap kegiatan. Penilaian dampak yang dilakukan pada software simapro yaitu dengan membandingkan secara langsung hasil dari *Life Cycle Inventory* pada tiap-tiap kategori. Metode yang digunakan dalam proses penilaian dampak yaitu metode TRACI. Metode ini dipilih sebagai metode penilaian dampak dikarenakan metode ini mempunyai penilaian dampak yang sesuai dengan ruang lingkup peneliti. Selain itu metode ini juga merupakan metode penilaian dampak *midpoint*, sehingga penilaian dampak yang dihasilkan lebih spesifik. Pada metode TRACI akan diperoleh 10 kategori dampak, namun dalam penelitian ini akan difokuskan pada 8 kategori dampak diantaranya yaitu *global warming 100a*, *ecotoxicity*, *smog*, *acidification*, *carcinogenic*, *respiratory effect*, *fossil fuel depletion*, dan *eutrophication*. Berikut penjelasan mengenai masing-masing dampak.

a. Global Warming 100a

Dampak ini membahas mengenai dampak yang dihasilkan dari peningkatan suhu permukaan bumi seperti adanya perubahan iklim. Dimana penyebab dari dampak ini akibat meningkatnya gas rumah kaca di atmosfer. Satuan dari *impact* ini adalah kg CO₂-eq.

b. Ecotoxicity

Dampak ini membahas mengenai potensi efek toksik (racun), yang disebabkan polutan kepada ekosistem seperti hutan dan laut. Satuan dari *impact* ini adalah kg CTUe.

c. Smog

Dampak ini membahas mengenai potensi terbentuknya asbut di udara yang mengandung NO₂ dan O₃, sehingga dapat mengganggu aktivitas dan kesehatan makhluk hidup. Satuan dari *impact* ini adalah kg O₃-eq.

d. *Acidification*

Dampak ini membahas mengenai zat asam yang masuk ke dalam lingkungan (asam nitrit dan asam sulfat). Hal ini menyebabkan keasaman di lingkungan meningkat. Satuan dari *impact* ini adalah kg SO₂-eq

e. *Carcinogenic*

Dampak ini membahas mengenai zat kimia yang mempengaruhi lingkungan dan kesehatan manusia khususnya penyakit kanker. Hal ini menimbulkan potensi penyakit kanker. Satuan dari *impact* ini adalah kg CTUh.

f. *Respiratory Effect*

Dampak ini membahas mengenai dampak yang dihasilkan dari peningkatan jumlah partikulat di atmosfer. Hal ini mempengaruhi kesehatan manusia. Satuan dari *impact* ini adalah kg PM_{2,5}-eq.

g. *Fossil Fuel Depletion*

Dampak ini membahas mengenai potensi menipisnya sumber daya alam akibat pemborosan energi fosil. Dimana dampaknya dapat memengaruhi kerusakan alam dan ekosistem. Satuan dari *impact* ini adalah MJ surplus.

h. *Eutrophication*

Dampak ini membahas mengenai pencemaran lingkungan khususnya air yang disebabkan oleh munculnya nutrient yang berlebihan ke dalam ekosistem. Satuan dari *impact* ini adalah kg N eq.

Penilaian dampak ini bertujuan untuk mengidentifikasi seberapa besar kontribusi suatu proses terhadap dampak lingkungan yang dihasilkan dari suatu proses tersebut. Dari keseluruhan kegiatan pada proses produksi listrik juga memberikan kontribusi dampak terhadap lingkungan. Pada Gambar 4.7 menunjukkan diagram pohon (*network*) yang terbentuk dari pengolahan data input dan output yang telah dilakukan sebelumnya. Berdasarkan diagram pohon (*network*) pada Gambar 4.7 didapatkan bahwa garis merah berpanah menunjukkan keterkaitan antar kegiatan. Dimana garis

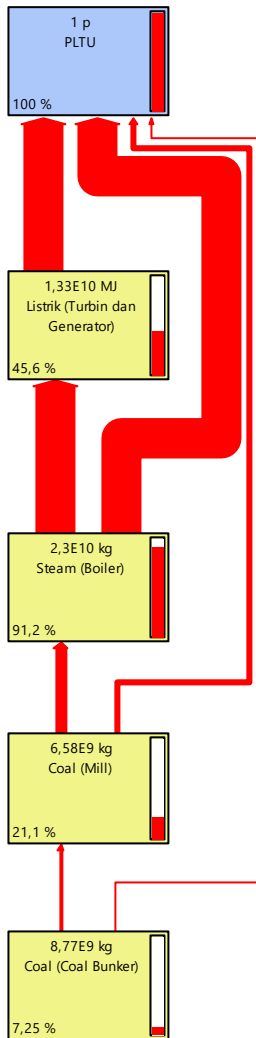
merah yang tebal menunjukkan kontribusi dampak yang dihasilkan selama unit tersebut berjalan. Sedangkan angka persen yang terdapat di dalam kotak menunjukkan besarnya beban emisi pada unit tersebut yang dihasilkan dari perhitungan tahapan impact assessment berdasarkan database yang telah diinputkan sebelumnya. Dalam perhitungan, kontribusi dampak yang paling besar dihasilkan dari proses pada unit *boiler* yaitu sebesar 91,2%. Keseluruhan dampak pada unit *boiler* tidak hanya dihasilkan oleh proses didalam *boiler* itu sendiri melainkan dari pembebanan jumlah produk yang masuk. Pada unit ini terdapat bahan-bahan material yang mengandung material B3 maupun Non B3 serta konsumsi listrik yang cukup besar. Analisis dampak yang ditimbulkan pada proses produksi listrik yaitu nilai karakterisasi dapat dilihat Tabel 4.7 dan nilai normalisasi dapat dilihat pada Tabel 4.8.

4.2.4 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 4.5.2 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.

4.2.4.1 Analisis Dampak Proses Produksi Terbesar (*Hotspot*)

Pada analisis sebelumnya diketahui bahwa pada diagram pohon proses produksi listrik kontribusi dampak terbesar dari unit *boiler*. Sehingga perlu dikaji lebih mendalam agar dapat diketahui dari komponen manakah yang menyebabkan unit *boiler* mempunyai kontribusi dampak yang paling besar. Maka dilakukan proses *networking* pada unit *boiler*. Berdasarkan Gambar 4.8 dapat diketahui bahwa kontribusi dampak terbesar berasal dari penggunaan listrik sebesar 75,4%.



Gambar 4.7 Network Proses Produksi PLTU

Tabel 4. 7 Nilai Karakterisasi Dampak Proses Produksi PLTU

Impact category	Unit	Total	Listrik (Turbin dan Generator)	Steam (Boiler)	Coal (Mill)	Coal (Coal Bunker)
Global warming	kg CO ₂ eq	9.088.429.300	4.443.109.200	4.443.089.900	115.781.500	86.448.766
Ecotoxicity	CTUe	6.742.688.500	3.042.147.600	3.042.134.400	543.479.560	114.926.950
Fossil fuel depletion	MJ surplus	1.306.922.300	443.189.870	443.187.950	211.811.890	208.732.630
Smog	kg O ₃ eq	174.339.490	84.271.501	84.271.135	3.512.565	2.284.291
Acidification	kg SO ₂ eq	33.325.460	16.083.947	16.083.877	614.237	543.399
Eutrophication	kg N eq	6.667.024	2.975.355	2.975.342	604.386	111.941
Respiratory effects	kg PM _{2.5} eq	3.793.175	1.696.246	1.696.238	275.574	125.118
Carcinogenics	CTUh	87,02	39,67	39,67	6,11	1,58

Sumber : Hasil SimaPro 8.5.2

Tabel 4. 8 Nilai Normalisasi Dampak Proses Produksi PLTU

Impact category	Unit	Total	Listrik (Turbin dan Generator)	Steam (Boiler)	Coal (Mill)	Coal (Coal Bunker)
Carcinogenics		1.650.732	752.438	752.435	115.939	29.919
Ecotoxicity		609.098	274.811	274.810	49.095	10.382
Global warming		375.188	183.420	183.419	4.780	3.569
Acidification		366.900	177.078	177.077	6.762	5.983
Eutrophication		308.433	137.647	137.647	27.960	5.179
Respiratory effects		156.433	69.954	69.954	11.365	5.160
Smog		125.252	60.544	60.543	2.524	1.641
Fossil fuel depletion		69.442	23.548	23.548	11.254	11.091

Sumber : Hasil SimaPro 8.5.2

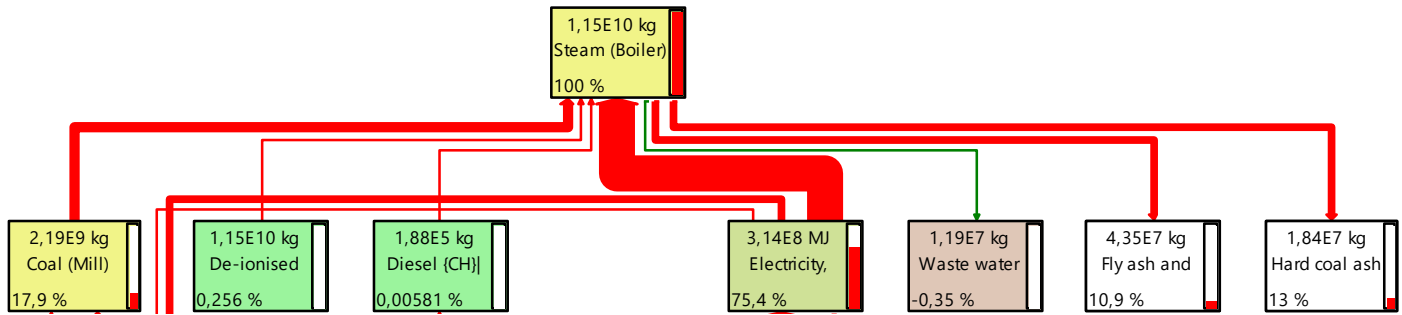
Hal ini dapat terjadi karena penggunaan listrik yang cukup besar pada *boiler* yaitu sebesar 67.466.749 kWh. Penggunaan listrik pada boiler menghasilkan dampak yang besar karena pada produksinya menghasilkan dampak yang besar pula. Besar penggunaan listrik diperoleh dari jumlah penggunaan listrik alat penunjang kegiatan pada boiler seperti pompa udara. Listrik yang dipakai adalah hasil produksi dari pembangkit PLTU PT. PJB UBJ O&M Paiton sendiri. Setelah dilakukan *networking* dan diketahui komponen yang menyebabkan beban lingkungan menjadi tinggi selanjutnya akan dilakukan penilaian terhadap dampak yang ditimbulkan dari beban lingkungan dengan menggunakan *characterization* dan *normalization*. Analisis *networking* pada unit boiler dapat dilihat pada Gambar 4.8.

a. *Characterization*

Characterization merupakan tahapan dimana akan menampilkan kontribusi relatif terhadap dampak lingkungan. Tahap ini akan mengukur kontribusi dampak produk atau kegiatan pada setiap indikator dampak. Selain itu, tahap ini membandingkan secara langsung hasil *life cycle inventory* dalam tiap kategori. Banyak metodologi penilaian dampak dalam TRACI didasarkan pada "titik tengah" dengan pendekatan karakterisasi (Bare et al. 2003). Nilai dampak karakterisasi didapat dari perhitungan yang dilakukan secara otomatis oleh aplikasi simaPro 8.5.2. Berdasarkan Tabel 4.9 diketahui bahwa dampak-dampak yang dihasilkan dari proses pada unit boiler sebagai berikut :

a. *Global warming*

Global warming adalah suatu bentuk ketidakseimbangan ekosistem di bumi akibat terjadinya proses peningkatan suhu rata-rata atmosfer, laut, dan daratan di bumi (Forest, 2017). Dampak yang paling dominan terhadap *global warming* yaitu sebesar $4,44 \times 10^9$ kg CO₂-eq. Penyebab besarnya dampak *global warming* ini diakibatkan oleh pembakaran batubara. Hasil dari pembakaran batubara berupa emisi yang dapat menyebabkan *global warming* seperti CO₂, CH₄, dan N₂O.



Gambar 4.8 Network pada Unit Boiler

- b. *Ecotoxicity*
Ecotoxicity adalah potensi kerusakan ekologis akibat bahan kimia yang dikeluarkan ke lingkungan dan terakumulasi. Selanjutnya ada dampak *ecotoxicity* yang mempunyai nilai dampak sebesar $3,04 \times 10^9$ CTUe.
- c. *Fossil fuel depletion*
Fossil fuel depletion terjadi karena adanya pemborosan bahan bakar fosil yang digunakan dalam proses produksi. Pada analisis karakterisasi unit boiler dampak *fossil fuel depletion* yang mempunyai nilai dampak sebesar $4,43 \times 10^8$ MJ surplus.
- d. *Smog*
Dampak selanjutnya adalah *smog* yang mempunyai nilai dampak sebesar $8,43 \times 10^7$ kg O₃-eq. *Smog* ini berasal dari reaksi fotokimia nitrogen oksida dan hidrokarbon organik yang mudah menguap, sehingga menghasilkan polutan sekunder yang mengandung gas NO₂ dan ozon (O₃) (Mark Z, 2002). Zat-zat tersebut terbentuk akibat proses pembakaran batubara.
- e. *Acidification*
Acidification adalah meningkatnya keasaman pada lingkungan yang diakibatkan oleh masuknya zat asam ke lingkungan. Emisi dari PLTU yang berupa SO_x dan NO_x ketika bereaksi dengan air akan menghasilkan asam. Kejadian ini sering terjadi ketika air hujan yang bereaksi dengan zat pencemar SO_x dan NO_x, sehingga terjadi hujan asam. Selain itu, CO₂ juga dapat menyebabkan *acidification*. Peningkatan rilis aCO₂ akan menghasilkan terus pengasaman permukaan laut selama abad ini dan itu meramalkan bahwa rata-rata pH lautan dapat menurun lebih jauh 0,4 unit pada tahun 2100 (Turley, 2008). Hal ini dapat terjadi karena ketika CO₂ bereaksi dengan air laut, terjadi perubahan kimia yang menyebabkan konsentrasi ion bikarbonat (HCO₃⁻) dan asam karbonat (H₂CO₃) meningkat seiring meningkatnya konsentrasi CO₂ di atmosfer, sedangkan jumlah ion karbonat (CO₃²⁻) dan pH

rata-rata air laut berkurang. Dampak *acidification* yang mempunyai nilai dampak sebesar $1,61 \times 10^7$ kg SO₂-eq.

f. *Eutrophication*

Eutrophication adalah pencemaran lingkungan dimana tumbuhan tumbuh dengan sangat cepat pada badan air. Penyebab *eutrophication* yaitu masuknya zat N dan P yang berlebihan pada badan air. Kemudian dampak *eutrophication* yang mempunyai nilai dampak sebesar $2,98 \times 10^6$ kg N-eq. Pada kasus ini zat N dan P terkandung didalam batubara dan air boiler.

g. *Respiratory Effect*

Respiratory Effect adalah gangguan pernapasan yang diakibatkan oleh adanya pencemaran udara. Menurut Pramanik (2009), setiap 10 peningkatan mikrogram / m³ dalam konsentrasi PM₁₀ dalam air akan menghasilkan penurunan 2% dari fungsi paru-paru. Pada dampak *respiratory effect* mempunyai nilai dampak sebesar $1,70 \times 10^6$ kg PM_{2,5}-eq.

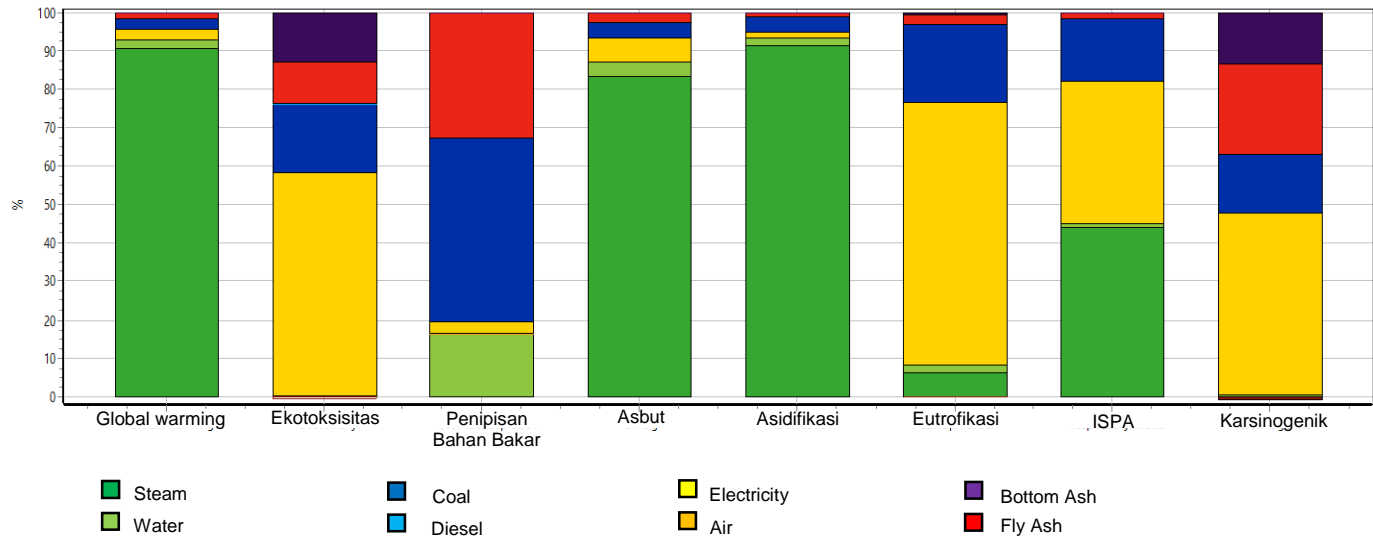
h. *Carcinogenics*

Carcinogenics adalah zat-zat yang dapat menyebabkan penyakit kanker. Salah satu penyebab penyakit kanker adalah *particulate matter* (PM). Dimana zat tersebut terkandung dalam *fly ash* sisa pembakaran batubara. Menghirup partikulat dapat menyebabkan beberapa penyakit berbahaya, termasuk kronis penyakit paru obstruktif (PPOK) dan kanker paru-paru (Cornell, 2016). Pada dampak *carcinogenics* mempunyai nilai dampak sebesar 39,7 CTUe.

Berikut kontribusi dampak dari masing-masing unit proses produksi PLTU dapat dilihat pada Gambar 4.9 dan Tabel 4.9.

b. *Normalization*

Normalization merupakan proses analisa data, dimana membandingkan indikator dampak dengan antara kategori dampak. Tujuan dari penyetaraan satuan disini agar penilaian dampak (*impact assessment*) yang dihasilkan pada proses *running* SimaPro dapat dibandingkan satu sama lain.



Gambar 4.9 Diagram Perhitungan Karakterisasi

Tabel 4. 9 Nilai Karakterisasi Dampak pada Unit Boiler

<i>Impact category</i>	<i>Unit</i>	<i>Total</i>	<i>Steam (Boiler)</i>	<i>Coal (Mill)</i>	<i>De-ionised</i>	<i>Diesel</i>	<i>Compressed air</i>	<i>Electricity</i>	<i>Waste water treatment</i>	<i>Fly ash</i>	<i>Bottom ash</i>
Global warming	kg CO ₂ eq	4,44, E+09	4,03, E+09	9,83, E+07	1,91, E+06	1,22, E+08	1,16, E+08	6,79, E+04	0,00, E+00	7,19, E+07	1,81, E+05
Ecotoxicity	CTUe	3,04, E+09	0,00, E+00	7,78, E+06	1,15, E+05	1,78, E+09	5,43, E+08	1,77, E+05	-1,07, E+07	3,31, E+08	3,94, E+08
Fossil fuel depletion	MJ surplus	4,43, E+08	0,00, E+00	7,22, E+07	1,31, E+06	1,28, E+07	2,12, E+08	1,34, E+06	0,00, E+00	1,43, E+08	7,26, E+05
Smog	kg O ₃ eq	8,43, E+07	7,03, E+07	3,07, E+06	5,77, E+04	5,09, E+06	3,51, E+06	6,22, E+03	0,00, E+00	2,16, E+06	2,85, E+04
Acidification	kg SO ₂ eq	1,61, E+07	1,47, E+07	3,00, E+05	1,33, E+04	2,93, E+05	6,14, E+05	6,25, E+02	0,00, E+00	1,72, E+05	1,23, E+03
Eutrophication	kg N eq	2,98, E+06	1,85, E+05	6,39, E+04	1,93, E+02	2,04, E+06	6,04, E+05	2,52, E+02	-5,75, E+03	6,33, E+04	2,38, E+04
Respiratory effects	kg PM _{2.5} eq	1,70, E+06	7,49, E+05	1,76, E+04	1,01, E+03	6,23, E+05	2,76, E+05	5,95, E+01	0,00, E+00	2,93, E+04	1,62, E+02
Carcinogenics	CTUh	3,97, E+01	0,00, E+00	2,81, E-01	1,54, E-03	1,88, E+01	6,11, E+00	2,22, E-03	-3,05, E-01	9,47, E+00	5,32, E+00

Sumber: Hasil SimaPro 8.5.2

Tahap ini dampak yang dihasilkan dari kegiatan proses produksi listrik kemudian dikonversi ke dalam satuan yang sama dengan membagi dengan nilai referensi yang dipilih. Berikut nilai *Normalization factor*:

Tabel 4. 10 Faktor Normalisasi

<i>Impact Category</i>	<i>Normalization Factor</i>
<i>Ecotoxicity</i>	7.6×10^1
<i>Carcinogenics</i>	$5,5 \times 10^{-6}$
<i>Global Warming</i>	$2,4 \times 10^4$
<i>Acidification</i>	$9,1 \times 10^1$
<i>Eutrophication</i>	$2,2 \times 10^1$
<i>Smog</i>	$1,4 \times 10^3$
<i>Respiratory Effects</i>	$2,4 \times 10^1$
<i>Fossil Fuel Depletion</i>	$1,7 \times 10^4$

Sumber: Ryberg *et al.*, 2013

Berdasarkan Tabel 4.11 setelah dilakukan proses normalisasi dapat diketahui bahwa dampak yang paling dominan dalam analisis secara berurutan sebagai berikut :

a. *Carcinogenics*

Dampak yang paling dominan dalam analisis yaitu *carcinogenics* dengan nilai sebesar $7,52 \times 10^5$. *Carcinogenics* mempunyai nilai yang paling tinggi dikarenakan dalam analisis menggunakan metode TRACI dampak ini mempunyai nilai faktor normalisasi yang kecil sehingga hasil dampaknya menjadi besar. Besarnya dampak *carcinogenics* disebabkan oleh penggunaan energi listrik pada boiler.

b. *Ecotoxicity*

Dampak *ecotoxicity* mempunyai nilai dampak sebesar $2,75 \times 10^5$. Besaran dampak *ecotoxicity* sebagian besar berasal dari penggunaan listrik yaitu sebesar $1,60 \times 10^5$.

c. *Global warming*

Selanjutnya ada dampak *global warming* yang mempunyai nilai dampak sebesar $3,89 \times 10^5$. *Global warming* mempunyai nilai karakteristik yang paling dominan sehingga dalam tahap normalisasi mempunyai nilai

dampak yang besar pula. Besaran dampak *global warming* disebabkan produk steam yaitu sebesar $1,85 \times 10^5$. Dimana dalam pembuatan steam menghasilkan produk sampingan yang mempengaruhi terjadinya *global warming* berupa emisi hasil pembakaran batubara seperti CO_2 , CH_4 , dan N_2O .

d. *Acidification*

Dampak *acidification* mempunyai nilai dampak sebesar $1,77 \times 10^5$. Besaran dampak *acidification* sebagian besar berasal dari produk steam yaitu sebesar $1,60 \times 10^5$. Dimana dalam pembuatan steam menghasilkan produk sampingan yang mempengaruhi terjadinya *acidification* berupa emisi hasil pembakaran batubara seperti SO_2 dan NO_2 .

e. *Eutrophication*

Dampak *eutrophication* mempunyai nilai dampak sebesar $2,75 \times 10^5$. Besaran dampak *eutrophication* sebagian besar berasal dari penggunaan listrik yaitu sebesar $9,44 \times 10^4$.

f. *Respiratory Effect*

Dampak *respiratory effect* mempunyai nilai dampak sebesar $6,99 \times 10^4$. Besaran dampak *respiratory effect* sebagian besar berasal dari produk steam yaitu sebesar $3,09 \times 10^4$. Dimana dalam pembuatan steam menghasilkan produk sampingan yang mempengaruhi terjadinya *acidification* berupa emisi hasil pembakaran batubara seperti $\text{PM}_{2.5}$.

g. *Smog*

Dampak *acidification* mempunyai nilai dampak sebesar $6,05 \times 10^4$. Besaran dampak *acidification* sebagian besar berasal dari produk steam yaitu sebesar $5,05 \times 10^4$. Dimana dalam pembuatan steam menghasilkan produk sampingan yang mempengaruhi terjadinya *acidification* berupa emisi hasil pembakaran batubara seperti NO_2 .

h. *Fossil Fuel Depletion*

Dampak *fossil fuel depletion* mempunyai nilai dampak sebesar $2,35 \times 10^4$. Besaran dampak *fossil fuel depletion* sebagian besar berasal dari bahan baku serbuk batubara dari proses *coal mill* yaitu sebesar $1,13 \times 10^4$. Hal ini

diakibatkan batubara yang diperoleh dari tambang digunakan untuk produksi listrik pada PLTU akan mengurangi ketersediaan batubara yang ada di alam.

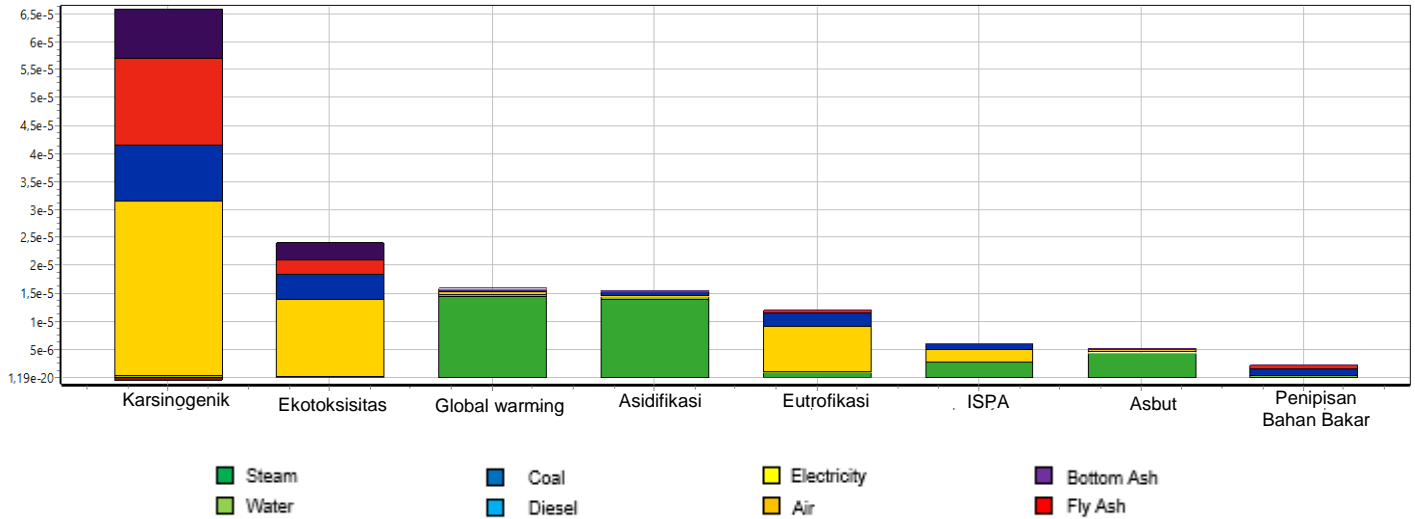
Berikut kontribusi dampak dari masing-masing unit proses produksi PLTU dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan Tabel 4.11.

4.2.5 Evaluasi *Life Cycle Assessment*

ISO 14040 (2006) adalah pedoman yang digunakan untuk melakukan analisis LCA. Dimana dalam analisis LCA diperlukan juga evaluasi guna membuktikan bahwa analisis yang dilakukan sesuai dengan yang diharapkan. Selain itu, evaluasi ini dilakukan untuk meningkatkan kepercayaan dan keandalan dari hasil analisis LCA. Evaluasi ini dilakukan sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup penelitian serta mempertimbangkan tujuan akhir dari penelitian. Dalam evaluasi LCA ada tiga teknik evaluasi yang perlu dipertimbangkan yaitu pemeriksaan kelengkapan (*completeness check*), pemeriksaan sensitivitas (*sensitivity check*) dan pemeriksaan konsistensi (*consistency check*).

4.2.5.1 *Completeness Check*

Completeness check adalah proses verifikasi apakah informasi dan data dari tahap LCA cukup untuk mencapai kesimpulan sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup penelitian. Informasi dan data yang diberikan harus relevan dan lengkap dalam analisis LCA. Jika terdapat data yang hilang atau tidak relevan dengan analisis LCA maka akan mempengaruhi hasil dari analisis LCA. Sehingga perlu adanya tinjau kembali terkait *life cycle inventory* (LCI) dan *life cycle impact assessment* untuk memastikan bahwa data sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup penelitian atau dapat dilakukan dengan menyesuaikan tujuan dan ruang lingkup penelitian dengan data yang ada. Namun diperlukan alasan yang kuat guna mengubah tujuan dan ruang lingkup penelitian.



Gambar 4.10 Diagram Perhitungan Normalisasi

Tabel 4. 11 Nilai Normalisasi Dampak pada Unit Boiler

<i>Impact category</i>	<i>Total</i>	<i>Steam (Boiler)</i>	<i>Coal (Mill)</i>	<i>De-ionised</i>	<i>Diesel</i>	<i>Compressed air</i>	<i>Electricity</i>	<i>Waste water treatment</i>	<i>Fly ash</i>	<i>Bottom ash</i>
Carcinogenics	7,52, E+05	0,00, E+00	5,33, E+03	2,43, E+01	3,56, E+05	1,16,E+05	4,21, E+01	- 5,78,E+03	1,80, E+05	1,01, E+05
Ecotoxicity	2,75, E+05	0,00, E+00	7,03, E+02	8,68, E+00	1,60, E+05	4,91,E+04	1,60, E+01	- 9,63,E+02	2,99, E+04	3,56, E+04
Global warming	1,83, E+05	1,67, E+05	4,06, E+03	6,55, E+01	5,02, E+03	4,78,E+03	2,80, E+00	0,00,E+00	2,97, E+03	7,46, E+00
Acidification	1,77, E+05	1,62, E+05	3,30, E+03	1,22, E+02	3,23, E+03	6,76,E+03	6,88, E+00	0,00,E+00	1,90, E+03	1,35, E+01
Eutrophication	1,38, E+05	8,56, E+03	2,96, E+03	7,46, E+00	9,44, E+04	2,80,E+04	1,17, E+01	- 2,66,E+02	2,93, E+03	1,10, E+03
Respiratory effects	6,99, E+04	3,09, E+04	7,25, E+02	3,48, E+01	2,57, E+04	1,14,E+04	2,45, E+00	0,00,E+00	1,21, E+03	6,67, E+00
Smog	6,05, E+04	5,05, E+04	2,21, E+03	3,46, E+01	3,66, E+03	2,52,E+03	4,47, E+00	0,00,E+00	1,55, E+03	2,04, E+01
Fossil fuel depletion	2,35, E+04	0,00, E+00	3,84, E+03	5,78, E+01	6,78, E+02	1,13,E+04	7,11, E+01	0,00,E+00	7,60, E+03	3,86, E+01

Sumber : Hasil SimaPro 8.5.2

4.2.5.2 Consistency Check

Consistency check adalah proses verifikasi bahwa asumsi, metode, dan data diterapkan secara konsisten di seluruh penelitian dan sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup penelitian yang dilakukan sebelum kesimpulan tercapai. Konsistensi asumsi, metode dan data ini bertujuan untuk memudahkan pemahaman pada analisis LCA sehingga tidak terjadi multi-tafsir dalam analisis LCA. Selain itu, konsistensi asumsi, metode dan data dilakukan untuk menunjukkan hasil dari analisis yang sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup penelitian.

4.3.4.3 Sensitivity Check

Sensitivity check adalah proses verifikasi bahwa informasi yang diperoleh dari analisis sensitivitas relevan untuk mencapai kesimpulan dan untuk memberikan rekomendasi. Tujuan dari pemeriksaan sensitivitas yaitu untuk menilai keandalan hasil akhir dan kesimpulan dengan menentukan apakah mereka dipengaruhi oleh asumsi, metode dan ketidakpastian dalam data yang dibuat dalam studi LCA.

Sensitivity check dilakukan dalam penelitian ini menggunakan hasil analisis LCIA proses produksi listrik. Dimana analisis LCIA proses produksi listrik menunjukkan bahwa kategori dampak yang paling dominan adalah *carcinogenics*. Perhitungan *sensitivity check* dilakukan dengan menambahkan dan mengurangi data bahan baku atau *input* sebanyak 10% pada masing-masing proses kegiatan dengan unit proses yang memiliki keterkaitan dampak pada *running* LCA pertama yaitu *coal bunker*, *coal mill* dan *boiler*. Berdasarkan nilai penambahan dan pengurangan 10% bahan baku dan penggunaan listrik selanjutnya akan dilakukan *running* dengan aplikasi *simaPro 8.5.2*. Tujuan dilakukan *running* kembali yaitu untuk mengetahui perubahan nilai dampak setelah dilakukannya penambahan dan pengurangan pada bahan baku dan penggunaan listrik pada unit *coal bunker*, *coal mill*, dan *boiler*.

Tabel 4. 12 Penambahan 10% Nilai Input

Unit Kegiatan	Bahan Bakar			+10%		
	Batubara	Diesel	Listrik	Batubara	Diesel	Listrik
Coal Bunker	2.193.340	-	3.378.176	2.412.674	-	3.715.994
Coal Mill	2.193.340	-	16.283.864	2.412.674	-	17.912.250
Boiler	2.193.340	188	67.466.749	2.412.674	206,8	74.213.424

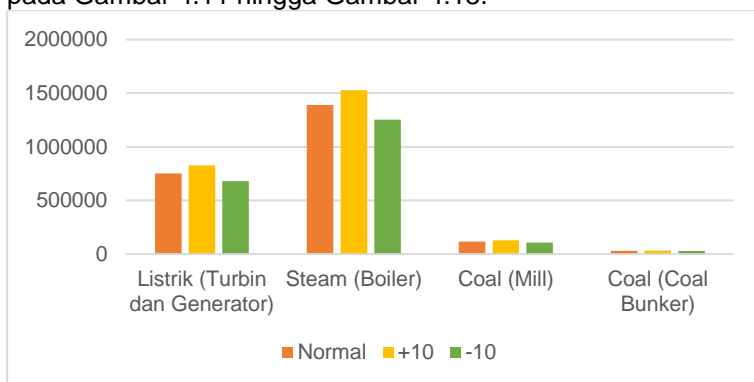
Sumber : Hasil Perhitungan

Tabel 4. 13 Pengurangan 10% Nilai Input

Unit Kegiatan	Bahan Bakar			-10%		
	Batubara	Diesel	Listrik	Batubara	Diesel	Listrik
Coal Bunker	2.193.340	-	3.378.176	1.974.006	-	3.040.358
Coal Mill	2.193.340	-	16.283.864	1.974.006	-	14.655.478
Boiler	2.193.340	188	67.466.749	1.974.006	169,2	60.720.074

Sumber : Hasil Perhitungan

Berikut hasil perbandingan dampak dari penambahan dan pengurangan bahan baku dan penggunaan listrik dapat dilihat pada Gambar 4.11 hingga Gambar 4.18.



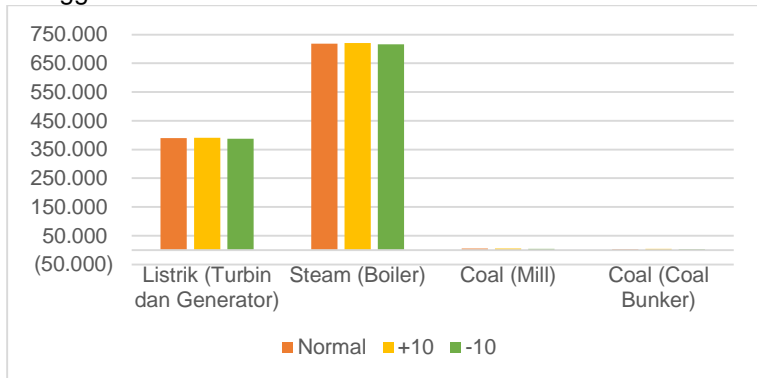
Gambar 4.11 Nilai Perbandingan Dampak Carcinogenics

Dampak *carcinogenics* pada kondisi normal untuk unit boiler menghasilkan nilai 1.389.094, pada saat penambahan 10% memiliki nilai 1.525.950 dan pada saat penambahan 10% dengan nilai 1.252.239. Maka deviasi pada masing-masing variasi data sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (+) 10\%} &= \text{Dampak saat (+)10\% - Data normal} \\ &= 1.525.950 - 1.389.094 \\ &= 136.855,8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (-) 10\%} &= \text{Data normal - Dampak saat (-)10\%} \\ &= 1.389.094 - 1.252.239 \\ &= 136.855,4 \end{aligned}$$

Penambahan dan pengurangan bahan bakar dan penggunaan listrik akan mempengaruhi dampak *carcinogenics* yaitu bertambah dan berkurang sejumlah perhitungan diatas. Terlihat perubahan nilai dampak yang signifikan, dengan persentase penambahan dan pengurangan sebesar $\pm 0,00029\%$. Sehingga, dari perhitungan *sensitivity check* dapat dikatakan bahwa analisis data menggunakan SimaPro 8.5.2 adalah sensitif.



Gambar 4.12 Nilai Perbandingan Dampak *Ecotoxicity*

Dampak *Ecotoxicity* pada kondisi normal untuk unit boiler menghasilkan nilai 718.495, pada saat penambahan 10% memiliki nilai 720.849 dan pada saat penambahan 10% dengan nilai 716.141. Maka deviasi pada masing-masing variasi data sebagai berikut:

$$\text{Deviasi (+) 10\%} = \text{Dampak saat (+)10\% - Data normal}$$

$$= 720.849 - 718.495,06$$

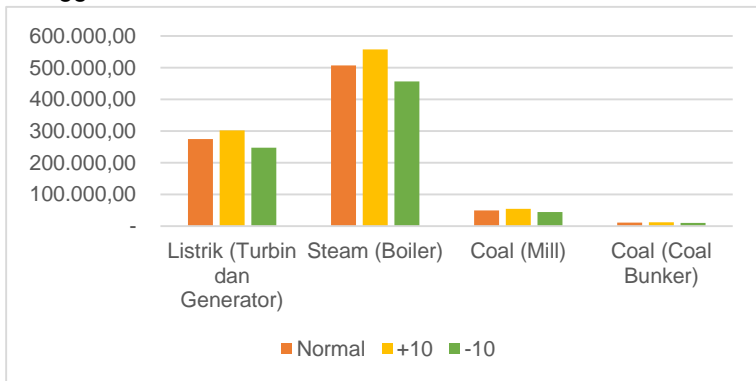
$$= 2.354$$

$$\text{Deviasi (-) 10\%} = \text{Data normal} - \text{Dampak saat (-)10\%}$$

$$= 718.495,06 - 716.141,09$$

$$= 2.353,97$$

Penambahan dan pengurangan bahan bakar dan penggunaan listrik akan mempengaruhi dampak *Ecotoxicity* yaitu bertambah dan berkurang sejumlah perhitungan diatas. Terlihat perubahan nilai dampak yang signifikan, dengan persentase penambahan dan pengurangan sebesar $\pm 0,00127$ %. Sehingga, dari perhitungan *sensitivity check* dapat dikatakan bahwa analisis data menggunakan SimaPro 8.5.2 adalah sensitif.



Gambar 4.13 Nilai Perbandingan Dampak *Global warming*

Dampak *Global warming* pada kondisi normal untuk unit boiler menghasilkan nilai 507.335,43, pada saat penambahan 10% memiliki nilai 557.744,15 dan pada saat pengurangan 10% dengan nilai 456.926,87. Maka deviasi pada masing-masing variasi data sebagai berikut:

$$\text{Deviasi (+) 10\%} = \text{Dampak saat (+)10\%} - \text{Data normal}$$

$$= 557.744,15 - 507.335,43$$

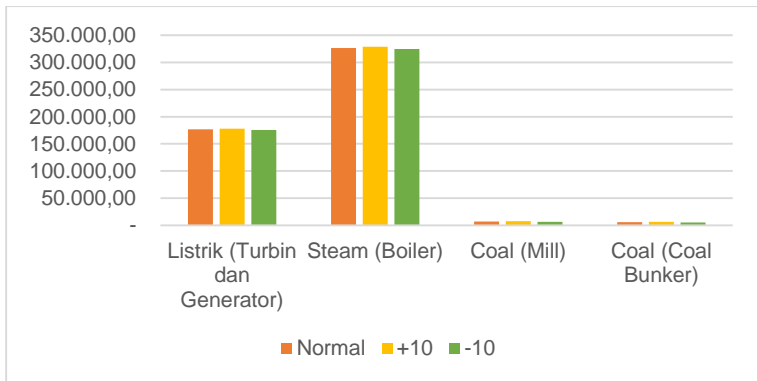
$$= 50.408,72$$

$$\text{Deviasi (-) 10\%} = \text{Data normal} - \text{Dampak saat (-)10\%}$$

$$= 507.335,43 - 456.926,87$$

$$= 50.408,56$$

Penambahan dan pengurangan bahan bakar dan penggunaan listrik akan mempengaruhi dampak *Global warming* yaitu bertambah dan berkurang sejumlah perhitungan diatas. Terlihat perubahan nilai dampak yang signifikan, dengan persentase penambahan dan pengurangan sebesar $\pm 0,00032\%$. Sehingga, dari perhitungan *sensitivity check* dapat dikatakan bahwa analisis data menggunakan SimaPro 8.5.2 adalah sensitif.



Gambar 4.14 Nilai Perbandingan Dampak *Acidification*

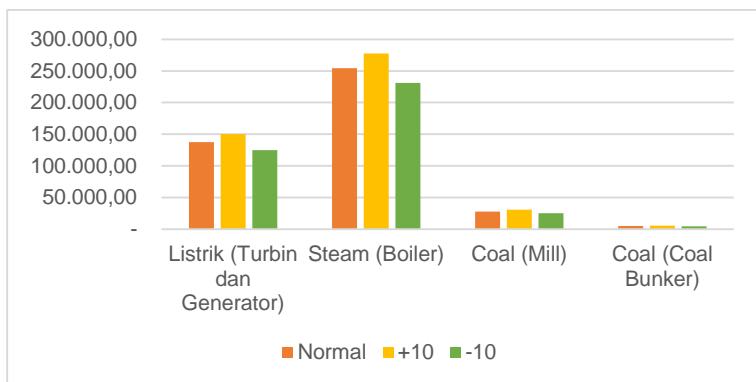
Dampak *ecotoxicity* pada kondisi normal untuk unit boiler menghasilkan nilai 326.864,24, pada saat penambahan 10% memiliki nilai 329.058,09 dan pada saat pengurangan 10% dengan nilai 324.670,45. Maka deviasi pada masing-masing variasi data sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (+) 10\%} &= \text{Dampak saat (+)10\%} - \text{Data normal} \\ &= 329.058,09 - 326.864,24 \\ &= 2.193,85 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (-) 10\%} &= \text{Data normal} - \text{Dampak saat (-)10\%} \\ &= 329.058,09 - 324.670,45 \\ &= 2.193,79 \end{aligned}$$

Penambahan dan pengurangan bahan bakar dan penggunaan listrik akan mempengaruhi dampak *ecotoxicity* yaitu bertambah dan berkurang sejumlah perhitungan diatas. Terlihat perubahan nilai dampak yang signifikan, dengan persentase penambahan

dan pengurangan sebesar $\pm 0,0027\%$. Sehingga, dari perhitungan *sensitivity check* dapat dikatakan bahwa analisis data menggunakan SimaPro 8.5.2 adalah sensitif.



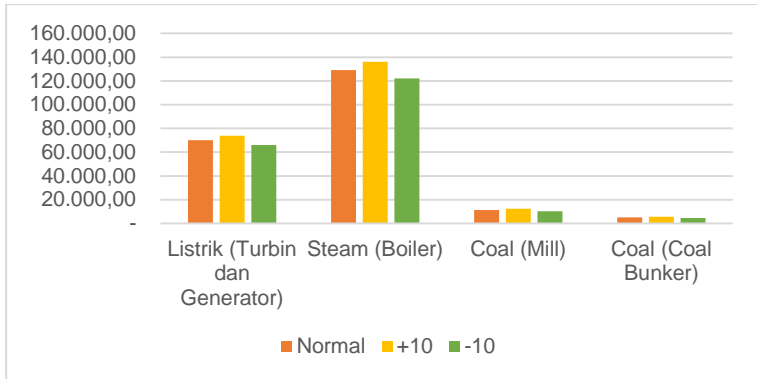
Gambar 4.15 Nilai Perbandingan Dampak *Eutrophication*

Dampak *eutrophication* pada kondisi normal untuk unit boiler menghasilkan nilai 254.112,91, pada saat penambahan 10% memiliki nilai 277.416,32 dan pada saat pengurangan 10% dengan nilai 230.809,61. Maka deviasi pada masing-masing variasi data sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (+) 10\%} &= \text{Dampak saat (+)10\%} - \text{Data normal} \\ &= 277.416,32 - 254.112,91 \\ &= 23.303,41 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (-) 10\%} &= \text{Data normal} - \text{Dampak saat (-)10\%} \\ &= 254.112,91 - 230.809,61 \\ &= 23.303,30 \end{aligned}$$

Penambahan dan pengurangan bahan bakar dan penggunaan listrik akan mempengaruhi dampak *eutrophication* yaitu bertambah dan berkurang sejumlah perhitungan diatas. Terlihat perubahan nilai dampak yang signifikan, dengan persentase penambahan dan pengurangan sebesar $\pm 0,0005\%$. Sehingga, dari perhitungan *sensitivity check* dapat dikatakan bahwa analisis data menggunakan SimaPro 8.5.2 adalah sensitif.

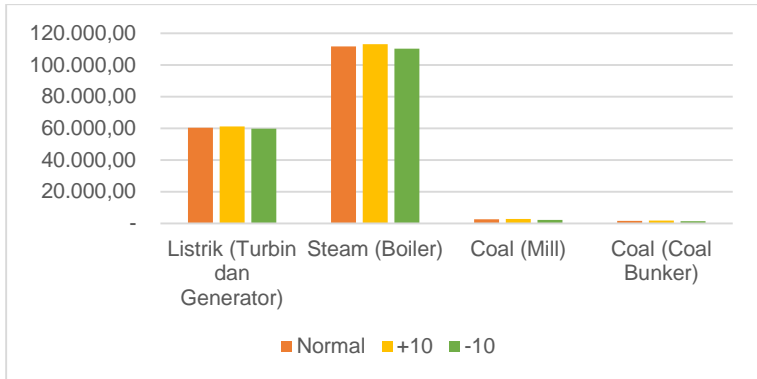


Gambar 4.163 Nilai Perbandingan Dampak *Respiratory effect*
 Dampak *respiratory effect* pada kondisi normal untuk unit boiler menghasilkan nilai 129.131,87, pada saat penambahan 10% memiliki nilai 136.193,22 dan pada saat pengurangan 10% dengan nilai 122.070,55. Maka deviasi pada masing-masing variasi data sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (+) 10\%} &= \text{Dampak saat (+)10\%} - \text{Data normal} \\ &= 136.193,22 - 129.131,87 \\ &= 7.061,35 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (-) 10\%} &= \text{Data normal} - \text{Dampak saat (-)10\%} \\ &= 129.131,87 - 122.070,55 \\ &= 7.061,32 \end{aligned}$$

Penambahan dan pengurangan bahan bakar dan penggunaan listrik akan mempengaruhi dampak *respiratory effect* yaitu bertambah dan berkurang sejumlah perhitungan diatas. Terlihat perubahan nilai dampak yang signifikan, dengan persentase penambahan dan pengurangan sebesar $\pm 0,00042\%$. Sehingga, dari perhitungan *sensitivity check* dapat dikatakan bahwa analisis data menggunakan SimaPro 8.5.2 adalah sensitif.



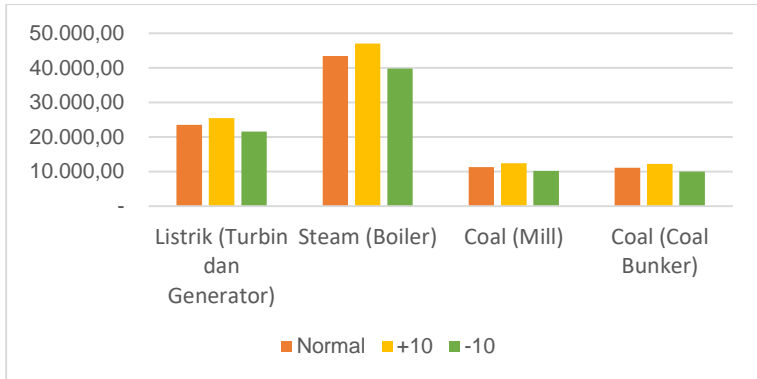
Gambar 4.17 Nilai Perbandingan Dampak Smog

Dampak *smog* pada kondisi normal untuk unit boiler menghasilkan nilai 111.759,07, pada saat penambahan 10% memiliki nilai 113.186,88 dan pada saat pengurangan 10% dengan nilai 110.331,30. Maka deviasi pada masing-masing variasi data sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (+) 10\%} &= \text{Dampak saat (+)10\%} - \text{Data normal} \\ &= 113.186,88 - 111.759,07 \\ &= 1.427,81 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (-) 10\%} &= \text{Data normal} - \text{Dampak saat (-)10\%} \\ &= 111.759,07 - 110.331,30 \\ &= 1.427,77 \end{aligned}$$

Penambahan dan pengurangan bahan bakar dan penggunaan listrik akan mempengaruhi dampak *smog* yaitu bertambah dan berkurang sejumlah perhitungan diatas. Terlihat perubahan nilai dampak yang signifikan, dengan persentase penambahan dan pengurangan sebesar $\pm 0,0028$ %. Sehingga, dari perhitungan *sensitivity check* dapat dikatakan bahwa analisis data menggunakan SimaPro 8.5.2 adalah sensitif.



Gambar 4.18 Nilai Perbandingan Dampak *Fossil Fuel Depletion*

Dampak *fossil fuel depletion* pada kondisi normal untuk unit boiler menghasilkan nilai 43.452,20, pada saat penambahan 10% memiliki nilai 47.074,01 dan pada saat pengurangan 10% dengan nilai 39.831,08. Maka deviasi pada masing-masing variasi data sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (+) 10\%} &= \text{Dampak saat (+)10\%} - \text{Data normal} \\ &= 47.074,01 - 43.452,20 \\ &= 3.621,82 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (-) 10\%} &= \text{Data normal} - \text{Dampak saat (-)10\%} \\ &= 43.452,20 - 39.831,08 \\ &= 3.621,12 \end{aligned}$$

Penambahan dan pengurangan bahan bakar dan penggunaan listrik akan mempengaruhi dampak *fossil fuel depletion* yaitu bertambah dan berkurang sejumlah perhitungan diatas. Terlihat perubahan nilai dampak yang signifikan, dengan persentase penambahan dan pengurangan sebesar $\pm 0,02\%$. Sehingga, dari perhitungan *sensitivity check* dapat dikatakan bahwa analisis data menggunakan SimaPro 8.5.2 adalah sensitif.

4.3 Alternatif Perbaikan

Alternatif perbaikan yang digunakan pada proses utama maupun penunjang seperti proses pada unit *coal bunker*, *coal mill*, *boiler*, turbin dan generator dalam kegiatan produksi listrik di PT.

PJB UBJ O&M PLTU Paiton merupakan alternatif yang didapatkan dari hasil analisis dan hasil diskusi dengan pihak terkait yang bekerja pada proses produksi listrik di PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton serta dosen pembimbing. Berdasarkan hasil analisis LCA, alternatif perbaikan yang dikaji lebih mengutamakan pada titik *hospot* yang berada pada unit boiler. Pada unit ini dampak *carcinogenic* mempunyai nilai terbesar yang disebabkan oleh partikulat, dampak lainnya dapat dilihat pada Tabel 4.12. Pemilihan alternatif perbaikan juga dilakukan dengan cara studi literatur yang didapatkan pada jurnal maupun analisis terhadap laporan perusahaan. Sedangkan, hasil diskusi dilakukan dengan cara bertukar pendapat dengan pihak terkait yang bekerja di proses produksi serta dosen pembimbing terkait kondisi aktual lapangan dan alternatif yang mungkin untuk diterapkan, sehingga proses produksi dapat bekerja lebih maksimal untuk mengurangi dampak lingkungan yang terjadi. Beberapa alternatif yang digunakan sebagai tujuan untuk mengurangi dampak lingkungan yang terjadi sesuai analisis LCA seperti berikut:

1. Substitusi bahan bakar diesel dengan biodiesel

Biodiesel merupakan bahan bakar yang terbuat dari minyak nabati yang berasal dari berbagai jenis biji-bijian. Pencampuran 25% biodiesel pada BBM solar sebagai bahan bakar boiler efektif menurunkan emisi SO_2 21,8%. Berbeda pada sebagian besar hasil pengujian penggunaan biodiesel pada mesin diesel, penggunaan biodiesel pada boiler juga berkontribusi pada penurunan emisi NO_x sebesar 25,3% (Leily, 2015).

2. *Boiler* Superkritikal

Pada kondisi *boiler* superkritikal (Ketel superkritis), air dipanaskan pada tekanan konstan di atas tekanan kritis sehingga tidak ada perbedaan antara gas dan cair, karena densitas massanya sama. Pada *boiler superkritikal* tidak ada tahapan air berada dalam dua fasa yang membutuhkan separasi. Sehingga boiler tidak dilengkapi dengan drum. *Boiler superheater* menggunakan *boiler* sekali lalu yaitu air umpan yang

dipompa oleh *boiler feed pump* hingga air dapat melalui tahapan pemansan di boiler dan uap yang dihasilkan langsung dikirim ke turbin uap tanpa adanya resirkulasi. Dengan aplikasi PLTU 660 MW superkritikal, konsumsi batubara menjadi 527,9 kg/MWh (Cahyadi, 2015).

3. *Pressurized Fluidized-Bed Combustion* (PFBC)

Pada proses PFBC, batubara sebelum dimasukkan ke dalam boiler dihaluskan hingga ukuran 620 mm. Batubara dimasukkan dengan cara diinjeksikan melalui lubang yang berada sedikit di atas distributor udara. Bersamaan dengan batubara diinjeksikan juga batu kapur yang sudah dihaluskan sehingga terjadi proses desulfurisasi. Pembakaran dalam boiler berlangsung pada suhu yang relatif rendah yaitu sekitar 800 °C. Suhu yang relatif rendah ini akan mengurangi emisi NO_x yang dihasilkan. Gas hasil pembakaran mempunyai tekanan yang cukup tinggi dan bersih sehingga bisa digunakan untuk menggerakkan turbin gas. Disamping itu gabungan uap yang dihasilkan dari pembakaran dengan uap hasil HRSG (Heat Recovery Steam Generator) dapat digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Dengan demikian dapat diperoleh siklus ganda sehingga akan menaikkan total efisiensinya. Dengan penggunaan teknologi PFBC, Efisiensi dari sistem ini berkisar antara 40-44 %, emisi SO₂ dapat dikurangi 90-95 % sedangkan emisi NO_x dapat dikurangi 70-80 % (Taukhid, 2011).

4.3.1 Skenario Alternatif Perbaikan

Skenario ini dibuat berdasarkan alternatif perbaikan yang telah didapat dan digabungkan untuk mendapatkan hasil yang maksimal dalam penurunan dampak terhadap lingkungan. Pemilihan skenario dilakukan berdasarkan titik *hospot* dari hasil analisis LCA yaitu pada unit boiler dengan dampak terbesar carcinogenics. Material yang dominan menyebabkan dampak tersebut muncul antara lain penggunaan listrik, batubara dan limbah

padat (*fly ash* dan *bottom ash*). Setelah mendapatkan skenario alternatif perbaikan dilakukan iterasi atau *running* kembali ke aplikasi simapro. Berikut skenario alternatif perbaikan yang telah dilakukan iterasi menggunakan aplikasi simapro:

1. Skenario I (Biodiesel - Boiler Superkritikal)

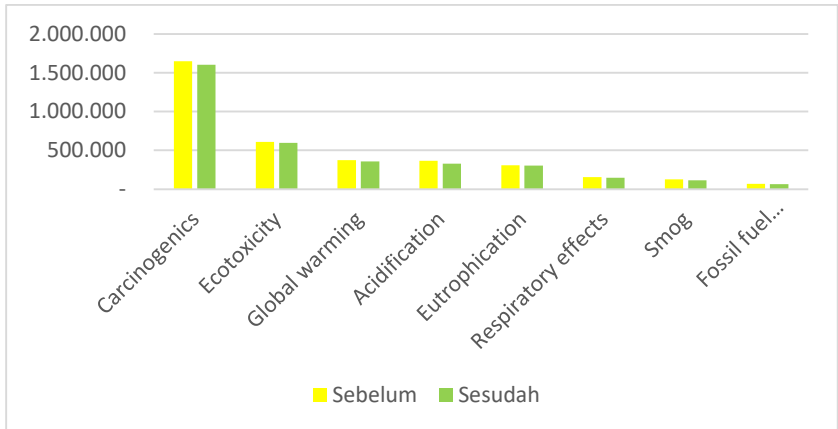
Pada skenario I digunakan alternatif berupa substitusi bahan bakar diesel menjadi biodiesel dan pergantian boiler jenis superkritikal. Dari skenario I dilakukan *running* kembali menggunakan simaPro 8.5.2. Setelah dilakukan *running* dibandingkan dampak sebelum dan sesudah *running* dengan skenario I. Berikut dapat dilihat pada Tabel 4.15 hasil perbandingan dampak sebelum dan sesudah adanya alternatif perbaikan skenario I.

Tabel 4. 14 Perbandingan Dampak Lingkungan antara Sebelum dan Sesudah Alternatif Perbaikan Skenario I

Impact category	Sebelum	Sesudah	Persentase penurunan (%)
Carcinogenics	1.650.732	1.603.876	2,8%
Ecotoxicity	609.098	595.333	2,3%
Global warming	375.188	355.327	5,3%
Acidification	366.900	328.265	10,5%
Eutrophication	308.433	302.148	2,0%
Respiratory effects	156.433	147.285	5,8%
Smog	125.252	111.669	10,8%
Fossil fuel depletion	69.442	64.873	6,6%

Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan hasil diatas dapat diketahui bahwa dampak yang mengalami perubahan secara signifikan adalah *smog* dengan persentase penurunan sebesar 10,8%. Sedangkan dampak yang mengalami perubahan terkecil adalah *eutrophication* dengan persentase penurunan sebesar 2%. Jika dilihat dari grafik, perubahan penurunan dampak dapat dilihat pada Gambar 4.19



Gambar 4.19 Diagram Perbandingan Dampak Lingkungan antara Sebelum dan Sesudah Alternatif Perbaikan Skenario I

2. Skenario II (Biodiesel - PFBC)

Pada skenario II digunakan alternatif berupa substitusi bahan bakar diesel menjadi biodiesel dan pergantian sistem boiler menggunakan PFBC. Dari skenario II dilakukan *running* kembali menggunakan simaPro 8.5.2. Setelah dilakukan *running* dibandingkan dampak sebelum dan sesudah *running* dengan skenario II. Berikut dapat dilihat pada Tabel 4.16 hasil perbandingan dampak sebelum dan sesudah adanya alternatif perbaikan skenario II.

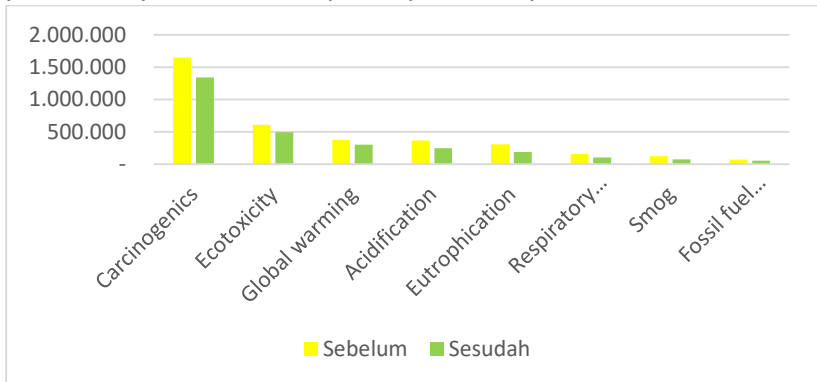
Tabel 4. 15 Perbandingan Dampak Lingkungan antara Sebelum dan Sesudah Alternatif Perbaikan Skenario II

Impact category	Sebelum	Sesudah	Persentase penurunan (%)
Carcinogenics	1.650.732	1.408.198	14,7%
Ecotoxicity	609.098	521.406	14,4%
Global warming	375.188	301.403	19,7%
Acidification	366.900	213.494	25,9%

Impact category	Sebelum	Sesudah	Persentase penurunan (%)
Eutrophication	308.433	249.281	38,1%
Respiratory effects	156.433	111.547	28,7%
Smog	125.252	76.255	39,1%
Fossil fuel depletion	69.442	58.190	16,2%

Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan hasil diatas dapat diketahui bahwa dampak yang mengalami perubahan secara signifikan adalah *smog* dengan persentase penurunan sebesar 39,1%. Sedangkan dampak yang mengalami perubahan terkecil adalah *ecotoxicity* dengan persentase penurunan sebesar 14,4%. Jika dilihat dari grafik, perubahan penurunan dampak dapat dilihat pada Gambar 4.20



Gambar 4.20 Diagram Perbandingan Dampak Lingkungan antara Sebelum dan Sesudah Alternatif Perbaikan Skenario II

BAB IV

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Beban emisi yang dihasilkan dari proses kegiatan khususnya pada unit *boiler* pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) di PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON Probolinggo yaitu
 - CO₂ sebesar 4.016 x 10⁶ kg/tahun.
 - CH₄ sebesar 38 x 10³ kg/tahun.
 - N₂O sebesar 56 x 10³ kg/tahun.
 - SO_x sebesar 117 x 10⁵ kg/tahun.
 - NO_x sebesar 42 x 10⁵ kg/tahun.
 - PM sebesar 44 x 10⁴ kg/tahun.
2. Berdasarkan analisis *life cycle assessment* (LCA) dihasilkan bahwa proses yang memiliki dampak paling besar terhadap lingkungan adalah proses pada unit *boiler*. Sedangkan, dampak yang paling besar yang terjadi pada produksi listrik tenaga uap (PLTU) di PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON Probolinggo adalah dampak *carcinogenics*. Berikut besar tiap dampak yang dikaji pada produksi listrik tenaga uap (PLTU) di PT. PJB UBJ O&M PLTU PAITON Probolinggo :
 - 1.650.732 untuk kategori dampak *carcinogenics*.
 - 609.098 untuk kategori dampak *ecotoxicity*.
 - 375.188 untuk kategori dampak *global warming*.
 - 366.900 untuk kategori dampak *acidification*.
 - 308.433 untuk kategori dampak *eutrophication*.
 - 156.433 untuk kategori dampak *respiratory effect*.
 - 125.252 untuk kategori dampak *smog*.
 - 69.442 untuk kategori dampak *fossil fuel depletion*.
3. Terdapat 2 skenario alternatif perbaikan guna mereduksi emisi dari hasil penelitian yaitu sebagai berikut:
 1. Skenario I (Biodiesel - Boiler Superkritikal)
Skenario ini dapat menurunkan dampak *carcinogenic* sebesar 2,8%. Sedangkan dampak yang mengalami

penurunan paling signifikan yaitu dampak *smog* dengan penurunan sebesar 10,8%.

2. Skenario II (Biodiesel - PFBC)

Skenario ini dapat menurunkan dampak *carcinogenic* sebesar 14,7%. Sedangkan dampak yang mengalami penurunan paling signifikan yaitu dampak *smog* dengan penurunan sebesar 38,1%.

3.2 Saran

Saran dari penelitian ini adalah:

1. Perlu dilakukan kajian lebih dalam mengenai keseluruhan proses sehingga pada proses pengolahan data tidak banyak menggunakan asumsi-asumsi pada nilai yang dihasilkan pada tiap-tiap proses.
2. Perlu dilakukan kajian lebih dalam mengenai jumlah biaya yang dapat disimpan atau biaya investasi terhadap alternatif yang dipilih.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A. R. 2007. *Kajian Pustaka Kebijakan Pencemaran Udara Di Indonesia*. Dinas Kesehatan Kabupaten Plewali Mandar: Sulawesi Barat.
- Anang, S.C. 2012. Difuser Membran untuk Pemisahan CO₂ dari Gas. *Tugas akhir FTSL ITB*. Bandung
- Andistiara, N. 2018. Kajian Dampak Proses Eksplorasi dan Produksi Gas Alam Terhadap Lingkungan dengan Menggunakan Metode Life Cycle Assessment (LCA). *Tugas Akhir FTSLK ITS*. Surabaya
- Anonim. 2015. *Laporan Pengelolaan Limbah B3 Triwulan I. Probolinggo PT.PJB Unit Pembangkit Paiton*
- Ancona, C., Bauleo, L., Massari, S., Sozzi, R., Davoli, M., Forastiere, F. 2016. Long term effects of industrial pollution: a residential cohort approach in the Civitavecchia area (Central Italy). *Abstracts of the 28th Annual Meeting of the International Society for Environmental Epidemiology (ISEE)*, Rome (Italy), 1-4/9/2016. Environmental Health Perspectives, Research Triangle Park, NC.
- API. 2009. *Compendium of Green House Gas Emissions Methodologies for the Oil and Natural Gas Industry*.
- Astuti, J. 2018. Tingkat Pengetahuan Masyarakat Tentang Pengaruh Polusi Udara Terhadap Penyakit Ispa Di Puskesmas Perawatan Betungan Kota Bengkulu. *Jurnal Ilmu Keperawatan Dan Kesehatan*. Vol (6) No 1
- Bailey, O. and Worrell, E. 2005. *Clean Energy Technologies: A Preliminary Inventory of the Potential for Electricity Generation Berkeley,CA*. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Budianto, W. 2008. Analisis Hubungan Kualitas Udara Ambien Dengan Kejadian Penyakit ISPA. *Tugas Akhir FKM Universitas Indonesia*. Jakarta
- Bare J., Norris G., Pennington D., and Mc Kone T. 2003. The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 6 Number 3-4

- Cahyadi. 2015. *PLTU Batubara Superkritikal yang Efisien*. Tangerang Selatan: Balai Besar Teknologi Energi, BPPT, 2015.
- Ciencewicky, J and Jasper. 2007. Air Pollution and Respiratory Viral Infection. *Inhalation Toxicology*, 19: 1135-1146
- Connell, D.W. 2005. *Basic Concepts of Environmental Chemistry*. Taylor and Francis, Boca Raton, FL.
- Danti, F. R. 2016. Kajian Inventarisasi dan Estimasi Upaya Penurunan Emisi Karbon Dioksida di PLTU Suralaya Unit 1–7, Banten. *Seminar Nasional Cendekiawan 2016 Vol (VI)* hal 1-8.
- Dina, P. 2017. Upaya Penurunan Emisi SO₂ Dari Hasil Pembakaran Batubara Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Pltu) Dengan Menggunakan Flue Gas Desulfurization (Fgd) Tipe Basah. *Prosiding SNATI F Ke-4*
- Ferreira J., G., Andersen J. H., Borja A., Bricker S. B., Camp J., da Silva M. C., Garcés E., Heiskanen A., Humborg C., Ignatiades L., Lancelot C., Menesguen A., Tett P., Hoepffner N., and Claussen U. 2011. Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 93: 117–131.
- Forest, and Jedi. 2017. Pengaruh Penggantian Sebagian Tanah Liat Oleh Fly Ash Batubara Terhadap Nilai Thermal Properties Sebagai Upaya Memetakan Material Batu Bata Yang Ramah Lingkungan. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Kejuruan*. Jiptek, Vol. X No.1 Hal 31-41
- Ghaziyad, V. N. 2015. Analisis Efektivitas Arang Tempurung Kelapa dan Karbon Aktif dalam Mengadsorpsi Gas Karbondioksida (CO₂) yang Dihasilkan Oleh Lumpur Tinja dan Kotoran Sapi. *Tugas Akhir FTSP Intitut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya*. Surabaya.
- Gusnita, D. 2014. Pencemaran Smog (Asap Kabut) Sebagai Dampak Aktivitas Antropogenik. *Berita Dirgantara* Vol. 15 No.2 Hal 84-89
- Haas, and Guido. 2005. *Estimation of Environmental Impact of Conversion to Organis Agriculture in Hamburg Using The Life-Cycle-Assessment Method*. Germany.

- Harsono, B., dan Kiman, S. 2015. Peningkatan Kinerja Mesin Diesel dengan Produksi Biodiesel dari Kelapa dan Unjuk Kinerjanya Berbasis Transesterifikasi dengan Sistem Injeksi Langsung. *Jurnal Rona Teknik Pertanian*.
- Hanafi, D. 2016. *Laporan Praktek Industri di PT. PJB Unit Pembangkit Gresik*. SMKSG: Gresik
- Hermawan, H., Puti, F. M., Muhamad, A., Driejana. 2013. Peran Life Cycle Analysis (LCA) Pada Material Kontruksi Dalam Upaya Menurunkan Dampak Emisi Kabon Dioksida Pada Efek Gas Rumah Kaca. *Konferensi Nasional Teknik Sipil 7 (KoNTekS 7)* hal. 47-52
- Herprayoga, R. 2014. Kajian Life Cycle Assessment (LCA) untuk Mereduksi Dampak Pencemaran Udara PT. Semen Bosowa Maros dengan Pendekatan Analytical Hierarchy Process (AHP). *Tugas Akhir FTSP Intitut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya*. Surabaya
- Himmatus, S. 2016. Inventaris Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Energi dan Sektor Limbah PLTU Paiton Probolinggo. *Tugas Akhir FTSP Intitut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya*. Surabaya
- IPCC. 2006. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Chapter 3: Mobile Combustion. Paris, France: OECD.
- International Energy Agency. 2011. *World Energy Outlook*. France.
- Iswan. 2010. Penanggulangan Limbah PLTU Batubara. *Dinamika Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. Vol. 1, No.2, Mei 2010.
- Jeremy J, Shuxiao W., and Jiming, H. 2012. Design and operational considerations for selective catalytic. *Front. Energy* 2012, 6(1): 98–105
- Kautzar, G. Z., Yeni S., dan Rahmi, Y. 2015. Analisis Dampak Lingkungan Pada Aktivitas Supply Chain Prouk Kulit Menggunakan Metode LCA dan ANP. *Jurnal Rekaya dan Manajemen Sistem Industri*. Vol (3) No. 1
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2018. *Statistik Ketenagalistrikan 2017*. Jakarta.
- Kementerian Lingkungan Hidup. 2012. *Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional*. Jakarta.

- ITS Kemitraan. 2017. Laporan Verifikasi dan Benchmarking PT. Indonesia Power UP Suralaya 2017. Banten
- Leily, N. K. 2015. Analisis Efek Penggunaan Biodiesel Sebagai Bahan Bakar Terhadap Kinerja Fire Tube Boiler. *Skripsi FTI UN Sriwijaya*. Palembang
- Mark, J. 2002. *Atmospheric Pollution: Aerosol Partikel in Smog*. Cambridge University.
- Menoufi, and Karim A. I. 2011. *Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment Methodologies : A state of the art*. Universitat de Lleida.
- OSPAR. 2003. In: Strategies of the OSPAR commission for the protection of the marine environment of the north-east Atlantic (reference number: 2003e21), OSPAR Convention for the Protection of the Marine Environment of the Northeast Atlantic: *Ministerial Meeting of the OSPAR Commission*, Bremen, 25 June 2003, vol. Annex 31 (Ref. B-4.2).
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.12. 2012. *Pedoman Penghitungan Beban Emisi Kegiatan Industri Minyak dan Gas Bumi*. Jakarta.
- Peraturan Presiden Republik Indonesia No.61. 2011. *Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca*. Jakarta.
- Peraturan Presiden Republik Indonesia No.71. 2011. *Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional*. Jakarta.
- Piersanti, A., Mario, A., Briganti, G., and Vitali, L. 2018. Air quality modeling and inhalation health risk assessment for a new generation coal-fired power plant in Central Italy. *Science of the Total Environment* 644 (2018) 884–898
- Pramanik, T., Hari, O. S., Suchita M., Anurag M., Rajesh, P., and Smriti S. 2009. Immediate Effect of Slow Pace Bhastrika Pranayama on Blood Pressure and Heart Rate. *The Journal Of Alternative And Complementary Medicine* Vol.(15), No. 3, 2009, pp. 293–295
- Pre. 2014. All About SimaPro 8. <URL: <https://www.presustainability.com/>>
- Primanda, 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 FTSP Intitut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya*. Surabaya
- Putri, R. B., Tama, I. P., dan Yuniarti, R. 2014. *Evaluasi Dampak Lingkungan Pada Aktivitas Supply Chain Produk Susu KUD Batu dengan Implementasi Life Cycle Assessment (LCA) dan Pendkatan Analytical Network Process (ANP)*. *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Sistem Industri*. Vol (3) No.2
- Rosmeika, R., Sutiarmo, L., dan Suratmo, B. 2010. *Pengembangan Perangkat Lunak Life Cycle Assessment (LCA) Untuk Ampas Tebu*. *Jurnal UGM AgriTech*. Vol (30) No. 3
- Ryberg, M., Jane B., Marisa D., Melissa Z., dan Ralph K. 2013. Updated US and Canadian Normalization Factors for TRACI 2.1. *Clean Techn Environ Policy*.
- Sabljić, A. 2009. *Environmental and Ecological Chemistry*. UNESCO. United Kingdom.
- Saputri, E. 2018. Kajian Dampak Proses Pengolahan Minyak Bumi di Pertamina RU IV Balongan Terhadap Lingkungan dengan Menggunakan Metode Life Cycle Assessment (LCA). *Tugas Akhir FTSLK Intitut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya*. Surabaya
- Sari, A. T. 2017. Life Cycle Assessment (LCA) emisi proses produksi Bahan Bakar Minyak (BBM) jenis solar dengan pendekatan Analytical Hierarchy Process (AHP). *Tugas Akhir FTSP Intitut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya*. Surabaya
- Soemarmo, R., Nunuk L.H., Akhmad, N., dan Sunaryono, E. 2013. *Metode Life Cycle Analysis dan Kajian Lingkungan*. PSDL-PDKL-PPSUB
- Suarna, dan Endang. 2011. Perkembangan Teknologi Batu Bara Bersih Berwawasan Lingkungan. *Jurnal Teknik Lingkungan*. 12. 1. 25-34
- Susandi, A., Herlianti, I., Tamamadin, M., dan Nurlela I. 2008. Dampak Perubahan Iklim Terhadap Ketinggian Muka Laut di Wilayah Banjarmasin. *Jurnal Ekonomi Lingkungan* Vol.12/No.2/2008
- Sutanto, dan Iryani A. 2011. Hujan Asam dan Perubahan Kadar Nitrat Dan Sulfat Dalam Air Sumur Di Wilayah Industri

- Cibinong-Citeureup Bogor. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah* Volume 14 Nomor 1
- Taukhid, I. 2011. Pembangkit Listrik Tenaga Batubara yang berwawasan Lingkungan. *Jurnal Teknik Energi*, Vol.7, No. 1, Januari 2011 : 17-23
- Talayansa, L., Widodo, S., dan Anshariah. 2017. Analisis Emisi SO₂ Hasil Pembakaran Batubara Pada PLTU Jeneponto. *Jurnal Geomine*. 5. 2. 80-83
- Tamara, A. S. 2017. Life Cycle Assessment (LCA) emisi proses produksi Bahan Bakar Minyak (BBM) jenis solar dengan pendekatan Analytical Hierarchy Process (AHP). *Tugas Akhir FTSP Intitut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya*. Surabaya
- Tarazona, J. V., and Peralonso, M. J. 2014. Ecotoxicology. *Encyclopedia of Toxicology*, Volume 2
- Turley, C. 2008. Impacts of changing ocean chemistry in a high-CO₂ world. *Mineralogical Magazine* 72
- Venkataramanan, M., and Smitha. 2011. *Causes and Effects of Global Warming*. Department of Economics. D.G. Vaishnav College. India.
- Wahyudi, J. 2017. Penerapan Life Cycle Assessment untuk Menakar Emisi Gas Rumah Kaca yang Dihasilkan dari Aktivitas Produksi Tahu. *Proceeding 6th University Research Colloquium 2017: Seri Humaniora, Sosial, dan Agama*
- Wiji, M. 2014. Pembuatan Prototipe Pengereng Batubara Untuk Mengurangi Moisture Content Pada PLTU. *GEMA TEKNOLOGI*. 18. 1. Periode April 2014 - Oktober 2014

BIOGRAFI PENULIS



Bima Sakti Satria Wibawa lahir di Sukoharjo pada tanggal 18 Desember 1996. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN 01 Jetis (2003-2009), SMPN 01 Sukoharjo (2009-2012), SMAN 01 Sukoharjo (2012-2015). Pada tahun 2015, penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan terdaftar dengan NRP 03211540000052.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif sebagai anggota Komunitas Pemerhati dan Pecinta Lingkungan (2015-2018). Menjadi Wakil Ketua Kegiatan Hari Air Sedunia pada tahun 2018. Selain itu, penulis juga pernah menjadi Kepala Departemen Dalam Negeri Ikatan Mahasiswa Teknik Lingkungan Indonesia Regional IV pada tahun 2018. Dalam bidang minat bakat penulis pernah mendapat juara 3 pada Kejuaraan nasional Futsal di Ponorogo dan mengikuti Kejuaraan Internasional di Malaysia. Penulis juga pernah menjadi asisten Laboratorium Limbah Padat dan B3 pada tahun 2017. Pada Tahun 2018, penulis mengikuti kerja praktik mengenai "Studi Kehilangan Air Pada Pdam Giri Menang" di PDAM Giri Menang Mataram. Apabila ingin mengetahui lebih dalam mengenai penelitian ini, dapat menghubungi penulis via e-mail bimasaktisatriawibawa@gmail.com