TUGAS AKHIR – RE 184804

KAJIAN DAMPAK LINGKUNGAN PADA *POLENG PROCESSING PLATFORM* PT. X DENGAN *LIFE CYCLE ASSESSMENT*

NI LUH SEKAR ASMARA PUTRI
03211740000048

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

TUGAS AKHIR – RE 184804

KAJIAN DAMPAK LINGKUNGAN PADA *POLENG PROCESSING PLATFORM* PT. X DENGAN *LIFE CYCLE ASSESSMENT*

NI LUH SEKAR ASMARA PUTRI
03211740000048

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

FINAL PROJECT – RE 184804

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT ON POLENG PROCESSING PLATFORM PT. X USING LIFE CYCLE ASSESSMENT

NI LUH SEKAR ASMARA PUTRI
03211740000048

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

ENVIRONMENTAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

“halaman ini sengaja dikosongkan”

HALAMAN PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN

KAJIAN DAMPAK LINGKUNGAN PADA *POLENG PROCESSING PLATFORM* PT. X DENGAN *LIFE CYCLE ASSESSMENT*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
NI LUH SEKAR ASMARA PUTRI
NRP. 03211740000048

Disetujui oleh,
Dosen Pembimbing Tugas Akhir

Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES., Ph.D.
NIP. 19600618 198803 1 002

SURABAYA
AGUSTUS, 2021

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIAN
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

“halaman ini sengaja dikosongkan”

ABSTRAK

KAJIAN DAMPAK LINGKUNGAN PADA *POLENG PROCESSING PLATFORM* PT. X DENGAN *LIFE CYCLE ASSESSMENT*

Nama Mahasiswa	: Ni Luh Sekar Asmara Putri
NRP	: 03211740000048
Departemen	: Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing	: Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES., Ph.D

ABSTRAK

PT. X merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang minyak dan gas bumi *offshore*. Pada PT. X, fungsi utama *offshore platform* berupa kegiatan pemisahan fluida dilakukan di *Poleng Processing Platform* (PPP). Adapun kegiatan migas *offshore* juga membutuhkan banyak energi yang mengarah pada besarnya produksi emisi yang dibuang ke atmosfer. Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi dampak lingkungan yang ditimbulkan proses produksi migas pada PPP PT. X, menentukan prioritas penanganan dampak, dan merekomendasikan alternatif perbaikan sesuai prioritas yang ditentukan.

Analisis dilakukan dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) menggunakan *software* SimaPro dan unit fungsional per ton produk. Indikator emisi udara yang dianalisis meliputi CO_2, CH_4, N_2O, SO_x, NO_x, PM, dan nmVOC. Metode penilaian dampak yang digunakan adalah metode ReCiPe 2016 dan CML IA-*Baseline* dengan pendekatan *midpoint*, mencakup kategori dampak *Global Warming, Ozone Layer Depletion, Acidification, Eutrophication, Potential Photochemical Oxidation, Potential Abiotic Depletion (fossil dan non fossil), Carcinogenic, Toxicity, Water Footprint,* dan *Land Use Change*.

Hasil penelitian ini menunjukkan *global warming* sebagai dampak lingkungan terbesar dengan nilai 54,285 kg CO_2 eq per ton produk (metode ReCiPe 2016) dan 52,063 kg CO_2 eq per ton produk (metode CML IA-*Baseline*); serta *gas compressor* sebagai *hotspot* proses. Alternatif perbaikan yang direkomendasikan adalah penambahan *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) atau CO_2-*Enhanced Oil Recovery* (CO_2-EOR) yang diperkirakan dapat mereduksi dampak sebesar 30%.

Kata kunci: Dampak Lingkungan, LCA, *Offshore*, *Processing Platform*, SimaPro

ABSTRACT

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT ON POLENG PROCESSING PLATFORM PT. X USING LIFE CYCLE ASSESSMENT

Nama Mahasiswa	: Ni Luh Sekar Asmara Putri
NRP	: 03211740000048
Departemen	: Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing	: Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES., Ph.D

ABSTRACT

PT. X is an oil and gas sector company that exploits and processes oil and gas offshore. Fluid separation activities as the main function of the offshore platform is done in Poleng Processing Platform (PPP). On the other hand, offshore oil and gas activities are a process that requires a lot of energy which leads to the large production of emissions being discharged into the atmosphere. This research was conducted to identify the environmental impacts that occur in the oil and gas production process at PPP PT. X, to determine priority in handling the impacts, and to recommend alternative for improvements in accordance with determined priority.

Analysis was done using Life Cycle Assessment (LCA) method with SimaPro software and functional unit per ton of product. The environmental impact analysis was carried out using ReCiPe 2016 and CML IA-Baseline Method with midpoint approach. Impact categories included are Global Warming, Ozone Layer Depletion, Acidification, Eutrophication, Potential Photochemical Oxidation, Potential Abiotic Depletion (fossil and non fossil), Carcinogenic, Toxicity, Water Footprint, and Land Use Change.

Results of this research showed global warming as highest environmental impact with a value of 54,285 kg CO_2 eq per ton product (ReCiPe 2016) or 52,063 kg CO_2 eq per ton product (CML IA-Baseline) and gas compressor as process hotspot. The selected alternative recommendation was addition of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) or CO_2-Enhanced Oil Recovery (CO_2-EOR) which estimated to reduce emissions by 30%.

Keywords: Environmental Impact, LCA, Offshore, Processing Platform, SimaPro

KATA PENGANTAR

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan kesehatan, kelancaran, kemudahan, berkat, dan anugrah sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul "**Kajian Dampak Lingkungan pada *Poleng Processing Platform* PT. X dengan *Life Cycle Assessment***". Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak (Alm) Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT., selaku dosen yang telah memberikan ilmu, bimbingan, arahan, waktu, dan motivasi.
2. Bapak Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.Es., Ph. D selaku dosen pembimbing, terima kasih banyak atas ilmu, arahan, bimbingan, dan motivasi yang telah diberikan selama pengerjaan sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
3. Bapak Dr. Eng. Arie Dipareza Syafe'i, ST., MEPM, Bapak Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si, MT., dan Bapak Adhi Yuniarto, ST., MT., Ph.D. selaku dosen pengarah, terima kasih atas arahan, saran, dan kritik yang membangun yang telah diberikan.
4. Bapak Sunu, Mbak Dian, Mas Habil, dan Mas Shidqi selaku pembimbing eksternal dari PT. X, terima kasih atas arahan dan bimbingan yang telah diberikan selama proses pengambilan dan pengumpulan data.
5. Papa, Mama, Adit, Dinda serta keluarga besar lainnya atas segala doa, dukungan, motivasi, dan semangat yang telah diberikan.
6. Aubri, There, Caca, Yudha, Gadot yang telah meluangkan waktu untuk diskusi dan memberikan arahan terutama mengenai LCA.
7. Syaima yang selalu rajin mengajak penulis untuk mengerjakan tugas bersama melalui *google meet* maupun *zoom meeting*.
8. Teman-teman Teknik Lingkungan, khususnya angkatan 2017 yang telah memberi motivasi dan semangat selama masa perkuliahan ini.

Penyusunan tugas akhir ini telah dilakukan dengan maksimal, namun penulis menyadari kemungkinan adanya kekurangan dan kesalahan dalam penulisan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat.

Surabaya, Juli 2021

Penulis

9.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....
ABSTRAK.....i
ABSTRACT iii
KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI..... vii
DAFTAR TABEL ix
DAFTAR GAMBAR xi
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah..... 2
1.3 Tujuan Penelitian..... 3
1.4 Ruang Lingkup 3
1.5 Manfaat Penelitian..... 4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Industri Minyak dan Gas Bumi 5
2.2 *Poleng Processing Platform* (PPP)..... 6
2.3 Beban Emisi 8
2.4 Gas Rumah Kaca (GRK) 9
2.4.1 Karbon Dioksida (CO_2) 10
2.4.2 Metana (CH_4)..... 10
2.4.3 Dinitrogen Oksida (N_2O) 11
2.5 Emisi Konvensional 11
2.5.1 Sulfur Oksida (SO_x) 11
2.5.2 Nitrogen Oksida (NO_x) 12
2.5.3 *Particulate Matter* (PM) 12
2.6 *Life Cycle Assessment* (LCA) 12
2.6.1 *Goal and Scope Definition* 13
2.6.2 *Life Cycle Inventory* (LCI)..... 14
2.6.3 *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) 14
2.6.4 Interpretasi 14
2.7 *Software* SimaPro..... 15
2.7.1 *Database* LCA 15
2.7.2 Metode Penilaian Dampak..... 16
2.7.3 Kategori Dampak..... 18
2.8 Penelitian Terdahulu..... 22

BAB 3 METODE PENELITIAN 27
3.1 Kerangka Penelitian 27
3.2 Ide Penelitian..... 28
3.3 Studi Literatur 29
3.4 Tahap Persiapan 29
3.5 Tahap Pelaksanaan..... 29
3.5.1 Pengumpulan Data..... 30
3.5.2 Analisis *Benchmarking*..... 30
3.5.3 Analisis LCA dengan SimaPro 31
3.5.4 Penentuan Prioritas Penanganan Dampak..... 34
3.5.5 Analisis Alternatif Perbaikan 35
3.6 Kesimpulan dan Saran 35
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN..... 37
4.1 Proses Produksi Minyak dan Gas Bumi di PPP..... 37
4.1.1 Data *Input* dan *Output* 37
4.2 Analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) 43
4.2.1 Penentuan *Goal* dan *Scope* 43
4.2.2 Penentuan *Life Cycle Inventory* 44
4.2.3 Penentuan *Life Cycle Impact Assessment* 51
4.2.4 Interpretasi Hasil..... 67
4.3 *Benchmarking* Perusahaan..... 73
4.3.1 *Benchmarking* Efisiensi Energi..... 73
4.3.2 *Benchmarking* Penurunan Emisi 75
4.4 Prioritas Penanganan Dampak 81
4.5 Analisis Alternatif Perbaikan 81
4.5.1 *Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS)* 82
4.5.2 *Waste Heat Recovery Unit*..... 84
4.5.3 *Flare Gas Recovery System (FGRS)* 86
4.5.4 Alternatif Terpilih..... 87
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN 89
5.1 Kesimpulan 89
5.2 Saran 89
DAFTAR PUSTAKA..... 91
LAMPIRAN I 101
BIOGRAFI PENULIS 109

DAFTAR TABEL

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai Faktor Ekuivalensi Emisi GRK 10
Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu 23
Tabel 3.1 Data – Data yang Diperlukan 30
Tabel 4.1 Data *Input* dan *Output* Produksi Migas PPP PT. X 40
Tabel 4.2 Kategori Dampak yang Perlu Dikaji 44
Tabel 4.3 Faktor Karakterisasi Metode ReCiPe 2016.....54
Tabel 4.4 Faktor Karakterisasi Metode CML IA-*Baseline* 54
Tabel 4.5 Perbandingan Nilai Karakterisasi Dampak Hasil LCA 58
Tabel 4.6 Faktor Normalisasi Metode ReCiPe 2016.....61
Tabel 4.7 Faktor Normalisasi Metode CML IA-*Baseline* 61
Tabel 4.8 Hasil Analisis LCIA Berdasarkan Kategori Dampak 67
Tabel 4.9 Hasil Analisis LCIA Berdasarkan Unit Proses.....68
Tabel 4.10 *Completeness Check* Berdasarkan SNI ISO 14044 69
Tabel 4.11 *Consistency Check* Berdasarkan SNI ISO 14044 70
Tabel 4.12 Hasil Variasi Data untuk Analisis Sensitivitas 71
Tabel 4.13 Perbandingan Hasil Dampak *Global Warming*.....71
Tabel 4.14 Analisis Sensitivitas 72
Tabel L.I.1 Data Intensitas Energi PT. X Skala Dunia 101
Tabel L.I.2 Data Intensitas Emisi GRK PT. X dan Perusahaan Pembanding Skala Dunia..... 102
Tabel L.I.3 Data Intensitas Emisi SO_x PT. X dan Perusahaan Pembanding Skala Dunia..... 103
Tabel L.I.4 Data Intensitas Emisi NO_x PT. X dan Perusahaan Pembanding Skala Dunia..... 104
Tabel L.I.5 Hasil Analisis Karakterisasi Metode ReCiPe 2016 105
Tabel L.I.6 Hasil Analisis Karakterisasi Metode CML IA-*Baseline* 106

Tabel L.I.7 Hasil Analisis Normalisasi Metode ReCiPe 2016 107
Tabel L.I.8 Hasil Analisis Normalisasi Metode CML IA-*Baseline* 108

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kerangka Sistem Proses Produksi di PPP untuk Analisis LCA 6
Gambar 2.2 Diagram Alir Proses pada *Poleng Processing Platform* 7
Gambar 2.3 Tahapan *Life Cycle Assessment* 13
Gambar 2.4 Kategori Dampak dengan Pendekatan *Midpoint* dan *Endpoint* 16
Gambar 3.1 Kerangka Penelitian..... 28
Gambar 3.2 Penentuan *Goal* pada SimaPro..... 31
Gambar 3.3 Penentuan *Scope* pada SimaPro 32
Gambar 3.4 Data Inventori *Process* pada SimaPro..... 33
Gambar 3.5 Data Inventori *Product* Stages pada SimaPro..... 33
Gambar 4.1 *Mass Balance* Produksi Minyak dan Gas Bumi PPP 42
Gambar 4.2 Data Inventori *Separator* PPP 45
Gambar 4.3 Data Inventori *Separator* AW 45
Gambar 4.4 Data Inventori *Scrubber* 46
Gambar 4.5 Data Inventori *Gas Compressor* 47
Gambar 4.6 Data Inventori *Gas Engine Generator* 48
Gambar 4.7 Data Inventori *Flare* 49
Gambar 4.8 Data Inventori *Crude Oil Transfer Pump*..... 50
Gambar 4.9 Data Inventori *Water Treatment* 50
Gambar 4.10 Aliran Massa LCI dengan Unit Fungsional..... 52
Gambar 4.11 Hasil Karakterisasi Dampak dengan Metode ReCiPe 2016 59
Gambar 4.12 Hasil Karakterisasi Dampak dengan Metode CML IA-*Baseline* 60
Gambar 4.13 Hasil Normalisasi Dampak dengan Metode ReCiPe 2016 65
Gambar 4.14 Hasil Normalisasi Dampak dengan Metode CML IA-*Baseline* 66
Gambar 4.15 *Benchmarking* Intensitas Energi Skala Nasional. 74

Gambar 4.16 *Benchmarking* Intensitas Energi Skala Dunia 75
Gambar 4.17 *Benchmarking* Intensitas Emisi GRK Skala Nasional 77
Gambar 4.18 *Benchmarking* Intensitas Emisi SO_x Skala Nasional 78
Gambar 4.19 *Benchmarking* Intensitas Emisi NO_x Skala Nasional 78
Gambar 4.20 *Benchmarking* Intensitas Emisi GRK Skala Dunia 79
Gambar 4.21 *Benchmarking* Intensitas Emisi SO_x Skala Dunia 80
Gambar 4.22 *Benchmarking* Intensitas Emisi NO_x Skala Dunia 80
Gambar 4.23 Perbandingan Nilai Dampak Alternatif 1 Metode ReCipe 2016 83
Gambar 4.24 Perbandingan Nilai Dampak Alternatif 1 Metode CML IA-*Baseline*.....83
Gambar 4.25 Perbandingan Nilai Dampak Alternatif 2 Metode ReCipe 2016 85
Gambar 4.26 Perbandingan Nilai Dampak Alternatif 2 Metode CML IA-*Baseline*.....85
Gambar 4.27 Perbandingan Nilai Dampak Alternatif 3 Metode ReCipe 2016 86
Gambar 4.28 Perbandingan Nilai Dampak Alternatif 3 Metode CML IA-*Baseline*.....87

BAB I

PENDAHULUAN

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri minyak dan gas bumi berperan penting bagi Indonesia dalam menyediakan energi untuk menggerakkan berbagai sektor kehidupan di Indonesia serta sebagai sumber pendapatan negara maupun ekonomi lokal (Widyastuti dan Nugroho, 2020). Kebutuhan energi akan meningkat seiring dengan meningkatnya pertumbuhan penduduk. Menurut proyeksi Dewan Energi Nasional, diperkirakan kebutuhan energi primer nasional pada tahun 2025 yang mencapai 412 juta setara ton minyak (Mtoe) masih akan dipasok secara dominan oleh migas (SKK Migas, 2016). PT. X merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang migas yang melakukan eksploitasi dan pengolahan migas *offshore*. *Offshore platform* memiliki fungsi utama yaitu pemisahan fluida menjadi minyak, gas, serta air terproduksi (Sanchez dan Jr., 2015). Pada PT. X, kegiatan pemisahan fluida ini terdapat di salah satu fasilitas *processing platform* PT. X yaitu *Poleng Processing Platform* (PPP).

Di sisi lain, kegiatan yang berlangsung pada industri minyak dan gas bumi tidak hanya berdampak positif tetapi juga berpotensi menghasilkan emisi gas rumah kaca (Dewi *et al.*, 2017). Pemanasan global sebagai salah satu penyebab perubahan iklim merupakan fenomena akibat peningkatan GRK di atmosfer (Yuliana, 2017). Berdasarkan hasil perhitungan Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) Nasional di tahun 2017, sektor energi merupakan sektor yang memberikan kontribusi terbesar terhadap emisi GRK (48%) sebesar 558.890 Gg CO_2e. Inventarisasi sektor energi mencakup salah satunya kegiatan pengadaan dan penggunaan energi yang meliputi eksplorasi dan eksploitasi sumber-sumber energi primer seperti minyak mentah dan batu bara (KLHK, 2019). Adapun kegiatan migas *offshore* merupakan proses yang membutuhkan banyak energi dan hal ini mengarah pada besarnya produksi CO_2 dan CH_4 yang dibuang ke atmosfer (Nguyen *et al.*, 2016).

Berdasarkan kondisi tersebut, perlu dilakukan suatu upaya untuk mengendalikan kegiatan yang berpotensi tinggi

menimbulkan dampak terhadap lingkungan. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah melaksanakan produksi bersih. Menurut *United Nation Environmental Program* (UNEP), produksi bersih adalah strategi pengelolaan lingkungan yang bersifat preventif, terpadu, dan perlu diterapkan secara terus menerus pada proses produksi dan daur hidup produk sehingga mengurangi risiko terhadap kesehatan manusia dan lingkungan (Sumadi dan Hermanuadi, 2017). Untuk mendukung pengelolaan daur hidup, metode analisis yang dapat digunakan adalah metode analisis daur hidup atau *life cycle assessment* (LCA).

LCA merupakan metode untuk menganalisis dan mengalkulasi dampak lingkungan dari sebuah produk di seluruh siklus hidupnya (Sulistyawanti *et al.*, 2020). Dengan LCA, dapat diketahui besar dampak lingkungan yang dihasilkan dari tiap proses, proses penghasil dampak terbesar (*hotspot* proses), serta jenis dampak lingkungan terbesar yang dihasilkan (*hotspot* dampak) sehingga perusahaan mampu menanggulangi dampak dengan tepat sasaran. LCA dilaksanakan dengan perangkat yang telah dibuat sesuai standar ISO yaitu *software* SimaPro (Goedkoop *et al.*, 2016).

PT. X sendiri telah melakukan kajian LCA pada tahun 2019 dan pada penelitian ini, kajian LCA dilakukan sebagai tindaklanjut dari program reduksi emisi yang telah dilaksanakan. Diharapkan dengan analisis LCA, diketahui dampak lingkungan yang ditimbulkan pada PPP sehingga dapat direkomendasikan alternatif untuk mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan titik *hotspot* dan mendukung pelaksanaan produksi bersih oleh perusahaan.

1.2 Rumusan Masalah

Kegiatan produksi migas pada PPP PT. X menghasilkan emisi yang berpotensi menyebabkan penurunan kualitas udara dan pemanasan global. Diperlukan penelitian untuk mengidentifikasi dampak lingkungan yang dihasilkan di PPP dengan menggunakan metode LCA. Agar penanganan dampak lingkungan nantinya efektif dan tepat sasaran, terlebih dahulu disusun prioritas penanganan berdasarkan *hotspot* proses maupun dampak. Setelah ditentukan prioritas, direkomendasikan

alternatif perbaikan sebagai upaya untuk mereduksi nilai dampak lingkungan yang dihasilkan.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan penelitian ini yaitu:

1. Mengidentifikasi dampak lingkungan yang ditimbulkan proses produksi minyak dan gas di PPP PT. X.
2. Menentukan prioritas penanganan dampak lingkungan yang ditimbulkan pada PPP PT. X.
3. Merekomendasikan alternatif perbaikan sebagai upaya untuk mereduksi nilai dampak lingkungan yang ditimbulkan pada PPP PT. X sesuai dengan prioritas yang telah ditentukan.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian merupakan batasan masalah yang dibahas pada penelitian ini. Ruang lingkup penelitian LCA produksi minyak dan gas di PPP. PT X ini meliputi:

1. Lokasi penelitian dilakukan di *Poleng Processing Platform* PT. X.
2. Waktu pelaksanaan penelitian adalah bulan Februari-Juni 2021.
3. Penelitian LCA menggunakan *software* SimaPro versi 9.1.1.
4. Unit fungsional kajian LCA ini adalah per ton produk.
5. Batas sistem yang digunakan adalah *gate to gate* yang berfokus pada beberapa unit yakni *Separator, Scrubber, Gas Compressor, Flare, Crude Oil Transfer Pump, Water Treatment,* dan *Gas Engine Generator*.
6. Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data bahan baku, masukan energi, produk, dan emisi yang dihasilkan berdasarkan laporan perusahaan.
7. Pendekatan yang digunakan untuk analisis dampak adalah *midpoint* dengan Metode ReCiPe 2016 dan CML IA-*Baseline*.
8. Kategori dampak yang dikaji meliputi *Global Warming, Ozone Layer Depletion, Acidification, Eutrophication, Potential Photochemical Oxidation, Potential Abiotic Depletion (fossil dan non fossil), Carcinogenic, Toxicity, Water Footprint,* dan *Land Use Change*.

9. Indikator emisi udara yang dianalisis meliputi CO_2, CH_4, N_2O, SO_x, NO_x, PM, dan nmVOC.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berupa:

1. Informasi mengenai dampak lingkungan yang ditimbulkan proses produksi minyak dan gas pada PPP PT. X.
2. Susunan prioritas penanganan dampak lingkungan yang ditimbulkan pada PPP PT. X.
3. Rekomendasi alternatif perbaikan sebagai upaya penurunan dampak lingkungan yang ditimbulkan pada PPP PT. X berdasarkan prioritas yang telah ditentukan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Industri Minyak dan Gas Bumi

Menurut Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 7 Tahun 2019 Tentang Pengelolaan dan Pemanfaatan Data Minyak dan Gas Bumi, minyak bumi merupakan hasil proses alami berupa hidrokarbon yang dalam kondisi tekanan dan temperature atmosfer berupa fasa cair atau padat, termasuk aspal, lilin mineral atau ozokerit, dan bitumen yang diperoleh dari proses penambangan, tetapi tidak termasuk batubara atau endapan hidrokarbon lain yang berbentuk padat yang diperoleh dari kegiatan yang tidak berkaitan dengan kegiatan usaha Minyak dan Gas Bumi. Sementara itu, gas bumi merupakan hasil proses alami berupa hidrokarbon yang dalam kondisi tekanan dan temperatur atmosfer berupa fasa gas yang diperoleh dari proses penambangan Minyak dan Gas Bumi. Pada umumnya, komposisi minyak bumi terdiri atas karbon (C) sebesar 84-87%, diikuti oleh hidrogen (H) 11-14%, sulfur (S) 0-3%, oksigen (O) 0-2%, nitrogen (N) 0-1%, dan senyawa logam (seperti vanadium, nikel, dan natrium) 0,001-0,05% (Sulistyawanti *et al.*, 2020).

Kegiatan industri migas terdiri dari kegiatan hulu (*upstream*) sampai dengan hilir (*downstream*). Kegiatan hulu meliputi kegiatan eksplorasi (pencarian), eksploitasi (pengangkatan) dengan pengeboran dan penyelesaian sumur, serta pengolahan minyak mentah untuk pemisahan dan pemurnian migas. Sedangkan, kegiatan hilir meliputi pengolahan di kilang minyak (*refinery*) guna memproduksi bahan bakar dan turunannya, pemasaran (*marketing*), serta penyimpanan dan distribusi (Hasiany *et al.*, 2015).

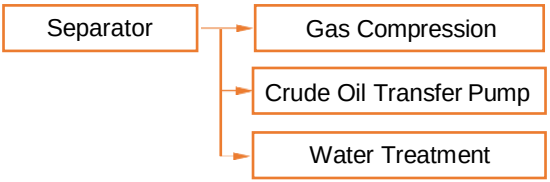
Berdasarkan Permen ESDM Nomor 7 Tahun 2019, eksplorasi merupakan kegiatan yang bertujuan memperoleh informasi mengenai kondisi geologi untuk menemukan dan memperoleh perkiraan cadangan Minyak dan Gas Bumi di Wilayah Kerja yang ditentukan. Sedangkan, eksploitasi merupakan rangkaian kegiatan yang bertujuan untuk menghasilkan Minyak

dan Gas Bumi dari Wilayah Kerja yang ditentukan, yang terdiri atas pengeboran dan penyelesaian sumur, pembangunan sarana pengangkutan, penyimpanan dan pengolahan untuk pemisahan dan pemurnian Minyak dan Gas Bumi di lapangan serta kegiatan lain yang mendukungnya.

Wilayah kerja migas dapat berada di daratan (*onshore*) maupun lepas pantai (*offshore*). *Onshore* yang mencakup daratan atau daratan yang mendekati laut mengacu pada pekerjaan terkait bangunan atau struktur untuk kegiatan eksplorasi dan eksploitasi migas di daratan, seperti kilang dan sumur bor di daratan. Sementara itu, *offshore* mengacu pada kegiatan eksplorasi dan eksploitasi migas yang di lepas pantai, seperti menggunakan platform lepas pantai terpancang dan terapung.

2.2 *Poleng Processing Platform* (PPP)

PPP merupakan unit pemisahan fluida tiga fase yang berasal dari sumur menjadi minyak mentah (*crude oil*), gas, dan air terproduksi yang terdapat di lepas pantai. *Processing platform* pada umumnya meliputi kegiatan pemisahan fluida tiga fase, pemompaan minyak mentah, pengaliran gas, dan pengolahan air terproduksi (Sanchez dan Jr., 2015). Sesuai dengan kajian LCA yang pernah dilakukan oleh PT. X, berikut kerangka model unit/sistem yang dianalisis LCA.



Gambar 2.1 Kerangka Sistem Proses Produksi di PPP untuk Analisis LCA
Sumber: ITS Tekno Sains, 2019

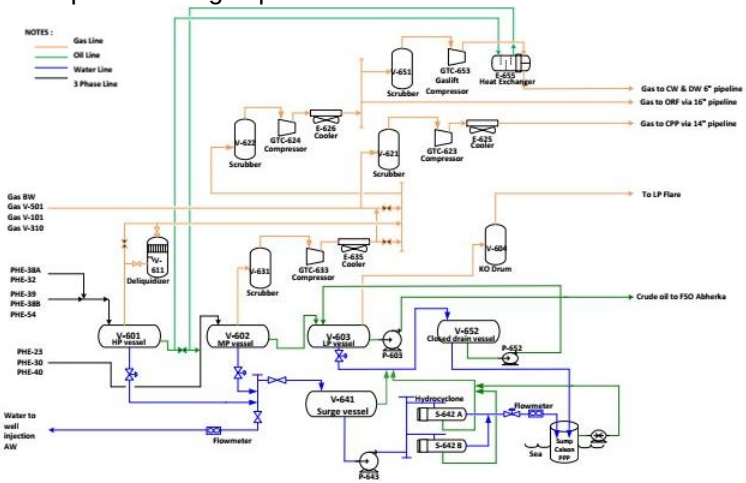
Lebih rincinya, proses produksi migas di PPP PT. X dimulai dengan fluida tiga fase dari sumur-sumur produksi yang telah terkumpul di *platform* atau anjungan disalurkan ke PPP melewati *pipeline*. Pada PPP, terjadi pemisahan fluida tiga fase menjadi

minyak, gas, dan air terproduksi pada unit *separator*, tepatnya *HP separator* dan *MP separator*.

Minyak dari *HP separator* terlebih dahulu disalurkan ke *heat exchanger* untuk menaikkan temperatur minyak agar proses separasi tahap berikutnya di *MP separator* berlangsung baik. Dari *MP separator*, minyak mengalami stabilisasi di *LP separator*. Minyak yang telah stabil dipompa menggunakan *crude oil transfer pump* ke *Floating Storage and Offloading* (FSO). FSO merupakan tanker pengumpul minyak sebelum didistribusikan ke konsumen.

Gas dari HP *separator* dibersihkan terlebih dahulu dengan *deliquidizer* sebelum dibersihkan dengan *scrubber* kemudian dikompresi pada *gas compression* serta didinginkan pada *cooler*, seperti gas dari *MP separator*. Kemudian, gas dikirimkan ke *Onshore Receiving Facility* (ORF) untuk diolah agar dapat didistribusikan ke konsumen, sementara gas yang tidak dapat digunakan kembali disalurkan ke *LP flare* untuk dibakar.

Air terproduksi dari proses separasi diolah dengan *produced water treatment* yang terdiri atas *surge vessel* untuk menampung air terproduksi sebelum dialirkan ke *hydrocyclone* yang memisahkan pencemar dengan memanfaatkan perbedaan berat jenis komponennya dan gaya sentrifugal. Berikut diagram alir proses produksi migas pada PPP PT. X.



Gambar 2.2 Diagram Alir Proses pada *Poleng Processing Platform*
Sumber: ITS Tekno Sains, 2019

Berdasarkan dokumen ANDAL PT. X (2013), untuk mengoptimalkan hasil produksi migas, maka dalam proses pemisahan fluida tiga fase ini digunakan beberapa bahan kimia. Jenis-jenis bahan kimia yang digunakan di PPP adalah:

1. "*Corrosion inhibitor*" dengan kode KI-3107 yang digunakan untuk melindungi instalasi terhadap karat. Penggunaan bahan kimia tersebut sekitar 246-487 galon/bulan.
2. "*Water clarifier*" dengan kode WC 512 yang digunakan untuk pemurnian air, penggunaannya berkisar 9 – 86 galon/bulan.
3. "*Demulsifier*" digunakan untuk mempercepat proses pemisahan minyak dan air digunakan dengan jumlah sekitar 60 – 188 galon/bulan.
4. Pengecekan *cathodic protection* dan ketebalan *marine groat* dilakukan sesuai peraturan migas dan inspeksi bawah laut untuk konstruksi platform dan pipa bawah laut setiap tahun. Selama operasi tidak dilakukan *piging*.

2.3 Beban Emisi

Menurut Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2012 Tentang Pedoman Penghitungan Beban Emisi Kegiatan Industri Minyak dan Gas Bumi, emisi adalah gas NO_x, CO, SO_2, dan/atau partikulat yang dihasilkan dari kegiatan industri minyak dan gas bumi yang masuk dan dimasukkannya ke dalam udara ambien yang mempunyai dan/atau tidak mempunyai unsur pencemar. Perhitungan beban emisi dapat dipilih berdasarkan ketersediaan data *input* diantaranya:

a. faktor emisi yang dipublikasikan (published)
b. faktor emisi peralatan dari manufacture
c. perhitungan teknis
d. simulasi proses atau pemodelan computer
e. pemantauan terhadap berbagai kondisi dan faktor emisi yang mempengaruhinya
f. pemantauan emisi atau parameter yang diperlukan untuk menghitung emisi secara periodik atau terus menerus.

Dalam perhitungan beban emisi, tingkat akurasi hasil perhitungan ditentukan oleh keakurasian data *input*. Untuk memudahkan perkiraan tingkat akurasi hasil perhitungan beban emisi, digunakan konsep Tier. Semakin tinggi tingkat Tier, semakin tinggi akurasinya. Sebagai contoh, Tier 1 lebih rendah tingkat akurasinya dibanding Tier 2 dan juga Tier 3. Parameter beban emisi yang digunakan antara lain CO_2, CH_4, dan N_2O untuk gas rumah kaca serta SO_x, NO_x, dan PM sebagai parameter utama.

2.4 Gas Rumah Kaca (GRK)

Menurut *Climate Action Tracker*, berdasarkan kebijakan yang telah diterapkan, emisi gas rumah kaca (GRK) Indonesia diperkirakan akan meningkat hingga 1,573-1,751 $MtCO_2e$ pada tahun 2030 (di luar sektor kehutanan) dimana proyeksi ini tidak sejalan dengan target Kesepakatan Paris untuk membatasi kenaikan suhu pemanasan global hingga 1,5^oC, sebaliknya menuju kenaikan suhu 3-4 ^oC (ClimateTransparency, 2018).

Gas rumah kaca (GRK) merupakan beberapa jenis gas yang terperangkap di atmosfer dan mampu berfungsi seperti rumah kaca yang meneruskan radiasi gelombang panjang matahari, namun menahan radiasi inframerah oleh permukaan bumi. Pemanasan global sebagai salah satu penyebab perubahan iklim merupakan fenomena akibat peningkatan GRK di atmosfer (Yuliana, 2017).

Pada tahun 1997, Protokol Kyoto dicetuskan untuk memperkuat tanggapan global terhadap perubahan iklim. Tujuh GRK paling berpengaruh berdasarkan Protokol Kyoto antara lain Karbon dioksida (CO_2), Methana (CH_4), Dinitrogen oksida (N_2O), Hydrofluorokarbon (HFCs), Perfluorokarbon (PFCs), Sulfur heksaflorida (SF_6), dan Nitrogen triflorida (NF_3). Ketujuh gas ini termasuk dalam *long-lived greenhouse gases* (LLGHG) atau GRK berumur panjang, dimana secara kimiawi gas tersebut stabil dan dapat bertahan di atmosfer selama satu dekade hingga berabad-abad sehingga emisi mereka memiliki pengaruh jangka panjang terhadap iklim. Masing-masing gas memiliki kapasitas berbeda dalam memerangkap panas di atmosfer. Kemampuan setiap GRK memerangkap panas selama 100 tahun dipresentasikan dalam nilai *Global Warming Potential* (GWP) atau Potensi Pemanasan Global. Perhitungan GRK dilakukan dengan mengonversi

kandungan tiap emisi gas pembentuk GRK ke dalam nilai GWP dengan satuan $CO_{2\text{-eq}}$ yang ditetapkan oleh *Intergovermental Panel on Climate Change* atau IPCC (Brata *et al.*, 2018).

Emisi GRK yang kemungkinan timbul dari kegiatan industri minyak dan gas bumi yaitu CO_2, CH_4, dan N_2O, karena ini adalah GRK yang paling umum dipancarkan dari operasi industri minyak dan gas bumi (Dewi *et al.*, 2017). Gas-gas ini dapat terjadi secara alami maupun karena hasil aktivitas manusia. Berikut nilai faktor ekuivalensi emisi GRK yang dianalisis pada penelitian ini.

Tabel 2.1 Nilai Faktor Ekuivalensi Emisi GRK

Gas Rumah Kaca	Potensi Pemanasan Global ($CO_{2\text{-eq}}$)
Karbon dioksida (CO_2)	1
Methana (CH_4)	25
Dinitrogen oksida (N_2O)	298

Sumber: IPCC, 2019 (dengan modifikasi)

2.4.1 Karbon Dioksida (CO_2)

Karbon dioksida (CO_2) merupakan jenis GRK dengan konsentrasi terbesar di atmosfer (Wahyudi, 2016). Gas ini menyumbang sekitar 64% dari total radiasi akibat LLGHG dan lama waktu terurainya di atmosfer dapat mencapai 100 tahun. Emisi CO_2 terutama dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil, penggundulan hutan, serta produksi besi dan baja. Terdapat 5 sektor yang menjadi sumber utama emisi CO_2 menurut IPCC, yaitu penggunaan energi, proses industri dan penggunaan produk, PKPL (pertanian, kehutanan, dan penggunaan lahan), serta limbah (Labiba dan Pradoto, 2018).

2.4.2 Metana (CH_4)

Metana (CH_4) berkontribusi sekitar 18% dari total radiasi akibat LLGHG dan bertahan di atmosfer selama kurang lebih 12 tahun. Gas ini menjebak panas di atmosfer dengan kapasitas 25 kali lebih besar daripada CO_2. Sekitar 40% emisi CH_4 dihasilkan dari sumber alami seperti lahan basah dan sekresi binatang. Sekitar 60% lainnya berasal dari aktivitas manusia seperti peternakan, pertanian, eksploitasi bahan bakar fosil, tempat pembuangan sampah, dan pembakaran biomassa. Sebagian

besar emisi CH_4 berasal dari proses dekomposisi bahan-bahan organik oleh mikroba anaerob (Wahyudi, 2016).

2.4.3 Dinitrogen Oksida (N_2O)

Dinitrogen oksida (N_2O) menyumbang sekitar 6% dari total radiasi akibat LLGHG. Aktivitas utama manusia yang menghasilkan N_2O antara lain produksi dan penggunaan pupuk dalam pertanian, pengolahan sampah, penggunaan bahan bakar pada sumber stasioner maupun bergerak, dan berbagai proses industri. Gas ini bertahan di atmosfer selama kurang lebih 114 tahun dan memerangkap panas di amosfer dengan kapasitas 298 kali lebih besar daripada CO_2. Berdasarkan sifat kimianya, pada lapisan stratosfer dengan bantuan sinar matahari, emisi ini dapat merusak ozon (Samiaji, 2012).

2.5 Emisi Konvensional

Selain emisi GRK, beberapa emisi konvensional juga menjadi parameter beban emisi kegiatan industri migas. Emisi konvensional ini umumnya dapat menyebabkan gangguan kesehatan seperti gangguan sistem pernapasan ataupun memperburuk penyakit yang telah dimiliki apabila terpapar pada manusia dengan konsentrasi tertentu. Berikut penjelasan singkat mengenai beberapa komponen pencemar udara konvensional dalam penelitian ini.

2.5.1 Sulfur Oksida (SO_x)

Pencemaran sulfur oksida (SO_x) di udara terutama dihasilkan dari pemakaian batu bara pada kegiatan industri dan transportasi (Buanawati *et al.*, 2017). Berdasarkan perhitungan indeks kualitas udara KLHK, SO_x mewakili emisi industri dan kendaraan diesel dengan bahan bakar solar atau bahan bakar yang mengandung sulfur lainnya (Purwanta, 2018).

Emisi SO_x terdiri atas sulfur dioksida (SO_2) dan sulfur trioksida (SO_3). SO_2 berbau tajam, tidak mudah terbakar, dan mulai terdeteksi indra penciuman manusia ketika konsentrasinya di udara sekitar 0,3-1 ppm. Sementara itu, SO_3 sangat reaktif.

Umumnya, gas hasil pembakaran mengandung lebih banyak SO_2 daripada SO_3 (Nainggolan, 2019).

2.5.2 Nitrogen Oksida (NO_x)

Berdasarkan perhitungan indeks kualitas udara KLHK, nitrogen oksida (NO_x) mewakili emisi dari kendaraan bermotor yang menggunakan bahan bakar bensin. NO_x merujuk pada tujuh senyawa gas antara lain NO, NO_2, N_2O, N_2O_3, N_2O_4, dan N_2O_5, dimana NO dan NO_2 merupakan polutan yang paling banyak diemisikan sehingga dalam pembahasan polusi udara, terminologi NO_x biasanya mengacu pada kedua gas tersebut (Purwanta, 2018). NO merupakan gas yang tidak berbau dan tidak berwarna. Sementara itu, NO_2 berwarna coklat kemerahan dan berbau tajam (Buanawati *et al.*, 2017).

2.5.3 *Particulate Matter* (PM)

Partikulat berarti material halus dalam bentuk padatan maupun cair (*liquid droplets*) di udara dengan ukuran 0,05-100 µm. PM dapat berasal dari industri maupun pertambangan baik dari proses pembakaran maupun non pembakaran (Purwanta, 2018). Partikulat juga bisa diemisikan dari kendaraan bermotor diesel maupun pembakaran biomassa, minyak, dan batu bara.

Partikulat dapat dibagi menjadi 2 kategori ukuran antara lain partikulat udara 10 µm (PM_{10}) dan 2,5 µm ($PM_{2,5}$). PM_{10} merupakan partikel udara berwujud padat dengan diameter kurang dari atau sama dengan 10 µm dan berada di udara dalam waktu yang relatif lama. Sementara itu, $PM_{2,5}$ merupakan partikel udara berwujud padat dengan diameter kurang dari 2,5 µm (Nainggolan, 2019).

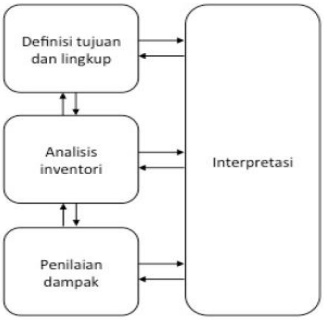
2.6 *Life Cycle Assessment* (LCA)

Berdasarkan SNI ISO 14040, LCA atau penilaian daur hidup merupakan kompilasi dan evaluasi masukan, keluaran dan dampak lingkungan potensial dari sistem produk di seluruh daur hidupnya. LCA berfungsi untuk menganalisis potensi dampak lingkungan yang timbul akibat suatu aktivitas dengan mengetahui *input* yang digunakan, seperti energi maupun sumber daya alam serta memaksimalkan *output* dengan pengurangan penggunaan

bahan baku, penerapan pengendalian pencemaran, dan pemanfaatan limbah (Astuti, 2019).

Dengan LCA, dapat diketahui titik kritis penyebab dampak lingkungan sehingga perusahaan mampu menanggulangi dampak dengan tepat sasaran (Ramdhani *et al.*, 2019). Ada empat tahap dalam kajian LCA yaitu:

a) *goal and scope definition* (definisi tujuan dan lingkup),
b) *life cycle inventory* (tahap analisis inventori),
c) *life cycle impact assessment* (tahap penilaian dampak),
d) *interpretation* (tahap interpretasi).



Gambar 2.3 Tahapan *Life Cycle Assessment*
Sumber: SNI ISO 14040

2.6.1 *Goal and Scope Definition*

Tujuan dan lingkup merupakan langkah pertama dalam tahapan LCA. Langkah pertama ini memiliki fungsi untuk mendiskripsikan tujuan, sistem yang akan dievaluasi, batasan-batasan dari sistem yang dievaluasi (Sumarata *et al.*, 2019). Ruang lingkup LCA berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 2021 Tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan Dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup ialah:

1. *Cradle to grave* yaitu penilaian daur hidup dari akuisisi bahan baku, produksi, penggunaan, pengolahan akhir, daur ulang, sampai pembuangan akhir.
2. *Cradle to gate* meliputi dalam akusisi bahan baku sampai proses produksi.

3. *Gate to gate* meliputi hanya dalam proses produksi dan/atau jasa.

2.6.2 *Life Cycle Inventory* (LCI)

Life Cycle Inventory (LCI) atau tahap analisis inventori merupakan tahap dalam penilaian daur hidup yang meliputi kompilasi dan kuantifikasi *input* dan *output* bahan baku, energi, emisi, dan produk samping yang dihasilkan selama siklus daur hidup suatu produk. Tahapan ini berupa analisis aliran neraca energi, neraca massa, dan emisi berdasarkan ketentuan SNI ISO 14040.

2.6.3 *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA)

Life Cycle Impact Assessment (LCIA) atau tahap penilaian dampak merupakan tahap analisis mengenai jenis dan besarnya nilai tiap kategori dampak yang dihasilkan. Tahap ketiga dari LCA ini bertujuan untuk memahami besar dan pentingnya dampak lingkungan untuk sistem produk (Brata *et al.*, 2018). Hasil dari LCI dianalisis menggunakan metode dampak lingkungan pada *software* SimaPro. Beberapa tahapan LCIA dengan penjelasan menurut Kautzar *et al.* (2015), Sitepu (2011), dan Sulistyawanti *et al.* (2020) antara lain:

1. *Characterization* merupakan tahapan penilaian kontribusi keseluruhan *input* dan *output* sesuai kategori dampak yang telah ditentukan. Tahap ini dilakukan dengan cara mengalikan masing-masing kategori dampak dengan faktor karakterisasi.
2. *Normalization* merupakan tahap dimana dampak yang telah dinilai kemudian disederhanakan dalam basis ukuran yang sama, dengan tujuan agar kategori dampak dapat dibandingkan dengan satu sama lain. Tahap ini dilakukan dengan mengalikan nilai hasil karakterisasi dengan faktor normalisasi.

2.6.4 Interpretasi

Interpretation atau tahap interpretasi hasil merupakan tahap akhir LCA, dimana hasil LCI dan/atau LCIA dirangkum dan dibahas sebagai dasar pengambilan kesimpulan, rekomendasi, dan keputusan sesuai definisi tujuan dan ruang lingkup. Hasil dari

tahap ini dikembangkan dengan melakukan *process improvement* atau pemilihan skenario alternatif perbaikan terbaik (Astuti, 2019).

Tahap interpretasi terdiri atas dua langkah penting antara lain identifikasi isu penting dan evaluasi. Pada tahap identifikasi isu penting, interpretasi hasil dilakukan dengan tujuan melihat konsistensi dalam inventarisasi *input*, *output* dan penilaian dampak lingkungan yang telah dilakukan dengan *goal and scope* yang telah ditentukan.

Pada tahap evaluasi dapat dilakukan dengan pemeriksaan kelengkapan, sensitivitas, dan konsistensi. Pemeriksaan kelengkapan dilakukan untuk memastikan seluruh informasi relevan dan diperlukan untuk interpretasi. Pemeriksaan sensitivitas dilakukan untuk menilai pengaruh hasil dan kesimpulan yang disebabkan oleh ketidakpastian data, metode, atau perhitungan. Pemeriksaan konsistensi dilakukan untuk memeriksa asumsi dan data agar tetap konsisten dengan tujuan dan ruang lingkup (Nugraha *et al.*, 2018).

2.7 *Software* SimaPro

SimaPro merupakan *software* yang digunakan untuk melakukan analisis LCA. SimaPro dapat digunakan untuk mengumpulkan data, menganalisis, serta memantau kinerja keberlanjutan dari suatu produk dan/atau layanan (Goedkoop *et al.*, 2016). Pada penelitian ini, SimaPro yang diunduh telah dilengkapi lisensi fakultas (*faculty license*) untuk edukasi.

2.7.1 *Database* LCA

Database LCA menyediakan data energi, material, dan aliran emisi yang terkait dengan komponen, proses atau produk tertentu. *Database* diperlukan karena keterbatasan dalam pengumpulan atau akses data primer untuk LCA, data sekunder yang tersedia hanya yang diperoleh dari penyedia data, serta data pada fase siklus hidup yang tidak dibawah kendali operasional penyedia data dapat menggunakan *database* yang tersedia.

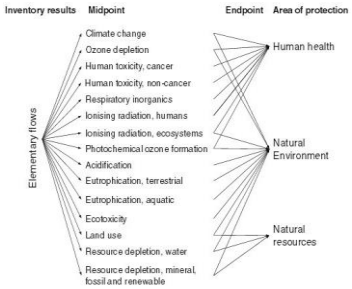
Database yang digunakan dalam kajian LCA ini adalah *Ecoinvent*. Menurut situs resmi SimaPro, basis data *ecoinvent* adalah sumber data yang telah terintegrasi di SimaPro serta sesuai untuk studi dan penilaian berdasarkan ISO 14040 dan 14044. *Ecoinvent* secara luas dikenal sebagai database inventori siklus hidup terbesar dengan akses ke data pada tingkat proses unit dan

proses sistem, serta berisi kumpulan data untuk sebagian besar industri dan pembaruan berkala segera setelah data baru tersedia. Basis data *ecoinvent* memiliki tiga model sistem yaitu "*allocation cut-off by classification*", "*allocation at point of substitution (APOS)*", dan "*consequential*". Masing-masing model sistem memiliki 2 kategori proses yakni proses unit dan proses sistem.

Pada penelitian ini, model sistem yang dipilih adalah "*allocation cut-off by classification*" dengan pendekatan bahwa produksi bahan utama dialokasikan untuk penggunaan utama suatu bahan, sehingga dampak yang muncul berasal dari proses utama saja dan dampak tidak meluas pada hal-hal diluar lingkup kajian. Serta dipilih juga kategori "proses unit" yang mengandung tautan ke proses unit lainnya dan dapat digunakan untuk interpretasi terperinci (ITS Tekno Sains, 2019).

2.7.2 Metode Penilaian Dampak

Terdapat dua pendekatan untuk melakukan penilaian kategori dampak antara lain secara *midpoint* dan *endpoint*. *Midpoint* adalah pendekatan yang lebih berfokus pada masalah lingkungan tunggal (*problem oriented*), misalnya *global warming*, *ozone layer depletion*, *eutrophication*, *acidification* dan lain-lain. *Endpoint* adalah pendekatan yang berada pada tingkat pengkategorian yang lebih luas dan berorientasi pada kerusakan (*damage-oriented*), misal *ecosystem quality*, *human health*, *resources* (Devia *et al.*, 2017). Berikut merupakan bagan beberapa kategori dampak pendekatan *midpoint* dan pengelompokannya pada pendekatan *endpoint*.



Gambar 2.4 Kategori Dampak dengan Pendekatan *Midpoint* dan *Endpoint*

Sumber: Bonou et al., 2016

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode yang telah mencakup kategori dampak yang harus dikaji sesuai dengan ketentuan Permen LHK Nomor 1 Tahun 2021 antara lain:

a. *Global warming potential*
b. Potensi penipisan ozon
c. Potensi hujan asam
d. Potensi eutrofikasi
e. *Photochemical oxidant*
f. Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil dan non fossil)
g. Potensi terjadi penurunan biotik
h. Karsinogenik
i. *Toxicity*
j. *Water footprint*
k. *Land use change*

2.5.2.1 Metode ReCiPe 2016

Metode ReCiPe 2016 merupakan metode yang menyediakan pendekatan *midpoint* dan *endpoint* sebagai bentuk sebab-akibat serta menggunakan faktor karakterisasi skala global. Faktor karakterisasi *midpoint* dikalikan dengan faktor *damage* untuk mendapatkan nilai karakterisasi *endpoint* (Dekker *et al.*, 2020). Berdasarkan SimaPro Database Manual Methods Library (PRé, 2019), Kategori dampak yang disediakan ReCiPe 2016 untuk pendekatan *midpoint* antara lain *global warming, stratospheric ozone depletion, ionizing radiation, ozone formation-human health, fine particulate matter formation, ozone formation-terrestial ecosystem, terrestrial acidification, freshwater eutrophication, marine eutrophication, terrestrial ecotoxicity, freshwater ecotoxicity, marine ecotoxicity, human carcinogenic toxicity, human non-carcinogenic toxicity, land use, mineral resource scarcity, fossil resources scarcity,* dan *water consumption*. Sementara itu, pendekatan *endpoint* pada ReCiPe 2016 dibagi menjadi tiga kategori dampak yaitu *damage to human health, damage to ecosystem,* dan *damage to resource availability*.

2.5.2.2 Metode CML IA-*Baseline*

CML IA merupakan metode penilaian dampak yang diajukan oleh sekelompok peneliti dari *Center of Environmental Science of Leiden University* (CML) dengan faktor karakterisasi skala eropa

dan global. Metode ini digunakan untuk pendekatan *midpoint*. Dalam SimaPro, metode ini memiliki 2 (dua) versi yaitu versi '*baseline'* dengan 11 kategori dampak dan versi yang diperluas dengan 'semua kategori dampak' (PRé, 2019). Kategori dampak yang disediakan CML IA-*Baseline* meliputi *abiotic depletion non fossil, abiotic depletion fossil fuels, global warming 100a, ozone layer depletion, human toxicity, fresh water aquatic ecotox., marine aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity, photochemical oxidation, acidification,* dan *eutrophication*.

2.7.3 Kategori Dampak

Kategori dampak yang dikaji pada penelitian ini adalah *Global Warming, Ozone Layer Depletion, Acidification, Eutrophication, Potential Photochemical Oxidation, Fine Particulate Matter Formation, Potential Abiotic Depletion (fossil dan non fossil), Carcinogenic, Toxicity, Water Footprint,* dan *Land Use Change.* Berikut penjelasan tiap kategori dampak dengan pendekatan *midpoint*.

1. *Global Warming*

Global warming merupakan peningkatan suhu rata-rata pada atmosfer, laut, dan daratan pada bumi. Kategori dampak ini berlandaskan *Intergovernmental Panel on Cimate Change* (IPCC) dengan faktor karakterisasi yang ditunjukkan sebagai Global Warming Potential selama 100 tahun (GWP100) dalam bentuk total emisi GRK yang dilepas ke atmosfer dan dinyatakan dalam satuan kg CO_2 eq (Martín *et al.*, 2016). Pemanasan global sendiri memicu perubahan iklim. Meningkatnya temperatur dapat meningkatkan frekuensi dan intensitas gelombang panas atau *heat wave*, cuaca ekstrim seperti kekeringan dan hujan badai, mencairnya es kutub atau gletser, dan peningkatan konsentrasi polusi udara, dimana hal-hal tersebut dapat menyebabkan lebih mudahnya penyebaran penyakit, malnutrisi, serta menyebabkan atau memperburuk penyakit pernapasan maupun kardiovaskular (Franchini & Mannucci, 2015).

2. *Ozone Layer Depletion*

Ozone layer depletion merupakan penipisan ozon di lapisan stratosfer yang menyebabkan lebih banyak sinar UV menembus atmosfer bumi. Kategori dampak ini berlandaskan *World*

Meteorological Organization (WMO) dan dinyatakan dalam jumlah zat penipis ozon yang dilepaskan ke bumi dengan satuan kg CFC-11 eq (Martín *et al.*, 2016). Triklorofluorometana sendiri merupakan zat antropogenik perusak ozon yang utama. Menurut Fleming *et al.* (2020), pada skenario dengan emisi CFC-11 yang bertahan sebesar 10 Gg/tahun diatas *baseline* (keadaan lapisan ozon pada tahun 1980) hingga tahun 2100, penipisan lapisan ozon akan mengalami peningkatan sebesar 0,13%; sementara itu dengan 72,5 Gg/tahun (rata-rata emisi pada tahun 2013-2016) hingga tahun 2100 akan menghasilkan peningkatan nilai klorin stratosfer ekuivalen efektif (*Effective Equivalent Stratospheric Chlorine/EESC*) sebesar 15% dan meningkatnya penipisan ozon global sebesar hampir 1%. Menurut Anwar *et al.* (2016), diperkirakan resiko terhadap penyakit katarak akan meningkat 0,3% - 0,6% dan kanker akibat radiasi UV akan meningkat sebesar 2% apabila penipisan lapisan ozon mencapai 1%.

3. *Acidification*

Acidification adalah pengasaman atau dampak dari proses pembentukan hujan asam. Kategori dampak ini dinyatakan dalam jumlah zat penyebab asidifikasi yang terlepas ke udara dengan satuan kg SO_2 eq (Sirait, 2020). Menurut Mohajan (2019), hujan asam disebabkan oleh emisi sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x, umumnya nitrogen monoksida atau NO dan nitrogen dioksida atau NO_2) yang timbul akibat pembakaran bahan bakar fosil, dimana emisi tersebut bereaksi dengan molekul air di atmosfer dan memproduksi H_2SO_4 dan HNO_3. Hal ini dapat menyebabkan penurunan pH hingga dibawah 5,6. Pada ekosistem perairan, ikan tidak dapat hidup pada pH kurang dari 4,5. Selain itu, pada tanah, tanaman tidak dapat tumbuh pada pH kurang dari 3,7. Hujan asam dengan pH 3-5 juga dapat merusak bangunan. Sementara itu, hujan asam berbahaya apabila terkena langsung pada kulit manusia. Disamping itu, apabila manusia mengonsumsi tumbuhan atau hewan yang terkena hujan asam, dapat menyebabkan kerusakan saraf; gangguan pada organ tubuh seperti paru-paru, ginjal, dan otak; hingga menyebabkan kematian. Pada tahun 2000, Kanada mengeluarkan sekitar 2,4 juta ton SO_2 yang menyebabkan beberapa wilayah menunjukkan pengasaman atau asidifikasi kronis dengan pH rata-rata mencapai 4,34.

4. *Eutrophication*

Eutrophication adalah pencemaran seperti pertumbuhan alga berlebih yang disebabkan nutrient yag berlebihan di lingkungan (Sirait, 2020). Kategori dampak ini dinyatakan dalam satuan kg PO_4 eq pada metode CML IA-*Baseline* atau kg P eq untuk *freshwater eutrophication* dan kg N eq untuk *marine eutrophication* pada metode ReCiPe 2016. Pada ekosistem perairan, pertumbuhan alga berlebih akibat nutrient N dan P berlebih dapat mengurangi kadar oksigen terlarut. Alga berlebih ini menutupi permukaan perairan sehingga mencegah sinar matahari masuk untuk pertumbuhan tanaman di dalam air. Ketika tanaman mati, oksigen yang dihasilkan berkurang. Selain itu, ketika tanaman maupun alga mati dan diuraikan oleh bakteri, proses dekomposisi ini juga membutuhkan oksigen. Minimnya oksigen terlarut dapat menyebabkan kematian pada ikan maupun organisme perairan lainnya. Disamping itu, dapat tumbuh pula alga atau ganggang berbahaya yang dapat membahayakan kesehatan apabila mengonsumsi bahan makanan atau minuman yang terpapar alga tersebut. Menurut penelitian Rui *et al. (*2012) pada sungai Han, peningkatan 1 unit beban P (mg/m^2y) dapat meningkatkan probabilitas timbulnya alga sebesar 14,82%.

5. *Potential Photochemical Oxidation*

Photochemical oxidation merupakan pembentukan zat reaktif akibat reaksi *volatile organic compound* (VOC) dan nitrogen oksida yang terkena panas sinar matahari yang merugikan kesehatan manusia dan ekosistem. Kategori dampak ini juga dikenal dengan istilah "*summer smog"*, dilakukan sesuai *United Nations Economic Comission for Europe* (UNECE), dan dinyatakan dalam satuan kg ethylene eq (kg C_2H_4 eq). Reaksi fotokimia menyebabkan polutan sekunder (polutan dengan sifat fisik dan kimia yang tidak stabil, yang terjadi karena reaksi dari dua atau lebih bahan kimia di udara) seperti ozon (O_3). Berbeda dengan ozon di lapisan stratosfer yang mencegah masuknya sinar UV ke permukaan bumi, ozon pada lapisan troposfer merupakan pencemar udara yang dapat membahayakan kesehatan mahluk hidup. Menurut PP No. 22 Tahun 2021, baku mutu oksidan fotokimia sebagai ozon yaitu 150 $\mu g/m^3$ dalam 1 jam waktu

pengukuran, 100 µg/m^3 dalam 8 jam waktu pengukuran, 35 µg/m^3 dalam 1 tahun waktu pengukuran. Pada metode TRACI, 1 kg C_2H_4 eq setara dengan 8,99 kg O_3 eq (Eckelman & Sherman, 2016). Ozone di permukaan (*ground-level ozone*) dapat menghambat pertumbuhan tanaman serta berbahaya bagi kesehatan manusia karena dapat menyebabkan berbagai penyakit seperti gangguan pada sistem pernapasan, sistem kardiovaskular, kulit, maupun sistem imun. Menurut Manisalidis *et al.* (2020), pada penelitian *European Project (APHEA2)* yang berfokus pada efek akut konsentrasi ozon terhadap kematian, dimana konsentrasi ozon harian dibandingkan dengan jumlah kematian di beberapa kota selama 3 tahun; diperkiran peningkatan 1 jam konsentrasi ozon sebesar 10 µg/m^3 ada kaitannya dengan peningkatan jumlah kematian harian (0,33%), kematian pernapasan (1,13%), dan kematian kardiovaskular (0,45%).

6. *Potential Abiotic Depletion (fossil dan non fossil)* dan *Potential Biotic Depletion*

Potensi penurunan abiotik baik fossil maupun non fossil terkait dengan penurunan jumlah material anorganik akibat proses ekstraksi berbagai material anorganik seperti air, logam, batu bara. *Abiotic Depletion Factor* (ADF) ditentukan berdasarkan konsentrasi cadangan dan laju deakumulasi untuk setiap ekstraksi mineral dan bahan bakar fosil, dengan satuan MJ dan kg Sb eq (ITS Tekno Sains, 2019). Sementara itu, potensi penurunan biotik membahas mengenai dampak yang dapat disebabkan oleh proses ekstraksi sumber daya alam seperti tumbuhan dan hewan. Kategori dampak ini tidak termasuk ke dalam sumber daya biotik yang diproduksi oleh proses produksi industri seperti tanaman pertanian, kayu dari perkebunan, hewan ternak, ikan dari akuakultur.

7. *Carcinogenic*

Carcinogenic merupakan dampak yang disebabkan emisi zat karsinogenik yang mempengaruhi lingkungan dan kesehatan manusia terutama penyakit kanker. Hal ini dapat menimbulkan potensi penyakit kanker. Satuan dari *impact* ini adalah kg 1,4-dichlorobenzene eq (kg 1,4-DB eq atau kg 1,4-DCB eq).

8. *Toxicity*

Toxicity merupakan adanya potensi efek toksik (racun) kepada lingkungan maupun manusia yang disebabkan oleh polutan yang mencemari lingkungan. Kategori dampak ini dihitung berdasarkan indeks yang menunjukkan potensi bahan kimia yang dapat merusak lingkungan, untuk *human toxicity* dihitung berdasarkan USES-LCA, dan pada ekosistem terbagi menjadi 3 jenis yaitu *freshwater, marine,* dan *land*, serta dinyatakan dalam satuan kg 1,4-DB eq atau kg 1,4-DCB eq (ITS Tekno Sains, 2019). Menurut *Environmental Protection Agency (EPA)*, paparan akut atau jangka pendek terhadap 1,4-dichlorobenzen pada manusia dapat menyebabkan iritasi pada kulit, mata, dan tenggorokan. Sedangkan, paparan kronis (jangka panjang) dapat menyebabkan gangguan pada kulit, hati, maupun sistem saraf pusat.

9. *Water Footprint*

Volume air yang digunakan dan kontaminasi air yang terbentuk pada produksi dari setiap unit produk dapat diketahui dengan menghitung jejak air. *Water footprint* terdiri dari *blue water footprint* (volume penggunaan air yang berasal dari mata air), *green water footprint* (volume penggunaan air yang berasal dari air hujan) dan *grey water footprint* (volume air yang digunakan untuk melarutkan polutan) pada setiap proses produksi. Kategori dampak ini dinyatakan dengan satuan m^3 (ITS Tekno Sains, 2019).

10. *Land Use Change*

Kategori dampak ini terkait dengan dampak konversi lahan dari keadaan awal atau aslinya setelah pembukaan lahan baru, alih fungsi lahan, serta kerusakan hutan. Satuan yang digunakan adalah m2a crop eq (ITS Tekno Sains, 2019).

2.8 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu diperlukan sebagai referensi pendukung penelitian tugas akhir terkait LCA pada kegiatan hulu industri migas. Dari penelitian terdahulu dapat dirangkum identifikasi awal yang membantu jalannya penelitian. Berikut adalah kajian LCA sejenis yang pernah dilakukan beserta dampak lingkungan hasil analisis dan alternatif perbaikan yang direkomendasikan sebagai strategis mitigasi.

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti (Tahun Penelitian)	Judul Penelitian	Isi Penelitian
1	Annisa Tamara Sari (2017)	*Life Cycle Assessment* (LCA) Emisi pada Proses Produksi Bahan Bakar Minyak (BBM) Jenis Solar dengan Pendekatan Metode *Analytical Hierarcy Process* (AHP)	Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dampak yang ditimbulkan kegiatan industri migas menggunakan LCA dengan metode penilaian dampak lingkungan EDIP 2003. Berdasarkan hasil analisis LCA, dampak terbesar pada proses ekplorasi dan produksi diakibatkan oleh sumur produksi, dengan *hotspot* dampak *global warming 100a* sebesar 63021357 kg CO_2eq. Alternatif perbaikannya yaitu *enhanced oil/gas recovery*.
2	Harmira Primanda Putri (2017)	*Life Cycle Assessment* (LCA) Emisi pada Proses Produksi Bahan Bakar Minyak (BBM) Jenis Bensin dengan Pendekatan Metode *Analytical Hierarcy Process* (AHP)	Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dampak yang ditimbulkan kegiatan industri migas menggunakan LCA dengan metode penilaian dampak lingkungan EDIP 2003. Berdasarkan hasil analisis LCA, dampak terbesar pada proses ekplorasi dan produksi diakibatkan oleh *shipping,* yaitu *ozone depletion* sebesar 34010 kg CFC-11 eq. Alternatif perbaikannya antara lain pemanfaatan gas buangan dari sumur menjadi *fuel* gas penggerak pompa.
3	Erdhiyan Saputri (2018)	Kajian Dampak Proses Pengolahan Minyak Bumi di Pertamina RU IV Balongan Terhadap Lingkungan dengan Menggunakan Metode	Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dampak yang ditimbulkan kegiatan industri minyak bumi menggunakan LCA dengan metode penilaian dampak lingkungan EDIP 2003. Berdasarkan hasil analisis LCA, dampak paling besar yang dihasilkan adalah *ozone depletion*, dengan alternatif terpilih yaitu bahan

		Life Cycle Assessment (LCA)	bakar biodiesel dan penggunaan *cogeneration (combined heat & power)*.
4	ITS Tekno Sains (2019)	Laporan Kajian *Life Cycle Assessment (LCA)* PT X	Tujuan dari analisis LCA pada penelitian ini adalah menganalisis produk untuk mengidentifikasi potensi dampak lingkungan dan upaya untuk mengurangi dampaknya. dampak lingkungan yang ditimbulkan dari produksi migas pada PPP untuk 1 ton produk antara lain: 1. *Global warming* sebagai *hotspot* dampak, dengan *hotspot* proses berasal dari *gas compression* sebesar 64,76 kg CO_2 eq (ReCiPe 2016); 64,26 kg CO_2 eq (CML IA-*Baseline*). 2. *Acidification* dengan *hotspot* proses berasal dari *separator* sebesar 0,0067 kg SO_2 eq (ReCiPe 2016); 0,0093 kg SO_2 eq (CML IA-*Baseline*). 3. *Fine particulate matter formation* dengan *hotspot* proses berasal dari *separator* sebesar 0,0020 kg PM2,5 eq (ReCiPe 2016). 4. *Ozone formation* dengan *hotspot* proses berasal dari *separator* sebesar 0,0039 kg NO_x eq (terrestrial ecosystems); 0,0024 kg NO_x eq (human health). 5. *Stratospheric ozone depletion* dengan *hotspot* proses berasal dari *gas compression* sebesar 0,000054 kg CFC-11 eq (ReCiPe 2016). 6. *Human toxicity* dengan *hotspot* proses berasal dari *gas compression* sebesar 0,18 kg 1,4-DB eq (CML IA-*Baseline*).

			7. *Eutrophication* dengan *hotspot* proses berasal dari *gas compression* sebesar 0,021 kg PO_4^{3-} eq. (CML IA-*Baseline*). 8. *Photochemical oxidation* dengan *hotspot* proses berasal dari *gas compression* sebesar 0,0045 kg C_2H_4 eq (CML IA-*Baseline*) Beberapa rekomendasi alternatif perbaikannya ialah optimasi unit WHRU untuk pemanas Triethylene Glycol (TEG), menurunkan konsumsi energi listrik dengan mengganti *sludge separator* 6 nozzle ke 14 nozzle, *exhaust gas flare to city gas*, *gas flare reduction* (VLP *compressor*), *Heat Recovery Steam Generator*, implementasi *Vapor Recovery Unit* untuk mengurangi gas *flare*, konversi gas *flaring* menjadi bahan bakar.

“halaman ini sengaja dikosongkan”

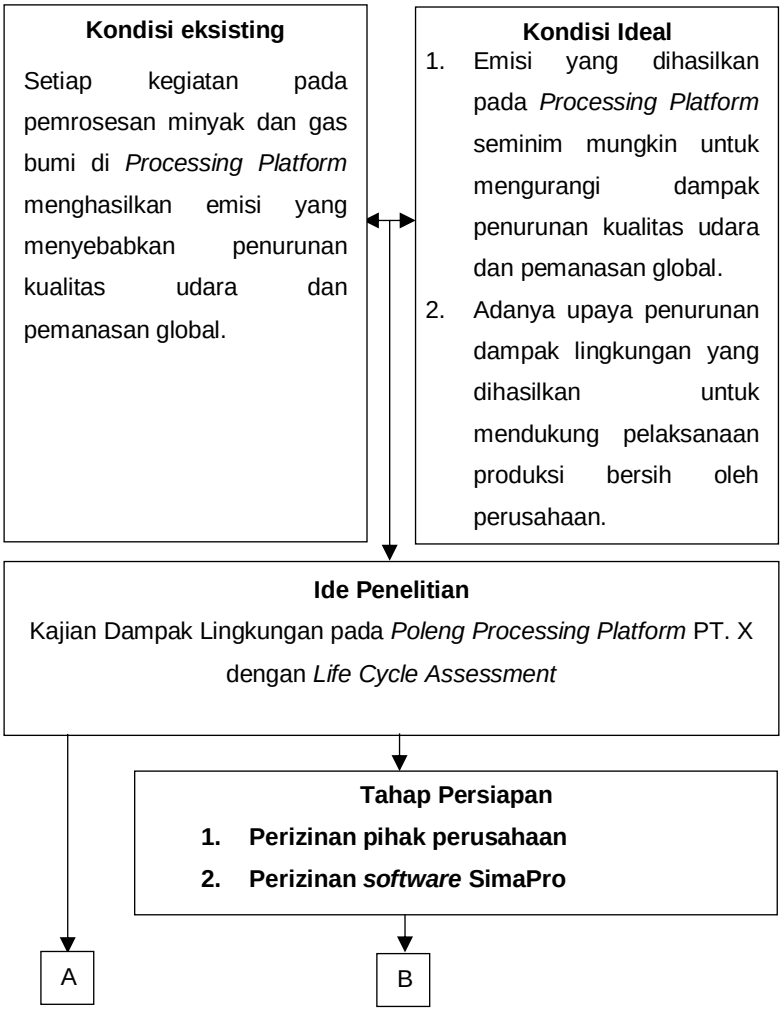
BAB III

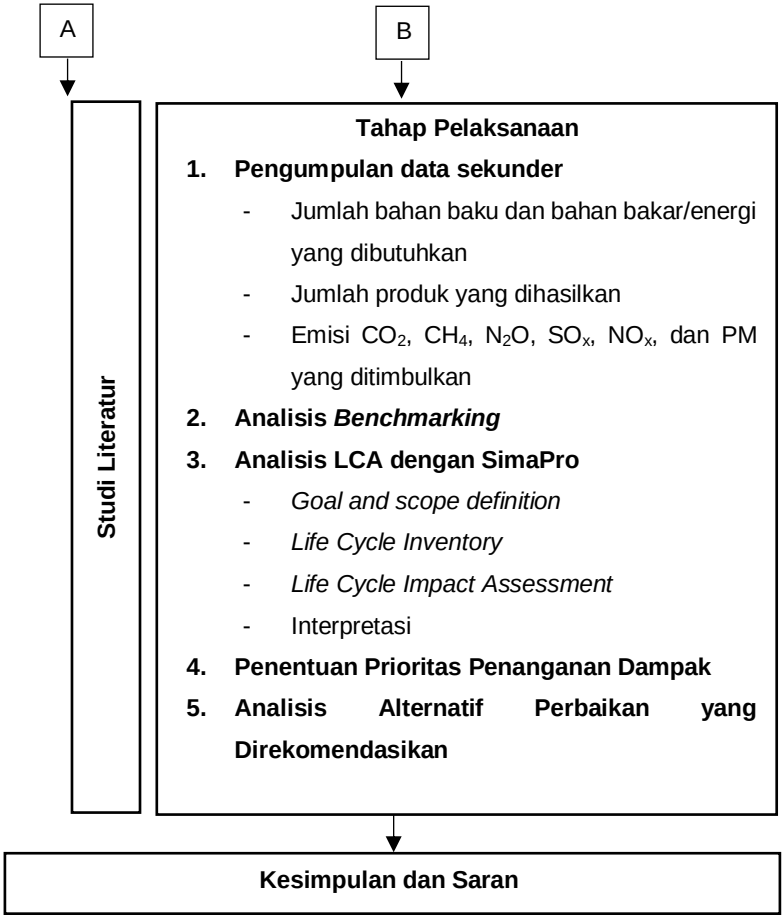
METODOLOGI PENELITIAN

BAB 3
METODE PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian merupakan tahapan sistematis dari penelitian yang dilakukan. Pada penelitian ini, kerangka penelitian adalah sebagai berikut:





Gambar 3.1 Kerangka Penelitian

3.2 Ide Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji dampak emisi udara terhadap lingkungan pada proses produksi minyak dan gas bumi khususnya di *Poleng Processing Platform* (PPP) PT. X menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dampak lingkungan yang sek dihasilkan di PPP PT. X, menentukan prioritas penanganan

dampak lingkungan yang ditimbulkan pada PPP, merekomendasikan alternatif perbaikan sebagai upaya untuk mereduksi nilai dampak lingkungan yang ditimbulkan di PPP PT. X sesuai dengan prioritas yang telah ditentukan.

3.3 Studi Literatur

Studi literatur dilaksanakan untuk menunjang ide penelitian dan pemahaman terhadap penelitian yang dilakukan. Sumber literasi dapat diperoleh dari jurnal penelitian, laporan tugas akhir/tesis/disertasi, buku, laporan kerja praktik, serta makalah seminar yang berkaitan dengan penelitian ini. Literatur yang diperlukan antara lain:

a. Proses produksi minyak dan gas bumi di *Poleng Processing Platform* PT. X termasuk *input* seperti komposisi bahan baku dan masukan energi serta *output* berupa produk dan emisi yang dihasilkan.
b. Pencemaran udara, gas rumah kaca, beban emisi, dan *benchmark* perusahaan migas sejenis.
c. LCA; s*oftware* SimaPro; metode ReCiPe 2016 dan CML IA-*Baseline*; serta kategori dampak.
d. Metode alternatif untuk mengurangi dampak emisi yang timbul di *Poleng Processing Platform* PT. X.

3.4 Tahap Persiapan

Beberapa tahap pendahuluan yang harus dilakukan untuk mendukung kelancaran penelitian ini terdiri dari perizinan pihak perusahaan dan perizinan *software* SimaPro. Perizinan pihak perusahaan dilakukan untuk kepentingan pengumpulan data yang dibutuhkan untuk penelitian pada pihak PT. X. Perizinan *software* dilakukan untuk mendapat lisensi aplikasi SimaPro sehingga perangkat dapat diunduh dan digunakan. Perizinan ini diajukan atas nama universitas.

3.5 Tahap Pelaksanaan

Tahap pelaksanaan penelitian ini meliputi pengumpulan data sekunder, analisis *mass balance* dan *benchmarking*, analisis LCA, penentuan prioritas penanganan dampak, dan analisis alternatif perbaikan yang direkomendasikan.

3.5.1 Pengumpulan Data

Data proses produksi minyak dan gas pada PPP PT. X yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder. Data sekunder meliputi data eksisting berupa dokumen atau laporan rutin perusahaan yang meliputi data-data sebagai berikut.

Tabel 3.1 Data – Data yang Diperlukan

No	Jenis Data	Metode Pengambilan Data	Durasi Data	Asal Data
1	Data jumlah bahan baku, bahan bakar, dan masukan energi yang dibutuhkan	Data sekunder	1 tahun	PT. X
2	Data jumlah produk dan produk samping yang dihasilkan	Data sekunder	1 tahun	PT. X
3	Emisi yang ditimbulkan	Data sekunder	1 tahun	PT. X

3.5.2 Analisis *Benchmarking*

Benchmarking merupakan proses perbandingan dan pengukuran suatu kegiatan perusahaan atau organisasi terhadap proses operasi terbaik di kelasnya sebagai inspirasi dalam meningkatkan kinerja perusahaan atau organisasi. Pada penelitian ini, dilakukan *benchmarking* antar perusahaan sejenis (migas) yang bertujuan untuk membandingkan kinerja pengelolaan lingkungan antara perusahaan dengan perusahaan lain yang sejenis. Dari perbandingan yang dilakukan, diketahui posisi perusahaan terkait kinerja lingkungannya sehingga dapat membantu dalam pemilihan alternatif perbaikan sebagai upaya dalam penurunan dampak lingkungan nantinya. Elemen lingkungan *benchmarking* pada penelitian ini meliputi penggunaan energi dan emisi pencemar udara. Data didapatkan dari laporan perusahaan.

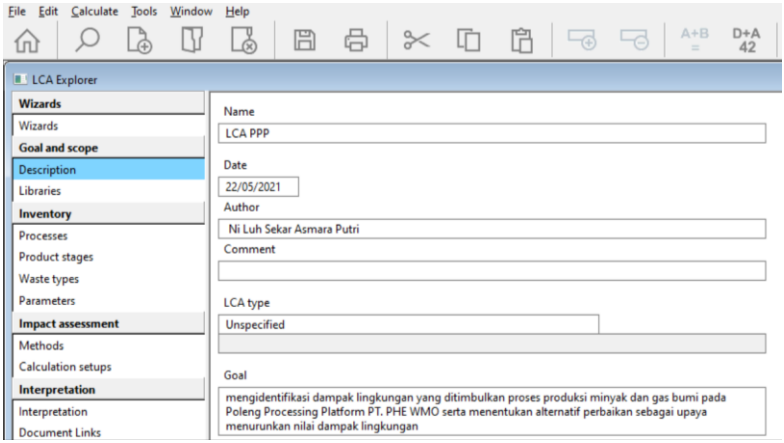
3.5.3 Analisis LCA dengan SimaPro

Analisis dampak lingkungan dilakukan dengan metode LCA menggunakan *software* SimaPro dan mencakup data bahan baku, bahan bakar dan masukan energi yang dibutuhkan serta produk dan emisi yang dihasilkan pada *Poleng Processing Platform* PT. X. Adapun langkah-langkah yang dilakukan menurut ITS Tekno Sains (2019) adalah sebagai berikut.

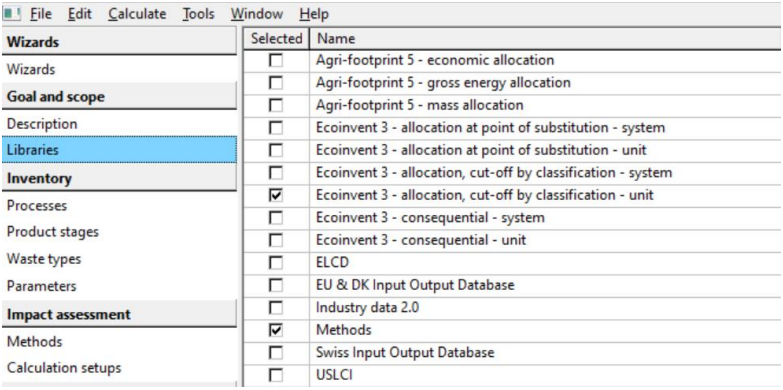
3.5.3.1 Penentuan *Goal* dan *Scope*

Penentuan tujuan dan ruang lingkup merupakan tahap awal LCA. Pada SimaPro, tujuan yang dimasukkan adalah mengidentifikasi dampak lingkungan yang ditimbulkan proses produksi minyak dan gas bumi pada *Poleng Processing Platform* PT. X serta menentukan alternatif perbaikan sebagai upaya menurunkan nilai dampak tersebut. Batasan ditentukan dengan memilih *database* yang tersedia yaitu *Ecoinvent*. Tahapan pada SimaPro antara lain:

a. *Text field* meliputi *input* data pemilik, komentar, alasan, dan tujuan melakukan penelitian LCA.
b. Pemilihan *libraries* meliputi pemilihan metode-metode apa yang paling sesuai dengan penelitian.



Gambar 3.2 Penentuan *Goal* pada SimaPro



Gambar 3.3 Penentuan *Scope* pada SimaPro

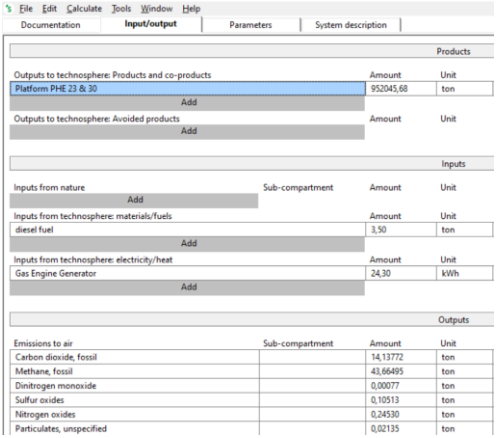
3.5.3.2 Penentuan *Life Cycle Inventory*

Analisis inventori meliputi perhitungan *mass balance* yang spesifik pada setiap unit proses berdasarkan data *input* (bahan baku, bahan bakar/masukan energi yang digunakan) dan data *output* (produk dan emisi yang dihasilkan) di dalam sistem. Berikut langkah analisis *mass balance*.

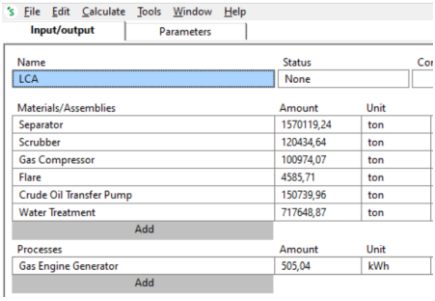
1. Mengidentifikasi unit-unit produksi yang menggunakan bahan bakar, durasi operasionalnya, dan laju alir bahan bakar serta sumber-sumber emisi tidak bergerak yang ada di PPP PT. X.
2. Merekapitulasi data penggunaan bahan bakar serta hasil pengukuran gas pencemar udara dan GRK pada sumber emisi tidak bergerak di PPP PT. X.
3. Menghitung beban emisi CO_2, CH_4, N_2O, SO_x, NO_x, dan PM menggunakan metode perhitungan beban emisi berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2012 tentang Pedoman Penghitungan Beban Emisi Kegiatan Industri Minyak dan Gas Bumi.
4. Mengkonversi masing-masing nilai satuan data pada setiap unit ke dalam satuan ton.
5. Mengurangi nilai *input* dengan nilai beban emisi yang telah didapatkan.

Hasil analisis berupa data *mass balance* dari tiap unit pada proses produksi migas di PPP PT. X. Data ini digunakan dalam tahapan analisis LCA selanjutnya. Sementara itu, inventarisasi data pada SimaPro meliputi:

1. *Process* untuk memasukkan data hasil rekapitulasi *output* berupa produk yang dihasilkan; *input* bahan baku, bahan bakar, dan masukan energi yang digunakan; serta beban emisi yang dihasilkan pada setiap proses kegiatan perusahaan terkait.
2. *Product stages* untuk memasukkan data berdasarkan tiap produk yang dihasilkan secara berurutan sesuai alir proses.



Gambar 3.4 Data Inventori *Process* pada SimaPro



Gambar 3.5 Data Inventori *Product Stages* pada SimaPro

3.5.3.3 Penentuan *Life Cycle Impact Assessment*

Dalam analisis penilaian dampak dilakukan perhitungan dampak lingkungan dari data *input* dan *output* yang dikompilasi dalam LCI sesuai metode penilaian dampak yang dipilih. Berikut langkah analisis penilaian dampak pada SimaPro.

1. Melakukan pemilihan metode penilaian dampak yang digunakan dan kategori dampak yang dikaji dalam penelitian yaitu metode ReCiPe 2016 dan CML IA-*Baseline* dengan pendekatan *midpoint*.
2. Melakukan tahap karakterisasi pada *software* SimaPro dengan cara mengalikan masing - masing kategori dampak dengan faktor karakterisasi.
3. Melakukan tahap normalisasi pada *software* SimaPro yaitu penilaian dengan membagi nilai hasil karakterisasi dengan faktor normalisasi.

3.5.3.4 Interpretasi Hasil

Interpretasi mencakup perangkuman dan evaluasi hasil LCIA untuk pengambilan kesimpulan, keputusan, dan rekomendasi sesuai dengan definisi tujuan dan ruang lingkup. Tahap evaluasi dilakukan dengan pemeriksaan kelengkapan, sensitivitas, dan konsistensi. Pemeriksaan kelengkapan dan konsistensi dilakukan dengan mengacu pada tabel yang disediakan pada SNI ISO 14044:2017. Menurut ISO 14044, analisis sensitivitas menilai pengaruh hasil dan kesimpulan terhadap variasi berbagai asumsi dan data dengan kisaran tertentu yaitu ± 10% - 25%. Dari hasil data tersebut, metode dengan perbedaan nilai *output* paling kecil dapat disimpulkan merupakan metode yang paling sensitif dan tepat untuk perusahaan minyak bumi.

3.5.4 Penentuan Prioritas Penanganan Dampak

Dari hasil LCA, dapat diketahui besar nilai dampak lingkungan sesuai kategori dampak yang dipilih dari setiap unit proses yang dianalisis. Diidentifikasi titik *hotspot* berupa kategori dampak dengan nilai tertinggi dan unit proses penyebab dampak tersebut. Titik *hotspot* inilah yang menjadi prioritas untuk penanganan dampak. Kemudian, dianalisis alternatif perbaikan

yang dapat dilakukan untuk mereduksi dampak yang ditimbulkan terhadap lingkungan.

3.5.5 Analisis Alternatif Perbaikan

Dalam analisis alternatif perbaikan terhadap titik *hotspot*, dilakukan tahapan-tahapan sebagai berikut.

1. Melakukan studi literatur mengenai alternatif perbaikan yang dapat diterapkan untuk mereduksi dampak yang ditimbulkan.
2. Menentukan skenario alternatif perbaikan yang direkomendasikan sesuai dengan hasil interpretasi data LCA, studi literatur, dan diskusi dengan pihak perusahaan.
3. Melakukan *running* atau simulasi kembali menggunakan *software* SimaPro dengan skenario alternatif perbaikan yang telah ditentukan.
4. Membuat grafik persentase penurunan dampak terhadap lingkungan terkait sebelum 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 berdasarkan hasil analisis data.

3.6 Kesimpulan dan Saran

Dari hasil analisis data dan pembahasan yang dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan dan saran. Kesimpulan menjawab rumusan masalah dan sesuai dengan tujuan penelitian. Saran diperlukan untuk penyempurnaan penelitian dan rekomendasi terhadap penelitian terkait sebagai masukan bagi penelitian sejenis yang mungkin dilakukan.

“halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

BAB 4
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Proses Produksi Minyak dan Gas Bumi di PPP

Poleng Processing Platform (PPP) merupakan anjungan proses yang terintegrasi dengan beberapa *platform* lainnya yakni 23, 30, AW, BW, CW, dan DW. Fluida tiga fase dari sumur-sumur produksi dikumpulkan di *platform* 23, 30, BW, CW, dan DW. Untuk pemrosesan selanjutnya, fluida tiga fase dari 23 dan 30 disalurkan ke PPP melewati *pipeline*. Sementara itu, fluida tiga fase dari BW, CW, dan DW disalurkan ke *platform* AW.

Pada PPP dan AW, terjadi pemisahan fluida tiga fase menjadi minyak, gas, dan air terproduksi pada unit *separator*. Minyak dari *separator* PPP dan AW yang telah stabil dipompa menggunakan *crude oil transfer pump* ke *Floating Storage and Offloading* (FSO) yang merupakan tanker pengumpul minyak sebelum didistribusikan ke konsumen serta sebagian kecil ke *Onshore Receiving Facility* (ORF).

Disamping itu, gas dari *platform* AW disalurkan ke unit pengolahan gas di PPP dan diolah bersama gas yang dihasilkan di PPP. Gas dibersihkan dengan *scrubber* kemudian dikompresi dengan unit *gas compression* lalu disalurkan ke ORF untuk diolah lebih lanjut agar dapat didistribusikan ke konsumen.

Air terproduksi diolah dengan *produced water treatment* yang terdiri atas *surge vessel* untuk menampung air terproduksi sebelum dialirkan ke *hydrocyclone*. Selain itu, sebagian air terproduksi diinjeksikan kembali ke sumur-sumur produksi untuk mempertahankan tekanan.

4.1.1 Data *Input* dan *Output*

Pada penelitian ini, data yang digunakan berupa data yang didapatkan berdasarkan laporan perusahaan antara lain data *input* yaitu bahan baku dan penggunaan bahan bakar gas, serta data *output* yakni produk berupa *crude oil*, gas, dan air serta emisi ke udara. Besar bahan baku berupa fluida tiga fase mengacu pada total produk yang dihasilkan.

Penggunaan bahan kimia tidak dimasukkan dalam analisis LCA dengan SimaPro karena komposisi dan besar penggunaan bahan kimia tersebut untuk tiap unit tidak diketahui, sehingga tidak

dapat dibuat basis data inventori. Beberapa bahan kimia yang digunakan yaitu:

1. *Demulsifier*

Bahan kimia ini ditambahkan pada proses separasi atau sebelum unit *separator* untuk mempercepat proses pemisahan minyak dan air dengan memecahkan air dalam minyak emulsi agar kualitas minyak sesuai dengan ketentuannya.

2. *Pour point depressant*

Menurut Sivakumar *et al.* (2018), berdasarkan tempat produksinya, minyak mentah dapat mengandung jumlah *wax,* resin, dan asphaltene yang berbeda. Reduksi pada temperatur dapat menyebabkan pengendapan *wax* yang membentuk kristal tidak terlarut yang menghambat laju alir fluida. *Pour point depressant* sebagai *flow improver* yang dapat memperlambat aglomerasi kristal *wax* dengan menurunkan titik tuang (*pour point*).

3. *Antifoulant*

Bahan kimia ini digunakan untuk mengurangi atau menghilangkan *fouling* yang menghambat proses perpindahan panas dan meningkatkan hambatan aliran fluida sehingga *pressure drop* menjadi lebih tinggi. Pada PPP PT. X, *antifoulant* mencegah terbentuknya *polymer* sehingga pengotor yang menempel pada rotor *gas compressor* dapat terlepas.

4. *H_2S scavenger*

Hidrogen sulfida dapat menurunkan mutu produk dan mengakibatkan korosi pada pengolahan minyak bumi. Selain itu, H_2S berbahaya karena sifatnya yang beracun. Proses *removal* H_2S dapat dilakukan dengan menginjeksikan bahan kimia H_2S *scavenger*. Bahan kimia ini ditambahkan setelah unit *separator* atau sebelum memasuki *gas compressor* (Bande *et al.*, 2016).

5. *Corrosion inhibitor*

Bahan kimia ini digunakan untuk melindungi instalasi terhadap karat. Pada PPP, *corrosion inhibitor* ditambahkan pada penyaluran gas setelah *separator* dan *gas compressor*.

6. *Water clarifier*

Penambahan bahan kimia *water clarifier* bertujuan untuk menurunkan konsentrasi minyak dan lemak dalam air terproduksi.

Selain penggunaan bahan kimia, limbah cair juga tidak termasuk dalam lingkup penelitian karena tidak diketahuinya

kandungan limbah cair untuk tiap unit. Limbah cair dari unit-unit seperti *separator*, *scrubber*, *gas compressor* disalurkan ke *surge vessel* yang merupakan bak ekualisasi kemudian diolah di *hydrocyclone*. Untuk saat ini, unit *hydrocyclone* di PPP tidak hanya mengolah limbah cair dari unit-unit PPP tetapi juga dari drainase pada dek *platform* dan unit-unit *platform* lain yang unit *hydrocyclone* nya tidak dapat bekerja dengan baik. Setelah diolah di *hydrocyclone*, hasil olahan disalurkan ke *sump caisson* untuk dibuang ke tengah laut. Hasil olahan di *sump caisson* diteliti terlebih dahulu untuk memastikan kandungannya berada pada baku mutu yang telah ditentukan.

Beberapa parameter hasil olahan limbah cair PPP yang dipantau oleh perusahaan yakni pH, salinitas, ammonia (NH_4), sulfida terlarut (H_2S), poliakromatik hidrokarbon (PAH), phenol total, PCB total (poliklor bifenil), *surfactant anionic*, minyak dan lemak, tributil tin (TBT), *dissolved oxygen* (DO), BOD_5, phospat (PO_4-), nitrat (NO_3-N), CN, *pesticide*, merkuri (Hg), Cd, Cu, Pb, Zn, Cr_{6+}, arsen total (As), Ni, dan residu *chlorine*.

Dari data yang terkumpul dan *mass balance*, dapat diperkirakan dampak lingkungan yang mungkin timbul akibat proses produksi minyak dan gas bumi pada PPP PT. X. Unit-unit yang diteliti mencakup *separator*, s*crubber, gas compressor*, *flare*, *crude oil transfer pump*, *water treatment*, dan *gas engine generator*. Konversi satuan yang digunakan pada penelitan ini sesuai dengan konversi yang digunakan oleh perusahaan yaitu:

1. Konversi bbl (*barrel*) ke tonnase
   1 bbl = 0,14 ton
2. Konversi mmscf (*million standard cubic feet*) ke tonnase
   1 mmscf = 23,33 ton

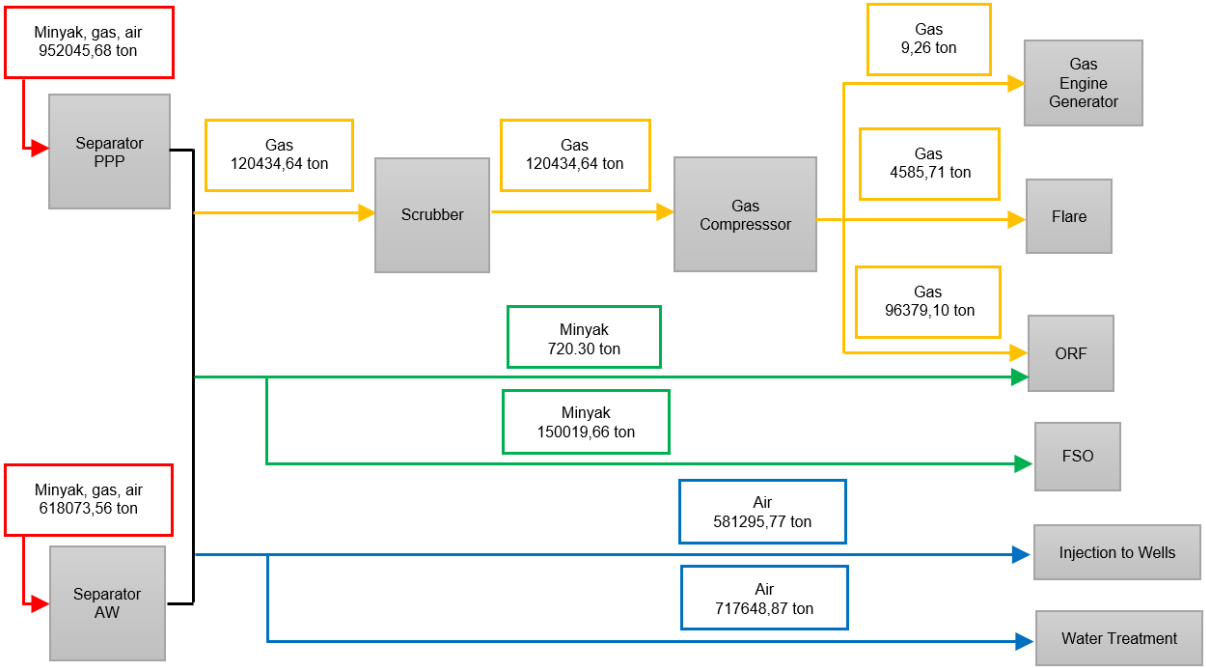
Mass balance dengan *input* bahan baku dan *output* produk proses produksi minyak dan gas bumi pada PPP PT. X tahun 2020 adalah sebagai berikut.

Tabel 4.1 Data *Input* dan *Output* Produksi Migas PPP PT. X

No	Unit Kegiatan	Kegiatan	Input					
			Material/Bahan Baku			Bahan Bakar/Energi Listrik		
			Jenis	Jumlah	Satuan	Jenis	Jumlah	Satuan
1	Platform 23 &30	Pengambilan dan penyimpanan *three phase liquid*	three phase liquid	952045,68	Ton	diesel fuel	3,50	Ton
						listrik	24,30	KWh
2	Platform BW,CW,DW			618073,56	Ton	diesel fuel	0,74	Ton
						listrik	36,45	KWh
3	Separator PPP	Pemisahan minyak, gas, air	three phase liquid	952045,68	Ton	-		
4	Separator AW			618073,56	Ton	-		
5	Scrubber	Pengolahan gas	gas	120434,64	Ton	-		
6	Gas Compressor	Pengolahan gas	gas	100974,07	Ton	gas fuel	19460,56	Ton
7	Gas Engine Generator	Power plant	gas	9,26	Ton	-		
8	Flare	Pembakaran gas	gas	4585,71	Ton	-		

selanjutnya

Output										
Emisi ke Udara (ton)							Produk			
CO2	CH4	N2O	SOx	NOx	PM	nmVOC	Jenis	Jumlah	Satuan	Ke Kegiatan
14,138	43,665	0,001	0,105	0,245	0,021	7,533	three phase liquid	952045,68	Ton	Separator PPP
3,798	97,562	0,000	0,022	0,052	5,793	8,143		618073,56	Ton	Separator AW
-							gas	70678,62	Ton	Scrubber
							minyak	22331,40	Ton	COTP to ORF/FSO
							air	859035,66	Ton	Injection to Well/Water Treatment
-							gas	49756,02	Ton	Scrubber
							minyak	128408,56	Ton	COTP to ORF/FSO
							air	439908,98	Ton	Injection to Well/Water Treatment
-							gas	120434,64	Ton	Gas Compressor
53516,553	8,173	4,281	0,249	130,386	3,777			9,26	Ton	Gas Engine Generator
							gas	4585,71	Ton	Flare
								96379,10	Ton	ORF
25,462	0,259	0,002	0,0001	0,704	0,003		listrik	505,04	KWh	
11968,713	160,500	0,371		6,879	1,216					



Gambar 4.1 *Mass Balance* Produksi Minyak dan Gas Bumi PPP

4.2 Analisis *Life Cycle Assessment* (LCA)

LCA adalah metode untuk menganalisis dan mengalkulasi dampak lingkungan dari sebuah produk di seluruh siklus hidupnya (Sulistyawanti *et al.*, 2020). Pengolahan data dengan metode LCA dilakukan dengan menggunakan *software* SimaPro 9.1.1 (*faculty license*). Adapun tahapan analisis LCA mengacu pada standar yang berlaku yaitu ISO 14040 yakni *goal and scope*, *life cycle inventory*, *life cycle impact assessment*, dan interpretasi hasil.

4.2.1 Penentuan *Goal* dan *Scope*

Tujuan dari penelitian ini adalah mengidentifikasi dampak lingkungan yang ditimbulkan proses produksi minyak dan gas bumi pada *Poleng Processing Platform* PT. X serta menentukan alternatif perbaikan sebagai upaya menurunkan nilai dampak lingkungan.

Ruang lingkup yg dipilih adalah *gate to gate* dengan unit-unit proses yg dianalis meliputi *Separator, Scrubber, Gas Compressor, Flare, Crude Oil Transfer Pump, Water Treatment,* dan *Gas Engine Generator* yang ada di PPP PT. X. Lingkup ini dipilih karena lingkup proses pada perusahaan saat ini hanya pada produksi minyak dan gas bumi. Proses akusisi bahan baku belum dilaksanakan lagi oleh X sehingga tidak dapat dilakukan analisis secara *cradle to gate*. Sementara itu, proses penggunaan produk sampai pembuangan akhir dilakukan oleh pihak ketiga atau konsumen di luar perusahaan sehingga analisis secara *cradle to grave* belum dapat dilaksanakan.

Sementara itu, *ecoinvent* dipilih sebagai *database* yang telah terintegrasi di SimaPro serta sesuai untuk studi dan penilaian berdasarkan ISO 14040 dan 14044. Model sistem yang dipilih adalah "*allocation cut-off by classification*" dengan kategori "proses unit" yang meliputi pendekatan dampak proses utama dari satu proses unit ke unit lainnya sehingga dampak tidak meluas pada hal-hal diluar lingkup kajian.

Metode penilaian dampak yang digunakan adalah ReCiPe 2016 dan CML IA-*Baseline* dengan pendekatan *midpoint* dan unit fungsional per ton produk. Selain menyesuaikan dengan kajian LCA di PT. X yang pernah dilakukan sebelumnya, metode-metode tersebut juga dipilih karena menyediakan kategori dampak yang terkait dengan produksi migas serta perlu dikaji sesuai dengan

Permen LHK Nomor 1 Tahun 2021. Berikut merupakan perbandingan kategori dampak yang perlu dikaji sesuai dengan Permen LHK Nomor 1 Tahun 2021 dengan kategori dampak yang disediakan oleh metode ReCiPe 2016 dan CML IA-*Baseline* pada *software* SimaPRo.

Tabel 4.2 Kategori Dampak yang Perlu Dikaji

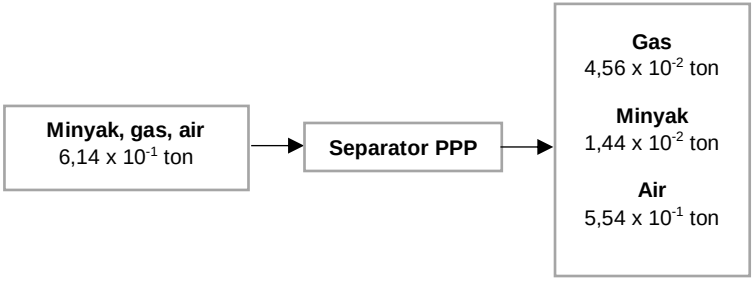
No	Kategori Dampak		
	PERMENLHK No. 1 Tahun 2021	ReCiPe 2016	CML IA-*Baseline*
1.	*Global warming potential*	*Global warming*	*Global warming (GWP100a)*
2.	Potensi penipisan ozon	*Stratospheric ozone depletion*	*Ozone layer depletion (ODP)*
3.	Potensi hujan asam	*Terrestrial acidification*	*Acidification*
4.	Potensi eutrofikasi	*Freshwater eutrophication, Marine eutrophication*	*Eutrophication*
5.	*Photochemical oxidant*	-	*Photochemical oxidation*
6.	Potensi penurunan abiotik (fossil dan non fossil)	*Mineral resource scarcity, Fossil resource scarcity*	*Abiotic depletion, Abiotic depletion (fossil fuels)*
7.	Karsinogenik	*Human carcinogenic toxicity*	-
8.	*Toxicity*	*Terrestrial ecotoxicity, Freshwater ecotoxicity, Marine ecotoxicity, Human non-carcinogenic toxicity*	*Freshwater ecotoxicity, Marine aquatic ecotoxicity, Terrestrial ecotoxicity, Human toxicity*
9.	*Water footprint*	*Water consumption*	-
10.	*Land use change*	*Land use*	-

4.2.2 Penentuan *Life Cycle Inventory*

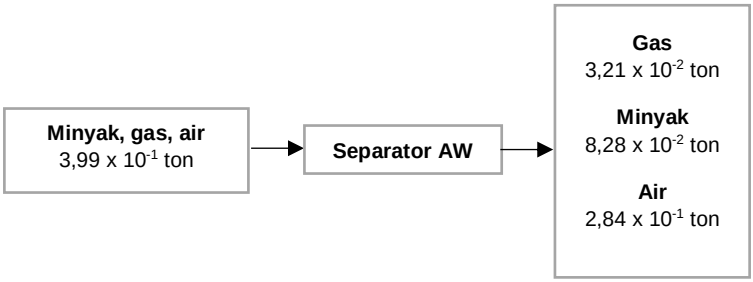
Pada tahap LCI dilakukan inventarisasi data *input* dan *output* proses produksi migas di PPP yang didapatkan dari laporan perusahaan. Penilaian dampak dari proses yang dianalisis memerlukan data yang meliputi kesetimbangan material antara data *output* produk yang dihasilkan; *input* bahan baku atau material dan energi yang digunakan; serta beban emisi yang dihasilkan. Berikut inventarisasi data untuk setiap unit proses yang dianalisis dengan unit fungsional per ton produk.

4.2.2.1 Unit *Separator*

Separator adalah bejana yang berfungsi memisahkan minyak, air, dan gas yang terkandung dalam minyak mentah (Ariandy, 2017). Berdasarkan hasil pemisahannya, *separator* terdiri dari *separator* dua fasa yang memisahkan gas dan fasa cair serta *separator* tiga fasa yang memisahkan minyak, air, dan gas. Menurut tekanan kerjanya, *separator* terdiri dari *high pressure (HP) separator* dengan tekanan 650-1500 psi, *medium pressure (MP) separator* dengan tekanan 225-650 psi, dan *low pressure (LP) separator* dengan tekanan 10-225 psi. Berdasarkan bentuknya, *separator* dibagi menjadi *separator* vertikal, *separator* horizontal, dan *separator* bulat atau *spherical* (Arifin, 2016). Inventarisasi data unit *separator* dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.2 Data Inventori *Separator* PPP



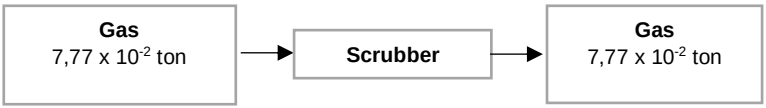
Gambar 4.3 Data Inventori *Separator* AW

Pada PPP PT. X, *separator* merupakan alat separasi minyak dan gas bumi yang menggunakan prinsip separasi *flash* pada tekanan dan temperatur tetap. Produksi dari sumur minyak di *separator* vertikal, sedangkan produksi dari sumur gas diproses di *separator* horizontal (ITS Tekno Sains, 2019). Selain itu, *separator* yang digunakan merupakan separator tiga fasa dan meliputi *HP separator, MP separator,* dan *LP separator.*

Berdasarkan data yang diperoleh, dapat diketahui bahwa nilai *input* untuk *separator* PPP sebesar 6,14 x 10^{-1} ton dengan hasil pemisahan gas sebesar 4,56 x 10^{-2} ton; minyak sebesar 1,44 x 10^{-2} ton; dan air sebesar 5,54 x 10^{-1} ton. Sementara itu, nilai *input* untuk *separator* AW sebesar 3,99 x 10^{-1} ton dengan *output* berupa gas sebesar 3,21 x 10^{-2} ton; minyak sebesar 8,28 x 10^{-2} ton; dan air sebesar 2,84 x 10^{-1} ton. Hasil dari kedua *separator* ini nantinya akan mengalami tahap pemrosesan yang sama sehingga *output* masing-masing dapat dijumlahkan, menghasilkan gas sebesar 7,77 x 10^{-2} ton; minyak sebesar 9,72 x 10^{-2} ton; dan air sebesar 8,38 x 10^{-2} ton.

4.2.2.2 Unit *Scrubber*

Scrubber atau *Gas Scrubber* merupakan alat yang digunakan untuk memisahkan butir cairan maupun partikel kotoran yang masih terkandung dalam gas. *Scrubber* umumnya terdiri dari jenis vertikal dan horizontal serta memiliki bentuk konstruksi seperti bejana tekan. Unit ini ditempatkan setelah *separator* atau sebelum kompresor untuk mencegah adanya cairan yang masuk ke dalam alat tersebut ((Labiby dan Ali, 2018). Inventarisasi data unit *scrubber* dapat dilihat pada gambar berikut.

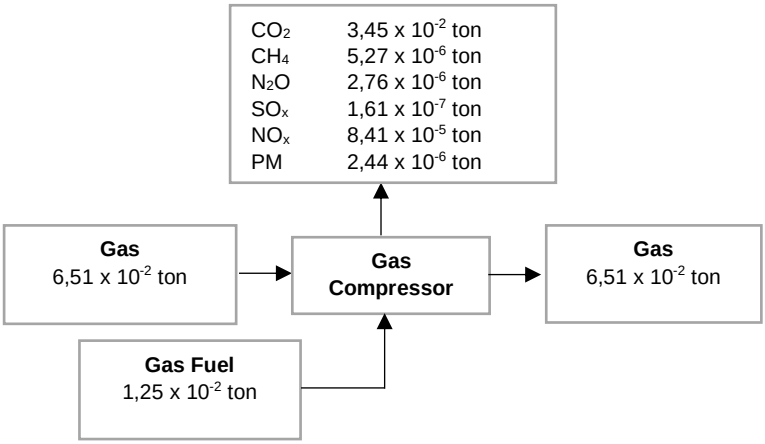


Gambar 4.4 Data Inventori *Scrubber*

Berdasarkan data yang diperoleh, nilai *input* dan *output scrubber* berupa gas sebesar 7,77 x 10^{-2} ton.

4.2.2.3 Unit *Gas Compressor*

Gas compressor merupakan alat atau mesin untuk memampatkan atau meningkatkan tekanan gas atau memindahkan gas bertekanan statis rendah ke tekanan statis yang lebih tinggi (Mulyani dan Fatmawati, 2017). *Gas compressor* yang digunakan pada PPP merupakan *gas turbine compressor* yang memanfaatkan gas untuk memutar turbin yang menghasilkan energi untuk menggerakkan kompresor yang mengalirkan gas ke proses selanjutnya dengan meningkatkan tekanan gas (ITS Tekno Sains, 2019). Inventarisasi data unit *gas compressor* dapat dilihat pada gambar berikut.

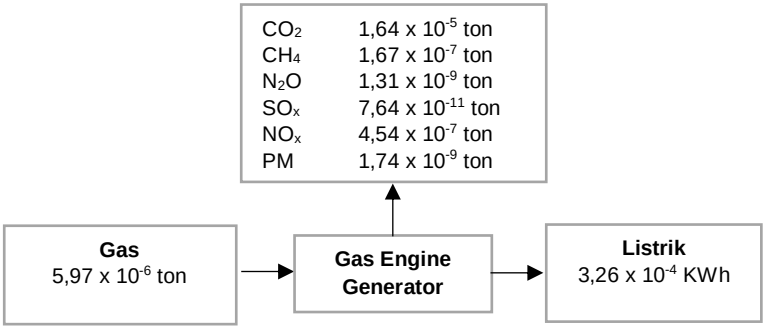


Gambar 4.5 Data Inventori *Gas Compressor*

Nilai *input* material *gas compressor* berupa gas dari unit *scrubber* sebesar 6,51 x 10^{-2} ton dengan sisanya bahan bakar berupa *gas fuel* sebesar 1,25 x 10^{-2} ton. Dari *gas compressor* dihasilkan emisi CO_2 sebesar 3,45 x 10^{-2} ton; CH_4 sebesar 5,27 x 10^{-6} ton; N_2O sebesar 2,76 x 10^{-6} ton; SO_x sebesar 1,61 x 10^{-7} ton; NO_x sebesar 8,41 x 10^{-5} ton; dan PM sebesar 2,44 x 10^{-6} ton. Hasil dari pengolahan gas di unit ini menghasilkan gas sebesar 6,51 x 10^{-2} ton yang selanjutnya disalurkan ke tiga unit yakni *gas engine generator*, *flare*, dan ORF (*Onshore Receiving Facility*).

4.2.2.4 Unit *Gas Engine Generator*

Gas engine generator merupakan unit penghasil listrik dengan memanfaatkan gas. Gas alam dijaga di bawah tekanan yang sesuai dengan kebutuhan mesin dan dicampur dengan udara yang diperlukan untuk pembakaran, untuk kemudian memutar rotor generator yang terhubung ke sumbu mesin dan menghasilkan listrik (Hlaing *et al.*, 2019). Inventarisasi data unit *gas engine generator* dapat dilihat pada gambar berikut.



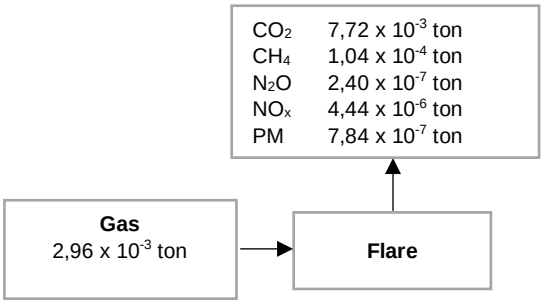
Gambar 4.6 Data Inventori *Gas Engine Generator*

Berdasarkan data yang diperoleh, nilai *input* pada *gas engine generator* berupa gas yang berasal dari *gas compressor* sebesar 5,97 x 10^{-6} ton. Unit ini menghasilkan listrik sebesar 3,26 x 10^{-4} KWh serta menimbulkan emisi berupa CO_2 sebesar 1,64 x 10^{-5} ton; CH_4 sebesar 1,67 x 10^{-7} ton; N_2O sebesar 1,31 x 10^{-9} ton; SO_x sebesar 7,64 x 10^{-11} ton; NO_x sebesar 4,54 x 10^{-7} ton; dan PM sebesar 1,74 x 10^{-9} ton.

4.2.2.5 Unit *Flare*

Flare merupakan alat pembakar limbah gas yang tidak dapat digunakan atau diangkut, berbentuk vertical yang biasa digunakan pada sumur minyak dan gas, pengeboran minyak, kilang, *plant* kimia, dan *plant* gas alam. Pada industri hulu migas, kelebihan produksi gas yang tidak dapat dimanfaatkan karena memiliki tekanan dan suhu yang rendah dibakar untuk menghindari dampak ledakan dan kebakaran (Ardi *et al.*, 2020).

Tujuan pembakaran gas pada flare ialah untuk meminimalisir pencemaran lingkungan yang dapat disebabkan apabila gas langsung dibuang ke udara, tetapi pembakaran ini juga dapat menimbulkan emisi yang mencemari lingkungan (Amirsyam *et al.*, 2018). Inventarisasi data unit *flare* dapat dilihat pada gambar berikut.



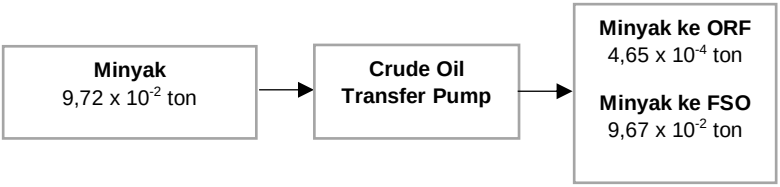
Gambar 4.7 Data Inventori *Flare*

Berdasarkan data yang diperoleh, dapat diketahui *input flare* berupa gas sebesar 2,96 x 10^{-3} ton yang berasal dari *gas compressor* dan menimbulkan emisi CO_2 sebesar 7,72 x 10^{-3} ton CH_4 sebesar 1,04 x 10^{-4} ton; N_2O sebesar 2,40 x 10^{-7} ton; NO_x sebesar 4,44 x 10^{-6} ton; dan PM sebesar 7,84 x 10^{-7} ton.

4.2.2.6 Unit *Crude Oil Transfer Pump*

Pengangkutan minyak mentah dari fasilitas produksi *upstream* merupakan salah satu tugas utama pada perusahaan eksplorasi dan produksi (EP) minyak, dan pompa banyak digunakan untuk hal ini (Bellary *et al.*, 2018). Pompa merupakan alat yang digunakan untuk mengalirkan cairan dari tempat yang rendah ke tinggi maupun dari tempat bertekanan rendah ke tempat yang bertekanan tinggi (Mawardi, 2019).

Crude *oil transfer pump* (COTP) memompa minyak dari tangki penyimpanan ke kapal tanker atau tangki distribusi (ITS Tekno Sains, 2019). Inventarisasi data unit *crude oil transfer pump* dapat dilihat pada gambar berikut.

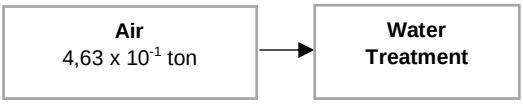


Gambar 4.8 Data Inventori *Crude Oil Transfer Pump*

Berdasarkan data yang diperoleh, dapat diketahui *input* COTP berupa minyak sebesar 9,72 x 10^{-2} ton yang berasal dari *separator* dan disalurkan ke ORF sebesar 4,65 x 10^{-4} ton serta ke FSO sebesar 9,67 x 10^{-2} ton.

4.2.2.7 Unit *Water Treatment*

Water treatment merupakan unit yang berfungsi untuk pengolahan air hasil proses pemisahan *crude oil* dan *natural gas*. *Water treatment* di PPP terdiri atas *surge vessel* yang menampung air terproduksi sebelum disalurkan ke *hydrocyclone*. *Surge vessel* adalah reservoir penyimpanan untuk menyerap kenaikan tekanan yang mendadak serta menyediakan air tambahan dengan cepat saat adanya penurunan tekanan. Sementara itu, *hydrocyclone* merupakan alat untuk pemisahan cair-cair berdasarkan perbedaan berat jenis komponennya dengan gaya sentrifugal yang dihasilkan dari bentuk kerucut *hydrocyclone* (Suminar dan Nurcahyo, 2020). Inventarisasi data unit *water treatment* dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.9 Data Inventori *Water Treatment*

Berdasarkan data yang diperoleh, dapat diketahui bahwa *water treatment* menerima *input* berupa air dari *separator* sebesar 4,63 x 10^{-1} ton.

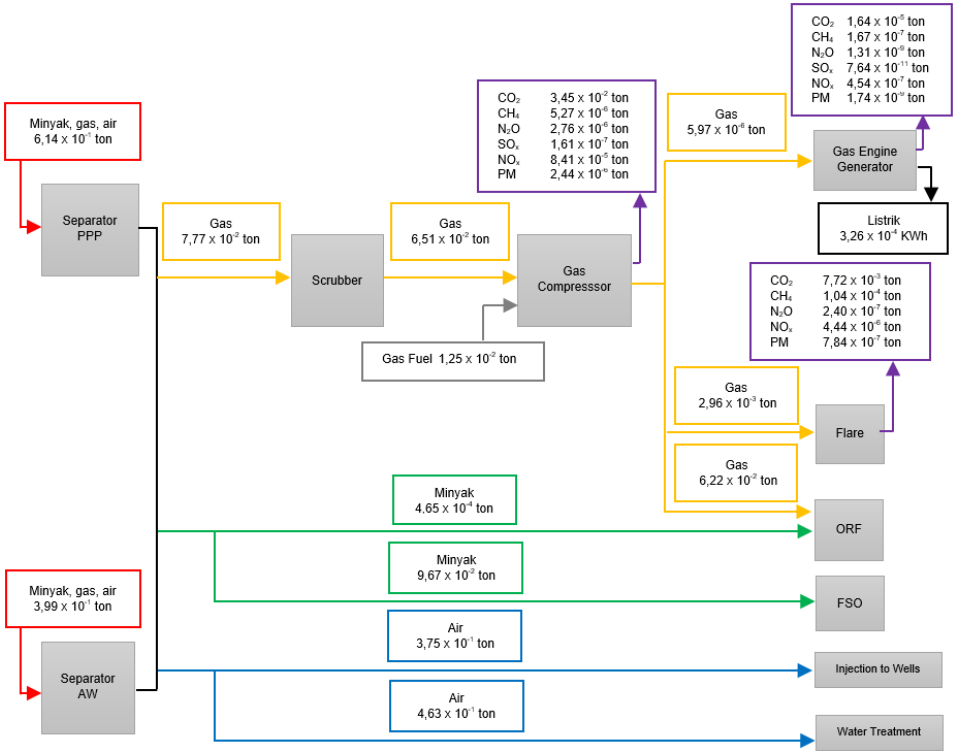
4.2.3 Penentuan *Life Cycle Impact Assessment*

Dari hasil LCI yang didapatkan, dilakukan tahap LCIA atau penilaian dampak untuk mengetahui jenis dan besar nilai tiap kategori dampak yang ditimbulkan sesuai metode penilaian dampak yang dipilih. Penggabungan dan pengolahan data LCI menghasilkan sebuah *network* (Kautzar *et al.*, 2015).

Network merupakan diagram yang menggambarkan keterkaitan antar proses dan dampak lingkungan yang dihasilkan dengan garis merah. Diagram dimulai dari bawah ke atas, dimana kegiatan di bawah merupakan pendukung kegiatan di atasnya. Ketebalan garis merah sendiri menunjukkan kepentingan hubungan tiap kegiatan dan besar dampak. Semakin tebal garis, maka semakin besar kontribusi emisi terhadap dampak yang mungkin ditimbulkan (Putri, 2017).

Selain dalam bentuk *network*, hasil dari LCIA juga berupa tabel serta grafik batang yang menunjukkan kategori-kategori dampak beserta nilai dampaknya dan unit yang berkontribusi pada dampak tersebut. Metode yang digunakan untuk penilaian dampak pada penelitian ini adalah ReCiPe 2016 dan CML IA-*Baseline*. Tahap LCIA yang dilakukan meliputi *Characterization* dan *Normalization*. Penilaian dampak pada penelitian ini menggunakan unit fungsional per ton produk.

Dari *Mass Balance,* dapat diketahui bahwa unit penghasil emisi terbesar ialah *gas compressor* diikuti oleh *flare* yang masing-masing menimbulkan emisi CO_2 hingga mencapai 3,45 x 10^{-2} ton dan 7,72 x 10^{-3} ton. Hal ini dikarenakan jumlah *input gas fuel* yang besar pada *gas compressor* yaitu 1,25 x 10^{-2} ton serta *input* gas yang harus diolah *flare* juga besar tepatnya mencapai 2,96 x 10^{-3} ton. Berdasarkan hal tersebut, diperkirakan *gas compressor* merupakan unit penghasil dampak terbesar (*hotspot* proses). Unit penghasil emisi lainnya yang tercatat pada data perusahaan adalah *gas engine generator* yang memanfaatkan masukan gas untuk menghasilkan listrik yang digunakan pada proses di PPP. Berikut adalah aliran massa hasil LCI dengan unit fungsional yang akan dianalisis pada tahap LCIA.



Gambar 4.10 Aliran Massa LCI dengan Unit Fungsional

Berdasarkan emisi-emisi yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar, dapat diperkirakan bahwa proses produksi minyak dan gas bumi di PPP akan menimbulkan dampak *global warming* karena besarnya emisi GRK yang dihasilkan terutama emisi CO_2. Selain itu, emisi N_2O juga berkontribusi dalam *ozone depletion*. Disisi lain, emisi konvensional seperti SO_x dapat menyebabkan dampak *acidification*. NO_x juga dapat berkontribusi dalam menyebabkan dampak *eutrophication*, bersama dengan emisi *fugitive* nmVOC dapat menyebabkan dampak *photochemical oxidation*. Kombinasi emisi-emisi tersebut juga dapat mengarah pada timbulnya dampak *toxicity*.

Ketidaksetimbangan massa dari data yang didapatkan kemungkinan terjadi karena adanya penambahan udara untuk mendukung proses pembakaran. Namun karena kondisi pengoperasian yang berubah-ubah maupun tidak ideal, nilai stoikiometrik rasio perbandingan udara dan bahan bakar yang mempengaruhi kesempurnaan pembakaran sulit dicapai. *Equivalence ratio (Φ)* atau perbandingan antara *air-to-fuel* teoritis ($ARF_{teoritis}$) dengan aktual (ARF_{aktual}) serta tekanan kompresi ruang bakar mempengaruhi besarnya emisi gas buang seperti NO_x dan CO. *Equivalence ratio* lebih dari 0,6 dapat menimbulkan gas NO_x dan CO yang tinggi (Tenaya & Hardiana, 2011). Seperti pada *gas compressor* yang memanfaatkan sistem turbin gas dengan bahan bakar *natural gas* atau gas alam yang diperkirakan mengandung 100% metana (CH_4) dengan nilai kalor 50000 kJ/kg, *air-fuel ratio* stoikiometriknya sebesar 17,39 dengan faktor udara berlebih maksimumnya sebesar 3,13 (Elgohary & Seddiek, 2012).

Berikut adalah hasil dan pembahasan LCIA tahap karakterisasi dan normalisasi menggunakan metode ReCiPe 2016 dan CML IA-*Baseline* serta unit fungsional per ton produk.

4.2.3.1 *Characterization*

Tahap karakterisasi merupakan tahap identifikasi dan pengelompokkan data LCI ke dalam kategori-kategori dampak yang telah ditentukan. Pada tahap ini, data *input* dan *output* yang telah diolah di LCI akan dinilai kontribusinya terhadap lingkungan dan menghasilkan profil dampak lingkungan dari sistem yang diamati (Kautzar *et al.*, 2015). Tahap ini dilakukan dengan mengalikan masing-masing kategori dampak dengan faktor

karakterisasi secara otomatis oleh *software* SimaPro. Berikut adalah faktor karakterisasi masing-masing kategori dampak untuk metode ReCiPe 2016 dan CML IA-*Baseline* pada SimaPro.

Tabel 4.3 Faktor Karakterisasi Metode ReCiPe 2016

No	Impact category	Unit	Characterization Factor
1	Global warming	kg CO_2 eq	1
2	Stratospheric ozone depletion	kg CFC_{11} eq	110
3	Terrestrial acidification	kg SO_2 eq	1.33
4	Freshwater eutrophication	kg P eq	0.33
5	Marine eutrophication	kg N eq	0.0902
6	Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0.962
7	Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0.285
8	Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0.118
9	Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	1.07
10	Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0.226
11	Land use	m^2a crop eq	0.73
12	Mineral resource scarcity	kg Cu eq	0.32
13	Fossil resource scarcity	kg oil eq	0.42
14	Water consumption	m^3	0.001

Tabel 4.4 Faktor Karakterisasi Metode CML IA-*Baseline*

No	Impact category	Unit	Characterization Factor
1	Abiotic depletion	kg Sb eq	0.00137
2	Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	18.16
3	Global warming (GWP100a)	kg CO_2 eq	1
4	Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0.07
5	Human toxicity	kg 1,4-DB eq	0.1
6	Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0.0225
7	Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	1.53
8	Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0.00295

9	Photochemical oxidation	kg C_2H_4 eq	0.032
10	Acidification	kg SO_2 eq	1.2
11	Eutrophication	kg PO_4--- eq	0.35

Pada metode ReCiPe 2016, dari 14 kategori dampak yang berkaitan dengan kategori dampak yang dikaji pada penelitian ini yakni *global warming, stratospheric ozone depletion, terrestrial acidification, freshwater eutrophication, marine eutrophication, terrestrial ecotoxicity, freshwater ecotoxicity, marine ecotoxicity, human carcinogenic toxicity, human non-carcinogenic toxicity, land use, mineral resource scarcity, fossil resources scarcity, water consumption*; dampak yang ditimbulkan proses produksi minyak dan gas bumi pada PPP PT. X mecakup 3 kategori dampak yakni *global warming, stratospheric ozone depletion, terrestrial acidification*.

Sementara itu, pada metode CML IA-*Baseline*, dari 11 kategori dampak yakni *abiotic depletion non fossil, abiotic depletion fossil fuels, global warming 100a, ozone layer depletion, human toxicity, fresh water aquatic ecotox., marine aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity, photochemical oxidation, acidification, eutrophication*; dampak yang ditimbulkan proses produksi minyak dan gas bumi pada PPP mecakup 5 kategori dampak yakni *global warming 100a, human toxicity photochemical oxidation, acidification, eutrophication*.

a. Global Warming

Berdasarkan, *Intergovernmental Panel on Cimate Change* (IPCC) dampak ini juga dapat ditunjukkan sebagai *Global Warming Potential* selama 100 tahun (GWP100). *Global warming* sebagai dampak lingkungan dalam bentuk total emisi GRK yang dilepas ke atmosfer dan dinyatakan dalam satuan kg CO_2 eq.

Dari hasil analisis karakterisasi menggunakan metode ReCiPe 2016, didapatkan nilai *global warming* sebesar 54,28 kg CO_2 eq. Sedangkan, dengan metode CML IA-*Baseline* sebesar 52,06 kg CO_2 eq. Unit penghasil dampak *global warming* terbesar baik dengan metode ReCiPe 2016 maupun CML IA-*Baseline* adalah *gas compressor* yakni sebesar 35,78 kg CO_2 eq dan 35,59 kg CO_2 eq.

Nilai pada kedua metode ini berbeda karena faktor karakterisasi yang berbeda. Faktor karakterisasi metode ReCiPe 2016 untuk seluruh kategori dampak yang disediakan berskala global sementara faktor karakterisasi metode CML IA-*Baseline* untuk kategori dampak *global warming* masih berskala eropa. Hasil karakterisasi berupa dampak yang dihasilkan dan unit proses yang berkontribusi terhadap dampak dapat dilihat pada **Gambar 4.11**, berikut penjelasannya.

b. Stratospheric Ozone Depletion

Kategori dampak ini membahas mengenai penipisan lapisan ozon yang menyebabkan lebih banyak sinar UV menembus atmosfer bumi. Kategori dampak ini dinyatakan dalam jumlah gas penyebab penipisan lapisan ozon yang dilepaskan ke bumi dengan satuan kg CFC-11 eq.

Dari hasil analisis karakterisasi menggunakan metode ReCiPe 2016, didapatkan nilai *stratospheric ozone depletion* sebesar 3,44 x 10^{-5} kg CFC-11 eq. Unit penghasil dampak *stratospheric ozone depletion* terbesar adalah *gas compressor* dengan nilai dampak 3,04 x 10^{-5} kg CFC-11 eq.

c. Acidification

Kategori dampak ini membahas mengenai proses pembentukan hujan asam akibat gas asam seperti sulfur dioksida (SO_2) yang bereaksi dengan air yang ada di atmosfer. Kategori dampak ini dinyatakan dalam satuan kg SO_2 eq.

Dari hasil analisis karakterisasi didapatkan nilai *acidification* atau jumlah zat penyebab asidifikasi yang terlepas ke udara menggunakan metode ReCiPe 2016 sebesar 0,034 kg SO_2 eq dan dengan menggunakan metode CML IA-*Baseline* sebesar 0,046 kg SO_2 eq. Unit penghasil dampak *acidification* terbesar baik dengan metode ReCiPe 2016 maupun CML IA-*Baseline* adalah *gas compressor* dengan nilai dampak 0,030 kg SO_2 eq dan 0,040 kg SO_2 eq.

Nilai yang didapatkan dari kedua metode ini berbeda karena kategori dampak *acidification* pada metode CML IA-*Baseline* mencakup jumlah zat penyebab asidifikasi secara keseluruhan baik pada daerah terestrial (tanah atau permukaan tanah), air

tanah, maupun air permukaan. Sementara itu, pada metode ReCiPe 2016 hanya mencakup terestrial (*terrestrial acidification*).

d. Human Toxicity

Kategori dampak ini membahas adanya potensi efek toksik (racun) kepada manusia yang disebabkan oleh polutan yang mencemari lingkungan. Kategori dampak ini dinyatakan sebagai jumlah zat dengan potensi efek toksik kepada manusia yang dilepaskan ke bumi dalam satuan kg 1,4-dichlorobenzene eq atau kg 1,4-DB eq.

Dari hasil analisis karakterisasi menggunakan metode CML IA-*Baseline*, didapatkan nilai *human toxicity* sebesar 0,11 kg 1,4-DB eq. Unit penghasil dampak *human toxicity* terbesar adalah *gas compressor* yakni sebesar 0,10 kg 1,4-DB eq.

e. Photochemical Oxidation

Kategori dampak ini membahas tentang pembentukan zat reaktif akibat reaksi *volatile organic compound* (VOC) dan nitrogen oksida yang terkena panas sinar matahari yang merugikan kesehatan manusia dan ekosistem. Kategori dampak *photochemical oxidation* dinyatakan dalam satuan kg ethylene eq (kg C_2H_4 eq).

Dari hasil analisis karakterisasi menggunakan metode CML IA-*Baseline*, didapatkan jumlah zat penyebab *photochemical oxidation* yang dilepaskan ke udara sebesar 0,002 kg C_2H_4 eq. Unit penghasil dampak *photochemical oxidation* terbesar adalah *flare* yakni sebesar 0,0006 kg C_2H_4 eq.

f. Eutrophication

Kategori dampak ini membahas mengenai pencemaran seperti pertumbuhan alga berlebih yang disebabkan nutrient yag berlebihan di lingkungan. Kategori dampak ini dinyatakan dalam satuan kg PO_4 eq.

Dari hasil analisis karakterisasi menggunakan metode CML IA-*Baseline*, didapatkan jumlah zat penyebab *eutrophication* yang terlepas sebesar 0,013 kg PO_4 eq. Unit penghasil dampak *eutrophication* terbesar adalah *gas compression* yakni sebesar 0,010 kg PO_4 eq.

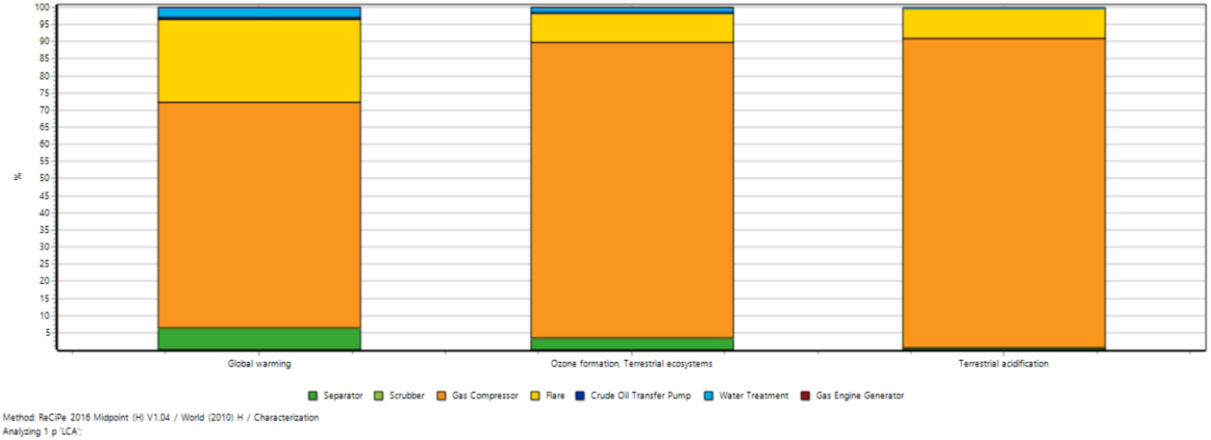
Kategori dampak yang dihasilkan pada penelitian ini sesuai dengan perkiraan dari data *mass balance* dan masih sama dengan dampak yang dihasilkan pada kajian LCA PPP PT. X yang pernah dilakukan sebelumnya, yakni kajian LCA tahun 2019, dimana kajian LCA ini mengolah data tahun 2018. Selain hasil kategori dampak yang sama, unit penghasil dampak terbesar untuk tiap kategori dampak juga sama yakni unit *gas compressor*, kecuali untuk dampak *photochemical oxidation* dengan *flare* sebagai penghasil dampak terbesar.

Jika dilihat dari nilai dampak yang ditimbulkan untuk total produk yang dihasilkan di PPP dalam setahun, nilai dampak pada tahun 2020 mengalami penurunan dari nilai dampak pada tahun 2018. Hal ini kemungkinan besar disebabkan karena adanya program efisiensi energi dan emisi yang mulai diterapkan di akhir tahun 2018. Program ini merupakan program *compressor washing* melalui proses injeksi kimia *antifoulant* untuk mencegah terbentuknya *polymer* sehingga pengotor yang menempel pada rotor kompresor dapat terlepas. Penerapan program ini bertujuan untuk mengurangi konsumsi energi sebesar 5% dan menurut PT. X, berhasil menghasilkan kenaikan efisiensi sebesar 10%.

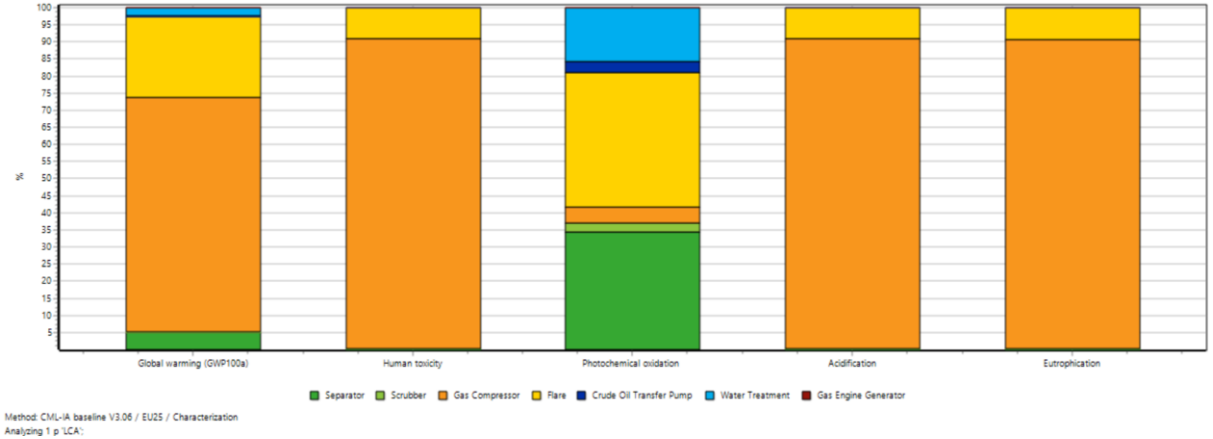
Tabel 4.5 Perbandingan Nilai Karakterisasi Dampak Hasil LCA

No	Kategori Dampak	Satuan	Nilai Kategori Dampak	
			Kajian LCA tahun 2019	Kajian LCA tahun 2021*
Metode ReCipe 2016				
1.	Global warming	kg CO_2 eq	117,613	54,285
2.	Terrestrial acidification	kg SO_2 eq	0,064	0,034
3.	Stratospheric ozone depletion	kg CFC_{11} eq	0,00007	0,00003
Metode CML IA-*Baseline*				
1.	Global warming (GWP100a)	kg CO_2 eq	114,18	52,063
2.	Acidification	kg SO_2 eq	0,089	0,046
3.	Eutrophication	kg PO_4--- eq	0,025	0,013
4.	Photochemical oxidation	kg C_2H_4 eq	0,008	0,002
5.	Human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,213	0,111

Berikut hasil karakterisasi dampak yang dihasilkan proses produksi migas di PPP PT. X untuk tiap metode.



Gambar 4.11 Hasil Karakterisasi Dampak dengan Metode ReCiPe 2016



Gambar 4.12 Hasil Karakterisasi Dampak dengan Metode CML IA-*Baseline*

4.2.3.2 *Normalization*

Tahap normalisasi dilakukan untuk menciptakan satuan yang seragam untuk tiap kategori dampak dengan tujuan agar kategori dampak dapat dibandingkan dengan satu sama lain. Tahap ini dilakukan dengan mengalikan nilai hasil karakterisasi dengan faktor normalisasi secara otomatis oleh *software* SimaPro. Berikut faktor normalisasi masing-masing kategori dampak untuk tiap metode penilaian dampak. Sama seperti hasil dari tahap karakterisasi, hasil normalisasi dampak ditunjukkan dengan unit fungsional per ton produk.

Tabel 4.6 Faktor Normalisasi Metode ReCiPe 2016

No	Impact category	Normalization Factor
1	Global warming	0.0001252
2	Stratospheric ozone depletion	16.7
3	Fine particulate matter formation	0.0391
4	Terrestrial acidification	0.0244
5	Freshwater eutrophication	1.54
6	Marine eutrophication	0.217
7	Terrestrial ecotoxicity	0.000965
8	Freshwater ecotoxicity	0.815
9	Marine ecotoxicity	0.969
10	Human carcinogenic toxicity	0.361
11	Human non-carcinogenic toxicity	0.00671
12	Land use	0.000162
13	Mineral resource scarcity	0.00000833
14	Fossil resource scarcity	0.00102
15	Water consumption	0.00375

Tabel 4.7 Faktor Normalisasi Metode CML IA-*Baseline*

No	Impact category	Normalization Factor
1	Abiotic depletion	5,77E-6
2	Abiotic depletion (fossil fuels)	2,82E-13

3	Global warming (GWP100a)	3,88E-12
4	Ozone layer depletion (ODP)	9,72E-7
5	Human toxicity	5,31E-12
6	Fresh water aquatic ecotox.	1,33E-10
7	Marine aquatic ecotoxicity	3,14E-13
8	Terrestrial ecotoxicity	1,09E-9
9	Photochemical oxidation	5,49E-9
10	Acidification	1,49E-9
11	Eutrophication	1,92E-9

Berdasarkan hasil yang didapatkan pada tahap normalisasi, dari dampak lingkungan yang dihasilkan proses produksi migas di PPP yaitu *global warming, stratospheric ozone depletion, terrestrial acidification* untuk **Metode ReCiPe 2016**; dampak terbesar yang ditimbulkan adalah *Global Warming* dengan nilai mencapai 6,80 x 10^{-3}. Unit penghasil dampak *global warming* terbesar adalah unit *gas compressor* senilai 4,48 x 10^{-3}; diikuti oleh unit *Flare* sebesar 1,65 x 10^{-3} dan *Separato*r sebesar 0,41 x 10^{-3}. Dampak *global warming* sebagai dampak lingkungan dalam bentuk total emisi GRK yang dilepas ke atmosfer dan menyebabkan peningkatan suhu rata-rata permukaan bumi. Dampak ini timbul akibat besarnya emisi GRK yang dihasilkan tiap unit, terutama karena penggunaan bahan bakar atau energi listrik, dimana ketika bahan bakar tersebut digunakan dalam proses pembakaran, maka dihasilkan emisi GRK dan konvensional.

Dampak terbesar kedua setelah *global warming* adalah *terrestrial acidification* senilai 8,22 x 10^{-4}; dengan kontribusi terbesar oleh unit *gas compressor* senilai 7,43 x 10^{-4}; unit *flare* senilai 7,27 x 10^{-5}; dan unit separator sebesar 3,70 x 10^{-6}. Dampak ini menunjukkan senyawa kimia penyebab asidifikasi yang terlepas ke udara, terserap ke dalam air/tanah. Asidifikasi atau umumnya hujan asam dapat menyebabkan peningkatan derajat keasaman (pH) lingkungan sehingga berada pada level dibawah 7. Hujan asam sendiri biasanya disebabkan oleh emisi konvensional SO_x atau sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x, umumnya nitrogen monoksida atau NO dan nitrogen dioksida atau NO_2) yang

timbul akibat pembakaran bahan bakar maupun pembakaran gas seperti pada unit *flare*, dimana emisi tersebut dapat bereaksi dengan molekul air di atmosfer dan memproduksi H_2SO_4 dan HNO_3.

Sementara itu, dampak *stratospheric ozone depletion* yang ditimbulkan sebesar 5,74 x 10^{-4} dengan kontribusi terbesar oleh unit *gas compressor* senilai 5,07 x 10^{-4}; unit *flare* senilai 6,70 x 10^{-4}; dan unit separator sebesar 1,16 x 10^{-7}. Kategori dampak yang dinyatakan dalam jumlah zat penyebab penipisan lapisan ozon yang dilepaskan ke bumi ini, kontributor umumnya adalah emisi N_2O akibat proses pembakaran bahan bakar maupun pembangkit listrik.

Pada **metode CML IA-*Baseline***, dari dampak lingkungan yang dihasilkan proses produksi migas di PPP yaitu *global warming 100a, human toxicity, photochemical oxidation, acidification, eutrophication*; dampak terbesar yang dihasilkan adalah *Global Warming 100a* dengan nilai mencapai 1,04 x 10^{-11}. Unit dengan kontribusi terbesar pada dampak ini adalah unit *gas compressor* senilai 7,08 x 10^{-12}; diikuti oleh unit *flare* sebesar 2,45 x 10^{-12} dan *separato*r sebesar 5,10 x 10^{-13}.

Dampak terbesar kedua setelah *global warming 100a* adalah *acidification* dengan nilai mencapai 1,04 x 10^{-11} dengan kontribusi terbesar yakni oleh unit *gas compressor* senilai 1,49 x 10^{-12}; diikuti oleh unit *flare* sebesar 1,47 x 10^{-13} dan *separato*r sebesar 3,42 x 10^{-15}.

Selain itu, dampak *eutrophication* yang ditimbulkan mencapai 9,77 x 10^{-13}. Unit dengan kontribusi terbesar pada dampak ini adalah unit *gas compressor* senilai 8,85 x 10^{-13}; diikuti oleh unit *flare* sebesar 8,88 x 10^{-14} serta *separato*r sebesar 1,91 x 10^{-15}. Dampak ini membahas mengenai peningkatan jumlah nutrien (N dan P) berlebih yang dapat menyebabkan pertumbuhan alga berlebih (eutrofikasi). Kategori dampak yang dinyatakan dalam jumlah zat penyebab eutrofikasi yang dilepaskan ke bumi ini kontributor dampak umumnya berasal dari emisi NO_2 dan N_2O akibat penggunaan bahan bakar gas/energi listrik.

Dampak *photochemical oxidation* yang ditimbulkan mencapai 1,87 x 10^{-13} dengan kontribusi terbesar oleh unit *flare* sebesar 7,37 x 10^{-14}; diikuti oleh unit *separato*r sebesar 6,45 x 10^{-14}; dan *water treatment* senilai 2,95 x 10^{-14}. Dampak ini membahas

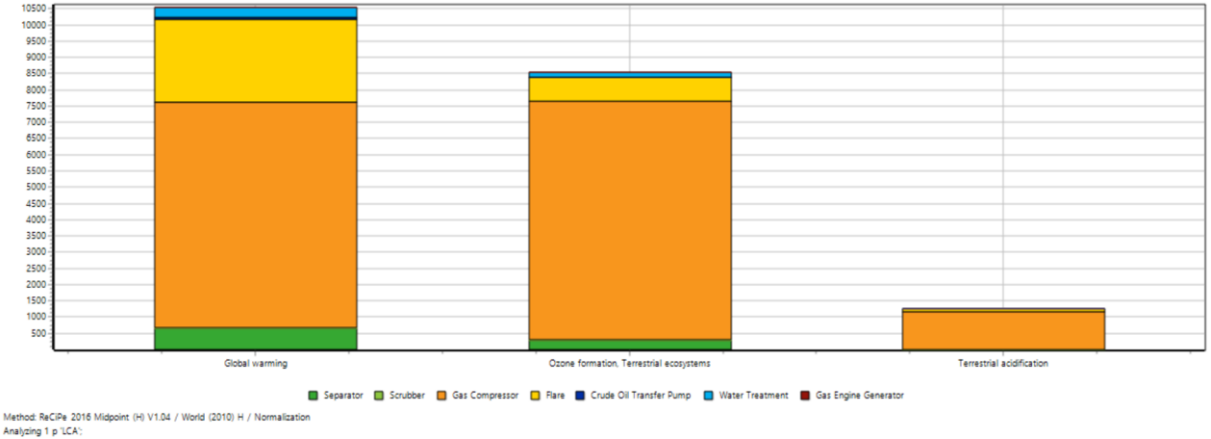
mengenai pembentukan reaksi fotokimia dari campuran polutan udara nitrogen oksida (NOx) dengan *volatile organic compound* (VOC). Kategori dampak yang menunjukkan banyaknya zat penyebab *photochemical oxidation* atau *summer smog* ke lingkungan ini kontributor dampak umumnya adalah emisi NO_2 serta emisi *fugitive* nmVOC akibat proses pembakaran bahan bakar maupun energi listrik.

Dampak *human toxicity* yang ditimbulkan mencapai 1,43 x 10^{-14}. Unit dengan kontribusi terbesar penyebab dampak ini adalah unit *gas compressor* yakni senilai 1,30 x 10^{-14}; diikuti oleh unit *flare* sebesar 1,28 x 10^{-15} dan *separato*r sebesar 2,98 x 10^{-17}. Dampak ini menunjukkan banyaknya substansi beracun (toksik) terhadap manusia yang dapat terlepas ke lingkungan. Kontributor dampak ini umumnya adalah emisi NO_2 dan SO_2 akibat proses pembakaran bahan bakar maupun energi listrik.

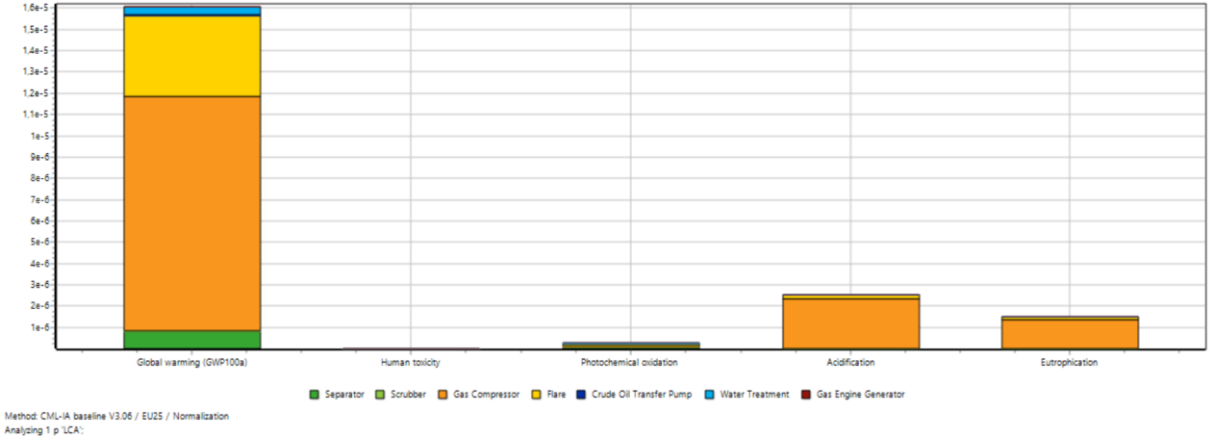
Jika dibandingkan dengan kajian LCA yang pernah dilakukan oleh PT. X sebelumnya, hasil kategori dampak, dampak terbesar, dan unit penghasil dampak terbesar yang didapatkan pada penelitian ini, baik dengan metode ReCiPe 2016 maupun CML IA-*Baseline,* serupa dengan hasil yang didapatkan pada kajian LCA sebelumnya. Kategori dampak yang dihasilkan yakni *global warming, acidification, stratospheric ozone depletion, eutrophication, photochemical oxidation,* dan *human toxicity*. Dampak terbesar atau *hotspot* dampak yang didapatkan adalah *global warming*. Unit proses sebagai kontributor utama penghasil dampak adalah *gas compressor*.

Masih dari hasil yang didapatkan, meskipun pada beberapa unit seperti *separator, scrubber, crude oil transfer pump,* dan *water treatment* tidak ada inventarisasi data emisi yang ditimbulkan, kontribusi terhadap tiap kategori dampak yang dihasilkan masih dapat diidentifikasi karena *database* yang dipilih saat melakukan analisis LCA dengan *software* SimaPro, yaitu *ecoinvent* dimana *database* ini telah tersedia langsung dan terintegrasi pada *software*.

Nilai normalisasi dampak tiap metode dapat dilihat pada gambar-gambar berikut.



Gambar 4.13 Hasil Normalisasi Dampak dengan Metode ReCiPe 2016



Gambar 4.14 Hasil Normalisasi Dampak dengan Metode CML IA-*Baseline*

4.2.4 Interpretasi Hasil

Interpretasi siklus hidup merupakan tahap akhir dari LCA dimana hasil LCI atau LCIA diringkas dan didiskusikan sebagai dasar dalam pengambilan kesimpulan, pemberian rekomendasi, dan pengambilan keputusan sesuai tujuan dan ruang lingkup yang telah ditetapkan sebelumnya (Sirait, 2020).

Interpretasi data juga bertujuan untuk mengetahui titik *hotspot* atau titik dengan dampak terbesar dari suatu proses industri. Tahap ini terdiri atas beberapa unsur yaitu identifikasi isu penting dan evaluasi. Tujuan identifikasi isu penting adalah untuk menyusun hasil dari tahap LCI dan LCIA sesuai dengan definisi tujuan dan lingkup yang telah ditentukan. Pada tahap evaluasi dilakukan pemeriksaan kelengkapan, sensitivitas dan konsistensi (Nugraha *et al.*, 2018).

4.2.4.1 Interpretasi Data

Interpretasi data meliputi penjabaran hasil analisis data untuk menjawab permasalahan yang sedang diteliti. Tahap ini dilakukan untuk mengetahui titik *hotspot* atau titik dengan dampak terbesar dari proses produksi minyak dan gas di PPP PT. X. Berikut perangkuman hasil LCIA meliputi hasil kategori dampak dan total nilai dampak dari yang terbesar hingga terkecil menurut tahap karakterisasi dan normalisasi.

Tabel 4.8 Hasil Analisis LCIA Berdasarkan Kategori Dampak

No	Impact category	Characterization		Normalization
		amount	unit	
ReCiPe 2016				
1	Global warming	54,285	kg CO2 eq	$6,80 \times 10^{-3}$
2	Terrestrial acidification	0,034	kg SO2 eq	$0,82 \times 10^{-3}$
3	Stratospheric ozone depletion	0,00003	kg CFC11 eq	$0,57 \times 10^{-3}$
CML IA-*Baseline*				
1	Global warming (GWP100a)	52,063	kg CO_2 eq	$1,04 \times 10^{-11}$
2	Acidification	0,046	kg SO_2 eq	$1,64 \times 10^{-12}$
3	Eutrophication	0,013	kg PO_4--- eq	$9,77 \times 10^{-13}$
4	Photochemical oxidation	0,002	kg C_2H_4 eq	$1,87 \times 10^{-13}$

5	Human toxicity	0,111	kg 1,4-DB eq	$1,43 \times 10^{-14}$

Tabel 4.9 Hasil Analisis LCIA Berdasarkan Unit Proses

ReCiPe 2016			CML IA-*Baseline*	
No	**Unit**	**Total Nilai Dampak**	**Unit**	**Total Nilai Dampak**
1	Gas Compressor	$5,73 \times 10^{-3}$	Gas Compressor	$9,48 \times 10^{-12}$
2	Flare	$1,78 \times 10^{-3}$	Flare	$2,76 \times 10^{-12}$
3	Separator	$4,16 \times 10^{-4}$	Separator	$5,80 \times 10^{-13}$
4	Water Treatment	$1,90 \times 10^{-4}$	Water Treatment	$2,65 \times 10^{-13}$
5	Crude Oil Transfer Pump	$3,99 \times 10^{-5}$	Crude Oil Transfer Pump	$5,57 \times 10^{-14}$
6	Scrubber	$3,19 \times 10^{-5}$	Scrubber	$4,45 \times 10^{-14}$
7	Gas Engine Generator	$5,25 \times 10^{-7}$	Gas Engine Generator	$8,70 \times 10^{-16}$

Berdasarkan hasil LCIA, dapat diketahui bahwa *hotspot* dampak atau dampak terbesar yang dihasilkan dari proses produksi minyak dan gas bumi di PPP PT. X adalah dampak *global warming* yang mencapai 54,285 kg CO_2 eq (karakterisasi metode ReCiPe 2016) dan/atau 52,063 kg CO_2 eq (karakterisasi metode CML IA-*Baseline*). Dampak ini timbul akibat besarnya emisi GRK yang dihasilkan tiap unit, terutama karena proses pembakaran bahan bakar atau energi listrik.

Dampak terbesar setelah *global warming* adalah *acidification* sebesar 0,034 kg SO_2 eq (karakterisasi metode ReCiPe 2016) dan/atau 0,046 kg SO_2 eq. Penyebab utama dampak ini disebabkan adalah emisi konvensional SO_x yang timbul akibat pembakaran bahan bakar maupun pembakaran gas seperti pada unit *flare*.

Sementara itu, *hotspot* proses atau proses penghasil dampak terbesar adalah unit *gas compressor* dengan total nilai dampak hasil normalisasi sebesar $5,73 \times 10^{-3}$ (metode ReCiPe 2016) dan/atau $9,48 \times 10^{-12}$ (metode CML IA-*Baseline*). Hal ini tidak lepas dari besarnya penggunaan bahan bakar berupa *gas fuel* oleh *gas compressor* yakni sebesar 19460,56 ton atau $1,25 \times 10^{-2}$ per

ton produk; sehingga menghasilkan emisi GRK maupun emisi konvensional yang besar pula.

Penghasil dampak terbesar setelah *gas compressor* adalah unit *flare* dengan total nilai dampak hasil normalisasi sebesar 1,78 x 10^{-3} (metode ReCiPe 2016) dan/atau 2,76 x 10^{-12} (metode CML IA-*Baseline*); dimana jumlah gas yang dibakar oleh *flare* mencapai 4585,71 ton atau 2,96 x 10^{-3} per ton produk dan menyebabkan besarnya timbulan emisi GRK maupun emisi konvensional.

4.2.4.2 Evaluasi Data

Pada tahap evaluasi dilakukan pemeriksaan kelengkapan, konsistensi, dan analisis sensitivitas. Tahap ini dilakukan untuk membangun dan meningkatkan keandalan dari hasil analisis LCA.

a. *Completeness Check*

Berdasarkan ISO 14044, pemeriksaan kelengkapan adalah proses verifikasi untuk memastikan informasi dari tahapan penilaian daur hidup sudah cukup untuk pengambilan keputusan sesuai dengan definisi tujuan dan ruang lingkup (Laurent *et al.*, 2020). Tujuan dari pemeriksaan kelengkapan adalah memastikan semua informasi relevan dan data yang dibutuhkan untuk interpretasi tersedia dan lengkap. Jika terdapat informasi relevan yang hilang atau tidak lengkap, tahap LCI dan LCIA sebelumnya sebaiknya ditinjau kembali untuk memenuhi tujuan dan lingkup LCA, atau tujuan dan lingkup disesuaikan dengan data yang ada.

Tabel 4.10 *Completeness Check* Berdasarkan SNI ISO 14044

Deskripsi	Kelengkap-an	Keterangan
Tujuan	V	Sudah sesuai tujuan perusahaan
Scope	V	Sudah sesuai dengan lingkup analisis LCA
Alur Proses Produksi	V	Sudah sesuai PFD perusahaan
Mass Balance	V	Sudah sesuai *inventory*
Bahan Baku	V	Sudah sesuai *inventory*
Pemakaian Energi/Bahan Bakar	V	Sudah sesuai *inventory*
Bahan Kimia	V	Sudah sesuai *inventory*
Emisi	V	Sudah sesuai *inventory*

Output (Produk)	V	Sudah sesuai *inventory*
Klarifikasi Data	V	Sudah dilakukan klarifikasi ke pihak perusahaan
Observasi Data	V	Sudah dilakukan observasi data

b. *Consistency Check*

Berdasarkan ISO 14044, pemeriksaan konsistensi merupakan proses verifikasi bahwa asumsi, metode, dan data telah diterapkan secara konsisten dalam seluruh kajian dan sesuai dengan definisi tujuan dan lingkup yang ditetapkan sebelum kesimpulan diambil. Pemeriksaan ini bertujuan untuk memastikan bahwa metode, prosedur, dan pengolahan data dilakukan dengan cara yang konsisten dari awal hingga akhir.

Tabel 4.11 *Consistency Check* Berdasarkan SNI ISO 14044

Pemeriksaan Konsistensi	Konsistensi	Keterangan
Sumber Data	V	Data primer 100% dari perusahaan
Akurasi Data	V	Akurasi data baik, karena ada bukti *monitoring* dan hasil perhitungan perusahaan
Umur Data	V	Data yang digunakan 1 tahun produksi (pada tahun 2020)
Cakupan Teknologi	V	Unit proses yang dianalisis yaitu PPP (Separator, Scrubber, Gas Compression, Flare, Gas Engine Generator, Crude Oil Transfer Pump, Water Treatment)
Cakupan Waktu	V	Aktual di tahun 2020
Metode yang Digunakan	V	Menggunakan 2 metode analisis yaitu CML IA-*Baseline* dan ReCiPe 2016
Cakupan Geografis	V	Indonesia

c. *Sensitivity Check*

Berdasarkan ISO 14044, pemeriksaan sensitivitas bertujuan untuk menilai keandalan hasil akhir dan kesimpulan dengan menentukan apakah penilaian dampak terhadap lingkungan dipengaruhi oleh ketidakpastian dalam data atau metode yang digunakan dalam studi LCA. Dengan demikian stabilitas data dapat diketahui melalui analisa sensitivitas.

Analisis sensitivitas adalah prosedur sistematis untuk memperkirakan pengaruh dari pilihan metode dan data terhadap hasil dari suatu kajian. Analisis sensitivitas dilakukan dengan membandingkan hasil yang diperoleh dari asumsi, metode atau data tertentu dengan hasil yang diperoleh dari asumsi, metode atau data yang telah diubah. Sensitivitas dinyatakan sebagai persentase perubahan atau deviasi mutlak dari hasil.

Dalam analisis sensitivitas, umumnya yang diperiksa adalah pengaruh hasil variasi berbagai asumsi dan data dengan kisaran tertentu ±10 sampai 25%. Hasil analisis awal dengan hasil dari data yang divariasikan tersebut kemudian dibandingkan.

Pada penelitian ini, dampak terbesar dan unit yang merupakan kontributor utama dampak tersebut adalah *global warming* dan *gas compressor*. Pada unit *gas compressor,* emisi terbesar yang dihasilkan adalah emisi CO_2. Berdasarkan hal tersebut, perhitungan analisis sensitivitas dilakukan dengan memberikan variasi berupa penambahan dan pengurangan nilai emisi CO_2 yang ditimbulkan *gas compressor* masing-masing sebesar 10%. Hasil perubahan data adalah sebagai berikut.

Tabel 4.12 Hasil Variasi Data untuk Analisis Sensitivitas

Material	ton CO_2/tahun		
	Normal	+10%	-10%
Emisi CO_2	$3{,}45 \times 10^{-2}$	$3{,}80 \times 10^{-2}$	$3{,}11 \times 10^{-2}$

Setelah didapatkan hasil variasi data, dilakukan simulasi LCA kembali dengan SimaPro untuk mengetahui perubahan nilai dampak setelah adanya variasi data pada unit-unit proses produksi migas di PPP PT. X. Kategori dampak yang diteliti pada analisis sensitivitas ini ialah *global warming*. Berikut hasil penilaian dampak *global warming* setelah adanya variasi *input* data.

Tabel 4.13 Perbandingan Hasil Dampak *Global Warming*

Metode	Besar Dampak		
	Normal (a)	+10% (b)	-10% (c)
ReCiPe 2016	$6{,}80 \times 10^{-3}$	$7{,}25 \times 10^{-3}$	$6{,}34 \times 10^{-3}$
CML IA-*Baseline*	$1{,}04 \times 10^{-11}$	$1{,}11 \times 10^{-11}$	$0{,}96 \times 10^{-11}$

Dengan metode CML IA-*Baseline*, hasil normalisasi dampak *global warming* dengan data awal adalah 1,04 x 10^{-11}. Sementara itu, apabila data ditambah 10%, dampaknya menjadi 1,11 x 10^{-11} dan apabila dikurang 10% menjadi 0,96 x 10^{-11}. Deviasi pada masing-masing variasi data adalah sebagai berikut.

% Deviasi (+10%) = [(b) – (a) / (a)]

$$= \frac{1{,}11 - 1{,}04}{1{,}11} \times 100\%$$

= 6,93 %

% Deviasi (-10%) = [(a) – (c) / (a)]

$$= \frac{1{,}04 - 0{,}96}{0{,}96} \times 100\%$$

= 6,93 %

Berikut data %deviasi selengkapnya pada **Tabel 4.14**.

Tabel 4.14 Analisis Sensitivitas

Metode	Deviasi (+10%)	Deviasi (-10%)
ReCiPe 2016	6,65	6,65
CML IA-*Baseline*	6,93	6,93

Dari analisis sensitivitas, dapat diketahui bahwa sensitivitas data untuk metode ReCiPe 2016 adalah sebesar 6,65% dan untuk metode CML IA-*Baseline* adalah sebesar 6,93%. Berdasarkan SNI ISO 14044, nilai data dikatakan signifikan apabila persentasenya berada dibawah 25%. Berdasarkan data yang diolah bersifat signifikan, sehingga menambah tingkat keyakinan pada kesimpulan.

4.3 *Benchmarking* Perusahaan

Benchmarking bertujuan untuk mengetahui posisi perusahaan terkait kinerja lingkungannya dengan membandingkan kinerja pengelolaan lingkungan perusahaan dengan perusahaan sejenis lainnya. Pada penelitian ini, dilakukan perbandingan standar nilai (*benchmarking*) antara PT. X dengan industri sejenis mengenai tingkat intensitas energi dan emisi, pada skala nasional dan dunia. Mengacu pada Permen LHK Nomor 1 Tahun 2021, *benchmarking* skala nasional menggunakan pemeringkatan mengikuti kriteria:

a. peringkat 25% teratas
b. peringkat 50% rata-rata
c. peringkat 25% terbawah

PT. X berada di peringkat 25% teratas untuk intensitas energi, emisi GRK, dan NO_x skala dunia. Sementara itu, perusahaan berada di peringkat 50% rata-rata untuk intensitas energi, emisi GRK, emisi SO_x, dan emisi NO_x skala nasional, serta emisi SO_x skala dunia. Berdasarkan hasil *benchmarking* perusahaan yang masih berada di peringkat 50% rata-rata, diperlukan alternatif perbaikan sebagai bentuk *continuous improvement*. Berikut penjelasan selengkapnya mengenai *benchmarking* perusahaan untuk intensitas energi dan emisi.

4.3.1 *Benchmarking* Efisiensi Energi

Benchmarking efisiensi energi tiap tahun dilakukan dengan membandingkan intensitas energi, yang merupakan penggunaan energi tiap satuan produk yang dihasilkan. Untuk mengetahui penggunaan energi tiap satuan produk digunakan rumus:

$$Et = \frac{\sum_i^n Ei}{\sum_i^n Pi}$$

Dimana:

Et = Penggunaan energi tiap satuan produk (GJ/TOE)
Ei = Penggunaan energi pada bulan ke-i (GJ)
Pi = Produksi minyak dan gas pada bulan ke-i (TOE)
n = Jumlah bulan dalam satu tahun (12 bulan)

Berdasarkan Laporan *Benchmarking* PT. X tahun 2020, total pemakaian energi PT. X pada tahun 2019 mencapai 2.090.944,76 GJ dan total produksi sebesar 1.410.922,93 TOE. Perhitungan nilai intensitas energi PT. X tahun 2019 adalah sebagai berikut.

$$\text{Intensitas energi} = \frac{total\ pemakaian\ energi\ (GJ)}{total\ produksi\ (TOE)}$$

$$= \frac{2.090.944{,}76\ GJ}{1.410.922{,}93\ TOE}$$

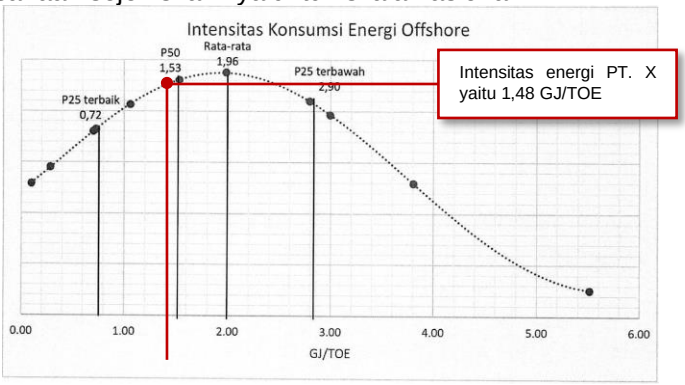
$$= 1{,}48\ \text{GJ/TOE}$$

4.3.1.1 Skala Nasional

Benchmarking skala nasional dilakukan dengan mengacu pada rentang nilai yang ditetapkan pada Peraturan Direktur Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan Nomor P.14/PPKL/SET/KUM.1/9/2020 Tentang Benchmarking Sektor Industri Minyak dan Gas Eksplorasi dan Produksi yaitu:

1. Peringkat 25% teratas = nilai intensitas energi ≤ 0,72 GJ/TOE
2. Peringkat 50% rata-rata = 0,72 GJ/TOE < nilai intensitas energi < 2,90 GJ/TOE
3. Peringkat 25% terbawah = 2,90 GJ/TOE ≤ nilai intensitas energi

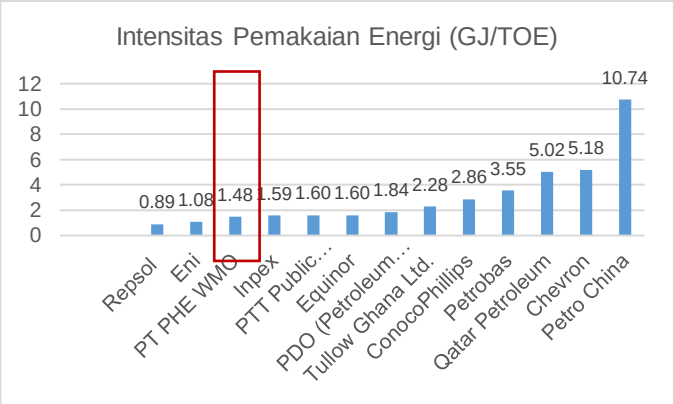
Dalam intensitas energi, PT. X dengan intensitas energi 1,48 GJ/TOE berada pada posisi **50% rata-rata** dibandingkan dengan perusahaan sejenis lainnya untuk skala nasional.



Gambar 4.15 *Benchmarking* Intensitas Energi Skala Nasional

4.3.1.2 Skala Dunia

Benchmarking skala dunia dilakukan dengan membandingkan intensitas energi PT. X pada 12 perusahaan sejenis dalam satuan GJ/TOE. Berdasarkan data yang telah dikumpulkan, PT. X berada pada posisi **25% teratas (peringkat 3 dari 13)** dibandingkan dengan perusahaan sejenis lainnya. Hasil *benchmarking* intensitas energi skala dunia selengkapnya dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.16 Benchmarking Intensitas Energi Skala Dunia

4.3.2 *Benchmarking* Penurunan Emisi

Benchmarking penurunan emisi tiap tahun dilakukan dengan membandingkan intensitas emisi, yakni emisi yang dihasilkan tiap satuan produk yang dihasilkan. Emisi yang dimaksud meliputi emisi GRK, SO_x, dan NO_x. Untuk mengetahui emisi yang dihasilkan tiap satuan produk dapat digunakan rumus:

$$Et = \frac{\sum_i^n Ei}{\sum_i^n Pi}$$

Dimana:

Et = Emisi yang dihasilkan tiap satuan produk (Ton CO_2eq/1000TOE)
Ei = Emisi yang dihasilkan pada bulan ke-i (Ton CO_2eq)
Pi = Produksi minyak dan gas pada bulan ke-i (1000TOE)
n = Jumlah bulan dalam satu tahun (12 bulan)

Berdasarkan Laporan *Benchmarking* PT. X tahun 2020, total emisi GRK PT. X pada tahun 2019 adalah sebesar 195.281,31 ton CO_{2eq}; emisi SO_x sebesar 271,88 ton SO_x; dan emisi NO_x sebesar 713,31 ton NO_x dengan total produksi sebesar 1.410.922,93 TOE. Berikut perhitungan nilai intensitas emisi GRK, SO_x, dan NO_x PT. X tahun 2019.

Intensitas emisi GRK $= \frac{beban\ emisi\ GRK\ (ton\ CO2eq)}{total\ produksi\ (TOE)}$

$= \frac{195.281{,}31\ \text{ton CO2eq}}{1.410.922{,}93\ TOE}$

= 0,13840 ton CO_{2eq}/TOE

= 138,40 ton CO_{2eq}/1000TOE

Intensitas emisi SO_x $= \frac{beban\ emisi\ SOx\ (ton\ SOx)}{total\ produksi\ (TOE)}$

$= \frac{271{,}88\ \text{ton SOx}}{1.410.922{,}93\ TOE}$

= 0,00019 ton SO_x/TOE

= 0,19 ton SO_x/1000TOE

Intensitas emisi NO_x $= \frac{beban\ emisi\ NOx\ (ton\ NOx)}{total\ produksi\ (TOE)}$

$= \frac{713{,}31\ \text{ton NOx}}{1.410.922{,}93\ TOE}$

= 0,0005 ton NO_x/TOE

= 0,5 ton NO_x/1000TOE

4.3.2.1 Skala Nasional

Benchmarking skala nasional dilakukan dengan mengacu pada Peraturan Direktur Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan Nomor P.14/PPKL/SET/KUM.1/9/2020 Tentang Benchmarking Sektor Industri Minyak dan Gas Eksplorasi dan Produksi. Peringkat kinerja perusahaan ditentukan berdasarkan rentang nilai intensitas emisi GRK yang sudah ditetapkan peraturan tersebut.

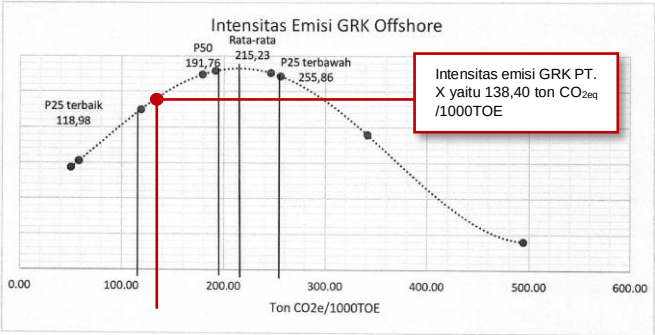
a. Emisi GRK

Ketentuan batas nilai intensitas emisi GRK berdasarkan peraturan yang berlaku adalah sebagai berikut.

1. Peringkat 25% teratas
   nilai intensitas emisi GRK ≤ 118,98 ton CO_{2eq}/1000TOE

2. Peringkat 50% rata-rata
   118,98 ton CO_{2eq}/1000TOE < nilai intensitas emisi GRK < 255,86 ton CO_{2eq}/1000TOE
3. Peringkat 25% terbawah
   255,86 ton CO_{2eq}/1000TOE ≤ nilai intensitas emisi GRK

Dalam intensitas emisi GRK, PT. X dengan intensitas emisi GRK 138,40 ton CO_{2eq}/1000TOE berada pada posisi **50% rata-rata** dibandingkan dengan perusahaan sejenis lainnya untuk skala nasional. Ilustrasi grafik dapat dilihat pada gambar berikut.



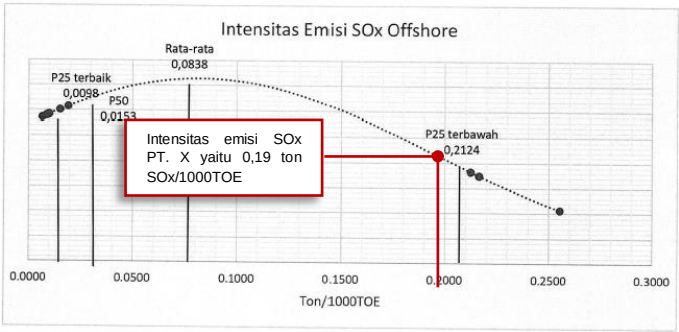
Gambar 4.17 *Benchmarking* Intensitas Emisi GRK Skala Nasional

b. Emisi SO_x

Ketentuan batas nilai intensitas emisi SO_x berdasarkan peraturan yang berlaku adalah sebagai berikut.

1. Peringkat 25% teratas
   nilai intensitas emisi SO_x ≤ 0,0098 ton SO_x/1000TOE
2. Peringkat 50% rata-rata
   0,0098 ton SO_x/1000TOE < nilai intensitas emisi SO_x < 0,2124 ton SO_x/1000TOE
3. Peringkat 25% terbawah
   0,2124 ton SO_x/1000TOE ≤ nilai intensitas emisi SO_x

Dalam intensitas emisi SO_x, PT. X dengan intensitas emisi SO_x 0,19 ton SO_x/1000TOE berada pada posisi **50% rata-rata** dibandingkan dengan perusahaan sejenis lainnya untuk skala nasional. Ilustrasi grafik dapat dilihat pada gambar berikut.



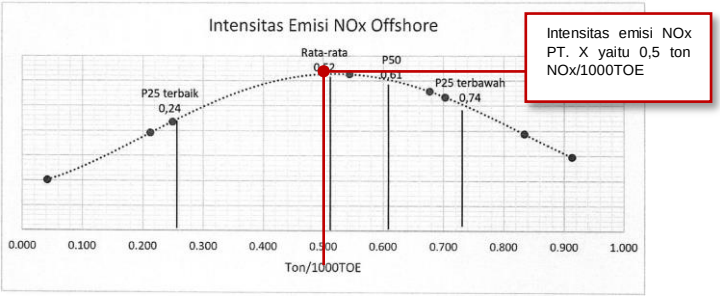
Gambar 4.18 *Benchmarking* Intensitas Emisi SO_x Skala Nasional

c. Emisi NO_x

Ketentuan batas nilai intensitas emisi NO_x berdasarkan peraturan yang berlaku adalah sebagai berikut.

1. Peringkat 25% teratas
   nilai intensitas emisi NO_x ≤ 0,24 ton NO_x/1000TOE
2. Peringkat 50% rata-rata
   0,24 ton NO_x/1000TOE < nilai intensitas emisi NO_x < 0,74 ton NO_x/1000TOE
3. Peringkat 25% terbawah
   0,74 ton NO_x/1000TOE ≤ nilai intensitas emisi NO_x

Dalam intensitas emisi NO_x, PT. X dengan intensitas emisi NO_x 0,5 ton NO_x/1000TOE berada pada posisi **50% rata-rata** dibandingkan dengan perusahaan sejenis lainnya untuk skala nasional. Ilustrasi grafik dapat dilihat pada gambar berikut.



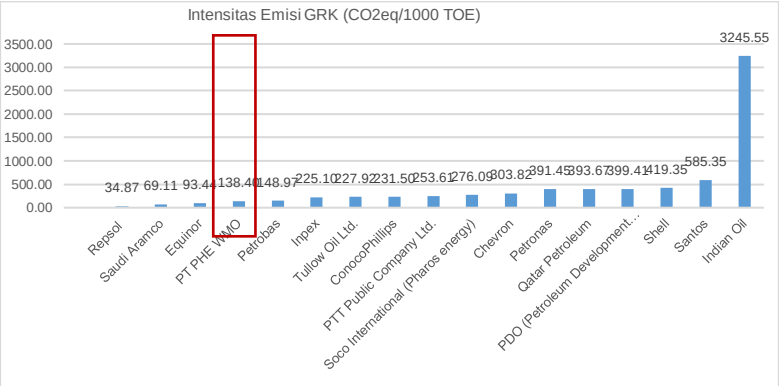
Gambar 4.19 *Benchmarking* Intensitas Emisi NO_x Skala Nasional

4.3.2.2 Skala Dunia

Benchmarking skala dunia dilakukan dengan membandingkan intensitas energi PT. X pada beberapa perusahaan sejenis dalam satuan ton CO_{2eq}/1000TOE untuk emisi GRK, ton SO_x/1000TOE untuk emisi SO_x, dan ton NO_x/1000TOE untuk emisi NO_x.

a. Emisi GRK

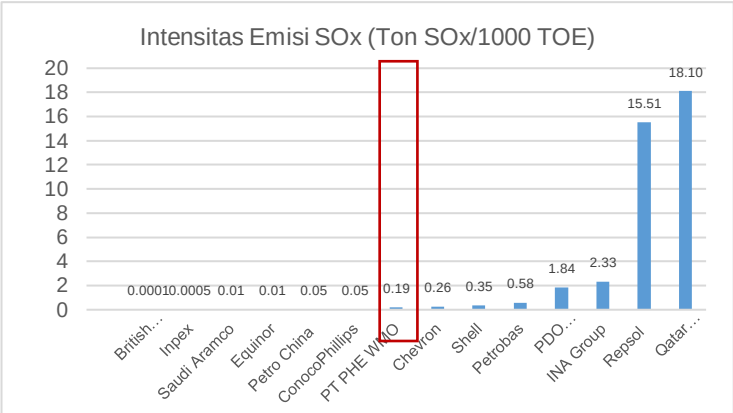
Benchmarking intensitas emisi GRK dilakukan dengan membandingkan intensitas emisi GRK PT. X dengan 17 perusahaan sejenis. Berdasarkan data yang telah dikumpulkan, PT. X dengan intensitas emisi GRK 138,40 ton CO_{2eq}/1000TOE berada pada posisi **25% teratas (peringkat 4 dari 17)** dibandingkan dengan perusahaan sejenis lainnya. Berikut hasil *benchmarking* intensitas emisi GRK PT. X skala dunia.



Gambar 4.20 *Benchmarking* Intensitas Emisi GRK Skala Dunia

b. Emisi SO_x

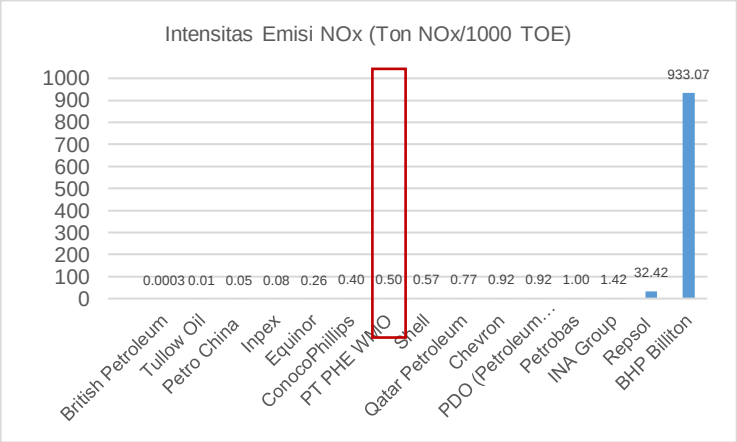
Benchmarking intensitas emisi SO_x dilakukan dengan membandingkan intensitas emisi SO_x PT. X dengan 14 perusahaan sejenis. Berdasarkan data yang telah dikumpulkan, PT. X dengan intensitas emisi SO_x 0,19 ton SO_x/1000TOE berada pada posisi **50% rata-rata (peringkat 7 dari 14)** dibandingkan dengan perusahaan sejenis lainnya. Berikut hasil *benchmarking* intensitas emisi SO_x PT. X skala dunia.



Gambar 4.21 *Benchmarking* Intensitas Emisi SO_x Skala Dunia

c. Emisi NO_x

Benchmarking intensitas emisi NO_x dilakukan dengan membandingkan intensitas emisi NO_x PT. X dengan 17 perusahaan sejenis. Berdasarkan data yang telah dikumpulkan, PT. X dengan intensitas emisi NO_x 0,5 ton NO_x/1000TOE berada pada posisi **25% teratas (peringkat 4 dari 15)** dibandingkan dengan perusahaan sejenis lainnya. Berikut hasil *benchmarking* intensitas emisi NO_x skala dunia.



Gambar 4.22 *Benchmarking* Intensitas Emisi NO_x Skala Dunia

4.4 Prioritas Penanganan Dampak

Dari analisis LCA, telah diketahui besar nilai dampak lingkungan sesuai kategori dampak yang dipilih dari setiap unit proses yang dianalisis. Kemudian, dapat diidentifikasi titik *hotspot* berupa kategori dampak dengan nilai tertinggi dan unit proses penyebab dampak tersebut. Titik *hotspot* inilah yang menjadi prioritas untuk penanganan dampak. Setelah ditentukan titik *hotspot*, dianalisis alternatif perbaikan yang dapat dilakukan untuk mereduksi dampak yang ditimbulkan terhadap lingkungan.

Dampak terbesar adalah *global warming* yang mencapai 54,285 kg CO_2 eq (karakterisasi metode ReCiPe 2016) dan/atau 52,06 kg CO_2 eq (karakterisasi metode CML IA-*Baseline*). Dampak ini timbul akibat besarnya emisi GRK yang dihasilkan tiap unit, terutama karena pembakaran bahan bakar. *Hotspot* proses atau unit yang menghasilkan total nilai dampak terbesar adalah unit *gas compressor* diikuti oleh *flare* dengan total nilai dampak sebesar $5,73 \times 10^{-3}$ dan $1,78 \times 10^{-3}$ (normalisasi metode ReCiPe 2016) atau sebesar $9,48 \times 10^{-12}$ dan $2,76 \times 10^{-12}$ (normalisasi metode CML IA-*Baseline*). Berdasarkan hasil tersebut, alternatif perbaikan yang akan direkomendasikan pada penelitian ini ditujukan untuk mengurangi dampak titik *hotspot* tersebut.

4.5 Analisis Alternatif Perbaikan

Rekomendasi alternatif perbaikan bertujuan sebagai upaya untuk mereduksi dampak lingkungan yang timbul akibat proses produksi migas di PPP PT. X. Rekomendasi alternatif perbaikan yang diajukan kali ini berasal dari hasil studi literatur dan mengacu pada hasil analisis LCA. Berdasarkan prioritas penanganan dampak, rekomendasi alternatif ditujukan untuk mengurangi nilai *hotspot* dampak yakni *global warming*, serta nilai dampak yang dihasilkan *hotspot* proses yakni *gas compressor* dan unit *flare*. Alternatif-alternatif perbaikan yang didapatkan dari studi literatur dianalisis kembali dengan metode LCA menggunakan *software* SimaPro untuk dapat mengetahui besar penurunan dampaknya. Berikut penjelasan terkait alternatif perbaikan yang didapatkan.

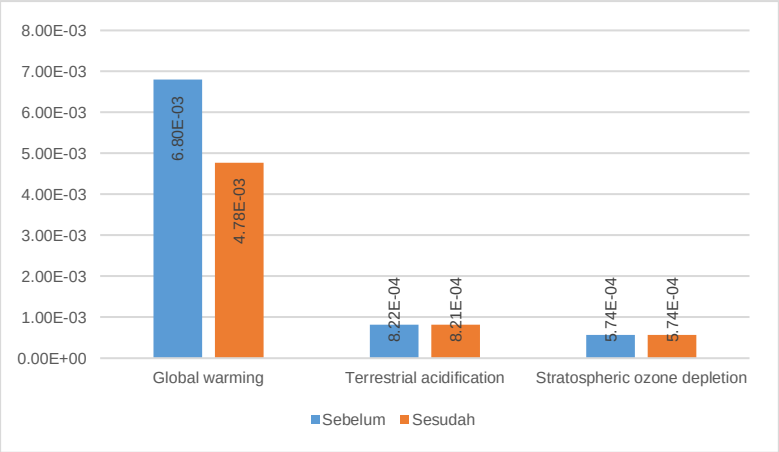
4.5.1 *Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS)*

Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) atau CO_2-*Enhanced Oil Recovery* (CO_2-EOR) merupakan teknologi dengan sistem yang melibatkan penangkapan CO_2 dari pembakaran bahan bakar atau proses industri, yang kemudian disalurkan, biasanya menggunakan pipa, dan diinjeksikan pada reservoir guna meningkatkan perolehan minyak. Teknologi ini juga bisa dikatakan dapat menyimpan CO_2 karena sebagian besar gas yang diinjeksikan tetap terperangkap secara permanen (dimanfaatkan kembali dalam siklus produksi) di lapangan.

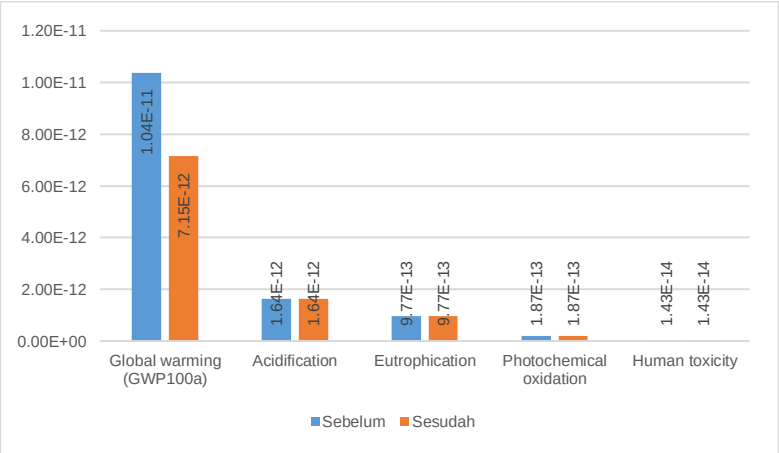
Menurut ADB (2019), reduksi emisi dari implementasi teknologi ini tergantung pada proses produksi seperti sumber atau jenis bahan bakar, berapa energi yang dibutuhkan, dan metode pemisahan CO_2 yang digunakan. Adapun pengaplikasian teknologi ini dapat disesuaikan dengan unit penghasil CO_2 pada sistem. Menurut Mavar *et al.* (2021), dari kompilasi data 23 proyek CO_2-EOR, rata-rata kapasitas penangkapan CO_2 adalah 26%. Sementara itu, rata-rata reduksi emisi secara keseluruhan yang dihasilkan teknologi ini sebesar 37%.

Diasumsikan implementasi CCUS pada unit-unit yang menghasilkan emisi CO_2 di PPP PT. X seperti unit *gas compressor, flare,* dan *gas engine generator* akan menghasilkan reduksi emisi yang sama yakni sebesar 37%. Dari hasil LCA setelah adanya alternatif 1 ini, didapatkan penurunan yang signifikan pada dampak *global warming*. Hasil karakterisasi menunjukkan nilai dampak *global warming* dengan metode CML IA-*Baseline* setelah adanya alternatif 1 adalah sebesar 36,44 kg CO_2 eq, dimana terjadi penurunan sebesar 30% dari nilai sebelumnya yaitu 52,06 kg CO_2 eq.

Sementara itu, berikut hasil normalisasi tiap kategori dampak berdasarkan metode ReCiPe 2016 serta CML IA-*Baseline* dalam bentuk grafik perbandingan nilai normalisasi dampak sebelum dan sesudah adanya penerapan alternatif 1.



Gambar 4.23 Perbandingan Nilai Dampak Alternatif 1 Metode ReCipe 2016



Gambar 4.24 Perbandingan Nilai Dampak Alternatif 1 Metode CML IA-*Baseline*

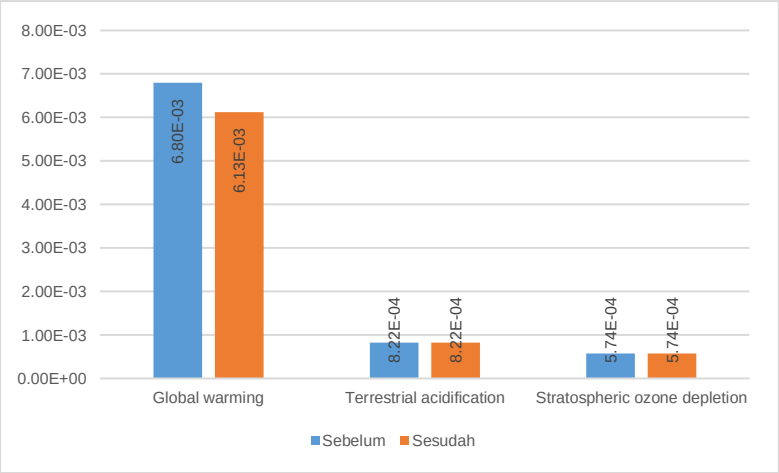
Kekurangan dari alternatif perbaikan ini adalah tingginya biaya modal yang diperlukan. Menurut Khalil & Biyanto (2018), dibutuhkan biaya untuk CO_2 *captured* (seperti dengan metode absorbsi menggunakan pelarut *amine*), perpipaan, serta fasilitas

EOR dan biaya ini bergantung pada jumlah CO_2 yang harus dialirkan, jarak sumber CO_2 dengan sumur yang akan diinjeksikan, dan teknologi yang digunakan. Berdasarkan penelitiannya, pengeluaran awal (*Capital Expenditure*/CAPEX) dan pengeluaran operasional (*Operational Expenditure/OPEX)* minimum ialah 247.066 US$ (Rp. 3.582.457.000) dan 202.927 US$ (Rp. 2.942.441.500) untuk injeksi CO_2 sebesar 780.000 kg dengan produksi minyak sebesar 219.817 ton. Selain itu, CCUS-EOR masih sedikit implementasinya terutama untuk migas *offshore* sehingga memerlukan penelitian lebih lanjut.

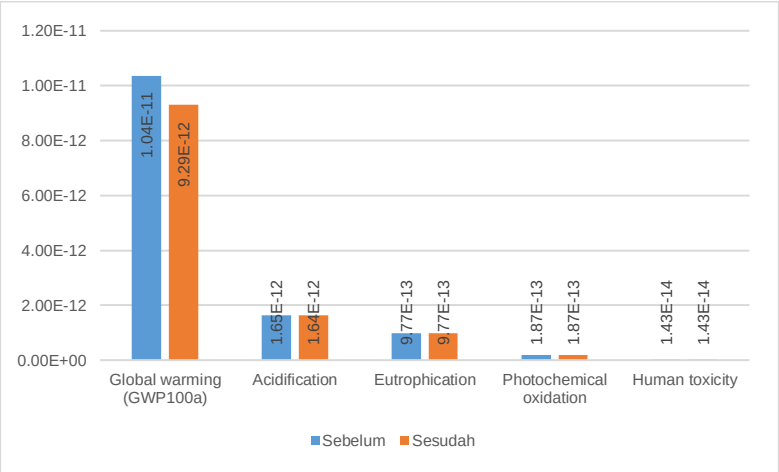
4.5.2 *Waste Heat Recovery Unit*

Menurut Jouhara *et al.* (2018), Penambahan *waste heat recovery unit* yang memanfaatkan energi panas gas buang dari *exhaust gas turbine compressor* dapat meningkatkan efisiensi unit yang mengarah pada berkurangnya emisi yang dihasilkan unit tersebut. Limbah panas atau *waste heat* ini ditangkap dan disalurkan kembali ke sistem sebagai sumber energi tambahan. Beberapa teknologi yang mendukung WHRU antara lain h*eat pumps, heat recovery steam generators* (HRSGs), *heat pipe systems, organic rankine cycles,* serta *kalina cycle*. *Organic rankine cycle* menggunakan zat organik dengan titik didih rendah dan tekanan uap tinggi sebagai fluida yang bekerja menghasilkan energi. WHRU dengan *organic rankine cycles* dapat mencapai efisiensi bersih sebesar 22%. Berdasarkan penelitian Zhang *et al.* (2019), sistem WHRU dengan *organic rankine cycles* dapat mereduksi emisi hingga 17,3%.

Adapun diasumsikan implementasi WHRU di *gas compressor* PPP PT. X akan menghasilkan reduksi emisi di unit tersebut, yaitu sebesar 17,3% sesuai dengan literatur. Dari hasil LCA setelah adanya alternatif 2 ini, total nilai dampak *gas compressor* mengalami penurunan sebesar 13% tepatnya dari $9{,}48 \times 10^{-12}$ menjadi $8{,}25 \times 10^{-12}$ (hasil normalisasi metode CML IA-*Baseline*). Berikut hasil normalisasi tiap kategori dampak berdasarkan metode ReCiPe 2016 serta CML IA-*Baseline* dalam bentuk grafik perbandingan nilai normalisasi dampak sebelum dan sesudah adanya penerapan alternatif 2.



Gambar 4.25 Perbandingan Nilai Dampak Alternatif 2 Metode ReCipe 2016

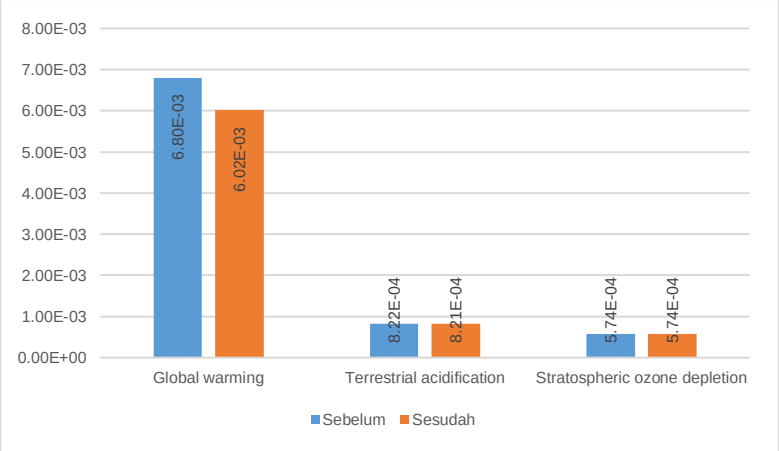


Gambar 4.26 Perbandingan Nilai Dampak Alternatif 2 Metode CML IA-Baseline

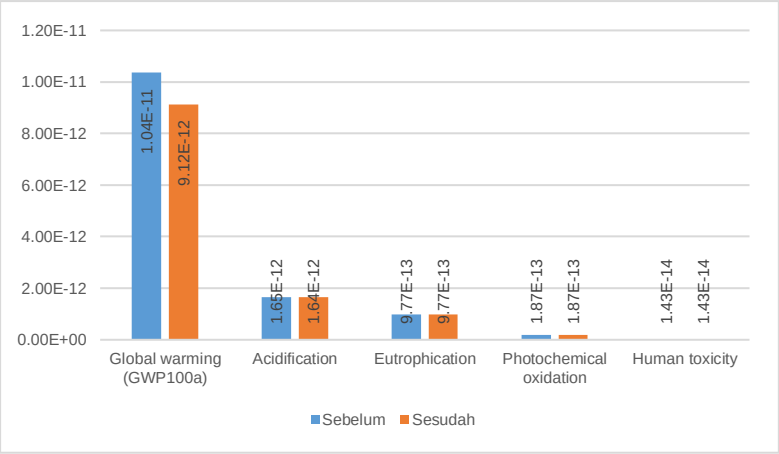
4.5.3 *Flare Gas Recovery System (FGRS)*

FGRS merupakan salah satu metode untuk mengurangi emisi yang dihasilkan unit *flare* dengan me-*recover* atau mengolah gas *flare* agar dapat dimanfaatkan kembali. Dengan beberapa metode, gas *flare* dapat dimanfaatkan untuk produksi *gas-to-liquid* (GTL), bahan bakar gas turbin sebagai pembangkit listrik, serta dikompresi dan diinjeksi kembali ke pipa sebagai *feed gas*. Menurut Rahimpour & Jokar (2012), dengan reduksi emisi yang serupa, pemanfaatan gas *flare* sebagai bahan bakar gas turbin untuk produksi listrik merupakan opsi yang paling menguntungkan secara ekonomi. Berdasarkan penelitian (Zadakbbar et al., 2008), pemanfaatan gas *flare* sebagai bahan bakar juga dipilih karena dapat mengurangi emisi dari *flare* sebesar 70-85%.

Adapun diasumsikan implementasi FGRS di unit *flare* PPP PT. X akan menghasilkan reduksi emisi di unit tersebut sebesar 70%. Dari hasil LCA setelah adanya alternatif 3 ini, didapatkan total dampak yang ditimbulkan *flare* menurun sebesar 38% yakni dari 2,76 x 10^{-12} menjadi 1,71 x 10^{-12} (hasil normalisasi metode CML IA-*Baseline*). Berikut hasil normalisasi tiap kategori dampak berdasarkan metode ReCiPe 2016 serta CML IA-*Baseline* dalam bentuk grafik perbandingan nilai normalisasi dampak sebelum dan sesudah adanya penerapan alternatif 3.



Gambar 4.27 Perbandingan Nilai Dampak Alternatif 3 Metode ReCipe 2016



Gambar 4.28 Perbandingan Nilai Dampak Alternatif 3 Metode CML IA-Baseline

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Farhan & Purwanto (2020) dengan *gas flaring* pada salah satu *offshore platform* di perairan pulau Jawa, diantara tiga opsi FGRS yakni sebagai bahan bakar gas turbin, LNG, dan GTL; FGRS yang dimanfaatkan sebagai bahan bakar gas turbin membutuhkan OPEX terendah yakni 108.000 US$ (Rp. 1.566.000.000) dengan *investment's rate of return* sebesar 30,12% dan *payback period* selama 3 tahun.

4.5.4 Alternatif Terpilih

Rekomendasi alternatif perbaikan yang dipilih pada penelitian ini mengacu pada besar penurunan dampak masing-masing alternatif. Besar penurunan dampak total untuk alternatif 1 (CCUS) adalah 30%, sementara itu besar penurunan dampak total untuk alternatif 2 (WHRU) dan alternatif 3 (FGRS) adalah sama-sama 10%. Berdasarkan hasil tersebut maka, alternatif yang dipilih adalah alternatif 1 dengan *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) atau CO_2-*Enhanced Oil Recovery* (CO_2-EOR).

“halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

BAB 5
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan dari penelitian ini antara lain:

1. Dampak lingkungan per ton produk yang dihasilkan dari proses produksi migas di PPP PT. X yaitu:
   - *global warming* sebesar 54,285 kg CO_2 eq (metode ReCiPe 2016) dan/atau 52,063 kg CO_2 eq (metode CML IA-*Baseline*)
   - *acidification* sebesar 0,034 kg SO_2 eq (ReCiPe 2016) dan/atau 0,046 kg SO_2 eq (CML IA-*Baseline*)
   - *stratospheric ozone depletion* sebesar 0,00003 kg CFC11 eq (ReCiPe 2016)
   - *eutrophication* sebesar 0,013 kg PO4 eq (CML IA-*Baseline*)
   - *photochemical oxidation* sebesar 0,002 kg C2H4 eq (CML IA-*Baseline*)
   - *human toxicity* sebesar 0,111 kg 1,4-DB eq (CML IA-*Baseline*)
2. Prioritas penangan dampak mengacu pada titik *hotspot* proses produksi migas di PPP PT. X yakni dampak terbesar (*hotspot* dampak) yaitu *global warming* serta proses penghasil dampak total terbesar (*hotspot* proses) yaitu *gas compressor* dan *flare*.
3. Alternatif yang direkomendasikan adalah penambahan *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) atau CO_2-*Enhanced Oil Recovery* (CO_2-EOR) yang diperkirakan dapat mereduksi dampak sebesar 30%.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat dilakukan untuk melengkapi penelitian selanjutnya ialah:

1. Inventarisasi data baik *input* maupun *output* dilengkapi untuk setiap unitnya agar mendapatkan hasil yang lebih kredibel.

2. Mencari dan mempelajari lebih banyak literatur mengenai interpretasi dari tiap kategori dampak agar lingkup pembahasannya bisa lebih detail.
3. Analisis alternatif perbaikan lebih diperdalam dengan penelitian lebih lanjut mengenai alternatif yang paling memungkinkan untuk diaplikasikan sesuai titik *hotspot,* baik dari reduksi dampaknya, biaya investasinya, maupun sumber-sumber dengan sistem atau proses produksi yang serupa dengan proses produksi yang diteliti.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

ADB. (2019). *Carbon Dioxide-Enhanced Oil Recovery in Indonesia:* https://doi.org/10.22617/TCS190600

Amirsyam, Siregar, A., & Zain, A. F. (2018). Analisa Kelebihan Tekanan pada Flare Stack dengan Metode Pembakaran Gas Lebih. *Journal of Mechanical Enginering, Manufactures, Materials and Energy*, *2*(2), 67–72.

Anwar, F., Chaudhry, F. N., Nazeer, S., Zaman, N., & Azam, S. (2016). Causes of Ozone Layer Depletion and Its Effects on Human : Review. *Atmospheric and Climate Sciences*, *6*, 129–134. https://doi.org/10.4236/acs.2016.61011

Ardi, Rosyani, & Nazarudin. (2020). Pemanfaatan Berkelanjutan Gas Suar Bertekanan dan Bertemperatur Rendah untuk Mengurangi Emisi Gas Rumah Kaca. *Jurnal Pembangunan Berkelanjutan*, *3*(1), 11–19.

Ariandy, D. S. (2017). *Analisa Manajemen Inspeksi Berbasis Resiko pada Separator Vessel di PT . YZ*. Tugas Akhir Fakultas Teknologi Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

Arifin, N. (2016). *Teknik Pengolahan Minyak dan Gas*. Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan.

Astuti, A. D. (2019). Analisis Potensi Dampak Lingkungan dari Budidaya Tebu Menggunakan Pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) Potential Analysis of Environmental Impact of Sugarcane Plantation Using Life Cycle Assessment (LCA) Approach. *Jurnal Penelitian Dan Pengembangan*, *15*(1), 51–64.

Bande, A. W., Djamaluddin, & Bakri, H. (2016). Analisis Penanganan Konsentrasi Hidrogen Sulfida dalam Minyak Bumi Lapangan Tiaka Kabupaten Morowali Utara Provinsi Sulawesi Tengah. *Jurnal Geomine*, *4*(2), 56–62.

Bellary, S. A. I., Husain, A., Samad, A., & Kanai, R. A. (2018).

Performance Optimization of Centrifugal Pump for Crude Oil Delivery. *Journal of Engineering Research*, *15*(1), 88–101. https://doi.org/10.24200/tjer.vol15iss1pp88-101

Bonou, A., Laurent, A., & Olsen, S. I. (2016). Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application. *Applied Energy*, *180*, 327–337. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.058

Brata, A. K., Ismayana, A., & Yani, M. (2018). Life Cycle Assessment of Gasoline and Gasoil on Production Proccess in Hydroskimming Complex – Hydrocracking Complex Refinery Field. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, *8*(3), 406–413. https://doi.org/10.29244/jpsl.8.3.406-413

Buanawati, T. T., Huboyo, H. S., & Samadikun, B. P. (2017). Estimasi Emisi Pencemar Udara Konvensional (SOx, NOx, CO, dan PM) Kendaraan Pribadi Berdasarkan Metode International Vehicle Emission (IVE) di Beberapa Ruas Jalan Kota Semarang. *Jurnal Teknik Lingkungan*, *6*(3), 1–12.

ClimateTransparency. (2018). *Brown to Green: Transisi G20 Menuju Ekonomi Rendah Karbon*. http://www.climate-transparency.org/g20-climate-performance/g20report2018

Dekker, E., Zijp, M. C., Kamp, M. E. Van De, Temme, E. H. M., & Zelm, R. Van. (2020). A Taste of The New Recipe for Life Cycle Assessment: Consequences of The Updated Impact Assessment Method on Food Product LCAs. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *25*, 2315–2324. https://doi.org/10.1007/s11367-019-01653-3

Devia, D., Lestari, P., & Sembiring, E. (2017). Life Cycle Assessment (LCA) Produk Semen Portland Komposit (Studi Kasus: PT X). *Jurnal Teknik Lingkungan*, *23*(2), 1–10.

Dewi, Y. P., Sihombing, M., & Setiawan, Y. (2017). Inventarisasi Sumber Emisi Gas Rumah Kaca (Greenhouse Gas) dari Kegiatan Eksplorasi & Eksploitasi Minyak dan Gas Bumi PT. MNO. *Prosiding Seminar Nasional XII "Rekayasa Teknologi*

Industri Dan Informasi 2017 Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta, 66–71.

Eckelman, M. J., & Sherman, J. (2016). Environmental Impacts of the U . S . Health Care System and Effects on Public Health. *PLOS ONE*, *11*(6), 1–14. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157014

Elgohary, M. M., & Seddiek, I. S. (2012). Comparison Between Natural Gas and Diesel Fuel Oil Onboard Gas Turbine Powered Ships. *Journal of King Abdulaziz University, Marine Science*, *23*(2), 109–127. https://doi.org/10.4197/Mar.23-2.7

EPA. (1993). *1,4-Dichlorobenzene*.

Farhan, M. A., & Purwanto, W. W. (2020). The Potential Utilization Options of Small-scale Associated Gas Flaring on the Upstream Process Production Offshore Platform. Techno-economic assessment. *AIP Conference Proceedings*, *2230*, 1–6. https://doi.org/10.1063/5.0002319

Fleming, E. L., Newman, P. A., Liang, Q., & Daniel, J. S. (2020). The Impact of Continuing CFC - 11 Emissions on Stratospheric Ozone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *125*(3), 1–40. https://doi.org/10.1029/2019JD031849

Franchini, M., & Mannucci, P. M. (2015). Impact on Human Health of Climate Changes. *European Journal of Internal Medicine*, *26*(1), 1–5. https://doi.org/10.1016/j.ejim.2014.12.008

Goedkoop, M. J., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., & Meijer, E. (2016). *Introduction to LCA with SimaPro*. PRé.

Hasiany, S., Noor, E., & Yani, M. (2015). Penerapan Produksi Bersih untuk Penanganan Air Terproduksi di Industri Minyak dan Gas. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, *5*(1), 25–32.

Hlaing, H. S., Liu, J., Miura, Y., Bevrani, H., & Ise, T. (2019). Enhanced Performance of a Stand-Alone Gas-Engine Generator Using Virtual Synchronous Generator and Energy

Storage System. *IEEE Access*, *7*, 176960–176970. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957890

IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (Vol. 1). Intergovernmental Panel on Climate Change.

ISO. (2006a). *ISO 14040 Enviromental Management – Life Cycle Asessment – Principles and Framework*.

ISO. (2006b). *ISO 14044 Enviromental Management – Life Cycle Asessment – Principles and Framework*.

ITS Tekno Sains. (2019). *Laporan Kajian Life Cycle Assessment (LCA) PT Pertamina Hulu Energi West Madura Offshore*.

Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., & Tassou, S. A. (2018). Waste Heat Recovery Technologies and Applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, *6*(January), 268–289. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017

Kautzar, G. Z., Sumantri, Y., & Yuniarti, R. (2015). Analisis Dampak Lingkungan pada Aktivitas Supply Chain Produk Kulit Menggunakan Metode LCA dan ANP. *Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Sistem Industri*, *3*(1), 200–211.

Khalil, M., & Biyanto, T. R. (2018). Optimisasi CO2 Captured dan Distribusi untuk Enhanced Oil Recovery. *Jurnal Teknik ITS*. https://doi.org/10.31219/osf.io/pmv56

KLHK. (2019). *Laporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca, Monitoring, Pelaporan, dan Verifikasi Nasional Tahun 2018*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.

Labiba, D., & Pradoto, W. (2018). Sebaran Emisi CO2 dan Implikasinya Terhadap Penataan Ruang Area Industri di Kendal. *Jurnal Pengembangan Kota*, *6*(2), 164–173. https://doi.org/10.14710/jpk.6.2.164-173

Labiby, N., & Ali, J. (2018). Perancangan Slug Catcher untuk Pre-Gas Treatment Pada CNG Plant. *Seminar Nasional Teknik*

Mesin Politeknik Negeri Jakarta, 387–393.

Laurent, A., Weidema, B. P., Bare, J., Liao, X., Souza, D. M. De, Pizzol, M., Sala, S., Schreiber, H., Thonemann, N., & Verones, F. (2020). Methodological Review and Detailed Guidance for The Life Cycle Interpretation Phase. *Journal of Industrial Ecology*, *24*(5), 986–1003. https://doi.org/10.1111/jiec.13012.

Manisalidis, I., Stavropoulou, E., & Stavropoulos, A. (2020). *Environmental and Health Impacts of Air Pollution : A Review*. *8*(14), 1–13. https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014

Martín, R. D., Trujillo, F. J. P., García, J. F. M., Río, C. M., Fernández, E. B., & Mouhaffel, A. G. (2016). Evaluation of The Environmental Benefits of Recycling Materials in The Moving Parts of A Wind Turbine Using The Life Cycle Assessment (LCA). *International Journal of Applied Engineering Research*, *11*(5), 2990–2995.

Mavar, K. N., Gaurina-Međimurec, N., & Hrnčević, L. (2021). Significance of enhanced oil recovery in carbon dioxide emission reduction. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(4), 1–27. https://doi.org/10.3390/su13041800

Mawardi. (2019). Perancangan Ulang Pompa Sentrifugal Dipergunakan Mengalirkan Minyak Bersih ke Tangki Penimbunan di Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Laminar*, *1*(1), 16–21.

Mohajan, H. K. (2019). Acid Rain is a Local Environment Pollution but Global Concern. *Open Science Journal of Analytical Chemistry*, *3*(5), 47–55.

Mulyani, Y., & Fatmawati, N. (2017). Pengaruh Temperatur Inlet Terhadap Efisiensi Kinerja Kompresor Centrifugal C.101.At. *Jurnal Migasian*, *1*(1), 1–4.

Nainggolan, F. S. (2019). *Kajian Beban Emisi Nitrogen Oksida (NOx) dan Particulate Matter 10 Mikron (PM10) dari Sektor Transportasi Darat di Beberapa Ruas Jalan Kota Medan*.

Tugas Akhir Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara.

Nguyen, T.-V., Tock, L., Breuhaus, P., Maréchal, F., & Elmegaard, B. (2016). CO2-Mitigation Options for The Offshore Oil and Gas Sector. *Applied Energy*, *161*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.088

Nugraha, A. Z., Wiloso, E. I., & Yani, M. (2018). Pemanfaatan Serbuk Gergaji sebagai Substitusi Bahan Bakar pada Proses Pembakaran - Kiln di Pabrik Semen dengan Pendekatan Life Cycle Assesment (LCA). *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, *8*(2), 188–198. https://doi.org/10.29244/jpsl.8.2.188-198

Perdirjen PPKL Nomor P.14/PPKL/SET/KUM.1/9/2020 Tentang Benchmarking Sektor Industri Minyak dan Gas Eksplorasi dan Produksi.

Permen ESDM Nomor 7 Tahun 2019 Tentang Pengelolaan dan Pemanfaatan Data Minyak dan Gas Bumi.

Permen LH Nomor 12 Tahun 2012 Tentang Pedoman Penghitungan Beban Emisi Kegiatan Industri Minyak dan Gas Bumi.

Permen LHK Nomor 1 Tahun 2021 Tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup.

PRé. (2019). *SimaPro Database Manual Methods Library*. PRé.

PT. X. (2013). *Analisis Dampak Lingkungan Hidup (ANDAL)*. PT. X.

Purwanta, W. (2018). Pemenuhan Baku Mutu Udara Emisi dan Penanganannya; Tinjauan Atas Polutan Partikulat, NOx dan SO2. *Prosiding Seminar Nasional Dan Konsultasi Teknologi Lingkungan*, 32–41.

Putri, H. P. (2017). *Life Cycle Assessment (LCA) Emisi pada Proses Produksi Bahan Bakar Minyak (BBM) Jenis Bensin dengan Pendekatan Metode Analytical Hierarchy Process*

(AHP). Tugas Akhir Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

Rahimpour, M. R., & Jokar, S. M. (2012). Feasibility of flare gas reformation to practical energy in Farashband gas refinery: No gas flaring. *Journal of Hazardous Materials*, *209–210*(x), 204–217. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.017

Ramdhani, M., Yani, M., & Ismayana, A. (2019). Analisis Emisi GRK dan Konversi Energi pada Produksi Minyak Jarak (Ricinus communis L.) dengan Metode Life Cycle Assessment (LCA). *Journal of Natural Resources and Environmental Management*, *9*(3), 680–691. https://doi.org/10.29244/jpsl.9.3.680-691

Rui, X. I. A., Zhi, C., & Yun, Z. (2012). Impact Assessment of Climate Change on Algal Blooms by a Parametric Modeling Study in Han River. *Journal of Resources and Ecology*, *3*(3), 209–219. https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2012.03.003

Samiaji, T. (2012). Karakteristik Gas N2O (Nitrogen Oksida) di Atmosfer Indonesia. *Berita Dirgantara*, *13*(4), 147–154.

Sanchez, Y. A. C., & Jr., S. de O. (2015). Exergy Analysis of Offshore Primary Petroleum Processing Plant with CO2 Capture. *Energy*, *88*, 46–56. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015. 05.130

Sirait, M. (2020). Studi Life Cycle Assessment Produksi Gula Tebu : Studi Kasus di Jawa Timur. *Rekayasa Journal of Science and Technology*, *13*(2), 197–204. https://doi.org/10.21107/ rekayasa.v13i2.5915

Sitepu, H. (2011). *Model Pengembangan Rusunawa Ramah Lingkungan Melalui Optimasi Pelaksanaan Green Construction di Batam*. Disertasi Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor. Bogor.

Sivakumar, P., Sircar, A., Deka, B., Silviya Anumegalai, A., Suresh Moorthi, P., & Yasvanthrajan, N. (2018). Flow Improvers for

Assured Flow of Crude Oil in Midstream Pipeline - A Review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *164*(1), 24–30. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.01.022

SKK Migas. (2016). *Laporan Keberlanjutan 2016*. Satuan Kerja Khusus Pelaksana Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas Bumi.

SNI. (2016). *SNI ISO 14040:2016 Manajemen lingkungan — Penilaian daur hidup — Prinsip dan Kerangka Kerja*. Badan Standardisasi Nasional.

SNI. (2017). *SNI ISO 14044:2017 Manajemen Lingkungan – Penilaian Daur Hidup – Persyaratan dan Panduan*. Badan Standardisasi Nasional.

Sulistyawanti, S., Iswara, A. P., & Boedisantoso, R. (2020). Impacts Assessment of Crude Oil Exploration Using Life Cycle Assessment (LCA). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *506*, 1–12. https://doi.org/10.1088/1755-1315/506/1/012025

Sumadi, & Hermanuadi, D. (2017). Penerapan Teknologi Produksi Bersih (Cleaner Production) untuk Peningkatan Produktivitas dan Kualitas Kacang Oven pada Agroindustri “UD. Rajawali” Kabupaten Jember. *Jurnal Pengabdian Masyarakat J-DINAMIKA*, *2*(1), 52–58.

Sumarata, D. N. Y. F., Sukendar, I., & Nurwidiana. (2019). Analisa Dampak Lingkungan Material dan Energi Proses Pembuatan Batik Menggunakan Metode Life Cycle Assessment (LCA) Studi Kasus: Batik Tobal Pekalongan. *Prosiding Konferensi Ilmiah Mahasiswa Unissula (Kimu) 2*, 556–564.

Suminar, D. R., & Nurcahyo. (2020). Karakteristik Hydrocyclone untuk Pemisahan Minyak dan Air. *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*, *4*(2), 133–140.

Tenaya, I., & Hardiana, M. (2011). Pengaruh Air Fuel Ratio Terhadap Emisi Gas Buang Berbahan Bakar Lpg Pada Ruang Bakar Model Helle-Shaw Cell. *Jurnal Energi Dan*

Manufaktur, *5*(1), 39–45.

Wahyudi, J. (2016). Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca. *Jurnal Penelitian Dan Pengembangan*, *12*(2), 104–112.

Widyastuti, N. L., & Nugroho, H. (2020). Dampak Covid-19 terhadap Industri Minyak dan Gas Bumi: Rekomendasi Kebijakan untuk Indonesia. *The Indonesian Journal of Development Planning*, *4*(2), 166–176.

Yuliana, D. K. (2017). Tingkat Emisi Gas Rumah Kaca di Kabupaten Indramayu. *Jurnal Sains Dan Teknologi Mitigasi Bencana*, *12*(2), 1–10.

Zadakbbar, O., Vatani, A., & Karimpour, K. (2008). Flare Gas Recovery in Oil and Refineries. *Oil and Gas Science and Technology*, *63*(6), 705–711. https://doi.org/10.2516/ogst:2008023

Zhang, A., Zhang, H., Qadrdan, M., Yang, W., Jin, X., & Wu, J. (2019). Optimal Planning of Integrated Energy Systems for Offshore Oil Extraction and Processing Platforms. *Energies*, *12*(756), 1–28. https://doi.org/10.3390/en12040756

“halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

LAMPIRAN I

Tabel L.I.1 Data Intensitas Energi PT. X Skala Dunia

No	Nama Perusahaan	Negara	Benua	Intensitas Pemakaian Energi (GJ/TOE)	Sumber
1	Repsol	Spanyol	Eropa	0,89	*Integrated Management Report (*2019)
2	Eni	Italia	Eropa	1,08	*Sustainability Report* (2018)
3	PT X	Indonesia	Asia	1,48	Data Perusahaan (2019)
4	Inpex	Jepang	Asia	1,59	*Sustainability Report* (2019)
5	PTT Public Company Ltd.	Thailand	Asia	1,60	*Sustainability Report* (2019)
6	Equinor	Norwegia	Eropa	1,60	*Sustainability Report* (2018)
7	PDO (Petroleum Development Oman)	Oman	Asia	1,84	*Sustainability Report* (2018)
8	Tullow Ghana Ltd.	Ghana	Afrika	2,28	*Annual Report* (2019)
9	ConocoPhillips	Amerika	Amerika Utara	2,86	*Sustainability Report* (2018)
10	Petrobas	Brasil	Amerika Selatan	3,55	*Sustainability Report* (2018)
11	Qatar Petroleum	Qatar	Asia	5,02	*Sustainability Report* (2018)
12	Chevron	Amerika	Amerika Utara	5,18	*Sustainability Report* (2018)
13	Petro China	China	Asia	10,74	*Sustainability Report* (2018)

Tabel L.I.2 Data Intensitas Emisi GRK PT. X dan Perusahaan Pembanding Skala Dunia

No	Nama Perusahaan	Negara	Benua	Emisi GRK (CO_{2eq}/ 1000 TOE)	Sumber
1	Repsol	Spanyol	Eropa	34,87	*Integrated Management Report (*2019)
2	Saudi Aramco	Saudi Arabia	Asia	69,11	*Annual Report* (2019)
3	Equinor	Norwegia	Eropa	93,44	*Sustainability Report* (2018)
4	PT X	Indonesia	Asia	138,40	Data Perusahaan (2019)
5	Petrobas	Brasil	Amerika Selatan	148,97	*Sustainability Report* (2018)
6	Inpex	Jepang	Asia	225,10	*Sustainability Report* (2019)
7	Tullow Oil Ltd.	Afrika	Afrika	227,92	*Annual Report* (2019)
8	ConocoPhillips	Amerika	Amerika Utara	231,50	*Sustainability Report* (2018)
9	PTT Public Company Ltd.	Thailand	Asia	253,61	*Sustainability Report* (2018)
10	Soco International (Pharos energy)	London	Eropa	276,09	*Annual Report and Account* (2018)
11	Chevron	Amerika	Amerika Utara	303,82	*Sustainability Report* (2018)
12	Petronas	Malaysia	Asia	391,45	*Sustainability Report* (2018)
13	Qatar Petroleum	Qatar	Asia	393,67	*Sustainability Report* (2018)
14	PDO (Petroleum Development Oman)	Oman	Asia	399,41	*Sustainability Report* (2018)
15	Shell	Belanda	Eropa	419,35	*Sustainability Report* (2018)
16	Santos	Australia	Australia	585,35	*Sustainability Report* (2017)
17	Indian Oil	India	Asia	3245,55	*Annual Report* (2019)

Tabel L.I.3 Data Intensitas Emisi SO_x PT. X dan Perusahaan Pembanding Skala Dunia

No	Nama Perusahaan	Negara	Benua	Emisi SO_x (Ton SO_x/ 1000 TOE)	Sumber
1	British Petroleum	Inggris	Eropa	0,0001	*Sustainability Report* (2018)
2	Inpex	Jepang	Asia	0,0005	*Sustainability Report* (2019)
3	Saudi Aramco	Saudi Arabia	Asia	0,01	*Annual Report* (2019)
4	Equinor	Norwegia	Eropa	0,01	*Sustainability Report* (2018)
5	Petro China	China	Asia	0,05	*Sustainability Report* (2017)
6	ConocoPhillips	Amerika	Amerika Utara	0,06	*Sustainability Report* (2018)
7	PT X	Indonesia	Asia	0,19	Data Perusahaan (2019)
8	Chevron	Amerika	Amerika Utara	0,26	*Sustainability Report* (2018)
9	Shell	Belanda	Eropa	0,35	*Sustainability Report* (2018)
10	Petrobas	Brasil	Amerika Selatan	0,58	*Sustainability Report* (2018)
11	PDO (Petroleum Development Oman)	Oman	Asia	1,84	*Sustainability Report* (2018)
12	INA Group	Kroasia	Eropa	2,33	*Annual Report* (2018)
13	Repsol	Spanyol	Eropa	15,52	*Integrated Management Report* (2019)
14	Qatar Petroleum	Qatar	Asia	18,10	*Sustainability Report* (2018)

Tabel L.I.4 Data Intensitas Emisi NO_x PT. X dan Perusahaan Pembanding Skala Dunia

No	Nama Perusahaan	Negara	Benua	Emisi NO_x (Ton NO_x/ 1000 TOE)	Sumber
1	British Petroleum	Inggris	Eropa	0,0003	*Sustainability Report* (2018)
2	Tullow Oil	Afrika	Afrika	0,01	*Sustainability Report* (2018)
3	Petro China	China	Asia	0,05	*Sustainability Report* (2017)
4	Inpex	Jepang	Asia	0,08	*Sustainability Report* (2019)
5	Equinor	Norwegia	Eropa	0,26	*Sustainability Report* (2018)
6	ConocoPhillips	Amerika	Amerika Utara	0,40	*Sustainability Report* (2018)
7	PT X	Indonesia	Asia	0,50	Data Perusahaan (2019)
8	Shell	Belanda	Eropa	0,57	*Sustainability Report* (2018)
9	Qatar Petroleum	Qatar	Asia	0,77	*Sustainability Report* (2018)
10	Chevron	Amerika	Amerika Utara	0,92	*Sustainability Report* (2018)
11	PDO (Petroleum Development Oman)	Oman	Asia	0,92	*Sustainability Report* (2018)
12	Petrobas	Brasil	Amerika Selatan	1,00	*Sustainability Report* (2018)
13	INA Group	Kroasia	Eropa	1,42	*Annual Report* (2018)
14	Repsol	Spanyol	Eropa	32,42	*Integrated Management Report* (2019)
15	BHP Billiton	Australia	Australia	933,07	*Annual Report* (2019)

Tabel L.I.5 Hasil Analisis Karakterisasi Metode ReCiPe 2016

Unit Proses	Global warming	Stratospheric ozone depletion	Terrestrial acidification
	kg CO2 eq	kg CFC11 eq	kg SO2 eq
Separator	3,291	6,93E-09	1,52E-04
Scrubber	0,252	5,32E-10	1,16E-05
Gas Compressor	35,777	3,04E-05	3,04E-02
Flare	13,141	4,01E-06	2,98E-03
Crude Oil Transfer Pump	0,316	6,66E-10	1,45E-05
Water Treatment	1,504	3,17E-09	6,93E-05
Gas Engine Generator	0,003	2,79E-09	2,79E-06
Total	54,285	3,44E-05	3,37E-02

Tabel L.I.6 Hasil Analisis Karakterisasi Metode CML IA-*Baseline*

Unit Proses	Global warming (GWP100a)	Human toxicity	Photochemical oxidation	Acidification	Eutrophication
	kg CO2 eq	kg 1,4-DB eq	kg C2H4 eq	kg SO2 eq	kg PO4--- eq
Separator	2,562	2,31E-04	5,46E-04	9,63E-05	2,52E-05
Scrubber	0,197	1,77E-05	4,19E-05	7,39E-06	1,93E-06
Gas Compressor	35,588	1,01E-01	7,35E-05	4,20E-02	1,17E-02
Flare	12,296	9,91E-03	6,24E-04	4,13E-03	1,17E-03
Crude Oil Transfer Pump	0,246	2,22E-05	5,25E-05	9,25E-06	2,42E-06
Water Treatment	1,171	1,06E-04	2,50E-04	4,40E-05	1,15E-05
Gas Engine Generator	0,003	9,25E-06	6,74E-09	3,86E-06	1,07E-06
Total	52,063	1,11E-01	1,59E-03	4,63E-02	1,29E-02

Tabel L.I.7 Hasil Analisis Normalisasi Metode ReCiPe 2016

Unit Proses	Global warming	Stratospheric ozone depletion	Terrestrial acidification	TOTAL
Separator	4,12E-04	1,16E-07	3,70E-06	4,16E-04
Scrubber	3,16E-05	8,88E-09	2,84E-07	3,19E-05
Gas Compressor	4,48E-03	5,07E-04	7,43E-04	5,73E-03
Flare	1,65E-03	6,70E-05	7,27E-05	1,78E-03
Crude Oil Transfer Pump	3,96E-05	1,11E-08	3,55E-07	3,99E-05
Water Treatment	1,88E-04	5,29E-08	1,69E-06	1,90E-04
Gas Engine Generator	4,11E-07	4,65E-08	6,81E-08	5,25E-07
Total	6,80E-03	5,74E-04	8,22E-04	8,19E-03

Tabel L.I.8 Hasil Analisis Normalisasi Metode CML IA-*Baseline*

Impact category	Global warming (GWP100a)	Human toxicity	Photochemical oxidation	Acidification	Eutrophication	TOTAL
Separator	5,10E-13	2,98E-17	6,45E-14	3,42E-15	1,91E-15	5,80E-13
Scrubber	3,91E-14	2,29E-18	4,95E-15	2,62E-16	1,47E-16	4,45E-14
Gas Compressor	7,08E-12	1,30E-14	8,68E-15	1,49E-12	8,85E-13	9,48E-12
Flare	2,45E-12	1,28E-15	7,37E-14	1,47E-13	8,88E-14	2,76E-12
Crude Oil Transfer Pump	4,90E-14	2,86E-18	6,19E-15	3,28E-16	1,83E-16	5,57E-14
Water Treatment	2,33E-13	1,36E-17	2,95E-14	1,56E-15	8,74E-16	2,65E-13
Gas Engine Generator	6,49E-16	1,19E-18	7,96E-19	1,37E-16	8,12E-17	8,70E-16
Total	1,04E-11	1,43E-14	1,87E-13	1,64E-12	9,77E-13	1,32E-11

BIOGRAFI PENULIS

BIOGRAFI PENULIS

Ni Luh Sekar Asmara Putri lahir pada tanggal 12 Februari 1999 di Kota Denpasar, Bali. Penulis menempuh pendidikan formal di SMPN 1 Denpasar dan SMAN 1 Denpasar. Penulis melanjutkan pendidikan S1 di Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya pada tahun 2017 dan terdaftar dengan NRP 03211740000048. Selama masa perkuliahan, penulis berkecimpung dalam organisasi Tim Pembina Kerohanian Hindu (TPKH) ITS sebagai Staff hingga Staff Ahli Pengabdian Masyarakat serta sebagai Staff Biro Internal Kelompok Pecinta dan Pemerhati Lingkungan (KPPL) HMTL ITS. Penulis turut aktif dalam berbagai kepanitiaan seperti sebagai sekretaris Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Tingkat Pra Dasar Tahun 2018 BEM FTSPK ITS, ketua Medical Day 2019 TPKH ITS dan sekretaris pada Gempita Pesona Dewata 2019 TPKH ITS, bendahara Hari Air Sedunia 2019 KPPL HMTL ITS, dan staff ahli divisi acara Ini Lho ITS! (ILITS) 2019. Pada tahun akhir perkuliahan yakni sejak tahun 2020 hingga saat ini, penulis aktif di organisasi Girl Up ITS Surabaya sebagai Sekretaris. Penulis juga pernah menjadi peserta dalam *Community Engagement for Development x Engineers in Action* di Puhsarang, Kediri pada tahun 2019. Penulis dapat dihubungi melalui surel di sekarasmara.putri@gmail.com atau linkedin.com/in/asmara-putri.

“halaman ini sengaja dikosongkan”

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL PERENCANAAN DAN KEBUMIAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

FORM FTA-03

KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Ni Luh Sekar Asmara Putri
NRP : 03211740000048
Judul : Kajian Dampak Lingkungan pada *Poleng Processing Platform* PT. X dengan *Life Cycle Assessment*

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1.	13 Januari 2021	Diskusi topik tugas akhir	
2.	25 Januari 2021	Bimbingan proposal tugas akhir: - Perbaikan dalam tujuan, harus ada prioritas penanganan karena tidak semua aktivitas yang berdampak perlu ditangani	
3.	30 Januari 2021	Pengumpulan draft proposal untuk sidang proposal	
4.	16 Maret 2021	Pengumpulan proposal yang telah direvisi	
5.	2 Mei 2021	Bimbingan progress tugas akhir: - Sambil menunggu data lengkap, mengerjakan yang bisa dikerjakan terlebih dahulu seperti mencoba simulasi LCA dengan data lain	
6.	25 Mei 2021	Bimbingan progress tugas akhir: - Memperdalam pembahasan dari hasil yang sudah didapatkan	
7.	22 Juni 2021	Menyampaikan progress terakhir dari tugas akhir	
8.	26 Juli 2021	Bimbingan revisi setelah ujian lisan tugas akhir: - Sudah OK dan dilanjutkan untuk membuat draft paper POMITS	

Surabaya, 5 Agustus 2021
Dosen Pembimbing

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

PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-03 **TUGAS AKHIR** **Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)**
Periode: Genap 2020/2021 **No. Revisi: 01**

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03A

Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Rabu, 7 Juli 2021
Pukul : 11.00 - 12.30
Lokasi : Zoom Meeting
Judul : Kajian Dampak Lingkungan pada Poleng Processing Platform PT. X dengan Life Cycle Assessment

Nama : Ni Luh Sekar Asmara Putri
NRP. : 03211740000048
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
	1. Tujuan penelitian dinyatakan eksplisit dalam abstrak secara ringkas di paragraf pertama **2. Penjelasan penggunaan 2 metode analisis dalam LCA (recipe 2016 dan CML-IA), perbedaan terjadi karena apa, bagaimana analisisnya dan mempresentasikan hasilnya.** **3. Dilengkapkan di bagan/neraca massa parameter-parameter emisi yang menimbulkan semua dampak seperti toxicology, eutrofikasi, acidification, carcinogen, dll** **4. Dilengkapi reason pada alternatif ketika diduga bisa menurunkan dampak. Misal penurunan dampak Global Warming, itu dari proses apa pada penerapan alternatif tsb, termasuk juga penurunan dampak2 yang lain bagaimana bisa terjadi** **5. Penjelasan teknis bagaimana menetukan lingkup gate-to-gate, cradle to gate, cradle to cradle dll...** **6. Lihat di bench marking ... apakah dampak yang saudara hasilkan dari analisis LCA inline dgn benchmarkingnya?** **7. TOE bagaimana proses dalam perhitungannya beban emisi...**

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si, MT ( )

Dosen Pembimbing Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES., Ph.D. ( )

PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-03 **TUGAS AKHIR** **Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)**
Periode: Genap 2020/2021 **No. Revisi: 01**

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03B

Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Rabu, 7 Juli 2021
Pukul : 11.00 - 12.30
Lokasi : Zoom Meeting
Judul : Kajian Dampak Lingkungan pada Poleng Processing Platform PT. X dengan Life Cycle Assessment

Nama : Ni Luh Sekar Asmara Putri
NRP. : 03211740000048
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
	LCA harus difahami lagi. Apa baku mutu itu? kenapa tropospheric O3 jahat?

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Dr. Eng. Arie Dipareza Syafe'i, ST., MEPM ( )

Dosen Pembimbing Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES., Ph.D. ( )

PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-03 **TUGAS AKHIR** **Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)**
Periode: Genap 2020/2021 **No. Revisi: 01**

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03C

Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Rabu, 7 Juli 2021
Pukul : 11.00 - 12.30
Lokasi : Zoom Meeting
Judul : Kajian Dampak Lingkungan pada Poleng Processing Platform PT. X dengan Life Cycle Assessment

Nama : Ni Luh Sekar Asmara Putri
NRP. : 03211740000048
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
	1. Studi harus berdasarkan pada definisi LCA. Cantumkan fungsional unit **2. LCI: Harus tampak di setiap tahap produksi. Bahan baku, bahan tambahan, energi, segala jenis limbah dan emisi harus teridentifikasi. Asumsi yang dipakai bila tidak ada data atau lainnya harus ditulis dalam penjelasan tiap tahap produksi** **3. Usul untuk mengurangi jumlah kategori dampak, berdasarkan data yang ada.** **4. Pastikan parameter LCI memang TERSEDIA untuk menghitung besaran dampak** **5. Alokasi dijelaskan** **6. LCIA: Emisi per unit produk** **7. Penyajian hasil melalui proses normalisasi berdasarkan pada pendekatan tahapan proses produksi** **8. Penentuan hotspot berdasarkan pada tahapan produksi** **9. Perbaikan kesimpulan**

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Adhi Yuniarto, ST., MT., Ph.D. ( )

Dosen Pembimbing Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES., Ph.D. ( )