



TUGAS AKHIR - RE 141581

KAJIAN DAMPAK PROSES EKSPLORASI DAN PRODUKSI GAS ALAM TERHADAP LINGKUNGAN DENGAN MENGGUNAKAN METODE LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)

NADIA ANDISTIARA
03211440000106

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - RE 141581

**KAJIAN DAMPAK PROSES EKSPLOKASI DAN
PRODUKSI GAS ALAM TERHADAP LINGKUNGAN
DENGAN MENGGUNAKAN METODE LIFE CYCLE
ASSESSMENT (LCA)**

NADIA ANDISTIARA
03211440000106

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - RE 141581

**STUDY ON THE IMPACTS OF NATURAL GAS
EXPLORATION AND PRODUCTION TO THE
ENVIRONMENT USING LIFE CYCLE ASSESSMENT
(LCA) METHOD**

NADIA ANDISTIARA
03211440000106

SUPERVISOR
Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT.

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Faculty of Civil, Environmental, and Geo Engineering
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

LEMBAR PENGESAHAN

KAJIAN DAMPAK PROSES EKSPLORASI DAN PRODUKSI GAS ALAM TERHADAP LINGKUNGAN DENGAN MENGUNAKAN METODE *LIFE CYCLE ASSESSMENT* (LCA)

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

NADIA ANDISTIARA
NRP. 03211440000106

Disetujui Oleh Pembimbing Tugas Akhir



Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT

NIP. 19660116 199703 1 001



"Halaman ini sengaja dikosongkan"

Kajian Dampak Proses Eksplorasi dan Produksi Gas Alam Terhadap Lingkungan dengan menggunakan Metode *Life Cycle Assessment (LCA)*

Nama : Nadia Andistiara.
NRP : 03211440000106.
Departemen : Teknik Lingkungan.
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T.

ABSTRAK

JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi merupakan salah satu industri pengolahan gas alam dengan proses utama pada *Central Processing Plant (CPP)* yang mencakup *gas gathering and production separation, gas treatment process, condensate stabilization system, produced water system*, dan *Acid Gas Conversion Unit (AGCU)* dalam *Wet Sulfuric Acid (WSA) facilities*. Sebagai penunjang operasional proses utama, terdapat unit *Gas Turbine Generator (GTG)* dan *hot oil heater* yang digunakan sebagai penghasil energi listrik dan energi panas. Selain itu, terdapat unit *flare* yang digunakan untuk membakar gas alam yang tersisa dari kegiatan produksi untuk alasan keamanan. Proses eksplorasi dan produksi gas alam yang dilakukan oleh JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi menimbulkan dampak terhadap lingkungan, baik dari penggunaan bahan baku yang diolah hingga menjadi produk yang diinginkan maupun emisi yang dihasilkan dari setiap proses yang dilakukan. Emisi yang dihasilkan dari unit GTG, *hot oil heater*, dan *flare* pada kegiatan tersebut dapat berupa emisi gas rumah kaca dan pencemar udara, seperti CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan SO_x.

Penelitian ini mengidentifikasi dampak yang terjadi dari proses utama dan proses penunjang, yaitu unit GTG, *flare*, dan *hot oil heater* yang ada di kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam pada CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi dengan menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment (LCA)*. LCA merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengevaluasi dan membandingkan dampak lingkungan dari suatu produk atau proses. Identifikasi dampak lingkungan

tersebut dilakukan dengan menggunakan *software* SimaPro 8.4 dengan metode *Eco Indicator* 99 berdasarkan data bahan baku, pemakaian energi, produk dan emisi yang dihasilkan. Kemudian dilakukan pemilihan alternatif perbaikan yang paling mungkin diterapkan dengan menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Metode AHP terdiri dari penyusunan permasalahan secara hierarki, penilaian kriteria dan alternatif, penetapan prioritas, dan pengukuran konsistensi logis.

Hasil penelitian ini menunjukkan nilai beban emisi CO₂, CH₄, dan N₂O terbesar berturut-turut sebesar 2.628.315,144 ton CO₂/hari; 47,018 ton CH₄/hari; dan 4,701 ton N₂O/hari dihasilkan oleh unit *hot oil heater*. Sedangkan, untuk beban emisi NO_x dan SO_x terbesar berturut-turut sebesar 0,288 ton NO_x/hari dan 0,002 ton SO_x/hari dihasilkan oleh unit *flare*. Emisi tersebut menimbulkan dampak yang besar pada kategori penurunan kesehatan manusia (*human health*). Sedangkan, dampak terbesar lainnya yang ditimbulkan adalah kategori penurunan sumber daya alam (*resources*) akibat penggunaan gas alam sebagai bahan baku. Adapun proses yang memiliki nilai dampak tertinggi terhadap lingkungan adalah proses pada unit *hot oil heater* dengan nilai dampak sebesar 25,22 MPt dan nilai masing-masing kategori kerusakan sebesar 552 DALY untuk kategori *human health*, $1,27 \times 10^3$ PDF.m².year pada kategori *ecosystem quality*, dan 51,1 MJ *surplus* untuk kategori *resources*. Maka, alternatif perbaikan yang paling mungkin diterapkan untuk mereduksi dampak lingkungan yang terjadi di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi adalah penggunaan kembali *LP fuel gas excess* ke dalam unit *production separator* dengan proses kompresi yang memiliki nilai prioritas sebesar 36,8%.

Kata kunci : Gas Alam, LCA, SimaPro 8.4, Eco Indicator 99, AHP.

Study On The Impacts Of Natural Gas Exploration And Production To The Environment Using Life Cycle Assessment (LCA) Method

Name : Nadia Andistiara.
NRP : 03211440000106.
Department : Environmental Engineering.
Supervisor : Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T.

ABSTRACT

JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi is a natural gas treatment industry with the main process in Central Processing Plant (CPP) that consist of gas gathering and production separation, gas treatment process, condensate stabilization system, produced water system, and Acid Gas Conversion Unit (AGCU) in Wet Sulfuric Acid (WSA) facility. As an operational support to the main process, there are Gas Turbine Generator (GTG) and hot oil heater that used as electrical power and heat power generator. Furthermore, there is a flare unit that is used to burn the remains of natural gas from the production process for safety reason. The exploration and production process done by JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi causes effects on environment, from the raw material used to the final product. The process on GTG, hot oil heater, and flare also emits green house gases and air pollutant, such as CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, and SO_x.

This research identifies effects that is caused by main processes and supporting processes, such as GTG, flare, and oil heater in the gas exploration and production processes in CPP JOB Pertamina-Medco E&P Tomori using Life Cycle Assessment (LCA) approach. LCA is an analysis method used to evaluate and compare environmental effects caused by a product or a process. The identification of environmental effects is done using SimaPro 8.4 with Eco Indicator 99 method based on raw material data, energy usage, product, and emission produced. Furthermore, the improvement alternative is chosen based on Analytical Hierarchy Process (AHP) method. AHP method consists of organizing

problems hierarchically, establishing priority, and determining logical consistency.

The result of this research shows the highest emission load of CO₂, CH₄, and N₂O is from hot oil heater unit respectively 2.628.315,44 ton/day, 47,018 ton/day, and 4,701 ton/day. Whereas the highest emission load of NO_x and SO_x is from flare unit respectively 0,288 ton/day and 0,002 ton/day. Those emission cause big impact on category of human health decrease. Meanwhile, another big impact caused by use of natural gas as raw material is on category of degradation of resources. As for the highest impact score on environment is process on unit HOH with the impact score of 25,22 MPt and score for human health, ecosystem quality, and resources category respectively 552 DALY, 1.27 x 10³ PDF and 51,1 surplus MJ. So, the improvement alternative that might be implemented to reduce the environmental effect in CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi is reuse of LP fuel gas excess into production separator unit with compression process that produce priority score of 36,8%

Key word : Natural Gas, LCA, SimaPro 8.4, Eco Indicator 99, AHP.

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia kenikmatan, kemudahan, petunjuk, dan berkah sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Tugas akhir ini berjudul **“Kajian Dampak Proses Eksplorasi dan Produksi Gas Alam terhadap Lingkungan dengan menggunakan Metode *Life Cycle Assessment (LCA)*”**.

Tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu tidak terlepas dari peran serta berbagai pihak. Oleh sebab itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT atas segala bimbingan dan nasihatnya selama kegiatan penelitian dan penyusunan laporan tugas akhir.
2. Bapak Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si, MT, Bapak Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST, MEPM, dan Ibu Harmin Sulistiyaning Titah, ST, MT, Ph.D atas arahan yang diberikan untuk kegiatan penelitian ini.
3. Ibu Alia Damayanti, ST, MT, Ph.D atas bimbingan selama menjalani kegiatan perkuliahan di Departemen Teknik Lingkungan FTSLK ITS.
4. Bapak, Ibu, dan Kakak serta keluarga besar atas segala dukungan materi, doa, dan moral demi kelancaran tugas akhir.
5. Ibu Nuke Susanti, Bapak Sigit Ismaya, dan rekan-rekan JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi lainnya atas kerjasamanya dan bantuannya selama pengerjaan tugas akhir.
6. Teman-teman Teknik Lingkungan ITS 2014, khususnya anggota Laboratorium Pengendalian Pencemaran Udara dan Perubahan Iklim, atas segala bantuan dan dukungannya selama pengerjaan tugas akhir.

Penulis memohon saran, kritik, dan penyempurnaan dari pembaca terkait dengan tugas akhir ini. Terima kasih.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Eksplorasi Sumber Daya Alam.....	7
2.2 Gas Alam	7
2.3 Komposisi Gas Alam.....	8
2.4 Proses Pengolahan Gas Alam	11
2.5 Bahan-Bahan Kimia yang digunakan dalam Pengolahan Gas Alam	12
2.5.1 <i>Methyl Diethanol Amine (MDEA)</i>	13
2.5.2 <i>Triethylene Glycol (TEG)</i>	14
2.6 Pemanfaatan Gas Alam	15
2.7 Pencemaran Udara	16
2.8 Pemanasan Global.....	17
2.9 Efek Rumah Kaca	18
2.10 Penipisan Lapisan Ozon	19
2.11 Sumber Emisi pada Industri Gas Alam	22
2.12 Karakteristik Emisi.....	23
2.13 Metode Perhitungan Beban Emisi.....	26
2.14 <i>Life Cycle Assessment (LCA)</i>	28
2.15 Prinsip <i>Life Cycle Assessment</i>	30
2.16 Karakteristik dan Batasan <i>Life Cycle Assessment</i>	31
2.17 Tahapan <i>Life Cycle Assessment</i>	31
2.17.1 Definisi Tujuan dan Cakupan (<i>Goal and Scope Definition</i>).....	31

2.17.2	Tahap <i>Input Analisis Inventory (Life Cycle Inventory)</i>	32
2.17.3	Tahap <i>Perdugaan Dampak (Life Cycle Impact Assessment)</i>	32
2.17.4	Tahap <i>Interpretasi (Life Cycle Interpretation)</i>	34
2.18	Aplikasi SimaPro untuk Analisis LCA	34
2.19	Metode <i>Eco Indicator 99</i>	36
2.20	Penggunaan <i>Software SimaPro 8.4</i>	39
2.21	Penelitian Terdahulu mengenai LCA	40
2.22	<i>Analytical Hierarchy Process (AHP)</i>	43
2.23	Prinsip <i>Analytical Hierarchy Process</i>	44
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		49
3.1	Umum	49
3.2	Wilayah Studi	49
3.3	Kerangka Penelitian	50
3.4	Tahap Pendahuluan	51
3.5	Tahap Pengumpulan Data	51
3.6	Tahap Pengolahan Data	53
3.6.1	Analisis beban emisi CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, NO _x , dan SO _x	53
3.6.2	Analisis <i>Life Cycle Assessment</i> dengan <i>Software SimaPro 8.4</i>	55
3.6.3	Analisis Alternatif yang Direkomendasikan	57
3.7	Kesimpulan dan Saran	58
BAB IV HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN		59
4.1	Profil Perusahaan	59
4.2	<i>Senoro Gas Central Processing Plant (CPP)</i>	60
4.3	Perhitungan Beban Emisi	62
4.3.1	Perhitungan Beban Emisi Unit GTG	62
4.3.2	Perhitungan Beban Emisi Unit <i>Hot Oil Heater</i>	65
4.3.3	Perhitungan Beban Emisi Unit <i>Flare</i>	67
4.3.4	Perhitungan Beban Emisi Unit AGCU (<i>Combustor</i>)	70
4.4	Analisis Hasil Perhitungan Beban Emisi	72
4.5	Analisis LCA menggunakan SimaPro 8.4	73
4.5.1	Penentuan <i>Goal and Scope</i>	73
4.5.2	Penentuan <i>Life Cycle Inventory (LCI)</i>	74
4.5.2.1	<i>Life Cycle Inventory</i> dari Proses <i>Gas and Gathering Production Separation</i>	75
4.5.2.2	<i>Life Cycle Inventory</i> dari <i>Produced Water</i>	

	<i>System</i>	77
4.5.2.3	<i>Life Cycle Inventory</i> dari <i>Condensate Stabilization System</i>	79
4.5.2.4	<i>Life Cycle Inventory</i> dari <i>Gas Treatment Process</i>	81
4.5.2.5	<i>Life Cycle Inventory</i> dari Proses Regenerasi <i>Amine</i> pada <i>AGRU System</i>	85
4.5.2.6	<i>Life Cycle Inventory</i> dari Proses Regenerasi <i>TEG</i> pada <i>Dehydration Unit</i>	88
4.5.2.7	<i>Life Cycle Inventory</i> dari Proses <i>LP Fuel Gas Treatment</i>	89
4.5.2.8	<i>Life Cycle Inventory</i> dari <i>Acid Gas Conversion Unit</i>	90
4.5.2.9	<i>Life Cycle Inventory</i> dari Proses pada Unit <i>GTG</i>	92
4.5.2.10	<i>Life Cycle Inventory</i> dari Proses pada Unit <i>Flare</i>	93
4.5.2.11	<i>Life Cycle Inventory</i> dari Proses pada Unit <i>Hot Oil Heater</i>	94
4.5.3	Analisis Hasil <i>Life Cycle Inventory</i>	94
4.5.4	Penilaian Dampak (<i>Life Cycle Impact Assessment</i>).....	95
4.5.5	Analisis Hasil <i>Life Cycle Impact Assessment</i>	114
4.6	Hubungan Alternatif Perbaikan dengan <i>Impact</i> pada Analisis <i>LCA</i>	115
4.7	Pemilihan Alternatif Terbaik dengan <i>AHP</i>	120
4.7.1	Pemilihan Kriteria dalam Prosedur <i>AHP</i>	121
4.7.2	Penyusunan Hierarki <i>AHP</i>	121
4.7.3	Penilaian Kriteria dan Alternatif.....	123
4.7.4	Penentuan Prioritas.....	126
4.7.5	Pengukuran Konsistensi Logis.....	134
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		139
5.1	Kesimpulan.....	139
5.2	Saran.....	140
DAFTAR PUSTAKA.....		141
LAMPIRAN I.....		151
LAMPIRAN II.....		157
LAMPIRAN III.....		173
LAMPIRAN IV.....		183

LAMPIRAN V.....	195
LAMPIRAN VI.....	213
LAMPIRAN VII.....	227
BIOGRAFI PENULIS	237

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Komposisi Gas Alam.....	8
Tabel 2. 2	Faktor Emisi untuk Unit Pembakaran Dalam dan Luar.....	27
Tabel 2. 3	Faktor Emisi untuk Unit Suar Bakar (Flare).....	27
Tabel 2. 4	Faktor Karakterisasi, Normalisasi, dan Pembobotan Metode Eco Indicator 99.....	39
Tabel 2. 5	Penelitian Terdahulu mengenai LCA.....	41
Tabel 2. 6	Index Random Consistency	47
Tabel 3. 1	Data-Data yang Diperlukan.....	51
Tabel 4. 1	Faktor Emisi untuk Unit Pembakaran Dalam dan Luar.....	63
Tabel 4. 2	Faktor Emisi untuk Gas <i>Flaring</i>	69
Tabel 4. 3	Hasil Perhitungan Beban Emisi.....	72
Tabel 4. 4	Hasil Analisis Life Cycle Impact Assessment ..	114
Tabel 4. 5	Alternatif Perbaikan yang direncanakan.....	116
Tabel 4. 6	Matriks Perbandingan Rata-Rata Antar Kriteria	125
Tabel 4. 7	Matriks Perbandingan Rata-Rata Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Biaya Investasi dan Produksi	125
Tabel 4. 8	Matriks Perbandingan Rata-Rata Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kinerja Alternatif.....	125
Tabel 4. 9	Matriks Perbandingan Rata-Rata Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kemudahan Pelaksanaan	125
Tabel 4. 10	Penjumlahan Nilai Kolom Antar Kriteria	127
Tabel 4. 11	Penjumlahan Nilai Kolom Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Biaya Investasi dan Produksi	128
Tabel 4. 12	Penjumlahan Nilai Kolom Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kinerja Alternatif.....	128
Tabel 4. 13	Penjumlahan Nilai Kolom Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kemudahan Pelaksanaan	128
Tabel 4. 14	Normalisasi dan Bobot Antar Kriteria	128

Tabel 4. 15	Normalisasi dan Pembobotan Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Biaya Investasi dan Produksi.....	129
Tabel 4. 16	Normalisasi dan Pembobotan Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kinerja Alternatif.....	129
Tabel 4. 17	Normalisasi dan Pembobotan Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kemudahan Pelaksanaan	129
Tabel 4. 18	Pembobotan Akhir Setiap Alternatif Perbaikan	132
Tabel 4. 19	Konsistensi Antar Kriteria.....	135
Tabel 4. 20	Konsistensi Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Biaya Investasi dan Produksi	135
Tabel 4. 21	Konsistensi Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kinerja Alternatif terhadap Dampak Lingkungan.....	136
Tabel 4. 22	Konsistensi Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kemudahan dalam Pelaksanaan	136
Tabel L.I. 1	Nilai Kalor berdasarkan Bahan Bakar	151
Tabel L.II. 1	Contoh Petunjuk Pengisian Penilaian	159
Tabel L.II. 2	Alternatif Perbaikan yang direncanakan.....	161
Tabel L.II. 3	Pemilihan Kriteria yang Lebih Penting dalam Kegiatan Eksplorasi dan Produksi Gas Alam..	165
Tabel L.II. 4	Pemilihan Alternatif Perbaikan berdasarkan Biaya Investasi dan Produksi	166
Tabel L.II. 5	Pemilihan Alternatif Perbaikan berdasarkan Kinerja Alternatif terhadap Dampak Lingkungan	168
Tabel L.II. 6	Pemilihan Alternatif Perbaikan berdasarkan Kemudahan dalam Pelaksanaan	170
Tabel L.III. 1	Petunjuk Pembacaan Hasil Kuesioner	173
Tabel L.III. 2	Hasil Kuesioner Perbandingan Berpasangan Antar Kriteria	175
Tabel L.III. 3	Hasil Kuesioner Perbandingan Berpasangan Antar Alternatif berdasarkan Biaya Investasi dan Produksi	176
Tabel L.III. 4	Hasil Kuesioner Perbandingan Berpasangan	

	Antar Alternatif berdasarkan Kinerja Alternatif	178
Tabel L.III. 5	Hasil Kuesioner Perbandingan Berpasangan Antar Alternatif berdasarkan Kemudahan Pelaksanaan	180
Tabel L.V. 1	Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses Gas and Gathering Production Separation.....	197
Tabel L.V. 2	Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses Produced Water System	197
Tabel L.V. 3	Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses Condensate Stabilization System	198
Tabel L.V. 4	Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses Gas Treatment Process	200
Tabel L.V. 5	Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses Regenerasi Amine di AGRU System	202
Tabel L.V. 6	Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses Regenerasi TEG di Dehydration Unit.....	204
Tabel L.V. 7	Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses LP Fuel Gas Treatment.....	206
Tabel L.V. 8	Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses Acid Gas Conversion Unit	209
Tabel L.V. 9	Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses Unit Gas Turbine Generator (GTG)	210
Tabel L.V. 10	Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses Unit HP/LP Flare	211
Tabel L.V. 11	Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses Unit <i>Hot Oil Heater</i>	211
Tabel L.VII. 1	Hasil Analisis Single Score pada Proses Gas and Gathering Production Separation	229
Tabel L.VII. 2	Hasil Analisis Single Score pada Proses Produced Water System	229
Tabel L.VII. 3	Hasil Analisis Single Score pada Condensate Stabilization System.....	229

Tabel L.VII. 4	Hasil Analisis Single Score pada Proses Gas Treatment Process.....	230
Tabel L.VII. 5	Hasil Analisis Single Score pada Proses Regenerasi Amine di AGRU System.....	231
Tabel L.VII. 6	Hasil Analisis Single Score pada Proses Regenerasi TEG di Dehydration Unit	232
Tabel L.VII. 7	Hasil Analisis Single Score pada Proses LP Fuel Gas Treatment	233
Tabel L.VII. 8	Hasil Analisis <i>Single Score</i> pada Proses <i>Acid Gas Conversion Unit</i>	234
Tabel L.VII. 9	Hasil Analisis <i>Single Score</i> pada Proses Unit Gas <i>Turbine Generator</i>	235
Tabel L.VII. 10	Hasil Analisis <i>Single Score</i> pada Proses Unit <i>Flare</i>	235
Tabel L.VII. 11	Hasil Analisis <i>Single Score</i> pada Proses Unit <i>Hot Oil Heater</i>	235

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Tinjauan Sederhana Aliran Material pada Pemrosesan Gas Alam.....	12
Gambar 2. 2	Ruang Lingkup LCA	29
Gambar 2. 3	Keterkaitan Data, Dampak Lingkungan, dan Kerusakan pada Metode Eco Indicator 99.....	37
Gambar 2. 4	Hierarki pada Metode AHP	45
Gambar 3. 1	Kerangka Penelitian	50
Gambar 4. 1	<i>Flow Diagram</i> Senoro Gas Central Processing Plant	61
Gambar 4. 2	Diagram Tahapan Single Score pada Gas and Gathering Production Separation	103
Gambar 4. 3	Diagram Tahapan Karakterisasi pada <i>Gas and Gathering Production Separation</i>	103
Gambar 4. 4	Diagram Tahapan Single Score pada Produced Water System.....	104
Gambar 4. 5	Diagram Tahapan Karakterisasi pada <i>Produced Water System</i>	104
Gambar 4. 6	Diagram Tahapan Single Score pada Condensate Stabilization System	105
Gambar 4. 7	Diagram Tahapan Karakterisasi pada <i>Condensate Stabilization System</i>	105
Gambar 4. 8	Diagram Tahapan <i>Single Score</i> pada Gas Treatment Process	106
Gambar 4. 9	Diagram Tahapan Karakterisasi pada Gas Treatment Process	106
Gambar 4. 10	Diagram Tahapan <i>Single Score</i> pada Proses Regenerasi <i>Amine</i> di AGRU System.....	107
Gambar 4. 11	Diagram Tahapan Karakterisasi pada Proses Regenerasi <i>Amine</i> di AGRU System.....	107
Gambar 4. 12	Diagram Tahapan <i>Single Score</i> pada Proses Regenerasi TEG di <i>Dehydration Unit</i>	108
Gambar 4. 13	Diagram Tahapan Karakterisasi pada Proses Regenerasi TEG di <i>Dehydration Unit</i>	108
Gambar 4. 14	Diagram Tahapan <i>Single Score</i> pada LP Fuel Gas Treatment.....	109

Gambar 4. 15	Diagram Tahapan Karakterisasi pada LP <i>Fuel Gas Treatment</i>	109
Gambar 4. 16	Diagram Tahapan <i>Single Score</i> pada <i>Acid Gas Conversion Unit</i>	110
Gambar 4. 17	Diagram Tahapan Karakterisasi pada <i>Acid Gas Conversion Unit</i>	110
Gambar 4. 18	Diagram Tahapan <i>Single Score</i> pada Unit <i>Gas Turbine Generator</i>	111
Gambar 4. 19	Diagram Tahapan Karakterisasi pada Unit <i>Gas Turbine Generator</i>	111
Gambar 4. 20	Diagram Tahapan <i>Single Score</i> pada Unit <i>Flare</i>	112
Gambar 4. 21	Diagram Tahapan Karakterisasi pada Unit <i>Flare</i>	112
Gambar 4. 22	Diagram Tahapan <i>Single Score</i> pada Unit <i>Hot Oil Heater</i>	113
Gambar 4. 23	Diagram Tahapan Karakterisasi pada Unit <i>Hot Oil Heater</i>	113
Gambar 4. 24	Hierarki Proses Eksplorasi dan Produksi Gas Alam.....	122
Gambar L.IV. 1	Material Balance dari Proses Eksplorasi dan Produksi Gas Alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.....	185
Gambar L.IV. 2	Process Flow Diagram dari Proses Gas and Gathering Production System.....	187
Gambar L.IV. 3	Process Flow Diagram dari Production Water System.....	188
Gambar L.IV. 4	Process Flow Diagram dari Condensate Stabilization System.....	189
Gambar L.IV. 5	Process Flow Diagram dari Gas Treatment Process.....	190
Gambar L.IV. 6	Process Flow Diagram dari Proses Regenerasi Amine pada AGRU System.....	191
Gambar L.IV. 7	Process Flow Diagram dari Proses Regenerasi TEG pada Dehydration Unit.....	192
Gambar L.IV. 8	Process Flow Diagram dari Proses Low Pressure Gas Treatment.....	193
Gambar L.IV. 9	Process Flow Diagram dari Acid Gas	

	Conversion Unit.....	194
Gambar L.VI. 1	Network dari Proses Gas and Gathering Production Separation.....	214
Gambar L.VI. 2	Network dari Produced Water System.....	215
Gambar L.VI. 3	<i>Network dari Condensate Stabilization System</i>	216
Gambar L.VI. 4	Network dari Gas Treatment Process.....	217
Gambar L.VI. 5	Network dari Proses Regenerasi Amine pada AGRU System	219
Gambar L.VI. 6	Network dari Proses Regenerasi TEG pada Dehydration Unit.....	220
Gambar L.VI. 7	Network dari Proses LP Fuel Gas Treatment	221
Gambar L.VI. 8	Network dari Proses Acid Gas Conversion Unit	222
Gambar L.VI. 9	Network dari Proses Unit Gas Turbine Generator	223
Gambar L.VI. 10	Network dari Proses Unit Flare.....	224
Gambar L.VI. 11	Network dari Proses Unit Hot Oil Heater	225

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Antara tahun 1990 hingga 2008, kebutuhan energi di dunia mengalami kenaikan hingga 40%. Pada saat ini, 68% pemenuhan kebutuhan energi di dunia berasal dari bahan bakar fosil. Bahan bakar fosil yang sering kali dimanfaatkan dapat berupa batu bara, minyak bumi, dan gas alam (*International Energy Agency*, 2010). Menurut Syukur (2016), gas alam merupakan sumber daya alam cadangan terbesar ketiga di dunia setelah batu bara dan minyak bumi. Berdasarkan data tahun 1988, terdapat cadangan *non associated gas* sebesar 1,7 triliun m³. Sedangkan cadangan *associated gas* sebesar 0,3 triliun m³ (Sugiyono, 1990). Apabila melihat persediaan energi saat ini, gas alam masih memegang peranan yang cukup dominan dalam menjawab kebutuhan masyarakat. Konsumsi gas alam meningkat dari 11% pada tahun 1960 menjadi 22% pada tahun 2010 (Yusuf dkk., 2015). Gas alam merupakan sumber daya energi yang efisien dan bersih yang digunakan di seluruh dunia (Lin *et al.*, 2010). Di Amerika Serikat, gas alam dimanfaatkan sebesar 22% untuk pemenuhan kebutuhan energi (Spath dan Mann, 2000). Sedangkan di Indonesia, pemanfaatan gas alam dilakukan untuk kebutuhan transportasi, rumah tangga, dan industri (Syukur, 2016).

JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi merupakan salah satu perusahaan yang mengeksplorasi dan mengolah gas alam di Indonesia. Produk utama yang dihasilkan adalah *sales gas* sebanyak 310 MMscfd. Selain itu, industri tersebut juga menghasilkan kondensat sebanyak 9000 bpd dan asam sulfat sebanyak 25 ton/hari (Deariska dan Sophiana, 2015). Terdapat 5 proses utama yang dilakukan JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi dalam mengolah gas alam pada *Central Processing Plant* (CPP) yang mencakup *gas gathering and production separation*, *gas treatment process*, *condensate stabilization system*, *produced water system*, dan *Acid Gas Conversion Unit* (AGCU) dalam *Wet Sulfuric Acid* (WSA) *facilities*.

Sebagai penunjang operasional proses utama, pada CPP juga terdapat unit *Gas Turbine Generator* (GTG) dan *hot oil*

heater yang digunakan sebagai penghasil energi listrik dan energi panas. Selain itu, terdapat unit *flare* yang digunakan untuk membakar gas alam yang tersisa dari kegiatan produksi untuk alasan keamanan. Pada proses AGCU juga terdapat unit *combustor* yang digunakan untuk mengoksidasi gas asam sulfat (H_2S) menjadi sulfur dioksida (SO_2). Dari keempat unit tersebut, terjadi proses pembakaran yang melepaskan emisi ke atmosfer. Menurut Spath dan Mann (2000), emisi yang biasa dihasilkan oleh industri gas alam dapat berupa emisi gas rumah kaca (GRK) seperti CO_2 , CH_4 , dan N_2O serta gas pencemar udara seperti NO_x dan SO_x . Emisi tersebut berasal dari proses pembakaran bahan bakar fosil dan kegiatan lainnya (Utina, 2009).

Menurut Kementerian Lingkungan Hidup (2012), jenis emisi utama yang dihasilkan dari industri minyak dan gas alam adalah karbon dioksida (CO_2). CO_2 yang dihasilkan dari proses pembakaran dapat mencapai 58%. Sedangkan, gas lain yang dihasilkan seperti NO_2 hanya sebesar 12% dan SO_2 sebesar 7% (Spath dan Mann, 2000). Berdasarkan data *Earth System Research Laboratory* dalam Lopez (2018), konsentrasi rata-rata CO_2 di atmosfer terus mengalami peningkatan. Pada tahun 2005, industri minyak dan gas alam menghasilkan emisi CO_2 sebesar 122 Metric Ton (Mt) CO_2 . Diperkirakan pada tahun 2030, emisi CO_2 yang dihasilkan akan meningkat menjadi 137 Mt CO_2 (Kementerian Keuangan RI, 2015). Peningkatan emisi yang dihasilkan bergantung pada banyaknya bahan bakar yang digunakan dan kandungan karbon serta unsur lainnya pada bahan bakar. Dengan kata lain, peningkatan emisi tersebut berbanding lurus dengan semakin meningkatnya jumlah gas alam yang diproduksi (Lattanzio, 2015).

Emisi gas rumah kaca maupun gas pencemar udara berpotensi menimbulkan dampak terhadap lingkungan. Adapun dampak lingkungan yang dapat terjadi adalah pemanasan global dan penurunan kualitas udara. Fenomena pemanasan global ditandai dengan meningkatnya suhu permukaan bumi. Peningkatan suhu tersebut terjadi sebesar $0,74 \pm 0,18^\circ C$ selama 100 tahun terakhir (Utina, 2009). Pemanasan global juga merupakan salah satu indikasi dari terjadinya perubahan iklim (Samiaji, 2011). Apabila perubahan iklim terjadi secara ekstrem, maka proses yang ada di ekosistem hutan dan lainnya akan

terganggu (Wahyuni, 2011). Sedangkan penurunan kualitas udara adalah tanda dari terjadinya pencemaran udara yang dapat mengganggu kesehatan manusia (Sandra, 2013).

Berdasarkan kondisi diatas, maka perlu dilakukan pembuatan strategi alternatif untuk menghasilkan proses dan produk yang ramah lingkungan (Sari, 2017). Dalam pembuatan alternatif tersebut, terlebih dahulu harus diketahui dampak-dampak yang mungkin terjadi dari suatu produk. Untuk menilai dampak lingkungan dari suatu produk, proses, atau aktivitas dapat digunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Penilaian tersebut dilakukan dengan mengidentifikasi sumber energi, penggunaan *raw material*, dan pembuangan pada lingkungan. Selain itu, metode tersebut dapat mengevaluasi dan menerapkan kemungkinan perbaikan lingkungan (Graedel dan Allenby, 1995).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dampak yang ditimbulkan pada serangkaian proses eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi dengan menggunakan LCA. Dalam analisis LCA digunakan *software* SimaPro 8.4 untuk menganalisis dan membandingkan aspek-aspek lingkungan dari suatu produk (Herprayoga, 2014). Sehingga nantinya dapat diketahui dampak yang ditimbulkan dari kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam (Kong, 2014). Selain itu, LCA juga berguna untuk menghindari pergeseran dampak dari satu fase daur hidup produk ke fase lainnya (Turconi *et al.*, 2013). Dengan demikian, alternatif perbaikan yang dibuat berdasarkan analisis LCA ini diharapkan dapat mengurangi potensi dampak yang terjadi pada proses eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah yang akan dibahas antara lain:

1. Berapa beban emisi gas CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan SO_x yang dihasilkan dari unit GTG, unit *hot oil heater*, unit *combustor*, dan unit *flare* yang ada pada kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi?
2. Bagaimanakah dampak lingkungan yang terjadi pada

kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi dengan menggunakan metode *Life Cycle Assessment (LCA)*?

3. Alternatif perbaikan apa yang dapat digunakan untuk mereduksi dampak lingkungan yang terjadi pada kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis beban emisi gas CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan SO_x yang dihasilkan dari unit GTG, unit *hot oil heater*, unit *combustor*, dan unit *flare* pada kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.
2. Mengidentifikasi dampak lingkungan yang terjadi pada kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi dengan menggunakan metode *Life Cycle Assessment (LCA)*.
3. Merekomendasikan alternatif perbaikan yang dapat digunakan untuk mereduksi dampak lingkungan yang terjadi pada kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.

1.4 Ruang Lingkup

Penelitian ini dibatasi oleh batasan-batasan ruang lingkup, yaitu:

1. Pengambilan data dilakukan pada 2 rangkaian kegiatan utama proses eksplorasi dan produksi gas alam, serta proses penunjang pada unit GTG, unit *hot oil heater*, dan unit *flare* di *Central Processing Plant*, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.
2. Dampak terhadap lingkungan yang dianalisis adalah dampak terhadap kualitas udara.
3. Indikator emisi GRK dan gas pencemar udara yang dianalisis, yaitu karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dinitrogen oksida (N₂O), nitrogen oksida (NO_x), dan sulfur oksida (SO_x).

4. *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) yang dinilai meliputi *ecosystem quality*, *resources*, dan *human health*.
5. Peneliti menggunakan *software* SimaPro 8.4 dengan metode *Eco Indicator 99* pada analisis LCA untuk mengidentifikasi dampak yang terjadi.
6. Penentuan alternatif perbaikan didasarkan dari hasil analisis LCA dan saran dari pihak perusahaan dengan menggunakan metode kuesioner.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak. Adapun manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Bagi pihak peneliti, penelitian ini dapat menjadi sumber referensi dan informasi untuk memungkinkan penelitian-penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan metode LCA.
2. Bagi pihak institut, penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat dalam perkembangan ilmu pengetahuan dengan menambah referensi dan informasi mengenai LCA.
3. Bagi pihak perusahaan, penelitian ini diharapkan dapat:
 - Memberikan informasi mengenai dampak dari penggunaan gas alam, penggunaan bahan-bahan kimia, dan emisi CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan SO_x yang dihasilkan pada kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam.
 - Memberikan solusi atau masukan berupa alternatif perbaikan untuk pengendalian dampak yang ditimbulkan berdasarkan hasil analisis *Life Cycle Assessment* dan kuesioner.
 - Sebagai bahan evaluasi perusahaan agar mampu menganalisis aktivitas proses produksinya yang ramah terhadap lingkungan.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Eksplorasi Sumber Daya Alam

Menurut Simamora (2000), kegiatan operasi minyak dan gas bumi dibagi kedalam kegiatan eksplorasi dan produksi, pengolahan, penyimpanan, pengangkutan, dan pemasaran. Sedangkan, kegiatan usaha minyak dan gas bumi yang diatur dalam Pasal 5 UU Nomor 22 Tahun 2001 terdiri atas dua poin. Poin pertama adalah kegiatan usaha hulu yang mencakup eksplorasi dan eksploitasi. Lalu, poin kedua adalah kegiatan usaha hilir yang mencakup pengolahan, pengangkutan, penyimpanan, dan niaga.

Dalam UU Nomor 22 Tahun 2001 tentang Minyak dan Gas Bumi dijelaskan mengenai eksplorasi dan eksploitasi. Eksplorasi adalah kegiatan yang bertujuan memperoleh informasi mengenai kondisi geologi untuk menemukan perkiraan cadangan minyak dan gas di wilayah yang ditentukan. Sedangkan, eksploitasi adalah rangkaian kegiatan yang bertujuan untuk menghasilkan minyak dan gas bumi, serta wilayah kerja yang ditentukan. Eksploitasi terdiri atas pengeboran dan penyelesaian sumur, pembangunan sarana pengangkutan, penyimpanan, dan pengolahan untuk pemisahan. Selain itu, terdapat proses pemurnian minyak dan gas bumi di lapangan serta kegiatan lain yang mendukungnya.

2.2 Gas Alam

Menurut Hoffer (1966), semua bahan bakar fosil dihasilkan oleh senyawa karbohidrat yang terdiri dari karbon dan hidrogen yang memfosil. Menurut Pasal 1 UU Nomor 22 Tahun 2001, gas alam adalah hasil proses alami berupa hidrokarbon. Gas ini berada dalam kondisi tekanan dan temperatur atmosfer berupa fase gas yang diperoleh dari proses penambangan minyak dan gas.

Gas alam dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *associated gas* dan *non associated gas*. *Associated gas* adalah gas alam yang ditemukan bersama minyak bumi dalam satu sumur. Sedangkan *non associated gas* adalah gas alam yang ditemukan secara terpisah dengan minyak bumi (Deariska dan Sophiana,

2015). Pada awalnya, jenis *associated gas* dibakar begitu saja karena dianggap tidak berharga (Syukur, 2016). Bahkan gas tersebut dianggap sebagai zat pengotor pada industri pengolahan minyak bumi (Deariska dan Sophiana, 2016). Namun, setelah disadari bahwa gas alam mengandung komponen utama berupa metana, yang merupakan senyawa hidrokarbon paling ringan dan berharga, barulah gas alam tersebut dimanfaatkan. Di Amerika, gas alam dimanfaatkan sebesar 22% untuk produksi uap dan panas pada proses industri, perumahan, dan pembangkit listrik (U.S. DOE, 1998). Sedangkan di Indonesia, pemanfaatan gas alam dilakukan untuk kebutuhan transportasi, rumah tangga, dan industri (Syukur, 2016).

2.3 Komposisi Gas Alam

Pada umumnya, gas alam dihasilkan dari sumur gas atau minyak bumi. Komponen utama dari gas alam adalah gas metana. Nilai kandungan gas metana dapat mencapai 80% dari volume gas alam. Gas alam juga tersusun dari etana, propana, butana, H₂S, dan gas *inert* lainnya, seperti nitrogen, karbon dioksida, dan helium. Secara tipikal gas alam yang ada, baik yang terasosiasi maupun yang tidak terasosiasi, memiliki komposisi kandungan yang berbeda. Kandungan gas alam ini biasanya bergantung pada lokasi sumur sesuai kondisi dan karakteristik lingkungan sekitar (Spath dan Mann, 2000). Pada Tabel 2.1 dapat dilihat komposisi tipikal dari gas alam.

Tabel 2. 1 Komposisi Gas Alam

Komponen	Komposisi di Jalur Pipa yang digunakan untuk Analisis (a)	Rentang Tipikal Komposisi Gas Alam di Sumur (%mol) (b)	
	Mol % (<i>dry</i>)	Low value	High value
Karbon dioksida (CO ₂)	0,5	0	10
Nitrogen (N ₂)	1,1	0	15
Metana (CH ₄)	94,4	75	99
Etana (C ₂ H ₆)	3,1	1	15
Propana (C ₃ H ₈)	0,5	1	10
Iso-butana (C ₄ H ₁₀)	0,1	0	1

Komponen	Komposisi di Jalur Pipa yang digunakan untuk Analisis (a)	Rentang Tipikal Komposisi Gas Alam di Sumur (%mol) (b)	
	Mol % (dry)	Low value	High value
N-butana (C ₄ H ₁₀)	0,1	0	2
Pentana+ (C ₅ ⁺)	0,2	0	1
Hidrogen sulfida (H ₂ S)	0,0004	0	30
Helium (He)	0,0	0	5
<i>Heat of combustion</i> (LHV)	48.252 J/g (20.745 Btu/lb)	-	-
<i>Heat of combustion</i> (HHV)	53.463 J/g (22.985 Btu/lb)	-	-

(a) *Chemical Economics Handbook (Lacson, 1999).*

(b) *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 1986.*

Menurut Religia (2014), dalam gas alam masih terdapat berbagai macam zat pengotor. Zat-zat pengotor tersebut akan menyebabkan penurunan *heating value* dari gas alam. Zat-zat pengotor biasanya berupa substansi sebagai berikut:

✓ Air.

Biasanya gas yang akan diproduksi memiliki kandungan air yang harus dihilangkan (Religia, 2014). Uap air dalam gas bumi dapat terkondensasi atau membentuk hidrat. Jika dalam sistem terdapat kandungan CO₂ dan H₂S, maka kondensasi uap air tersebut akan mengakibatkan korosi. Hidrat adalah senyawa kristalin yang terbentuk dari campuran hidrokarbon dan air pada kondisi tertentu. Senyawa hidrat dalam gas bumi dapat menghambat aliran gas pada jaringan pipa transmisi. Disamping korosi dan hidrat, efek yang dapat ditimbulkan oleh air adalah mempengaruhi nilai panas gas bumi. Uap air yang terkandung dalam gas sebaiknya tidak melebihi 7 lb/MMscf Spesi sulfur (Marsella dan Maharani, 2012).

✓

Spesi sulfur yang ada dapat berupa *carbonyl sulfide* (COS), *carbon disulfide* (CS₂), dan sulfur itu sendiri. Spesi-spesi sulfur tersebut biasanya terbentuk apabila

konsentrasi hidrogen sulfida dalam gas bernilai lebih dari 2 hingga 3% (Religia, 2014). Asam sulfida maupun produk pembakarannya yaitu SO_2 dan SO_3 merupakan gas beracun. Fluida yang mengandung air dan asam sulfida dapat membentuk asam sulfat yang menyebabkan lingkungan korosif. Selain asam sulfat, juga dapat terbentuk besi sulfida yang bersifat katodik terhadap besi dan dapat menyebabkan tingkat korosi yang berat (Marsella dan Maharani, 2012).

✓ Karbon dioksida (CO_2).

Karbon dioksida dalam gas bumi dapat menurunkan nilai panas campuran gas, karena karbon dioksida tidak memiliki nilai kalor. Selain itu, dengan adanya kandungan air, karbon dioksida akan berubah menjadi asam karbonat yang dapat menimbulkan korosi pada peralatan (Marsella dan Maharani, 2012).

✓ Merkuri.

Konsentrasi merkuri dalam gas alam memiliki rentang dari 0,01 hingga $180 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Apabila tidak diolah, kandungan merkuri ini akan menyebabkan pengolahan gas terganggu. Hal ini terjadi akibat dari kereaktifan merkuri terhadap logam seperti aluminium. Maka dari itu, biasanya dibutuhkan unit penghilang merkuri hingga $0,01 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ (Kidnay dan Parrish, 2006).

✓ NORM.

NORM merupakan singkatan dari *Naturally Occurring Radioactive Material* atau material-material yang secara alamiah bersifat radioaktif. Material-material ini juga memiliki kemungkinan untuk muncul pada gas alam yang ada. NORM dapat berpengaruh pada sel-sel tubuh dan mengakibatkan terjadinya kerusakan DNA (Religia, 2014).

✓ Oksigen.

Daerah-daerah yang memiliki sistem pengumpul gas dengan tekanan operasi dibawah tekanan atmosfer dapat menyebabkan masuknya oksigen dari udara luar. Hal ini dapat terjadi akibat beberapa kemungkinan seperti kebocoran, katup *valve* yang terbuka, dan lain-lain. Oksigen dalam jumlah besar ini mampu menyebabkan

terjadinya korosi pada sistem perpipaan maupun unit-unit pengolahan (Religia, 2014).

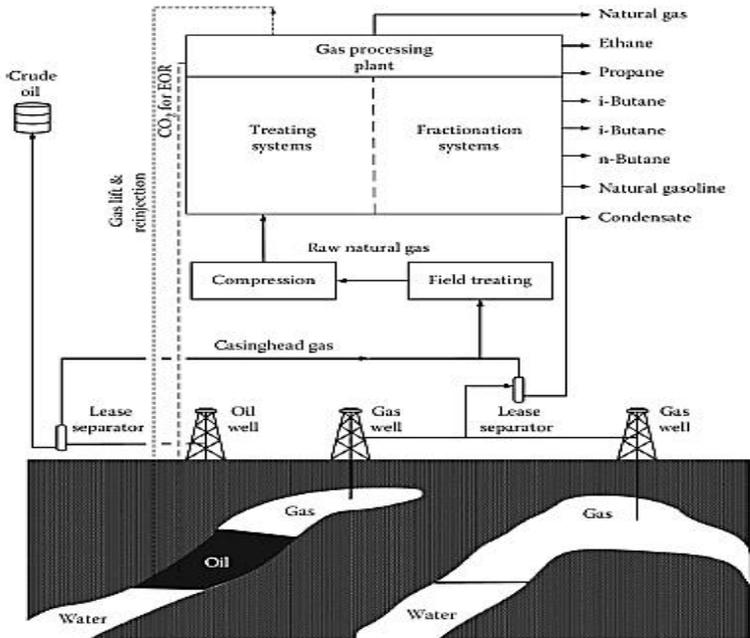
2.4 Proses Pengolahan Gas Alam

Menurut Spath dan Mann (2000), hampir seluruh gas alam melewati tahapan pengolahan terlebih dahulu sebelum digunakan. Tahapan pengolahan utama yang biasa dilakukan adalah *drying* dan *sweetening*. Hal ini bertujuan untuk menghilangkan zat-zat pengotor pada gas, sehingga gas yang dihasilkan sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan konsumen. Spesifikasi produk *sales gas* yang berlaku adalah <4 ppm mol H₂S dan 5% mol CO₂ (Irsyaduzzaqi dan Ariadji, 2010).

Biasanya, gas alam dipenuhi dengan kandungan H₂O. Maka dari itu, untuk menghilangkan kandungan H₂O pada gas, umumnya digunakan *glycol units*. Pada unit tersebut, gas alam akan terdehidrasi hingga mencapai nilai kelembaban sebesar 8 mg/m³. Selain H₂O, biasanya gas alam juga mengandung H₂S yang membuat kondisi gas menjadi asam. Gas alam yang masih mengandung H₂S, CO₂, dan senyawa asam lainnya disebut *sour gas* (Irsyaduzzaqi dan Ariadji, 2010). Baik H₂S maupun CO₂ merupakan senyawa yang tidak diinginkan keberadaannya di dalam gas alam. Hal tersebut disebabkan oleh komponen gas asam tersebut bersifat korosif, dapat menurunkan kandungan panas sehingga menurunkan nilai jual, dan berdampak buruk bagi lingkungan (Irsyaduzzaqi dan Ariadji, 2010). Maka, biasanya dilakukan proses reduksi H₂S melalui proses pengontakan dengan *amine*. Sehingga H₂S akan terikat dengan *amine* dan nilai konsentrasinya dapat mencapai <4 ppmv (*Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 1986). Gas alam yang telah dihilangkan kandungan asamnya disebut *sweet gas* (Irsyaduzzaqi dan Ariadji, 2010). Untuk mengurangi jumlah energi yang dikeluarkan dalam proses penyaluran gas alam, maka dilakukan pengurangan kandungan CO₂ dan N₂. Selain itu, kandungan CO₂ direduksi hingga mencapai 1-2% dari volume gas untuk membatasi jumlah terjadinya korosi pada sistem penyaluran gas.

Menurut Kidnay dan Parrish (2006), secara umum proses pengolahan gas alam memiliki tahapan pengolahan tipikal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Masing-masing tahapan pemrosesan memiliki tujuan tersendiri bergantung pada sistem

unit pemrosesan yang dibutuhkan serta spesifikasi yang diinginkan pada *sales gas*. Dalam sebuah pabrik pengolahan gas, urutan proses pengolahan bersifat fleksibel bergantung pada berbagai faktor seperti material-material yang digunakan (Religia, 2014).



Gambar 2. 1 Tinjauan Sederhana Aliran Material pada Pemrosesan Gas Alam

Sumber : Kidnay dan Parrish, 2006

2.5 Bahan-Bahan Kimia yang digunakan dalam Pengolahan Gas Alam

Proses penurunan kandungan gas asam maupun H₂O dalam gas alam biasa dilakukan dengan teknik absorpsi. Menurut Donsus dan Fuadi (2017), teknik absorpsi adalah metode pemisahan yang paling ekonomis untuk memisahkan CO₂ dari aliran gas. Teknik absorpsi adalah proses penghilangan gas ikutan yang dapat memurnikan gas dengan tingkat kemurnian

mencapai 94-99%. *Solvent* atau pelarut kimia atau fisika digunakan untuk menangkap kandungan gas ikutan di dalam aliran gas. Oleh karena itu, diperlukan sejumlah energi untuk melucuti gas ikutan dan meregenerasi *solvent*. Pemilihan *solvent* merupakan optimasi antara kapasitas absorpsi dengan energi yang dibutuhkan untuk regenerasi (Irsyaduzzaqi dan Ariadji, 2010). *Solvent* atau pelarut yang biasa digunakan untuk proses *drying* dan *sweetening* adalah *Triethylene Glycol* (TEG) dan *Methyl Diethanol Amine* (MDEA).

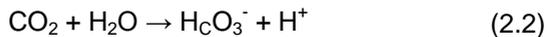
2.5.1 *Methyl Diethanol Amine* (MDEA)

Pelarut MDEA sering digunakan untuk menyingkirkan CO₂, H₂S, COS, dan RSH dari gas sintetik, gas alam atau gas lainnya dengan rasio CO₂ terhadap H₂S yang sangat besar. Produk dari proses ini adalah gas dengan kandungan gas *inert* yang sangat kecil (memisahkan H₂S sampai kurang dari 4 ppmv dan konsentrasi CO₂ sampai 2%). Proses ini dapat menghasilkan *food grade* CO₂ dengan kemurnian CO₂ minimal 99,9%-v dan maksimal H₂S 1 ppm v/v (Irsyaduzzaqi dan Ariadji, 2010).

Reaksi H₂S dengan MDEA melibatkan perpindahan proton seperti yang terjadi pada amina lainnya. Reaksi kimia H₂S dengan MDEA dapat dilihat pada persamaan 2.1.



Karena MDEA merupakan amina tersier dan tidak memiliki atom hidrogen, maka reaksi CO₂ hanya dapat terjadi setelah terbentuknya ion bikarbonat. Reaksi kimia CO₂ dengan air dapat dilihat pada persamaan 2.2.



Reaksi pembentukan bikarbonat (HCO₃⁻) berjalan lambat. Bikarbonat merupakan bagian dari reaksi gas asam dengan amina untuk menghasilkan reaksi CO₂ secara keseluruhan. Reaksi karbon dioksida dengan amina dapat dilihat pada persamaan 2.3.



Larutan MDEA sering kali digunakan karena memiliki beberapa keuntungan, yaitu energi yang dibutuhkan kecil, kapasitas penyerapan dan stabilitas yang tinggi (Donsus dan Fuadi, 2017). Selain itu, menurut Marsella dan Maharani (2012), larutan MDEA juga dapat mengurangi *flowrate* dari sirkulasi larutan *amine*, mengurangi konsumsi energi pompa, tidak mudah terdegradasi baik secara *thermal* maupun *chemical*, memiliki reaksi panas yang rendah terhadap H₂S. Namun larutan MDEA ini memiliki kekurangan, yaitu kecepatan reaksi yang rendah. Maka dari itu digunakan *piperazine* sebagai promotor. Penggunaan promotor ini dapat menaikkan laju reaksi tanpa menghilangkan keuntungan dari penggunaan larutan MDEA itu sendiri (Donsus dan Fuadi, 2017).

Piperazine (PZ) secara bebas larut dalam air dan etilena glikol, tetapi tidak larut dalam dietil eter, dan merupakan basa lemah. *Piperazine* mudah menyerap air dan karbon dioksida dari udara. *Piperazine* yang umumnya tersedia di industri adalah sebagai *hexahydrate* (C₄H₁₀N₂ · 6H₂O) yang meleleh pada suhu 44°C dan mendidih pada 125-130°C. Keuntungan dari *piperazine* adalah memiliki reaktivitas yang tinggi terhadap CO₂ dan daya dukung yang tinggi untuk CO₂. Menurut studi yang dilakukan oleh Bishnoi dan Rochelle pada tahun 2002, penambahan 5% berat *piperazine* dan 45% berat MDEA dapat meningkatkan tingkat penyerapan CO₂ sekitar dua kali besarnya di dibandingkan dengan penggunaan 50 % berat MDEA (Donsus dan Fuadi, 2017). Larutan MDEA yang ditambahkan dengan air dan *piperazine* disebut sebagai *activated* MDEA (aMDEA) (Marsella dan Maharani, 2012).

2.5.2 *Triethylene Glycol* (TEG)

Dalam proses industri, khususnya pengolahan gas, *glycol* digunakan sebagai penyerap kandungan air yang terdapat dalam gas alam. Menurut Jafar, dkk tahun 2016, ada 3 jenis *glycol* yang umum digunakan dalam proses industri, yaitu *Triethylene Glycol* (TEG), *Diethylene Glycol* (DEG), dan *Ethylene Glycol* (MEG). Namun yang paling banyak digunakan adalah *Triethylene Glycol*. TEG juga bisa disebut *Triglycol* yang merupakan cairan kental yang tidak berwarna, tidak berbau, transparan, memiliki volatilitas rendah, dan larut dalam air. TEG memiliki rumus molekul C₆H₁₄O₄

atau $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$. Pada kondisi normal, TEG tidak akan berbau, namun pada kondisi konsentrasi *vapor* yang tinggi maka akan sedikit tercium bau manis. TEG memiliki karakteristik yang cenderung sama dengan jenis *glycol* lainnya. Ada banyak kegunaan TEG yang dapat dimanfaatkan dalam dunia industri, salah satunya adalah sebagai penyerap dalam proses dehidrasi gas alam karena TEG memiliki sifat higroskopis yaitu mampu menyerap air (Septian, 2016).

TEG adalah bahan kimia yang stabil, tidak korosif, dan memiliki *flash point* yang tinggi. Pada kondisi normal, TEG dapat disimpan di dalam tangki yang terbuat dari baja dengan campuran karbon yang rendah atau disebut *mild steel*. Jika penyimpanan dilakukan dalam jangka waktu yang panjang disarankan menggunakan tangki yang terbuat dari *stainless steel* dan aluminium. Tidak disarankan menggunakan material zink, tembaga, ataupun *alloy* tembaga karena dapat menyebabkan perubahan warna pada TEG (Septian, 2016). TEG memiliki titik didih yang tinggi dan hampir 90% TEG dapat diregenerasi pada suhu 3400°F sampai 4000°F , sehingga dapat diperoleh konsentrasi yang tinggi (Jafar, dkk; 2016).

Pada saat TEG menyerap air di unit kontaktor, sebenarnya tidak hanya air saja yang terserap, tetapi juga menyerap hidrokarbon dan gas asam. Kekuatan penyerapan TEG terhadap hidrokarbon parafin, seperti metana, etana, dan lainnya tidak terlalu besar. Namun, hidrokarbon aromatik seperti *benzene*, *toluene*, *ethylbenzene*, dan *xylene* (BTEX) dengan mudah terserap, yang menjadi masalah adalah zat-zat tersebut bersifat karsinogenik dan menyebabkan polusi pada udara sekitar (Septian, 2016).

2.6 Pemanfaatan Gas Alam

Sebagian besar pemanfaatan gas bumi dibagi atas 3 kelompok yaitu sebagai bahan bakar, bahan baku, dan komoditas energi untuk ekspor. 3 kelompok tersebut dikenal sebagai LNG (*Liquefied Natural Gas*), CNG (*Compressed Natural Gas*), dan LPG (*Liquefied Petroleum Gas*) (Syukur, 2016). LPG dan LNG merupakan gas alam hasil penyulingan dan pemisahan dari minyak bumi. Gas butana (C_4) dan propana (C_3) akan menjadi LPG sedangkan gas metana (C_1) akan menjadi LNG. LPG

dikenal sebagai bahan bakar untuk keperluan memasak

CNG sendiri merupakan gas alam yang dikompresi sampai dengan tekanan 250 bar tanpa melalui proses penyulingan. Kemudian gas tersebut disimpan dalam tabung logam dan didistribusikan dengan truk tangki jenis *skid tube*. CNG relatif lebih murah dan lebih ramah lingkungan. Hal tersebut dikarenakan CNG ini memiliki emisi yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar minyak. CNG adalah alternatif bahan bakar selain bensin dan solar. Indonesia mengenal CNG sebagai BBG. CNG sekarang menjadi primadona dalam penggunaannya sebagai bahan bakar pada bus, truk, bahkan bahan bakar untuk pembangkit listrik (Syukur, 2016).

Menurut Religia (2014), dalam bidang industri, pemanfaatan gas alam dilakukan pada berbagai sektor, seperti sebagai sumber pembangkit energi pada PLTG. Selain itu, gas alam juga dimanfaatkan sebagai komponen produksi *lifting* minyak bumi, bahan baku produksi industri pupuk dan petrokimia, dan sebagainya.

2.7 Pencemaran Udara

PP Nomor 41 Tahun 1999 menyebutkan bahwa pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien sampai tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya. Sedangkan menurut Mukono (2005), pencemaran udara adalah adanya bahan polutan di atmosfer dalam konsentrasi tertentu. Sehingga bahan polutan tersebut dapat dideteksi oleh manusia serta memberikan efek kepada makhluk hidup dan material. Pencemar udara dibedakan menjadi pencemar primer dan pencemar sekunder. Pencemar primer adalah pencemar yang berada di udara dalam bentuk hampir sama seperti saat dibebaskan ke udara. Sedangkan pencemar sekunder merupakan pencemar yang sudah mengalami perubahan bentuk karena hasil reaksi tertentu antar pencemar atau dengan kontaminan di udara.

Pencemaran udara dapat digolongkan menjadi tiga kategori, yaitu pergesekan permukaan, penguapan, dan pembakaran. Pergesekan permukaan adalah penyebab utama

pencemaran partikel padat diudara dan ukurannya dapat bermacam-macam. Sedangkan penguapan adalah perubahan fase cairan menjadi gas. Polusi udara banyak disebabkan oleh zat-zat yang mudah menguap, seperti pelarut cat dan perekat (Sastrawijaya, 2009). Pencemaran udara ditandai dengan terjadinya penurunan kualitas udara yang dapat mengganggu kesehatan manusia (Sandra, 2013). Menurut Kusminingrum *et al.* (2008), gas-gas pencemar udara juga dapat menimbulkan efek terhadap pemanasan global. Salah satu gas pencemar udara yang berkontribusi terhadap pemanasan global adalah NO_x (Sagala, 2012).

2.8 Pemanasan Global

Pemanasan global (*global warming*) adalah suatu bentuk ketidakseimbangan ekosistem di bumi yang diakibatkan oleh peningkatan suhu rata-rata permukaan bumi. Selama kurang lebih seratus tahun terakhir, suhu rata-rata di permukaan bumi telah meningkat sebesar $0,74 \pm 0,18$ °C (Utina, 2009). Sedangkan menurut IPCC (2006), suhu rata-rata pada permukaan bumi akan meningkat sebesar 1,1 hingga 6,4°C antara tahun 1990 hingga 2100. Meningkatnya suhu rata-rata permukaan bumi terjadi akibat meningkatnya emisi gas rumah kaca di atmosfer (Cahyono, 2010). Penyebab utama pemanasan ini adalah pembakaran bahan bakar fosil yang melepas CO_2 dan gas lainnya ke atmosfer (Sulistiyono, 2012). Menurut Samiaji (2011), gas rumah kaca yang berada di atmosfer terdiri dari CO_2 , CH_4 , N_2O , CFC, HFCs, dan SF_6 . Pada tahun 2005, industri minyak dan gas menghasilkan emisi CO_2 sebesar 122 Metric Ton (Mt) CO_2 . Diperkirakan pada tahun 2030, emisi CO_2 yang dihasilkan meningkat menjadi 137 Mt CO_2 (Kementerian Keuangan RI, 2015)

Peningkatan suhu permukaan juga dihasilkan oleh adanya radiasi sinar matahari menuju ke atmosfer bumi. Kemudian sebagian sinar ini berubah menjadi energi panas dalam bentuk sinar inframerah yang diserap oleh udara dan permukaan bumi. Sebagian sinar inframerah dipantulkan kembali ke atmosfer dan ditangkap oleh gas-gas rumah kaca yang kemudian menyebabkan suhu bumi meningkat (Utina, 2009). Sebagian besar peningkatan suhu rata-rata terjadi sejak pertengahan abad ke-20 (Sulistiyono, 2012). Pemanasan diperkirakan akan terus

terjadi karena karbon dioksida (CO_2) diperkirakan memiliki umur di atmosfer 50 sampai 200 tahun (Venkataramanan dan Smitha, 2011). Adapun dampak dari pemanasan global adalah peningkatan suhu bumi, perubahan iklim, peningkatan permukaan air laut, dan dampak ekologis (Sulistiyono, 2012). Perubahan iklim merupakan perubahan pola cuaca menjadi tidak terprediksi dan lebih ekstrim.

2.9 Efek Rumah Kaca

Gas Rumah Kaca (GRK) merupakan gas di atmosfer yang berfungsi menyerap radiasi inframerah dan ikut menentukan suhu atmosfer. GRK diartikan sebagai gas yang terkandung dalam atmosfer, baik alami maupun dari kegiatan manusia, yang menyerap dan memancarkan kembali radiasi inframerah (Martono, 2015). Awalnya, sinar matahari masuk ke lapisan atmosfer dan memancarkan panas. Sebagian radiasi matahari dalam bentuk gelombang pendek yang diterima permukaan bumi dipancarkan kembali ke atmosfer dalam bentuk radiasi gelombang panjang. Energi yang masuk ke bumi mengalami pemantulan oleh awan atau partikel sebesar 25% dan diserap awan sebesar 25%. Lalu 45% energi diadsorpsi permukaan bumi, sedangkan 5% nya dipantulkan kembali oleh permukaan bumi. Namun sebagian radiasi yang dipantulkan kembali tetap terperangkap di atmosfer bumi akibat menumpuknya jumlah gas rumah kaca. Radiasi gelombang yang tertahan akibat adanya gas rumah kaca akan menimbulkan efek panas yang disebut efek rumah kaca (Sulistiyono, 2012).

Menurut Sulistiyono (2012), efek rumah kaca ini sebenarnya dibutuhkan oleh segala makhluk hidup yang ada di bumi. Hal tersebut dikarenakan apabila tidak ada efek rumah kaca, maka planet ini akan menjadi sangat dingin. Dengan suhu rata-rata sebesar 15°C (59°F), sebenarnya bumi telah lebih panas 33°C ($91,4^\circ\text{F}$) dari suhunya semula. Apabila tidak ada efek rumah kaca, suhu bumi hanya mencapai -18°C . Sehingga es akan menutupi seluruh permukaan bumi. Akan tetapi, apabila gas-gas rumah kaca tersebut berlebihan di atmosfer, maka akan mengakibatkan pemanasan global. Dengan semakin meningkatnya konsentrasi GRK di atmosfer, maka semakin banyak panas yang terperangkap di bawahnya.

Menurut IPCC (2006), gas CO₂ dan CH₄ merupakan emisi GRK yang paling potensial sebagai penyebab pemanasan global. Pemanasan global merupakan indikasi dari perubahan iklim. Penelitian yang dilakukan oleh Monahan & Powell (2011) dan You *et al.* (2011) menunjukkan bahwa CO₂ sangat berpengaruh terhadap perubahan iklim. Dalam isu perubahan iklim, gas CO₂ memegang peranan penting dalam mengontrol suhu permukaan bumi dibandingkan gas lainnya (Samiaji, 2011). Hal tersebut dikarenakan konsentrasi CO₂ lebih besar dibandingkan gas lainnya, meskipun gas CO₂ mempunyai indeks pemanasan global yang paling kecil (Daniel, 1999). Berdasarkan data *Earth System Research Laboratory* dalam Lopez (2018), konsentrasi rata-rata CO₂ di atmosfer terus mengalami peningkatan. Pada tahun 1960, konsentrasi rata-rata CO₂ adalah 316 ppm, sedangkan tahun 1985 meningkat menjadi 346 ppm. Dan pada tahun 2017, konsentrasi rata-rata CO₂ berhasil mencapai 406 ppm.

Terdapat 2 target penurunan emisi GRK pada sektor industri yang disebutkan dalam Peraturan Presiden No. 61 Tahun 2011. Target pertama adalah penurunan emisi GRK sebesar 26% (0,001 Gton CO₂e) pada tahun 2020 tanpa bantuan negara lain. Sedangkan target kedua adalah penurunan emisi GRK sebesar 41% (0,005 Gton CO₂e) bila memperoleh bantuan dari negara lain (Peraturan Presiden, 2011). Selain itu, untuk mengurangi emisi GRK, terdapat sebuah konvensi yang dilakukan oleh negara-negara di dunia. Konvensi tersebut disebut sebagai Protokol Kyoto (Sulistiyono, 2012). Protokol ini mengharuskan negara-negara industri untuk menurunkan emisinya sebesar 5,2% dibawah tingkat emisi tahun 1990 (Utina, 2009). Jika Protokol Kyoto sukses dijalankan, maka diprediksi akan mengurangi rata-rata pemanasan global antara 0,02°C - 0,28°C pada tahun 2050 (Sulistiyono, 2012).

2.10 Penipisan Lapisan Ozon

Ozon merupakan komponen atmosfer yang sangat sedikit jumlahnya (Prodjosantoso, 1992). Tergantung pada letak lokasinya, ozon adalah gas alami yang dapat bersifat baik dan buruk bagi kesehatan. Ozon yang bersifat buruk adalah ozon yang terletak pada lapisan troposfer. Ozon troposfer adalah

polutan udara yang merupakan unsur utama kabut perkotaan. Sedangkan, ozon yang terletak pada lapisan stratosfer merupakan ozon yang baik karena melindungi kehidupan bumi dengan menyerap sinar UV matahari (EPA, 2010).

Menurut Moore dan Moore (1976), ozon mempunyai kemampuan untuk menyerap sebagian besar radiasi sinar UV-B dengan panjang gelombang 280-320 nm. Sinar UV-B ini dapat mematikan hampir semua bentuk-bentuk kehidupan dan menyebabkan terjadinya kanker kulit. Meningkatnya radiasi sinar UV-B ini juga dapat menghambat reproduksi pada tanaman, seperti kentang dan alga. Selain sinar UV-B, lapisan ozon juga banyak menyerap sinar UV-C dengan panjang gelombang 200-280 nm, sedangkan untuk sinar UV-A hanya diserap oleh lapisan ozon dalam jumlah sedikit. Hal tersebut dikarenakan sinar UV-A memiliki panjang gelombang lebih besar dari 320 nm dan relatif tidak berbahaya (Prodjosantoso, 1992).

Berdasarkan hasil penelitian, lapisan ozon yang menjadi pelindung bumi dari radiasi sinar UV B semakin menipis. Kerusakan lapisan ozon pertama kali ditemukan pada tahun 1974 oleh tim peneliti Inggris, British Antarctic Survey (BAS), diatas Halley Bay, benua Antartika. Peneliti tersebut menyimpulkan bahwa penipisan ozon pada Halley Bay diakibatkan oleh reaksi kimia chlorin dan nitrogen. Tercatat bahwa penipisan yang terjadi mencapai 30-40% dalam satu dekade (Widowati dan Sutoyo, 2009). Penipisan lapisan ozon di stratosfer akan menyebabkan intensitas sinar UV dari radiasi matahari yang sampai kepermukaan bumi menjadi lebih besar. Bila intensitas sinar UV di permukaan bumi menjadi lebih besar, maka dapat menimbulkan penyakit pada manusia dan hewan, serta mengganggu metabolisme tumbuhan (Masithah, 2016).. Kerusakan tanaman, terutama daun, menyebabkan terhambatnya proses fotosintesis yang berdampak pada pertumbuhan dan hasil tanaman (Iglesias, *et al.*, 2006). Sedangkan, penyakit yang dapat timbul pada manusia dan hewan adalah kanker kulit, penyakit katarak pada mata, dan perusakan sel-sel hidup. Selain itu, kehidupan laut, ekosistem, dan hutan pun akan terganggu bila volume sinar UV yang masuk melebihi batas normal. Sebagai contoh, konsentrasi ozon normal untuk kesehatan manusia kira-kira 0,1 ppm di udara, jika konsentrasi ozon di udara 0,1-1,0 ppm

maka dapat menyebabkan kepala psing, mata iritasi, dan iritasi saluran pernapasan (Widowati dan Sutoyo, 2009).

Faktor penyebab terjadinya penipisan lapisan ozon diakibatkan oleh lepasnya gas pencemar yang merusak ozon. Gas pencemar perusak ozon yang banyak terlepas adalah *Chlorofluorocarbon* (CFC) dan *Halon* (*bromofluorocarbon* atau *bromochlorofluorocarbon*) (Masithah, 2016). Selain kedua gas tersebut, terdapat gas pencemar perusak ozon lainnya, seperti N_2O , *methyl bromida*, *carbon tetrachlorida*, *methyl chloroform* (Widowati dan Sutoyo, 2009).

Pada lapisan stratosfer, radiasi matahari memecah molekul gas yang mengandung khlorin atau bromin yang dihasilkan oleh CFC dan halon yang akan menghasilkan radikal khlor dan brom. Reaksi CFC dan halon dengan radiasi matahari dapat dilihat pada Persamaan 2.4 dan Persamaan 2.5.

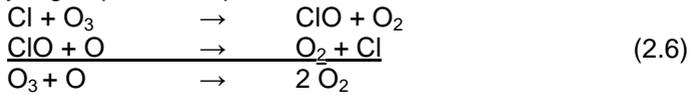


Kemudian, radikal-radikal khlorin dan bromin melalui reaksi berantai memecahkan ikatan gas-gas lain di atmosfer, termasuk ozon. Molekul-molekul ozon terpecah menjadi oksigen dan radikal oksigen. Dengan terjadinya reaksi ini maka akan mengurangi konsentrasi ozon di stratosfer. Semakin banyak senyawa yang mengandung khlor dan brom, maka perusakan lapisan ozon semakin parah. Dalam waktu kira-kira 5 tahun, CFC bergerak naik dengan perlahan ke dalam stratosfer (ketinggian 10 – 50 km). Molekul CFC terurai setelah bercampur dengan sinar UV dan membebaskan atom khlorin. Bahan kimia ini membuat lapisan ozon tipis dengan bertindak sebagai katalis dalam suatu reaksi kimia yang merubah ozon (O_3) menjadi oksigen (O_2). Reaksi ini dipercepat dengan adanya kristal-kristal es di stratosfer yang merupakan salah satu dari sumber bagi kerugian besar ozon di Antartika. Karena CFC bertindak sebagai katalis, maka mereka tidak dikonsumsi dalam reaksi yang merubah ozon menjadi oksigen, namun tetap ada di stratosfer dan terus menerus merusak ozon selama bertahun-tahun (Masithah, 2016). Menurut hasil penelitian, satu atom Cl dapat menguraikan sampai 100.000 senyawa ozon dan bertahan sampai 40-150 tahun di

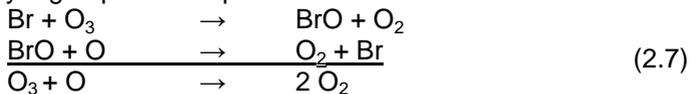
atmosfer. Padahal stratosfer hanya bisa menyerap sejumlah atom klorin, sehingga pada akhirnya meskipun penggunaan CFC ditekan, jumlah yang ada dalam atmosfer masih cukup besar dan perlu waktu yang sangat lama untuk diserap (Widowati dan Sutoyo, 2009).

Menurut Prodjosantoso (1992), reaksi-reaksi penipisan ozon adalah sebagai berikut:

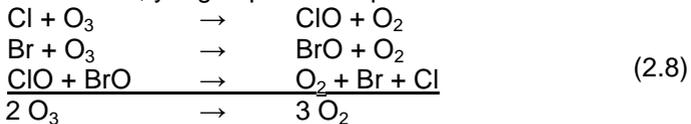
1. Reaksi penipisan ozon oleh khlor dari CFC 11 (CFCl_3), yang dapat dilihat pada Persamaan 2.6.



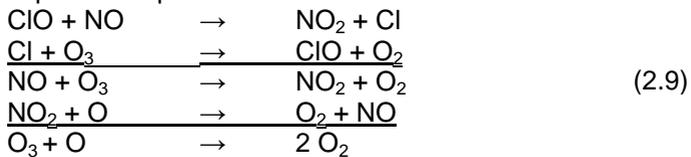
2. Reaksi penipisan ozon oleh brom dari halon (CBrF_3), yang dapat dilihat pada Persamaan 2.7.



3. Reaksi penipisan ozon oleh khlor dan brom secara bersamaan, yang dapat dilihat pada Persamaan 2.8.



4. Reaksi penipisan ozon oleh khlor dan gas NO, yang dapat dilihat pada Persamaan 2.9.



2.11 Sumber Emisi pada Industri Gas Alam

Pada kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam dihasilkan emisi gas rumah kaca (GRK) dan gas pencemar udara (Spath dan Mann, 2000). 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 (Permen LH No.12 Tahun 2012).

Adapun sumber emisi pada kegiatan industri minyak dan gas alam menurut UU Nomer 13 Tahun 2009 antara lain:

- Sumber emisi proses pembakaran adalah sumber emisi yang menghasilkan emisi dari reaksi *exothermic* antara bahan bakar dengan oksigen kecuali gas tersebut di bakar untuk pengolahan sulfur. Proses pembakaran yang meliputi emisi dari mesin pembakar dalam, turbin gas, ketel uap, pembangkit uap, pemanas proses, dan suar bakar.
- Sumber emisi proses produksi adalah sumber emisi yang menghasilkan emisi selain dari proses pembakaran sebagai akibat reaksi yang disengaja maupun tidak disengaja antara bahan-bahan (senyawa) atau perubahannya termasuk proses dekomposisi bahan secara thermal dan pembentukan bahan yang digunakan sebagai bahan baku proses produksi. Proses produksi yang meliputi emisi dari regenerator katalis unit perengkahan katalitik alir, emisi dari proses *decoking*. Selain itu, terdapat emisi dari kegiatan penangkapan sulfur dan unit pengolahan ulang sulfur sistem *claus*.
- Sumber emisi *fugitive* adalah emisi yang secara teknis tidak dapat melewati cerobong, ventilasi atau sistem pembuangan emisi yang setara. *Fugitive* yang meliputi emisi akibat kebocoran dari katup, *flensa*, pompa, kompresor, alat pelepas tekanan, peralatan proses produksi dan komponen-komponennya. Selain itu, emisi dari tangki timbun dan instalasi pengolahan air limbah.

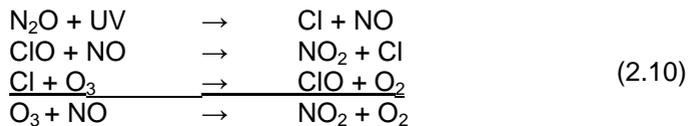
2.12 Karakteristik Emisi

Berikut ini adalah penjelasan singkat mengenai karakteristik dari masing-masing emisi gas rumah kaca (CO_2 , CH_4 , dan N_2O) dan gas pencemar udara (NO_2 dan SO_x):

- Karbon dioksida (CO_2).
Karbon dioksida adalah gas rumah kaca antropogenik yang paling penting. CO_2 dapat diemisikan secara alami (siklus karbon) dan melalui aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil (IPCC, 2006). CO_2 adalah

gas *inert* dan gas ikutan yang keluar bersama gas alam, yang timbul dari kegiatan eksploitasi migas (Sulistyono, 2012). CO₂ merupakan gas yang tidak berwarna dan tidak berbau. Gas ini akan menurunkan nilai pembakaran (*heating value*) dari gas alam. Menurut Sulistyono (2012), apabila CO₂ dikombinasi dengan adanya air, maka akan membentuk senyawa yang korosif.

- Dinitrogen Oksida (N₂O).
Gas N₂O dapat timbul secara alami yaitu dari berbagai sumber biologis di dalam tanah dan air, terutama aktivitas mikroba pada hutan tropis basah dan kebakaran hutan. Sumber dari antropogenik yaitu sektor pertanian, peternakan, proses industri, pengelolaan sampah, pemakaian energi, bahkan bisa diproduksi dengan sengaja untuk berbagai kebutuhan. Emisi gas N₂O di Indonesia cenderung naik. Sumber yang paling besar di Indonesia adalah pertanian dan peternakan. Akibat dari emisi N₂O yang cenderung naik, maka konsentrasinya pun di permukaan cenderung naik. Karakteristik gas N₂O ini bila berada di stratosfer maka konsentrasinya makin kecil dengan bertambahnya ketinggian dan umumnya mengalami maksimum di garis ekuator. Dari sifat kimianya, gas N₂O di lapisan stratosfer dengan bantuan sinar matahari dapat merusak ozon dan termasuk ke dalam salah satu gas rumah kaca. Reaksi N₂O ketika merusak lapisan ozon dapat dilihat pada Persamaan 2.10.



Sedangkan untuk sifat fisiknya, gas N₂O pada suhu kamar tidak berwarna dan tidak mudah terbakar, tetapi pada temperatur tinggi dapat digunakan sebagai *oxidizer* dalam peroketan dan dalam balap motor untuk meningkatkan daya *output* mesin atau menambah tenaga

- mesin (Samiaji, 2012)..
- Metana (CH_4).
Metana (CH_4) merupakan gas telusur yang menduduki peringkat ke-5 terbesar di atmosfer setelah argon (Ar), karbon dioksida (CO_2), neon (Ne), dan helium (He) (Pawitan, 1989). Metana juga merupakan senyawa organik atmosfer yang memiliki waktu tinggal (*life time*) cukup lama sekitar 8-10 tahun (Isaksen, 2014). Metana dapat mengalami transportasi dari permukaan ke troposfer, lalu bergerak sampai stratosfer (Warneck, 1988). Di stratosfer, CH_4 berperan sebagai perosot atom klorin (Cicerone dan Oremland, 1988) dan penting untuk reaksi kimia ozon di stratosfer. Hal ini disebabkan CH_4 akan bereaksi dengan Cl radikal dan membentuk asam klorida yang memiliki sifat *inert* (Jones and Pyle, 1984). Konsentrasi CH_4 di atmosfer pada saat ini telah lebih dari dua kali lipat dibandingkan 200 tahun lalu, sehingga berpengaruh besar pada kimia atmosfer global dan juga keseimbangan radiasi (Braunlich *et al.*, 2001). Selain itu Leliveld *et al.* (1998) juga mengungkapkan bahwa CH_4 berkontribusi sekitar 20% pada *forcing* gas rumah kaca (GRK) antropogenik. Peningkatan emisi CH_4 antropogenik berasal dari sektor peternakan, pertambangan, dan pertanian yang merupakan sumber utama pengemisi CH_4 terutama di pedesaan (Braunlich *et al.*, 2001). Selain di pedesaan, sumber emisi CH_4 juga terdapat di perkotaan. Limbah domestik rumah tangga (*septic tank*), badan air tergenang (saluran pembuangan air, sungai mampat, dan waduk), tempat pembuangan sampah baik sementara (TPS) maupun akhir (TPA), serta genangan air saat banjir adalah beberapa sumber emisi di perkotaan (Slamet, 2014).
 - Nitrogen dioksida (NO_2).
Gas ini terbentuk dari reaksi antara nitrogen dan oksigen di udara. Reaksi tersebut dapat terjadi pada pembakaran hingga suhu diatas 1210°C (Depkes RI, 2010). NO_2 dapat dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar minyak dan bahan bakar fosil. NO_2 memiliki karakteristik berwarna coklat kemerahan dan berbau tajam (Barata,

2005).

- Sulfur oksida (SO_x).
Sulfur oksida adalah senyawa gas berbau tidak sedap yang banyak dijumpai di kawasan industri yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakarnya (Barata, 2005). Senyawa ini terbentuk jika konsentrasi uap air sangat rendah. Jika terdapat uap air yang memadai, maka SO_x akan mengikat uap air untuk membentuk *droplet* asam sulfat (H_2SO_4). Pengaruh SO_x terhadap manusia adalah iritasi pada sistem pernafasan. Menurut Depkes RI (2010), iritasi pernafasan terjadi pada kadar SO_x sebesar 5 ppm atau lebih. Sedangkan dampak bagi lingkungan adalah terjadinya hujan asam, menyebabkan korosi pada logam, dan pemburaman pada bangunan yang mengandung kapur atau marmer.

2.13 Metode Perhitungan Beban Emisi

Metode perhitungan beban emisi adalah menghitung beban emisi berdasarkan data aktivitas yang diperoleh dengan cara menghitung sistem dan parameter tambahan lain yang diperoleh dari pengukuran laboratorium atau faktor standar. Sedangkan, metode pengukuran beban emisi adalah pengukuran secara kontinu konsentrasi dan aliran gas dari sumber emisi (Segala, 2012). Menurut Permen LH No. 12 Tahun 2012, terdapat beberapa pilihan untuk menghitung beban emisi yang dipilih berdasarkan ketersediaan data *input* sebagai berikut:

- a. Faktor emisi yang dipublikasikan.
- b. Faktor emisi peralatan dari *manufacture*.
- c. Perhitungan teknis.
- d. Simulasi proses atau permodelan komputer.
- 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.

Biasanya, nilai beban emisi dihitung dengan faktor emisi yang dipublikasikan. Adapun rumus perhitungan beban emisi berdasarkan Permen LH No. 12 Tahun 2012 dapat dilihat pada Persamaan 2.11.

$$E_i = FC \times EF_i \quad (2.11)$$

Keterangan:

- E = Beban emisi komponen i (ton/hari).
 i = Parameter emisi yang dihitung.
 FC = Pemakaian bahan bakar (m^3 atau MMscfd).
 EF = Faktor emisi komponen i (ton/ton)

Faktor emisi baku yang dipublikasikan dapat dilihat dari berbagai referensi, seperti API *Compendium*, *Oil & Gas Producers*-OGP, US EPA, dan lain-lain, yang disesuaikan dengan kebutuhan dalam perhitungan. Adapun faktor emisi untuk unit pembakaran dalam dan luar dapat dilihat pada Tabel 2.2, sedangkan faktor emisi untuk unit suar bakar (*flaring*) dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 2 Faktor Emisi untuk Unit Pembakaran Dalam dan Luar

Emisi	Unit	Faktor Emisi
CO ₂	ton/10 ¹² J	55.9 (a)
CH ₄	ton/10 ¹² J	0.001 (a)
N ₂ O	ton/10 ¹² J	0.0001 (a)
NO _x	lb/MMscf	100 (b)
SO _x	lb/MMscf	0.6 (b)

(a) API Compendium 2009 dalam Pertamina, 2016.

(b) US EPA-AP 42 dalam Pertamina, 2016.

Tabel 2. 3 Faktor Emisi untuk Unit Suar Bakar (*Flare*)

Emisi	Unit	Faktor Emisi
CO ₂	Ton/Ton	2,61
CH ₄	Ton/Ton	0,035
N ₂ O	Ton/Ton	0,000081
NO _x	Ton/Ton	0,0015
SO _x	Ton/Ton	0,0000128

Sumber: OGP *Report* no.197 dalam Permen LH 12/2012

Dalam perhitungan beban emisi dengan Persamaan 2.11, nilai faktor emisi dikalikan terlebih dahulu dengan nilai *heating value* (nilai kalor). Nilai kalor merupakan jumlah energi kalor yang dilepaskan bahan bakar pada waktu terjadinya pembakaran atau oksidasi unsur-unsur kimia yang ada pada bahan bakar tersebut (Napitupulu, 2006).

Nilai kalor bahan bakar terdiri dari *high heating value* (HHV) dan *low heating value* (LHV). Menurut Napitupulu (2006), HHV adalah nilai kalor yang diperoleh dari pembakaran 1 kg bahan bakar dengan memperhitungkan panas kondensasi uap (air yang dihasilkan dari pembakaran berada dalam wujud cair). Sedangkan, LHV adalah nilai kalor yang diperoleh dari pembakaran 1 kg bahan bakar tanpa memperhitungkan panas kondensasi uap (air yang dihasilkan dari pembakaran berada dalam wujud gas/uap). Untuk nilai kalor berdasarkan jenis bahan bakar berdasarkan API *Compendium* 2009 dapat dilihat pada Lampiran I.

2.14 Life Cycle Assessment (LCA)

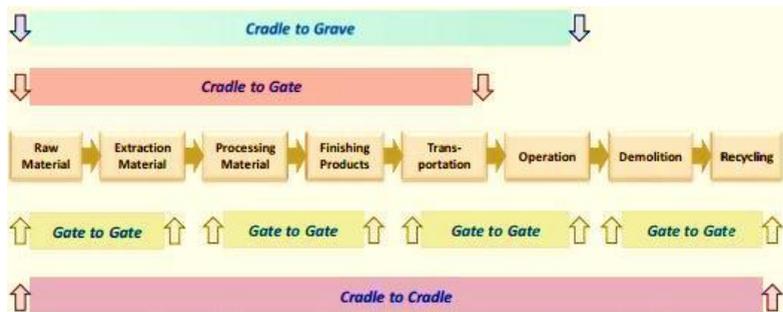
Menurut Giandadewi, dkk (2017), untuk mengidentifikasi dan menganalisis dampak-dampak lingkungan yang dapat terjadi, metode yang sering digunakan adalah metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Selain itu, LCA adalah alat yang biasa digunakan untuk menganalisis penghematan energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca, audit lingkungan dan energi global yang berfokus pada kehidupan siklus produk, serta efisiensi penggunaan sumber daya seperti tanah, air, energi, dan sumber daya alam lainnya (Giandadewi, dkk., 2017).

Konsep dasar dari LCA ini didasarkan pada pemikiran bahwa suatu sistem industri tidak lepas kaitannya dengan lingkungan tempat industri itu berada. Dalam suatu sistem industri terdapat *input* dan *output*. *Input* dalam sistem adalah material-material yang diambil dari lingkungan dan *output* nya akan dibuang ke lingkungan kembali. *Input* dan *output* dari sistem industri ini tentu saja akan memberi dampak terhadap lingkungan. Pengambilan material (*input*) yang berlebihan akan menyebabkan semakin berkurangnya persediaan material, sedangkan hasil keluaran dari sistem industri yang bisa berupa limbah (padat, cair, udara) akan banyak memberi dampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu LCA berusaha untuk melakukan evaluasi untuk meminimumkan pengambilan material dari lingkungan, memperbaiki proses, dan juga meminimumkan limbah industri (Hamonangan, dkk., 2017).

Life Cycle Assessment (LCA) adalah proses objektif untuk menilai dampak lingkungan dari produk, proses, atau

aktivitas. Penilaian tersebut dilakukan dengan mengidentifikasi sumber energi, penggunaan *raw material*, dan pembuangan pada lingkungan. Selain itu, metode tersebut dapat mengevaluasi dan menerapkan kemungkinan perbaikan lingkungan (Graedel dan Allenby, 1995). Maka, dengan dibuatnya LCA dapat menghindari terjadinya pergeseran dampak dari satu fase daur hidup produk ke fase lainnya (Turconi *et al.*, 2013).

LCA memiliki sebuah siklus yang dimulai dari kegiatan ekstraksi bahan mentah, proses produksi, transportasi, operasi, sampai pada proses daur ulang. Dengan ruang lingkup siklus tersebut, maka LCA dapat memberikan dampak lingkungan dari kegiatan yang menghasilkan produk (Finnveden *et al.*, 2009). Konsep dalam LCA ini disebut juga sebagai konsep “*cradle to grave*” (Hamonangan, dkk., 2017). Menurut Herprayoga (2014), LCA dapat membantu penggunaannya untuk bisa mengidentifikasi dampak lingkungan yang dihasilkan dari setiap proses. Sehingga, hal tersebut akan memudahkan penggunaannya dalam memberikan saran dikarenakan identifikasi dampak menggunakan LCA sangat detail dan jelas. Menurut Hermawan dkk. (2013), ruang lingkup pada LCA terbagi menjadi 4. Untuk skema dari ruang lingkup LCA tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2



Gambar 2. 2 Ruang Lingkup LCA
Sumber : Hermawan, dkk., 2013

Berikut ini adalah masing-masing penjelasan untuk keempat ruang lingkup LCA pada Gambar 2.2:

- a. *Cradle to grave*, ruang lingkup pada bagian ini dimulai dari *raw material* sampai pada pengoperasian produk.

- b. *Cradle to gate*, ruang lingkup pada analisis daur hidup dimulai dari *raw material* sampai ke *gate* sebelum proses operasi.
- c. *Gate to gate*, ruang lingkup pada analisis daur hidup yang terpendek karena hanya meninjau kegiatan yang terdekat.
- d. *Cradle to cradle*, bagian dari analisis daur hidup yang menunjukkan ruang lingkup dari *raw material* sampai pada daur ulang material.

2.15 Prinsip *Life Cycle Assessment*

Menurut Pujadi dan Yola (2013), *Life Cycle Assessment* (LCA) memiliki prinsip sebagai berikut:

- Melihat siklus hidup sebagai suatu perspektif, dengan kata lain mempertimbangkan seluruh siklus hidup fisik dari suatu produk (atau jasa), mulai dari ekstraksi bahan baku, pemakaian energi dan material produksi, proses produksi, penggunaan produk, sampai akhir hidup produk tersebut. Perspektif yang lainnya adalah melihat siklus hidup pada suatu proses tertentu yang sekarang ini banyak dilakukan sebagai penelitian.
- Mencakup semua aspek lingkungan menjadi satu penilaian umum sehingga dampak lingkungan dapat diidentifikasi.
- Memberikan transparansi dalam rangka memastikan interpretasi yang tepat atas hasil yang didapatkan oleh perhitungan.
- Bersifat iteratif karena terdiri dari empat tahapan, yaitu penentuan tujuan dan ruang lingkup penelitian, *Life Cycle Inventory*, *Life Cycle Impact Assessment*, dan Interpretasi.
- Berfokus kepada lingkungan dengan mempelajari aspek lingkungan dari sistem produk dan mengesampingkan aspek ekonomi dan sosial ke luar penelitian.
- Merupakan metode yang berbasis ilmu pengetahuan meskipun keadaan ilmiah selalu berubah. LCA memberikan gambaran dari keadaan tertentu pada waktu tertentu.

2.16 Karakteristik dan Batasan *Life Cycle Assessment*

Menurut Pujadi dan Yola (2013), *Life Cycle Assessment* (LCA) memiliki karakteristik dan batasan untuk menilai siklus hidup sebagai berikut:

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

2.17 Tahapan *Life Cycle Assessment*

Menurut ISO 14040, LCA adalah sebuah teknik yang digunakan untuk melakukan penilaian terhadap dampak lingkungan yang berhubungan dengan suatu produk. Terdapat beberapa tahapan dalam melakukan penilaian tersebut. Tahapan-tahapan tersebut diatur dalam beberapa standar ISO. ISO 14040 berisi mengenai prinsip umum LCA dan ISO 14041 tentang definisi tujuan dan ruang lingkup serta analisis inventarisasi LCA. Lalu, ISO 14042 berisi mengenai siklus pengkajian dampak siklus dan ISO 14043 tentang interpretasi LCA (Pujadi dan Yola, 2013). Adapun tahapan-tahapan dari LCA adalah *goal and scope*, *Life Cycle Inventory*, *Life Cycle Impact Assesment*, dan *Life Cycle Interpretation*.

2.17.1 Definisi Tujuan dan Cakupan (*Goal and Scope Definition*)

Langkah pertama dalam LCA adalah menentukan tujuan

dan ruang lingkup pembahasan. Pada tahap ini, alasan menggunakan LCA diidentifikasi menjadi penentuan produk, proses, dan penentuan pilihan tentang batasan penelitian (Bogia *et al.*, 2009). Batasan sistem menentukan unit proses mana yang tercakup dalam pembahasan LCA dan batasan tersebut harus mencerminkan tujuan dari pembahasan. Kesimpulan pada tahap ini mencakup deskripsi dari metode yang diaplikasikan untuk memperkirakan potensi dampak lingkungan. Selain itu, tahap ini juga berisi mengenai dampak lingkungan mana yang akan diperhitungkan (Jeroen, 2002).

2.17.2 Tahap *Input Analisis Inventory (Life Cycle Inventory)*

Langkah kedua LCA adalah menginventarisasikan data *input* (bahan baku dan energi). Data lain yang diinventarisasikan adalah data *output* (limbah dan emisi ke udara, air dan tanah) yang terjadi sepanjang daur hidupnya. Pada tahap LCI, semua data yang dimasukkan adalah proses data yang relevan digunakan untuk memproduksi, mengangkut, menggunakan, dan membuang produk yang dipilih (Riyanty, 2015). Tahap ini menginventarisasi penggunaan sumber daya, penggunaan energi, dan pelepasan ke lingkungan terkait dengan sistem yang dievaluasi (Sari, 2017). Langkah ini membutuhkan waktu yang paling lama dibandingkan dengan langkah lainnya. Hal tersebut dikarenakan kualitas, akurasi, dan representatif data sangat mempengaruhi hasil akhirnya (Bogia *et al.*, 2009).

2.17.3 Tahap *Perdugaan Dampak (Life Cycle Impact Assessment)*

Hasil dari langkah LCI merupakan kumpulan bahan/material yang terkandung dari setiap bahan yang digunakan atau yang dikeluarkan. Untuk mengubah tiap elemen dalam inventarisasi tersebut menjadi kajian yang kualitatif terhadap kondisi lingkungan, maka diperlukan suatu langkah untuk memperkirakan dampak lingkungan yang terjadi. Langkah ini disebut *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*. Jadi, LCIA adalah tahap analisis mengenai jenis dan besarnya nilai tiap kategori dampak yang dihasilkan (Hamonangan, dkk., 2017).

Menurut Sitepu (2011), tahapan pada LCIA sendiri terdiri dari karakterisasi, normalisasi, pembobotan, dan *single score*.

Tahap karakterisasi adalah tahap mengidentifikasi dan mengelompokkan data *input* yang berasal dari LCI kedalam kategori-kategori dampak yang heterogen yang ditentukan sebelumnya. Penentuan kategori dampak yang heterogen ini dilakukan oleh *software* SimaPro sesuai dengan metode dan *database* yang digunakan (Hamonangan, dkk., 2017). Menurut Kautzar *et al.* (2015), karakterisasi merupakan tahapan dimana keseluruhan *input* dan *output* akan dinilai kontribusinya terhadap lingkungan sesuai dengan kategori dampak yang telah ditentukan sebelumnya. Nilai kontribusi terhadap lingkungan dari tiap data *input* dapat diketahui dengan memasukkan data *input* kedalam *software* SimaPro yang nantinya akan dikonversi menjadi dampak-dampak lingkungan yang sudah dikategorikan (Hamonangan, dkk., 2017). Menurut Menoufi *et al.* (2011), untuk menghitung nilai karakterisasi dari setiap kategori dampak maka nilai data pada tahap LCI dikalikan dengan faktor karakterisasi.

Tahap berikutnya setelah karakterisasi adalah tahap normalisasi. Tahap normalisasi merupakan prosedur yang diperlukan untuk menunjukkan kontribusi relatif dari semua kategori dampak pada seluruh masalah masalah lingkungan di suatu daerah dan dimaksudkan untuk menciptakan satuan yang seragam untuk semua kategori dampak (Hamonangan, dkk., 2017). Hal ini dilakukan untuk mempermudah dalam melakukan analisis antar kategori dampak lingkungan (Kautzar *et al.*, 2015). Menurut Menoufi *et al.* (2011), untuk menghitung nilai normalisasi dari setiap kategori dampak maka nilai dampak pada tahap karakterisasi dibagi dengan faktor normalisasi.

Tahap selanjutnya adalah tahap pembobotan. Tahap pembobotan merupakan tahapan dimana keseluruhan dampak yang telah dinilai akan dibandingkan dan disederhanakan dalam suatu basis ukuran yang sama (Kautzar *et al.*, 2015). Menurut Menoufi *et al.* (2011), untuk menghitung nilai pembobotan dari setiap kategori dampak maka nilai dampak pada tahap normalisasi dikalikan dengan faktor pembobotan.

Sedangkan tahapan terakhir dalam LCIA adalah tahap *single score*. Tahap *single score* adalah tahap untuk mengklasifikasikan nilai kategori dampak berdasarkan aktivitas atau proses. Dari nilai *single score* akan terlihat aktivitas atau proses mana yang memiliki kontribusi tinggi terhadap dampak

lingkungan yang ditimbulkan (Hamonangan, dkk., 2017).

2.17.4 Tahap Interpretasi (*Life Cycle Interpretation*)

Langkah terakhir dalam LCA adalah untuk menginterpretasikan hasil dari langkah ketiga. Bila mungkin, dapat disertai saran untuk langkah perbaikan kinerja lingkungan (Herprayoga, 2014). Setelah mengetahui aktivitas yang memiliki dampak terbesar, maka langkah selanjutnya adalah melakukan analisis lebih lanjut mengenai sistem amatan yang memiliki dampak terbesar (Kautzar *et al.*, 2015). Hasil integrasi tersebut digunakan untuk mengkaji, menarik kesimpulan, dan rekomendasi yang konsisten dengan tujuan serta lingkup penelitian. Pada tahap ini juga dilakukan evaluasi dan analisis terhadap usaha-usaha yang dapat dilakukan untuk perbaikan (Jeroen, 2002).

2.18 Aplikasi SimaPro untuk Analisis LCA

SimaPro merupakan singkatan dari *System for Integrated Environmental Assessment of Products* (Riyanty, 2015). SimaPro merupakan *software* yang membantu dalam suatu proses untuk menganalisis aspek-aspek yang berkaitan dengan lingkungan dari suatu produk (Santoso dan Ronald, 2012). Menurut Hamonangan, dkk. (2017), SimaPro adalah *software* yang digunakan untuk mengumpulkan data, untuk menganalisis, dan memantau kinerja keberlanjutan produk dan jasa dari suatu perusahaan. Menurut Kautzar *et al.* (2015), data yang dimasukkan dalam *software* SimaPro ditentukan berdasarkan deskripsi sistem amatan. Hal tersebut meliputi distribusi bahan baku, proses produksi, serta distribusi produk akhir. *Software* SimaPro yang digunakan di dalam analisis LCA ini adalah SimaPro versi 8.4.

SimaPro dapat digunakan untuk penilaian siklus hidup, pembuatan laporan mengenai *sustainability*, desain produk, menentukan indikator kinerja utama, dan lainnya. SimaPro dikembangkan untuk membantu dalam pengumpulan fakta dan menggunakan metode LCA untuk memberikan wawasan yang diperlukan untuk menciptakan nilai yang berkelanjutan. SimaPro telah menjadi perangkat lunak LCA terkemuka di dunia selama 25 tahun dan dipercaya oleh industri dan akademisi di lebih dari 80

negara (Hamonangan, dkk., 2017). Menurut PreConsultant (2016), *software* SimaPro memiliki kelebihan dibandingkan *software* lainnya, diantaranya adalah:

- Dapat digunakan secara *multi-user-version* sehingga dapat menginput data secara berkelompok meskipun berbeda lokasi.
- Memiliki metode dampak yang beragam dan bersifat fleksibel.
- Dapat menginventarisasi data dalam jumlah banyak.
- Data yang didapatkan memiliki nilai transparansi yang tinggi, dimana hasil analisis dapat melacak hasil lainnya kembali ke asal-usulnya.
- SimaPro dilengkapi dengan banyak *database* LCI, termasuk *database ecoinvent*, *database Agri-footprint* khusus industri, dan *database ELCD*.

Adapun beberapa cakupan fitur SimaPro menurut Pujadi dan Yola (2013) adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan siklus hidup yang kompleks dan produk yang kompleks.
2. Fitur analisis lanjutan.
3. Termasuk metode penilaian persediaan (LCI) *database* dan dampaknya.
4. *Ecoinvent* *database* yang disertakan, opsional untuk versi pendidikan.
5. Tersedia dalam berbagai versi (*single / multi user*) dan dalam berbagai bahasa seperti Perancis, Jerman, Italia, Spanyol, Jepang, Korea, Belanda dan Inggris.

Pada SimaPro, terdapat 2 jenis metode pendekatan penilaian dampak, yaitu metode *midpoint* dan metode *endpoint*. Metode *midpoint* adalah metode yang menggambarkan sebab-akibat dampak lingkungan awal yang akan muncul dari data yang dimasukkan pada tahap LCI. Sedangkan, metode *endpoint* adalah metode yang menggambarkan kerusakan lingkungan yang akan timbul dari dampak lingkungan yang terjadi berdasarkan data yang dimasukkan pada tahap LCI.

Sebagai contoh, data emisi CFC yang dimasukkan pada *software* SimaPro akan memunculkan hasil penilaian dampak

pada kategori penipisan ozon. Apabila metode penilaian dampak yang digunakan adalah metode *midpoint*, maka peneliti hanya akan mengetahui besaran dampak penipisan ozon dari data emisi CFC yang dimasukkan. Sedangkan, apabila metode penilaian dampak yang digunakan adalah metode *endpoint*, maka peneliti akan mendapatkan nilai besarnya kerusakan pada kategori kesehatan manusia. Hal tersebut dikarenakan akibat dari terjadinya penipisan ozon akan menyebabkan timbulnya penyakit kanker kulit (Menoufi *et al.*, 2011).

Metode LCIA yang tergolong dalam metode *midpoint* adalah CML-IA, EPD 2013, ILCD 2011, *ReCipe Midpoint*, BEES+, EDIP 2003, *Ecological Footprint*, *Ecosystem Damage Potential*, IPCC 2013, USEtox, *Greenhouse Gas Protocol*, dan TRACI 2.1. Sedangkan, metode LCIA yang tergolong dalam metode *endpoint* adalah *Eco Indicator 99*, EPS 2000, *Eco Scarcity 2013*, *ReCipe Endpoint*, IMPACT 2000+, dan JEPIX (PreConsultant, 2016). Pemilihan metode tersebut dilakukan sesuai dengan kegiatan proses dan produk yang dianalisis. SimaPro menggunakan berbagai metode evaluasi yang akan mengklasifikasikan zat menurut efeknya terhadap dampak lingkungan seperti hujan asam dan penipisan lapisan ozon. Menurut Repele *et al.* (2014), metode *eco indicator 99* adalah metode penilaian dampak yang paling banyak digunakan dalam penilaian LCA.

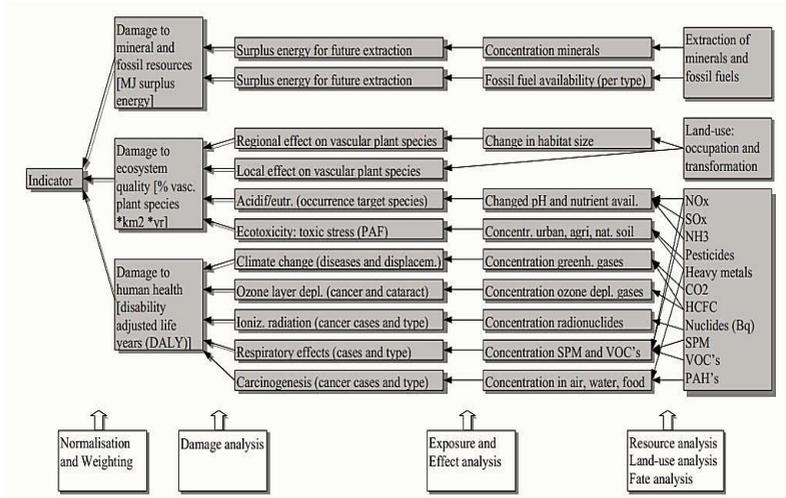
2.19 Metode *Eco Indicator 99*

Metode *Eco Indicator 99* (EI 99) adalah metode yang paling penting dan direkomendasikan berdasarkan ISO 14040-43 (Giandadewi, dkk., 2017). Metode EI 99 adalah metode evaluasi yang mengkalsifikasikan zat menurut efeknya terhadap dampak lingkungan serta dapat menunjukkan kontribusi relatif dari setiap proses dihitung dengan lingkungan (Kusumawaradani, 2017). Metode EI 99 ini merupakan metode yang lebih komprehensif dibandingkan metode lainnya dalam melakukan evaluasi terhadap dampak lingkungan (Sirait, 2016).

Menurut Menoufi *et al.* (2011), metode EI 99 termasuk ke dalam metode *endpoint* atau metode yang berbasis pada pendekatan akhir yang menilai dampak secara keseluruhan hingga kerusakan apa yang mungkin ditimbulkan. Menurut Goedkoop dan Spriensma (2000), metode ini mengkategorikan

dampak lingkungan dalam tiga kategori kerusakan, yaitu dampak terhadap kesehatan manusia (*human health*), dampak terhadap kerusakan ekosistem (*ecosystem quality*), dan dampak terhadap penggunaan sumber daya alam (*resources*).

Metode EI 99 ini memiliki 11 kategori dampak, yaitu *climate change, ozone layer depletion, acidification/eutrophication, carcinogenesis, respiratory organic effects, respiratory inorganic effects, ionizing radiation, ecotoxicity, land use, mineral resources, dan fossil fuel resources* yang terlibat dalam 3 kategori kerusakan lingkungan (Goedkoop dan Spriensma, 2000). Untuk bagan alir keterkaitan data, dampak lingkungan, dan kerusakan yang ditimbulkan pada metode EI 99 ini dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Keterkaitan Data, Dampak Lingkungan, dan Kerusakan pada Metode *Eco Indicator 99*

Sumber: Goedkoop dan Spriensma, 2000

Berikut ini adalah penjelasan mengenai masing-masing kategori utama (kategori kerusakan) yang terdapat pada metode EI 99 ini:

1. Dampak proses produksi terhadap kesehatan manusia (*human health*) dinyatakan dengan unit DALY (*Disability*

Adjusted Life Years), yang artinya merupakan jumlah tahun yang hilang akibat gangguan kesehatan cacat atau kematian dini. Ukuran DALY diterima seseorang dari keseluruhan beban penyakit. Untuk satu DALY sama dengan satu tahun dari hidup sehat yang hilang (Kusumawaradani, 2017). Kategori dampak lingkungan yang masuk ke dalam kategori kesehatan manusia apabila dilihat pada Gambar 2.3 adalah *respiratory organic and inorganic effects, carcinogenesis, climate change, ozone layer depletion, dan ionizing radiation* (Goedkoop dan Spriensma, 2000).

2. Dampak pada kualitas ekosistem (*ecosystem quality*) merupakan dampak yang dapat mempengaruhi kehidupan kualitas ekosistem di sekitar lingkungan pada proses produksi. Akibat dari dampak ini adalah hilangnya spesies/ekosistem di daerah tersebut. Satuan dari kategori ini adalah $\text{PDF.m}^2.\text{year}$. Satu $\text{PDF.m}^2.\text{year}$ sama dengan kerusakan spesies atau ekosistem seluas 1 m^2 di permukaan bumi dalam 1 tahun (Kusumawaradani, 2017). Kategori dampak lingkungan yang masuk ke dalam kategori kerusakan kualitas ekosistem apabila dilihat pada Gambar 2.3 adalah *ecotoxicity, acidification/eutrophication, dan land use* (Goedkoop dan Spriensma, 2000).
3. Dampak terhadap penurunan sumber daya alam (*resources*) merupakan dampak yang berpengaruh terhadap kerusakan sumber daya yang akan dialami oleh generasi yang akan datang atau ketersediaan sumber daya yang tak bisa digantikan. Satuan *MJ surplus* digunakan untuk kategori dampak yang nantinya dikelompokkan ke dalam nilai kerusakan *resources*. Satu *MJ surplus* sama dengan satu kerusakan sumber daya alam yang dieksploitasi dan energi yang dikeluarkan dalam 1 tahun di bumi (Kusumawaradani, 2017). Kategori dampak lingkungan yang masuk ke dalam kategori dampak terhadap penurunan sumber daya alam apabila dilihat pada Gambar 2.3 adalah *mineral dan fossil fuel* (Goedkoop dan Spriensma, 2000).

Untuk nilai faktor karakterisasi, normalisasi, dan pembobotan pada metode EI 99 dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Faktor Karakterisasi, Normalisasi, dan Pembobotan Metode *Eco Indicator 99*

Kategori Dampak	Karakterisasi		Normalisasi (PE-person equivalent)	Pembobotan (Pt-PE target emissions)
	Unit	Nilai		
<i>Carcinogens</i>	DALY	9.7E-7	6.35E-05	2.54E-02
<i>Respiratory organics</i>	DALY	6.21E-09	4.04E-07	1.62E-04
<i>Respiratory inorganics</i>	DALY	3.56E-06	2.32E-04	9.27E-02
<i>Climate change</i>	DALY	-1.64E-07	-1.073-05	-4.28E-03
<i>Radiation</i>	DALY	4.64E-10	3.02E-08	1.21E-05
<i>Ozone layer</i>	DALY	1.41E-11	9.20E-10	3.68E-07
<i>Ecotoxicity</i>	PDF. m ² .yr	3.81E-03	7.43E-07	2.97E-04
<i>Acidification/eutrophication</i>	PDF. m ² .yr	E.62E-02	7.06E-06	2.82E-03
<i>Land use</i>	PDF. m ² .yr	7.74	1.51E-03	6.04E-01
<i>Minerals</i>	MJ Surplus	1.00E-02	1.19E-06	2.38E-04
<i>Fossil fuels</i>	MJ Surplus	1.86E-01	2.22E-05	4.44E-03

Sumber: Herrmann dan Moltesen, 2014

2.20 Penggunaan Software SimaPro 8.4

SimaPro 8.4 adalah *software* generasi ke-8 dari interpretasi penggunaan metode *Life Cycle Assessment*. SimaPro 8.4 ini merupakan versi terbaru yang di *update* dari versi SimaPro 8.3 (PreConsultant, 2017). Namun dalam pengoperasian SimaPro 8.4 tidak berbeda dengan versi sebelumnya. Hanya saja terdapat beberapa fitur yang diperbarui seperti tampilan, *data libraries*, dan beberapa dampak dari *impact assessment method*. Tujuan dari penggunaan SimaPro ini adalah untuk menganalisis dan membandingkan aspek-aspek lingkungan dari suatu produk. Menurut Herprayoga (2014), dalam menggunakan *software* ini

terdapat beberapa tahapan diantaranya sebagai berikut:

- Penentuan tujuan dan ruang lingkup.
Penentuan tujuan dan ruang lingkup ada beberapa cara, diantaranya:
 - *Text field*, untuk menginput data pemilik, komentar, alasan, dan tujuan melakukan penelitian LCA.
 - Pemilihan *libraries*, untuk memilih metode-metode apa yang paling sesuai dengan penelitian.
 - Mengatur data *quality indicator requirements*, dengan menetapkan karakteristik-karakteristik data yang sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup. Data yang dimasukkan dapat berupa waktu periode melakukan penelitian, teknologi yang digunakan dalam penelitian, alokasi penelitian, dan juga batasan suatu sistem.
- Penginventarisasi.
Pada tahap inventarisasi, semua data mengenai emisi yang berpotensi timbul dan juga konsumsi bahan baku dikumpulkan. Pada tahap inventarisasi ini terdapat beberapa fase, yaitu:
 - *Process*, menunjukkan hal-hal yang termasuk dalam proses produksi suatu produk yang membutuhkan penginputan data.
 - *Product stages*, mendeskripsikan bagaimana suatu produk diproduksi, digunakan, dan dibuang.
 - *System description*, bagian ini merupakan catatan terpisah yang digunakan untuk mendeskripsikan struktur dari sistem.
 - *Waste types*, terdapat *waste scenarios* dan *disposal scenarios*. *Waste scenarios* didefinisikan sebagai material yang akan dibuang atau didaur ulang. Sedangkan *disposal scenarios* didefinisikan sebagai produk yang akan digunakan kembali.
- Penilaian terhadap cemaran.
Struktur dasar penilaian cemaran terdiri atas karakterisasi, normalisasi, pembobotan, dan *single score*.
- Interpretasi data.

2.21 Penelitian Terdahulu mengenai LCA

Banyak penelitian yang telah dilakukan dengan metode

LCA untuk mengetahui dampak yang ditimbulkan dari suatu produk. Penelitian terdahulu ini menjadi salah satu referensi dan bahan kajian dalam melakukan penelitian. Pada sub-bab ini akan diuraikan mengenai tiga penelitian yang berkaitan dengan metode LCA. Untuk beberapa penelitian terdahulu yang menggunakan metode LCA dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Penelitian Terdahulu mengenai LCA

No.	Peneliti (Tahun Penelitian)	Judul Penelitian	Isi Penelitian
1.	Radika Herprayoga (2014)	<i>Kajian Life Cycle Assessment (LCA) untuk mereduksi dampak pencemaran udara PT. Semen Bosowa Maros dengan pendekatan Analytical Hierarchy Process (AHP).</i>	Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi dampak pencemaran udara yang terjadi pada proses produksi industri semen di PT. Semen Bosowa Maros. Identifikasi dampak lingkungan ini dilakukan dengan pendekatan LCA menggunakan <i>software</i> SimaPro 8.0. Proses yang diperiksa yaitu <i>mining, raw material grinding, raw mill, cement mill, dan packaging & shipping</i> . Dari hasil LCA, diketahui bahwa unit <i>coal mill</i> memberikan dampak terbesar yaitu 52,7%, <i>raw mill</i> 34,1%, dan <i>cement mill</i> 13%. Dari analisis LCA tersebut dilakukan pemilihan alternatif solusi pengurangan dampak dengan menggunakan metode AHP. Dari hasil AHP menggunakan <i>software Expert Choice</i> diketahui bahwa pemasangan <i>adsorber</i> adalah alternatif terbaik yang dipilih oleh para <i>expert</i>
2.	Annisa Tamara Sari (2017)	<i>Life Cycle Assessment (LCA) emisi proses produksi</i>	Penelitian ini mengidentifikasi dampak dari emisi kegiatan industri minyak dan gas menggunakan LCA. LCA digunakan untuk melakukan

No.	Peneliti (Tahun Penelitian)	Judul Penelitian	Isi Penelitian
		Bahan Bakar Minyak (BBM) jenis solar dengan pendekatan <i>Analytical Hierarchy Process</i> (AHP).	penilaian terhadap dampak lingkungan dengan metode EDIP 2003. Dampak paling besar berasal dari proses pengolahan sebesar 94,6% akibat adanya kegiatan pada unit <i>crude distilasi</i> . Sedangkan pada masing-masing proses dampak paling besar diakibatkan oleh, sumur produksi pada proses eksplorasi dan produksi, kegiatan penunjang pada proses distribusi, dan pemakaian BBM solar. Setelah diketahui dampaknya maka dilakukan analisis alternatif menggunakan AHP. Alternatif kegiatan sumur produksi yang dapat digunakan adalah <i>enhanced oil/gas recovery</i> . Alternatif kegiatan <i>crude distilasi</i> yang dapat digunakan adalah <i>disalter design</i> sebagai gas inert. Alternatif kegiatan penunjang yang dapat digunakan adalah peningkatan pemakaian bahan bakar <i>low sulphur</i> . Alternatif kegiatan pemakaian BBM solar yang dapat digunakan adalah pemakaian <i>eco-driving</i> .
3.	Harmira Primanda Putri (2017)	<i>Life Cycle Assessment</i> (LCA) emisi proses produksi Bahan Bakar Minyak (BBM) jenis bensin dengan pendekatan <i>Analytical</i>	Penelitian ini mengidentifikasi dampak emisi yang dihasilkan dari proses produksi bensin menggunakan <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA). Siklus hidup yang dianalisis adalah proses eksplorasi dan produksi, proses pengolahan, proses pemasaran, dan penggunaan oleh masyarakat. Analisis LCA produk bensin dilakukan menggunakan

No.	Peneliti (Tahun Penelitian)	Judul Penelitian	Isi Penelitian
		<i>Hierarchy Process</i> (AHP).	software SimaPro 8.3. Kegiatan diatas berdampak besar terhadap fenomena <i>ozone depletion</i> dan fenomena <i>global warming</i> . Alternatif terbaik guna mereduksi emisi yang terjadi pada proses eksplorasi dan produksi adalah pemanfaatan gas buang sebagai <i>fuel</i> pompa. Sedangkan pada proses pengolahan adalah adsorpsi dengan <i>zeolit</i> dan pengaplikasian <i>gas handling system</i> sebagai alternatif perbaikan pada proses pemasaran. Pada sektor penggunaan menggunakan program pemerintah sebagai alternatifnya, yakni penyempurnaan perencanaan transportasi dan pengelolaan kebutuhan lalu lintas.

2.22 Analytical Hierarchy Process (AHP)

Analytical Hierarchy Process (AHP) adalah sebuah hierarki fungsional dengan *input* utamanya persepsi manusia. Metode ini dikembangkan oleh Prof. Thomas Lorie Saaty dari Wharton Business School di awal tahun 1970, yang digunakan untuk mencari ranking atau urutan prioritas dari berbagai alternatif dalam pemecahan suatu permasalahan (Sinaga, 2009 dalam Purnomo, dkk., 2013).

AHP adalah metode dalam sistem pengambilan keputusan yang menggunakan beberapa variabel dengan proses analisis bertingkat. Analisis dilakukan dengan memberi nilai prioritas dari tiap-tiap variabel, kemudian melakukan perbandingan berpasangan dari variabel-variabel dan alternatif-alternatif yang ada (Saaty, 2008 dalam Purnomo, dkk., 2013). AHP dapat dipakai untuk menentukan pembobotan baik kriteria maupun alternatif (Saputri dan Wiguna, 2013).

Metode AHP ini membantu memecahkan persoalan yang kompleks dengan menstruktur suatu hierarki kriteria, pihak yang berkepentingan, hasil, dan dengan menarik berbagai pertimbangan guna mengembangkan bobot atau prioritas (Adhi, 2010). Pada penerapan metode AHP yang diutamakan adalah kualitas data dari responden, dan tidak tergantung pada kuantitasnya (Saaty, 1993 dalam Susanto, 2008). Oleh karena itu, penilaian AHP memerlukan pakar sebagai responden dalam pengambilan keputusan dalam pemilihan alternatif. Para pakar disini merupakan orang-orang kompeten yang benar-benar menguasai, mempengaruhi pengambilan kebijakan atau benar-benar mengetahui informasi yang dibutuhkan. Untuk jumlah responden dalam metode AHP tidak memiliki perumusan tertentu, namun hanya ada batas minimum yaitu dua orang responden (Saaty, 1993 dalam Susanto, 2008).

2.23 Prinsip *Analytical Hierarchy Process*

Menurut Saaty (2000) dalam Purnomo, dkk (2013), dalam menyelesaikan permasalahan dengan AHP ada beberapa prinsip yang harus dipahami, yaitu:

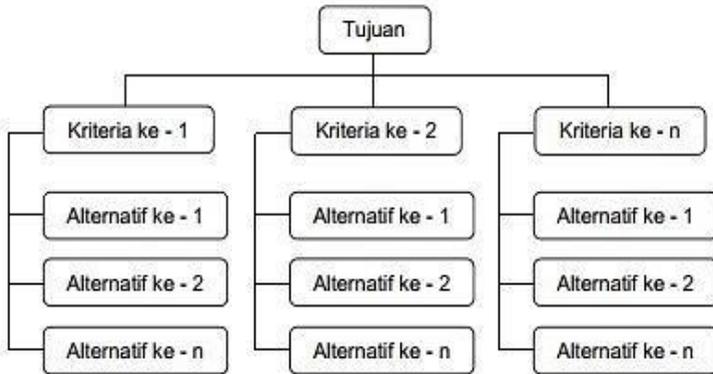
1. *Decomposition* (membuat hierarki).

Mendefinisikan persoalan dengan cara memecah persoalan yang utuh menjadi unsur-unsurnya dan di gambarkan dalam bentuk hierarki. Penyusunan hierarki dimulai dengan menentukan tujuan yang merupakan sasaran sistem secara keseluruhan pada level teratas. Level berikutnya terdiri dari kriteria-kriteria untuk menilai atau mempertimbangkan alternatif-alternatif yang ada dan menentukan alternatif-alternatif tersebut. Untuk contoh hierarki AHP dapat dilihat pada Gambar 2.4.

2. *Comparative judgment* (penilaian kriteria dan alternatif).

Pada tahap ini dibuatlah penentuan prioritas elemen. Langkah pertama dalam menentukan prioritas elemen adalah membuat perbandingan berpasangan, yaitu membandingkan elemen secara berpasangan sesuai kriteria yang di berikan dengan menggunakan bentuk matriks. Matriks bersifat sederhana, berkedudukan kuat yang menawarkan kerangka untuk memeriksa konsistensi, memperoleh informasi tambahan dengan membuat semua perbandingan yang mungkin, dan

menganalisis kepekaan prioritas secara keseluruhan untuk merubah pertimbangan. Proses perbandingan berpasangan dimulai dari level paling atas hierarki untuk memilih kriteria (Setiawan, 2016). Pembuatan perbandingan berpasangan ditujukan untuk mengetahui skala kepentingan dari masing-masing kriteria terhadap kriteria lainnya (Purnomo, dkk., 2013).



Gambar 2. 4 Hierarki pada Metode AHP
Sumber: Setiawan, 2016

Mengisi matriks perbandingan berpasangan yaitu dengan menggunakan bilangan untuk merepresentasikan kepentingan relatif dari satu elemen terhadap elemen lainnya yang dimaksud dalam bentuk skala dari 1 sampai dengan 9. Skala ini mendefinisikan dan menjelaskan nilai 1 sampai 9 untuk pertimbangan dalam perbandingan berpasangan elemen pada setiap level hierarki terhadap suatu kriteria di level yang lebih tinggi. Apabila suatu elemen dalam matriks dan dibandingkan dengan dirinya sendiri, maka diberi nilai 1. Berikut ini skala kuantitatif 1 sampai dengan 9 untuk menilai tingkat kepentingan suatu elemen dengan elemen lainnya menurut Saaty (1993) dalam Purnomo, dkk (2013):

- a. Skala 1 (*equal importance*) berarti kedua elemen sama penting.
- b. Skala 3 (*weak importance of one over*) berarti elemen yang satu sedikit lebih penting dari yang lainnya.

- c. Skala 5 (*essential or strong importance*) berarti elemen yang satu lebih penting daripada yang lainnya.
 - d. Skala 7 (*demonstrated importance*) berarti elemen yang satu jelas sangat penting daripada elemen yang lainnya.
 - e. Skala 9 (*extreme importance*) berarti elemen yang satu mutlak sangat penting daripada elemen yang lainnya.
 - f. Skala 2, 4, 6, 8 berarti nilai tengah yang saling berdekatan diantara kedua elemen.
3. *Synthesis of priority* (menentukan prioritas).
Menurut Setiawan (2016), pertimbangan-pertimbangan terhadap perbandingan berpasangan di sintesis untuk memperoleh keseluruhan prioritas, dengan cara sebagai berikut:
- a. Menjumlahkan nilai-nilai dari setiap kolom pada matriks.
 - b. Membagi setiap nilai dari kolom dengan total kolom yang bersangkutan untuk memperoleh normalisasi matriks.
 - c. Menjumlahkan nilai dari setiap matriks dan membaginya dengan jumlah elemen untuk mendapatkan nilai rata-rata.
4. *Logical consistency* (konsistensi logis).
Konsistensi penting untuk mendapatkan hasil yang valid dalam dunia nyata. AHP mengukur konsistensi pertimbangan dengan rasio konsistensi (*consistency ratio*). Nilai konsistensi rasio harus kurang dari 10%. Jika lebih dari rasio dari batas tersebut maka nilai perbandingan matriks di lakukan kembali (Setiawan, 2016). Hal-hal yang dilakukan dalam langkah ini adalah sebagai berikut:
- a. Kalikan setiap nilai pada kolom pertama dengan prioritas relatif elemen pertama, nilai pada kolom kedua dengan prioritas relatif elemen kedua dan seterusnya.
 - b. Jumlahkan setiap baris
 - c. Hasil dari penjumlahan baris dibagi dengan elemen prioritas relatif yang bersangkutan.
 - d. Jumlahkan hasil bagi di atas dengan banyaknya elemen yang ada, hasilnya disebut λ_{maks} .
 - e. Melakukan penghitungan *Consistency Index* (CI) dengan rumus seperti pada Persamaan 2.12.

$$CI = (\lambda_{maks} - n) / (n - 1) \quad (2.12)$$

Keterangan:

n = Banyaknya elemen.

- f. Melakukan penghitungan Konsistensi Rasio/*Consistency Ratio* (CR) dengan rumus seperti pada Persamaan 2.13.

$$CR = CI/IR \quad (2.13)$$

Keterangan:

CI = *Consistency Index*.

IR = *Index Random Consistency*, yang dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2. 6 *Index Random Consistency*

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41
n	9	10	11	12	13	14	15	
RI	1.45	1.49	1,51	1,53	1,56	1,57	1,58	

Sumber: Purnomo, dkk., 2013

- g. Memeriksa konsistensi hierarki. Jika nilainya lebih dari 10%, maka penilaian data *judgment* harus diperbaiki. Namun jika Rasio Konsistensi (CI/CR) kurang atau sama dengan 0,1, maka hasil perhitungan bisa dinyatakan benar.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Umum

Penelitian yang dilakukan terkait dengan dampak proses eksplorasi dan produksi gas alam dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Adapun tujuan yang ingin dicapai adalah prakiraan beban emisi CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan SO_x; identifikasi dampak lingkungan, dan rekomendasi alternatif perbaikan untuk mereduksi dampak yang terjadi pada kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam. Dalam analisis perhitungan beban emisi digunakan metode perhitungan beban emisi berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No.12 Tahun 2012. Sedangkan untuk mengidentifikasi dampak yang ditimbulkan dari proses eksplorasi dan produksi gas alam digunakan metode LCA. Analisis yang dilakukan dalam penelitian ini mencakup analisis bahan baku dan bahan bakar yang digunakan, emisi serta produk yang dihasilkan dari kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam. Hasil dari analisis LCA tersebut digunakan untuk memprakirakan alternatif perbaikan yang dapat dilakukan untuk mereduksi dampak yang terjadi, yang kemudian dipilih oleh pihak perusahaan menggunakan metode kuesioner. Keluaran penelitian ini adalah beberapa alternatif perbaikan yang dapat diterapkan untuk mereduksi dampak yang terjadi.

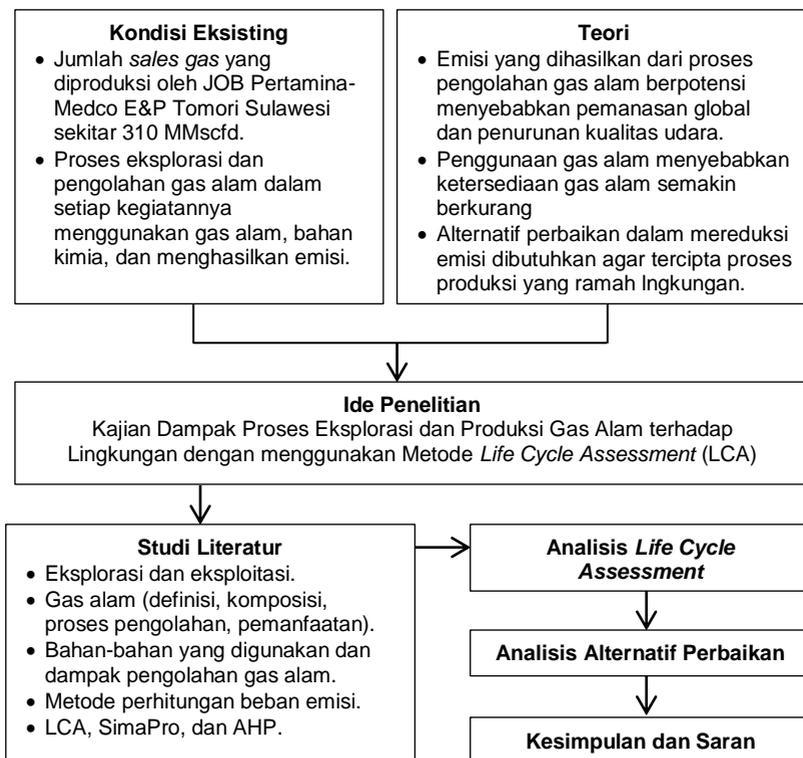
3.2 Wilayah Studi

Penelitian ini berfokus pada bahan bakar, bahan baku, produk, dan emisi dari aktivitas eksplorasi dan produksi gas alam di *Central Processing Plant* (CPP), JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi. Untuk kegiatan yang dianalisis dalam penelitian ini adalah proses utama dan proses pada unit-unit penunjang yang menjadi sumber emisi tidak bergerak, yang terdapat di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi. Adapun proses utama pengolahan gas alam tersebut adalah *gas gathering and production separator, gas treatment process (Acid Gas Removal Unit, dehydration unit, dan dew point control system, serta low pressure gas treatment), condensate stabilization, produced water system, dan Acid Gas Conversion Unit (AGCU)* dalam *Wet*

Sulfuric Acid (WSA) facilities. Sedangkan, proses pada unit penunjang yang dianalisis adalah proses pada unit *Gas Turbine Generator (GTG)*, unit *hot oil heater*, dan unit *flare*.

3.3 Kerangka Penelitian

Susunan kerangka ini didasarkan pada tujuan penelitian. Dengan tujuan tersebut, dikembangkan menjadi ide penelitian, studi literatur, pengumpulan data lapangan, analisis beban emisi, analisis dampak dengan *Life Cycle Assessment (LCA)* menggunakan SimaPro 8.4, dan penentuan alternatif perbaikan dari metode kuesioner. Kerangka penelitian selengkapny dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian

3.4 Tahap Pendahuluan

Tahap pendahuluan pada penelitian ini terdiri atas:

1. Kajian literatur yang dilakukan antara lain terhadap:
 - Eksplorasi dan eksploitasi gas alam.
 - Proses pengolahan gas alam.
 - Komposisi gas alam.
 - Pemanfaatan gas alam.
 - Bahan-bahan kimia yang digunakan dalam pengolahan gas alam.
 - Sumber emisi di industri gas alam dan karakteristiknya.
 - Pencemaran udara dan pemanasan global.
 - Efek rumah kaca dan penipisan lapisan ozon.
 - Metode perhitungan bebas emisi.
 - Metode *Life Cycle Assessment*, prinsip, karakteristik, dan tahapannya.
 - Aplikasi SimaPro 8.4 dan penggunaannya.
 - Penelitian terdahulu mengenai LCA.
 - *Analytical Hierarchy Process* dan prinsip analisisnya.
2. Melakukan perizinan untuk kepentingan pengumpulan data dan penyebaran kuesioner pada pihak JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.
3. Membuat perizinan untuk mendapatkan *license software* SimaPro dan mengunduh *software* SimaPro 8.4.

3.5 Tahap Pengumpulan Data

Pengumpulan data yang digunakan adalah data primer dan data sekunder. Data primer merupakan data yang didapatkan dari data kuesioner responden (pihak perusahaan). Sedangkan, data sekunder merupakan data yang didapatkan dari data produksi pengolahan gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi. Untuk data yang diperlukan dalam penelitian ini secara lebih rinci dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Data-Data yang Diperlukan

No.	Jenis Data	Metode Pengambilan Data	Durasi Data	Asal Data
1.	Hasil kuesioner pemilihan kriteria dan alternatif perbaikan	Metode kuesioner (Data primer)	-	Pihak Perusahaan

No.	Jenis Data	Metode Pengambilan Data	Durasi Data	Asal Data
2.	Konsentrasi NO ₂ dan SO ₂ pada unit <i>combustor</i> di AGCU <i>system</i>	Data Sekunder (Hasil pengukuran setiap 6 bulan sekali)	2 tahun (2015-2017)	Laporan RKL-RPL JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi
3.	Data kecepatan aliran gas buang dan suhu gas buang pada unit <i>combustor</i> di AGCU <i>system</i>	Data Sekunder (Hasil pengukuran setiap 6 bulan sekali)	2 tahun (2015-2017)	Laporan SA PPU JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi
4.	Data <i>material balance</i> (<i>flow</i> , berat molekul, densitas, tekanan, suhu) produksi di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi	Data sekunder	-	Data desain produksi CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.
5.	Data jumlah produk yang dihasilkan dari produksi di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi	Data Sekunder	-	Data desain produksi CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.
6.	Data jumlah bahan bakar, bahan baku, bahan kimia yang digunakan, serta emisi yang dihasilkan pada setiap unit proses utama, unit GTG, unit <i>hot oil heater</i> , dan unit <i>flare</i> di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi	Data Sekunder	-	Data desain produksi CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.

3.6 Tahap Pengolahan Data

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

3.6.1 Analisis beban emisi CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan SO_x

Data yang akan dianalisis adalah data beban emisi CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan SO_x. Analisis yang akan dilakukan mencakup data konsentrasi NO₂ dan SO₂ dalam 2 tahun setiap 6 bulan sekali pada unit *combustor* di AGCU system dan jumlah bahan bakar yang digunakan pada setiap unit GTG dan *hot oil heater*, serta gas yang dialirkan pada unit *flare* berdasarkan data desain produksi. Dalam melakukan analisis beban emisi CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan SO_x dilakukan hal-hal sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi sumber-sumber emisi tidak bergerak yang ada di JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi. Berdasarkan data RKL-RPL CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, terdapat 6 jenis unit yang menjadi sumber emisi tidak bergerak, yaitu 3 unit *Gas Turbine Generator*, 2 unit *Hot Oil System*, 2 unit *Emergency Diessel Generator*, 1 unit AGCU, 1 unit *Fire Pump*, dan 1 unit *Flare*.
2. Mengeliminasi unit-unit sumber emisi tidak bergerak yang tidak dioperasikan secara berkala (tidak wajib pantau) sesuai data RKL-RPL CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi dan menganalisis lebih lanjut beban emisi pada unit-unit sumber emisi tidak bergerak yang dioperasikan sepanjang proses produksi dilakukan (wajib pantau).
3. Merekapitulasi data penggunaan bahan bakar pada setiap unit-unit sumber emisi tidak bergerak yang dianalisis.
4. Mencari nilai *heating value* (nilai kalor) berdasarkan penggunaan bahan bakar pada unit-unit sumber emisi tidak bergerak yang dianalisis.
5. Mencari nilai faktor emisi CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan SO_x sesuai dengan unit sumber emisi tidak bergerak yang dianalisis.

6. Melakukan perhitungan faktor emisi dengan mengalikan nilai faktor emisi dengan *heating value*.
7. Menghitung beban emisi CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan SO_x dengan menggunakan metode perhitungan beban emisi berdasarkan PerMen LH No. 12 Tahun 2012 yang dapat dilihat pada Persamaan 3.1.

$$E_i = FC \times EF_i \quad (3.1)$$

Keterangan:

- E = Beban emisi komponen i (ton/hari).
- i = Parameter emisi yang dihitung.
- FC = Pemakaian bahan bakar (m³ atau MMscfd).
- EF = Faktor emisi komponen i (ton/ton)

8. Apabila pada unit sumber emisi tidak bergerak yang dianalisis tidak terdapat data penggunaan bahan bakar, maka langkah selanjutnya adalah merekapitulasi data hasil pengukuran emisi yang pernah dilakukan, kecepatan alir gas buang, dan suhu aktual gas buang pada saat proses *sampling* sesuai data RKL-RPL dan SA PPU CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.
9. Apabila satuan konsentrasi emisi hasil pengukuran yang didapatkan dalam keadaan normal, maka terlebih dahulu dilakukan perhitungan konsentrasi emisi hasil pengukuran saat kondisi aktual dengan menggunakan rumus pada Persamaan 3.2.

$$\frac{C_a}{C_n} = \frac{T_n}{T_a} \quad (3.2)$$

Keterangan:

- C_a = Konsentrasi gas pada keadaan aktual (mg/m³).
- C_n = Konsentrasi gas pada keadaan normal (mg/Nm³).
- T_a = Suhu gas pada keadaan aktual (K).
- T_n = Suhu gas pada keadaan normal (K atau 25°C).

10. Menghitung beban emisi dengan menggunakan metode perhitungan beban emisi seperti pada Persamaan 3.3.

$$E_i = C_i \times Q \quad (3.3)$$

Keterangan:

- E = Beban emisi komponen i (kg/hari).
i = Parameter emisi yang dihitung (NO_2 dan SO_2).
C = Konsentrasi emisi gas buang (mg/m^3).
Q = *Flow* gas buang (m^3/hari).

Keluaran dari analisis ini adalah data beban emisi untuk gas CO_2 , CH_4 , N_2O , NO_x , dan SO_x dari setiap unit pengolahan yang menjadi sumber emisi tidak bergerak yang dianalisis, yaitu unit GTG, unit *hot oil heater*, unit *flare*, dan unit *combustor* dalam kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi. Hasil dari analisis beban emisi ini nantinya akan digunakan dalam analisis LCA.

3.6.2 Analisis Life Cycle Assessment dengan Software SimaPro 8.4

Untuk analisis dampak yang terjadi dari setiap kegiatan yang dianalisis maka digunakan metode LCA. Analisis yang akan dilakukan mencakup data bahan bakar, bahan baku, bahan kimia, produk, dan emisi yang dihasilkan dalam kegiatan eksplorasi dan produksi yang dilakukan. Data yang digunakan merupakan data selama desain produksi. Hal tersebut dikarenakan hingga saat ini proses produksi CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi masih sesuai dengan kapasitas desain produksi yang dibuat. Dalam melakukan analisis dampak yang terjadi dengan metode LCA digunakan *software* SimaPro 8.4. Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam menganalisis dampak dengan metode LCA menggunakan *software* SimaPro 8.4 adalah sebagai berikut:

1. Melakukan rekapitulasi data bahan bakar, bahan baku, dan bahan kimia yang digunakan pada setiap unit pengolahan, serta produk yang dihasilkan dari setiap unit pengolahan berdasarkan data laporan desain kegiatan produksi JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.
2. Melakukan rekapitulasi data emisi yang dihasilkan berdasarkan hasil analisis beban emisi yang telah dilakukan.

3. Melakukan konversi nilai masing-masing satuan data pada setiap unit pengolahan ke dalam satuan kg (sesuai dengan satuan pada *software* SimaPro).
4. Menentukan tujuan analisis dengan memasukkan tujuan penelitian kedalam *software* SimaPro 8.4. Tujuan penelitian yang dimasukkan adalah mengidentifikasi dampak lingkungan yang terjadi pada kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.
5. Menentukan batasan analisis dengan memilih *database* yang akan digunakan dalam penelitian pada *software* SimaPro 8.4. Dalam penelitian ini akan digunakan batasan penelitian *ecoinvent system unit, methods*, dan USLCI. Batasan tersebut disesuaikan dengan analisis penelitian yang dilakukan pada tiap unit dalam rangkaian kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam.
6. Memasukkan data-data berupa bahan bakar, bahan baku, bahan kimia, produk, dan emisi yang telah dikonversi dalam satuan kg ke dalam *software* SimaPro 8.4.
7. Melakukan pemilihan metode dampak lingkungan yang digunakan dalam penelitian pada *software* SimaPro 8.4. Pada penelitian ini digunakan metode EI 99. Nantinya, akan didapatkan skenario besaran dampak dari setiap kegiatan yang dianalisis berupa bagan. Semakin tebal garis alir yang ditunjukkan pada bagan skenario berarti semakin besar potensi dampak lingkungan yang terjadi pada kegiatan tersebut.
8. Melakukan tahapan karakterisasi pada *software* SimaPro 8.4, yang mana terjadi pengalihan faktor karakterisasi dengan data-data yang telah di *input* pada tahap sebelumnya.
9. Melakukan tahapan normalisasi pada *software* SimaPro 8.4 dengan membagi hasil tahapan karakterisasi dengan faktor normalisasi.
10. Melakukan tahapan pembobotan pada *software* SimaPro 8.4 dengan mengalihkan hasil tahapan normalisasi dengan faktor pembobotan.
11. Dari data-data yang dimasukkan pada *software* SimaPro

8.4, maka akan terlihat dampak yang paling besar dari setiap kegiatan yang dianalisis sesuai dengan kategori dampak yang dipilih.

Keluaran dari analisis ini adalah skenario dan grafik yang menunjukkan dampak yang paling besar dari setiap kegiatan yang dianalisis. Besarnya nilai dari grafik tersebut sesuai dengan data-data yang dimasukkan dalam *software* SimaPro 8.4. Berdasarkan besarnya dampak yang ditunjukkan dari hasil analisis LCA dengan *software* SimaPro 8.4, maka dapat diprakirakan alternatif perbaikan yang dapat diterapkan untuk mereduksi dampak yang terjadi. Hasil prakiraan alternatif perbaikan ini nantinya akan dimasukkan ke dalam kuesioner untuk selanjutnya dipilih oleh pihak perusahaan dan akan digunakan sebagai dasar dalam analisis alternatif perbaikan.

3.6.3 Analisis Alternatif yang Direkomendasikan

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

1. Dari hasil analisis LCA dengan mengetahui dampak yang terjadi, maka dilakukan studi literatur mengenai alternatif perbaikan yang dapat diterapkan untuk mereduksi dampak yang terjadi.
2. Melakukan rekapitulasi alternatif perbaikan mengenai cara kerja dan fungsinya sesuai dengan hasil studi literatur.
3. Melakukan *pra-survey* kepada pihak perusahaan terkait kondisi produksi pengolahan gas alam yang dilakukan dan kemungkinan alternatif-alternatif perbaikan yang dapat diterapkan untuk mereduksi dampak lingkungan yang terjadi.
4. Membuat kuesioner berisi alternatif perbaikan yang akan dipilih sesuai dengan studi literatur dan *pra-survey* yang telah dilakukan, seperti yang dapat dilihat pada Lampiran II.
5. Melakukan penyebaran kuesioner kepada pihak perusahaan untuk memberikan masukan atas alternatif perbaikan yang dapat diterapkan di industri tersebut.

Responden yang dipilih berjumlah 14 orang, yaitu 1 orang *production operation superintendent*, 1 orang *production operation supervisor*, 2 orang *field operator*, 2 orang *senior operator*, 1 orang *control room operator*, 1 orang *production planner*, 1 orang *maintenance superintendent*, 1 orang *mechanical supervisor*, 1 orang *QHSE manager*, 1 orang *environmental section head*, 1 orang *environmental engineer*, dan 1 orang *area HSE superintendent*. Pemilihan responden ini didasarkan pada posisi struktural yang terdapat pada perusahaan dan keterkaitannya dengan objek penelitian.

6. Merekapitulasi hasil kuesioner sesuai dengan prinsip AHP.
7. Memberikan peringkat pada alternatif perbaikan berdasarkan hasil pembobotan di setiap alternatif.
8. Merekomendasikan alternatif perbaikan sesuai dengan hasil pembobotan yang paling besar (peringkat tertinggi) kepada pihak perusahaan.

Keluaran dari analisis ini adalah alternatif perbaikan yang paling mungkin diterapkan pada industri yang menjadi objek penelitian sesuai dengan masukan dari pihak perusahaan berdasarkan hasil kuesioner.

3.7 Kesimpulan dan Saran

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

BAB IV

HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Profil Perusahaan

Joint Operating Body (JOB) Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi adalah badan kerjasama operasi yang dibentuk berdasarkan *Production Sharing Contract* antara perusahaan PT. Pertamina Hulu Energi dengan PT. Medco E&P Tomori Sulawesi. Pemerintah dalam hal ini SKK Migas melakukan tugas pengawasan kepada JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi selaku Kontraktor Kontrak Kerjasama (KKKS) untuk melakukan kegiatan eksplorasi dan eksploitasi di lapangan gas Senoro dan lapangan minyak Tiaka.

Wilayah Kerja JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi terletak di Provinsi Sulawesi Tengah, tepatnya untuk lapangan minyak Tiaka terletak di Kabupaten Morowali Utara dan proyek pengembangan gas Senoro di Kabupaten Banggai yang terbagi menjadi *Central Processing Plant*, *Jetty Area*, dan *USO Metering*. Untuk luas lahan *Central Processing Plant* JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi adalah 484.328,73 m². Sedangkan, luas lahan untuk *Jetty Area* adalah 384,95 ha. Namun sejauh ini, hanya sekitar 133.735 m² dari luas tersebut yang telah digunakan. Pada *USO Metering* sendiri memiliki luas sekitar 9049,198 m².

Proyek pengembangan gas Senoro baru mulai berproduksi pada tahun 2015 hingga saat ini. Sedangkan, lapangan minyak Tiaka, yang telah berproduksi dari tahun 2005, ditutup sementara pada bulan April 2016 hingga saat ini. Hal tersebut dikarenakan kondisi harga minyak dunia sedang mengalami penurunan dan terdapat faktor ekonomi lapangan yang kurang baik.

Proyek pengembangan gas Senoro yang dilakukan oleh JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi menghasilkan produk gas sebesar 310 MMscfd (*Million standard cubic feet per day*). Selain itu, kegiatan tersebut juga menghasilkan produk sampingan berupa kondensat sebesar 9000 Bpd (*Barrels per day*) dan asam sulfat sebanyak 25 ton/hari. Proyek ini terintegrasi secara hulu bersama-sama dengan PT. Pertamina Eksplorasi dan Produksi-Proyek Pengembangan Gas Matindok (PEP-

PPGM). Adapun gas yang dihasilkan dari kedua industri hulu migas tersebut akan dialirkan ke PT. Donggi Senoro LNG, PT. PLN untuk pembangkit listrik tenaga gas (PLTG), dan pabrik pupuk amonia milik PT. Panca Amara Utama.

4.2 Senoro Gas Central Processing Plant (CPP)

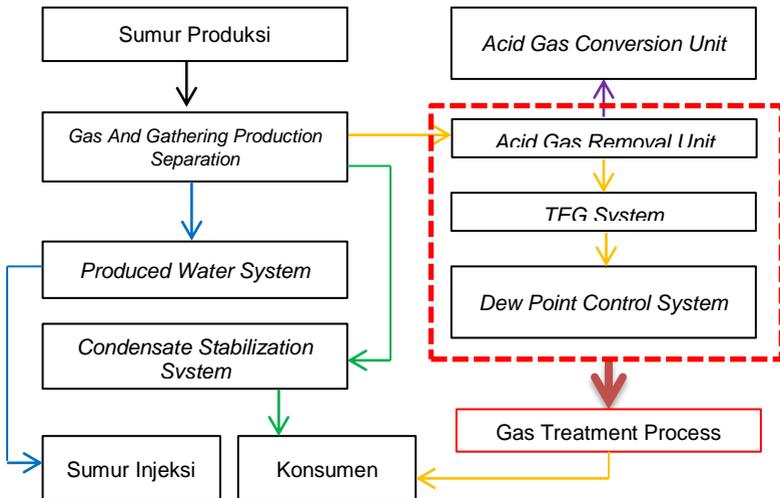
Pada penelitian ini, wilayah studi yang dianalisis adalah Senoro *Gas Central Processing Plant* (CPP), JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi. Sedangkan untuk *Jetty Area* dan *USO Metering* tidak dilakukan analisis. Hal tersebut dikarenakan pada kedua area tersebut tidak terjadi proses produksi, melainkan hanya proses distribusi ke pihak konsumen dan tempat menampung hasil olahan berupa kondensat serta asam sulfat. Sedangkan Senoro Gas CPP merupakan fasilitas pengolahan dan produksi gas alam JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi yang dihasilkan dari setiap sumur produksi. Gas alam yang dieksplorasi dan diproduksi di lapangan Senoro, CPP merupakan gas alam yang masuk dalam kategori *non-associated gas*, yang merupakan gas alam yang berasal dari sumur gas dan sumur kondensat dimana gas sedikit atau bahkan tidak ada kandungan minyak mentah (Deariska dan Sophiana, 2015).

Gas alam yang dieksplorasi dari sumur lapangan Senoro ini mengandung berbagai macam komponen hidrokarbon dan komponen non-hidrokarbon. Komponen hidrokarbon dalam kandungan gas alam yang dieksplorasi tidak hanya mengandung C_1 (metana), tetapi juga mengandung komponen hidrokarbon berat seperti C_2 (etana), C_3 (propana), C_4 (butana), C_5 (pentana), dan C_6 (Heksana) dalam jumlah persen volume yang banyak. Sedangkan untuk komponen non-hidrokarbon pada gas alam yang dieksplorasi mengandung karbon dioksida (CO_2) dan hidrogen sulfida (H_2S), serta zat pengotor lainnya. Baik H_2S maupun CO_2 merupakan senyawa yang tidak diinginkan berada didalam gas alam. Hal tersebut dikarenakan komponen gas asam tersebut bersifat korosif dan dapat menurunkan kandungan panas, sehingga menurunkan harga jual gas serta berdampak buruk bagi lingkungan (Cita dan Ariadji, 2010). Sedangkan kandungan hidrokarbon berat pada gas alam dapat menyebabkan terjadinya *foaming* pada proses pemurnian gas alam. Maka dari itu, perlu dilakukan proses separasi agar produk

gas yang dihasilkan sesuai dengan spesifikasi produk yang diinginkan oleh pihak konsumen.

Spesifikasi produk jual gas yang berlaku adalah <4 ppm mol H_2S dan 5% mol CO_2 (Irsyaduzzaqi dan Ariadji, 2010). Untuk mencapai spesifikasi gas yang akan dijual pada konsumen, maka perlu dilakukan pengolahan yang terintegrasi. Proses utama yang berada di fasilitas pengolahan Senoro gas CPP adalah proses terintegrasi yang mencakup *Gas Gathering and Production Separation*, *Gas Treatment Process*, *Condensate Stabilization System*, *Produced Water System*, dan *Acid Gas Conversion Unit (AGCU)* dalam *Wet Sulfuric Acid (WSA) Facilities*.

CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi memiliki 2 rangkaian pengolahan gas alam yang memiliki unit yang sama dengan posisi antar unit dari setiap rangkaian saling berhadapan seperti cermin. Untuk alur sederhana kegiatan utama eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Flow Diagram Senoro Gas Central Processing Plant
Sumber: JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2015

Sedangkan, untuk *material balance* dari kegiatan proses eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco

E&P Tomori Sulawesi secara lebih lengkap dapat dilihat pada Gambar L.IV.1 di Lampiran IV.

4.3 Perhitungan Beban Emisi

Berdasarkan laporan RKL-RPL CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi (2016), pada kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam di Senoro gas CPP terdapat unit-unit yang menjadi sumber emisi tidak bergerak, yaitu 3 unit *Gas Turbine Generator (GTG)*, 2 unit *hot oil heater*, 1 unit *combustor* pada *Acid Gas Conversion Unit (AGCU)*, 1 unit *flare*, 2 unit *Emergency Diessel Generator (EDG)*, dan 1 unit *fire pump*. Unit-unit tersebut merupakan unit penunjang proses utama pengolahan gas alam yang dilakukan oleh JOB Pertamina-Medco E&P Tomori di CPP. Pada penelitian ini, sumber emisi tidak bergerak yang akan dianalisis beban emisinya hanya unit GTG, *hot oil heater*, *combustor* pada AGCU, dan *flare*. Hal tersebut dikarenakan untuk unit EDG dan *fire pump* hanya dioperasikan pada keadaan tertentu, sehingga emisi yang dihasilkan tidak keluar secara kontinu.

4.3.1 Perhitungan Beban Emisi Unit GTG

Menurut PerMen LH No. 12 Tahun 2012, turbin gas adalah mesin berbahan bakar cair maupun gas yang menggunakan aliran gas untuk menggerakkan bilah-bilah turbin yang terdiri dari kompresor, pembakar, dan turbin pembangkit tenaga. Unit GTG sendiri termasuk ke dalam unit pembakaran dalam. Pembakaran dalam adalah pembakaran yang menghasilkan panas sebagai penggerak langsung mesin atau peralatan (PerMen LH No. 12 Tahun 2012).

Jumlah *power* yang diperlukan untuk operasional proses utama pengolahan gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi adalah sekitar 7,1 MW dalam kondisi operasi normal. Awalnya kebutuhan jumlah *power* dipenuhi oleh 3 unit GTG yang beroperasi secara bersamaan dengan kapasitas masing-masing 2,3 MW. Namun, untuk saat ini jumlah unit GTG yang dioperasikan hanya 2 unit, sedangkan 1 unit lainnya diposisikan dalam keadaan *stand by*. Hal tersebut dikarenakan adanya pasokan *power* dari *Steam Turbine Generator* yang

membuat beban kerja unit GTG menurun. Satu kali pengoperasian unit GTG dilakukan dalam waktu ± 720 jam.

Berdasarkan data desain produksi di JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, jumlah *fuel gas* yang dialirkan pada pada unit GTG adalah 3,99 MMscfd. Gas yang dialirkan pada unit tersebut adalah gas yang telah diproses (*sales gas*), yang diambil sebelum didistribusikan ke pihak konsumen. Maka dari itu, *heating value* untuk unit GTG berdasarkan penggunaan bahan bakar menurut API Compendium (2009) seperti yang terlihat pada Lampiran I adalah sebesar $3,42 \times 10^{10} \text{ J/m}^3$. Dikarenakan unit GTG termasuk ke dalam unit pembakaran dalam, maka dari itu parameter beban emisi yang dihitung berdasarkan PerMen LH No. 12 Tahun 2012 adalah beban emisi CO_2 , CH_4 , N_2O , NO_x , dan SO_x . Selanjutnya, untuk perhitungan beban emisi CO_2 , CH_4 , N_2O , NO_x , dan SO_x pada unit GTG berdasarkan Permen LH No.12 tahun 2012 dapat dilihat pada Persamaan 4.1.

$$E_i = FC \times EF_i \quad (4.1)$$

Keterangan:

- E = Beban emisi komponen i (ton/hari).
- i = Parameter emisi yang dihitung (CO_2 , CH_4 , N_2O , NO_x , dan SO_x).
- FC = Pemakaian bahan bakar (m^3 atau MMscfd).
- EF = Faktor emisi komponen i (ton/ton), yang didasarkan pada API Compendium 2009 atau US EPA-AP 42, seperti yang terlihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Faktor Emisi untuk Unit Pembakaran Dalam dan Luar

Emisi	Unit	Faktor Emisi
CO_2	ton/ 10^{12} J	55.9 (a)
CH_4	ton/ 10^{12} J	0.001 (a)
N_2O	ton/ 10^{12} J	0.0001 (a)
NO_x	lb/MMscf	100 (b)
SO_x	lb/MMscf	0.6 (b)

(a) API Compendium 2009 dalam Pertamina, 2016.

(b) US EPA-AP 42 dalam Pertamina, 2016.

Untuk menyetarakan nilai satuan, maka sebelum menghitung beban emisi CO_2 , CH_4 , dan N_2O yang dikeluarkan oleh unit GTG, terlebih dahulu dilakukan konversi nilai *fuel gas* yang dialirkan ke

unit tersebut dalam satuan m^3 . Berikut ini adalah perhitungan konversi jumlah *fuel gas* yang dialirkan ke unit GTG:

$$\begin{aligned} \text{FC} &= 3,99 \text{ MMscfd.} \\ &= 3,99 \times 10^6 \text{ ft}^3/\text{day} \times 28 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{ft}^3. \\ &= 111.720 \text{ m}^3/\text{hari.} \end{aligned}$$

Selain itu, untuk faktor emisi berdasarkan API *Compendium* 2009 yang digunakan dalam menghitung beban emisi CO_2 , CH_4 , dan N_2O terlebih dahulu dikalikan dengan *heating value* dari bahan bakar yang digunakan pada unit GTG. Rumus yang digunakan dalam perhitungan faktor emisi CO_2 , CH_4 , dan N_2O dapat dilihat pada Persamaan 4.2.

$$\text{EF} = \text{Faktor emisi (Tabel 4.1)} \times \text{Heating Value} \quad (4.2)$$

Maka, berdasarkan rumus pada Persamaan 4.2, nilai faktor emisi untuk CO_2 , CH_4 , dan N_2O adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{EF}_{\text{CO}_2} &= 55,9 \text{ ton}/10^{12} \text{ J} \times 3,42 \times 10^{10} \text{ J}/\text{m}^3. \\ &= 191,178 \times 10^{-2} \text{ ton CO}_2/\text{m}^3. \\ \text{EF}_{\text{CH}_4} &= 0,001 \text{ ton}/10^{12} \text{ J} \times 3,42 \times 10^{10} \text{ J}/\text{m}^3. \\ &= 0,342 \times 10^{-4} \text{ ton CH}_4/\text{m}^3. \\ \text{EF}_{\text{N}_2\text{O}} &= 0,0001 \text{ ton}/10^{12} \text{ J} \times 3,42 \times 10^{10} \text{ J}/\text{m}^3. \\ &= 0,342 \times 10^{-5} \text{ ton N}_2\text{O}/\text{m}^3. \end{aligned}$$

Selanjutnya, dilakukan perhitungan beban emisi CO_2 , CH_4 , N_2O , NO_x , dan SO_x pada unit GTG di JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi dengan Persamaan 4.1 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} E_{\text{CO}_2} &= \text{FC} \times \text{EF}_{\text{CO}_2} \\ &= 111.720 \text{ m}^3/\text{hari} \times 191,178 \times 10^{-2} \text{ ton CO}_2/\text{m}^3. \\ &= 213.584,06 \text{ ton CO}_2/\text{hari.} \\ E_{\text{CH}_4} &= \text{FC} \times \text{EF}_{\text{CH}_4} \\ &= 111.720 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,342 \times 10^{-4} \text{ ton CH}_4/\text{m}^3. \\ &= 3,82 \text{ ton CH}_4/\text{hari.} \\ E_{\text{N}_2\text{O}} &= \text{FC} \times \text{EF}_{\text{N}_2\text{O}} \\ &= 111.720 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,342 \times 10^{-5} \text{ ton N}_2\text{O}/\text{m}^3. \\ &= 0,38 \text{ ton N}_2\text{O}/\text{hari.} \\ E_{\text{NO}_x} &= \text{FC} \times \text{EF}_{\text{NO}_x} \\ &= 3,99 \text{ MMscfd} \times 100 \text{ lb}/\text{MMscfd}. \\ &= 399 \text{ lb NO}_x/\text{hari} \times 0,454 \text{ kg}/\text{lb}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 181.15 \text{ kg NO}_x/\text{hari.} \\
&= 0,18 \text{ ton NO}_x/\text{hari.} \\
E_{\text{SOX}} &= FC \times EF_{\text{SOX}} \\
&= 3,99 \text{ MMscfd} \times 0,6 \text{ lb/MMscfd.} \\
&= 2,39 \text{ lb SO}_x/\text{hari} \times 0,454 \text{ kg/lb.} \\
&= 1,09 \text{ kg SO}_x/\text{hari.} \\
&= 0,001 \text{ ton SO}_x/\text{hari.}
\end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan dengan konsumsi *fuel gas* yang dialirkan ke unit GTG sebesar 3,99 MMscfd dan faktor emisi dari API *Compendium* 2009, maka didapatkan beban emisi CO₂ sebesar 213.584,06 ton CO₂/hari, CH₄ sebesar 3,82 ton CH₄/hari, dan N₂O sebesar 0,38 ton N₂O/hari. Sedangkan berdasarkan faktor emisi dari US EPA-AP 42 didapatkan beban emisi NO_x sebesar 0,18 ton NO_x/hari dan SO_x sebesar 0,001 ton SO_x/hari.

4.3.2 Perhitungan Beban Emisi Unit *Hot Oil Heater*

Menurut PerMen LH No. 12 Tahun 2012, ketel uap atau pembangkit uap dan pemanas proses ataupun pengolahan panas adalah peralatan berbahan bakar cair maupun gas yang berfungsi menghasilkan air panas dan/atau uap untuk kebutuhan pemindahan energi lainnya. Unit *hot oil heater* sendiri termasuk ke dalam unit pembakaran luar. Pembakaran luar adalah pembakaran yang menghasilkan panas untuk memanaskan cairan (*internal*) yang bekerja, seperti air atau uap, melalui dinding mesin/peralatan atau *heat exchanger* (PerMen LH No. 12 Tahun 2012).

Sistem *hot oil heater* merupakan sistem yang digunakan untuk menyediakan panas pada *reboiler*. Panas ini akan digunakan sebagai pendukung proses pada regenerasi *amine*, regenerasi TEG, dan stabilisasi kondensat. Jenis minyak yang digunakan sebagai *hot oil* adalah *Therminol 55* yang ditampung dalam *hot oil expansion vessel*. Dalam prosesnya, *hot oil* akan dipanaskan terlebih dahulu pada unit *hot oil heater*. *Hot oil* (*therminol 55*) akan menerima panas dari proses pembakaran dalam *hot oil heater* secara konveksi. Selanjutnya, *therminol 55* yang telah dipanaskan dalam *hot oil heater*, dialirkan ke unit-unit pengolahan, yaitu *condesate stabilizer*, *amine reboiler*, dan TEG *reboiler*, serta *LP fuel gas treatment* yang mana pembagian

therminol 55 dilakukan dengan menggunakan *valve*. Untuk *therminol* 55 yang telah digunakan dan mengalami penurunan suhu, maka akan dialirkan kembali ke unit *hot oil heater* untuk kembali dipanaskan.

Berdasarkan data desain produksi di JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, jumlah *fuel gas* yang dialirkan pada unit *hot oil heater* adalah 4,91 MMscfd. Gas yang dialirkan pada unit tersebut adalah gas yang telah diproses (LP *fuel gas*), yang dialirkan dari LP *fuel gas treatment*. Maka dari itu, *heating value* untuk unit *hot oil heater* berdasarkan penggunaan bahan bakar menurut API Compendium (2009) seperti yang terlihat pada Lampiran I adalah sebesar $3,42 \times 10^{10} \text{ J/m}^3$. Dikarenakan unit *hot oil heater* termasuk ke dalam unit pembakaran luar, maka dari itu parameter beban emisi yang dihitung berdasarkan PerMen LH No. 12 Tahun 2012 adalah beban emisi CO_2 , CH_4 , N_2O , NO_x , dan SO_x . Selanjutnya, untuk perhitungan beban emisi CO_2 , CH_4 , N_2O , NO_x , dan SO_x pada unit *hot oil heater* berdasarkan Permen LH No.12 tahun 2012 dapat dilihat pada Persamaan 4.1. Untuk menyederhanakan nilai satuan, maka sebelum menghitung beban emisi CO_2 , CH_4 , dan N_2O yang dikeluarkan oleh unit *hot oil heater*, terlebih dahulu dilakukan konversi nilai *fuel gas* yang dialirkan ke unit tersebut dalam satuan m^3 . Berikut ini adalah perhitungan konversi jumlah *fuel gas* yang dialirkan ke unit GTG:

$$\begin{aligned} \text{FC} &= 4,91 \text{ MMscfd.} \\ &= 4,91 \times 10^6 \text{ ft}^3/\text{day} \times 28 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{ft}^3. \\ &= 1.374.800 \text{ m}^3/\text{hari.} \end{aligned}$$

Selain itu, untuk faktor emisi berdasarkan API *Compendium* 2009 yang digunakan dalam menghitung beban emisi CO_2 , CH_4 , dan N_2O terlebih dahulu dikalikan dengan *heating value* dari bahan bakar yang digunakan pada unit *hot oil heater*. Rumus yang digunakan dalam perhitungan faktor emisi CO_2 , CH_4 , dan N_2O dapat dilihat pada Persamaan 4.2. Maka, berdasarkan rumus pada Persamaan 4.2, nilai faktor emisi untuk CO_2 , CH_4 , dan N_2O adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{EF}_{\text{CO}_2} &= 55,9 \text{ ton}/10^{12} \text{ J} \times 3,42 \times 10^{10} \text{ J/m}^3. \\ &= 191,178 \times 10^{-2} \text{ ton CO}_2/\text{m}^3. \\ \text{EF}_{\text{CH}_4} &= 0,001 \text{ ton}/10^{12} \text{ J} \times 3,42 \times 10^{10} \text{ J/m}^3. \\ &= 0,342 \times 10^{-4} \text{ ton CH}_4/\text{m}^3. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 EF_{N_2O} &= 0,0001 \text{ ton}/10^{12} \text{ J} \times 3,42 \times 10^{10} \text{ J}/\text{m}^3 \\
 &= 0,342 \times 10^{-5} \text{ ton N}_2\text{O}/\text{m}^3.
 \end{aligned}$$

Selanjutnya, dilakukan perhitungan beban emisi CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan SO_x pada unit *hot oil heater* di JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi dengan dengan Persamaan 4.1 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 E_{CO_2} &= FC \times EF_{CO_2} \\
 &= 1.374.800 \text{ m}^3/\text{hari} \times 191,178 \times 10^{-2} \text{ ton CO}_2/\text{m}^3 \\
 &= 2.628.315,144 \text{ ton CO}_2/\text{hari}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{CH_4} &= FC \times EF_{CH_4} \\
 &= 1.374.800 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,342 \times 10^{-4} \text{ ton CH}_4/\text{m}^3 \\
 &= 47,018 \text{ ton CH}_4/\text{hari}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{N_2O} &= FC \times EF_{N_2O} \\
 &= 1.374.800 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,342 \times 10^{-5} \text{ ton N}_2\text{O}/\text{m}^3 \\
 &= 4,701 \text{ ton N}_2\text{O}/\text{hari}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{NO_x} &= FC \times EF_{NO_x} \\
 &= 4,91 \text{ MMscfd} \times 100 \text{ lb/MMscfd} \\
 &= 491 \text{ lb NO}_x/\text{hari} \times 0,454 \text{ kg/lb} \\
 &= 222,914 \text{ kg NO}_x/\text{hari} \\
 &= 0,222 \text{ ton NO}_x/\text{hari}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{SO_x} &= FC \times EF_{SO_x} \\
 &= 4,91 \text{ MMscfd} \times 0,6 \text{ lb/MMscfd} \\
 &= 2,95 \text{ lb SO}_2/\text{hari} \times 0,454 \text{ kg/lb} \\
 &= 1,337 \text{ kg SO}_x/\text{hari} \\
 &= 0,001 \text{ ton SO}_x/\text{hari}.
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan dengan konsumsi *fuel gas* yang dialirkan ke unit *hot oil heater* sebesar 4,91 MMscfd dan faktor emisi dari API *Compendium* 2009, maka didapatkan beban emisi CO₂ sebesar 2.628.315,144 ton CO₂/hari, CH₄ sebesar 47,018 ton CH₄/hari, dan N₂O sebesar 4,701 ton N₂O/hari. Sedangkan berdasarkan faktor emisi dari US EPA-AP 42 didapatkan beban emisi NO_x sebesar 0,222 ton NO_x/hari dan SO_x sebesar 0,001 ton SO_x/hari.

4.3.3 Perhitungan Beban Emisi Unit Flare

Menurut PerMen LH No. 12 Tahun 2012, suar bakar (*flare*) adalah pembakaran secara terus menerus maupun tidak dari gas-gas yang dihasilkan oleh kegiatan operasi minyak dan

gas pada cerobong tetap (*stationary stack*), baik vertikal maupun horizontal. Suar bakar terbagi menjadi tiga jenis, yaitu suar bakar bertekanan rendah (*low pressure flare*), suar bakar bertekanan menengah (*medium pressure flare*), dan suar bakar bertekanan tinggi (*high pressure flare*). *Flare* digunakan sebagai pembakar gas buang/gas limbah dari proses karena kondisi untuk menjaga peralatan jika terjadi *overpressure* di bejana atau peralatan. Terkadang, gas buang memang sengaja dialirkan ke unit *flare* karena kebutuhan, misalnya kondisi *offspec* atau kondisi *shutdown* untuk perbaikan peralatan.

Berdasarkan data laporan RKL-RPL CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi (2016), jenis *flare* yang digunakan pada proses pengolahan gas alam di CPP adalah HP dan LP *flare*. HP dan LP *flare* diletakan secara berhimpitan. Perbedaan *pressure* yang dimaksudkan dalam jenis *flare* ini bukan berada pada tekanan gas yang ada di *flare*, namun perbedaan sumber gas yang masuk ke dalam unit *flare*. Selama operasi normal, sistem *high pressure flare* digunakan untuk *purging*, yang mana LP *fuel gas* dimasukkan ke dalam sistem *high pressure flare* sehingga tidak terjadi *backflow* pada *high pressure flare system*. Untuk gas yang dialirkan ke LP *flare* berasal dari *vapor* pada unit TEG dan *excess LP fuel* dari LP AGRU.

Berdasarkan data desain produksi di JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, jumlah gas total yang dialirkan pada unit *flare* adalah 17.645 lb/jam. Parameter beban emisi yang dihitung untuk unit suar bakar berdasarkan PerMen LH No. 12 Tahun 2012 adalah beban emisi CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan SO_x. Selanjutnya, untuk perhitungan beban emisi CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan SO_x pada unit *flare* berdasarkan Permen LH No.12 tahun 2012 dapat dilihat pada Persamaan 4.3.

$$E_i = FC \times EF_i \quad (4.3)$$

Keterangan:

- E = Beban emisi komponen i (ton/hari).
- FC = Jumlah gas yang dialirkan ke *flare* (ton).
- EF = Faktor emisi komponen i (ton/ton), yang didasarkan pada OGP *Report* no. 197, seperti yang terlihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Faktor Emisi untuk Gas *Flaring*

Emisi	Unit	Faktor Emisi
CO ₂	Ton/Ton	2,61
CH ₄	Ton/Ton	0,035
N ₂ O	Ton/Ton	0,000081
NO _x	Ton/Ton	0,0015
SO _x	Ton/Ton	0,0000128

Sumber: OGP *Report* no.197 dalam Permen LH 12/2012

Untuk menyetarakan nilai satuan, maka sebelum menghitung beban emisi yang dikeluarkan oleh unit *flare*, terlebih dahulu dilakukan konversi nilai gas yang dialirkan ke unit tersebut dalam satuan ton. Berikut ini adalah perhitungan konversi jumlah gas yang dialirkan ke unit *flare*:

$$\begin{aligned}
 FC &= 17.645 \text{ lb/jam} \times 0,454 \text{ kg/lb} \times 24 \text{ jam/hari} \\
 &= 192.259,92 \text{ kg/hari} \\
 &= 192,26 \text{ ton/hari}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya, dilakukan perhitungan beban emisi CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan SO_x pada unit *flare* (suara bakar) di JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi dengan persamaan 4.3 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 E_{CO_2} &= FC \times EF_{CO_2} \\
 &= 192,26 \text{ ton/hari} \times 2,61 \text{ ton/ton} \\
 &= 501,799 \text{ ton CO}_2\text{/hari} \\
 E_{CH_4} &= FC \times EF_{CH_4} \\
 &= 192,26 \text{ ton/hari} \times 0,035 \text{ ton/ton} \\
 &= 6,729 \text{ ton CH}_4\text{/hari} \\
 E_{N_2O} &= FC \times EF_{N_2O} \\
 &= 192,26 \text{ ton/hari} \times 0,000081 \text{ ton/ton} \\
 &= 0,015 \text{ ton N}_2\text{O/hari} \\
 E_{NO_x} &= FC \times EF_{NO_x} \\
 &= 192,26 \text{ ton/hari} \times 0,0015 \text{ ton/ton} \\
 &= 0,288 \text{ ton NO}_x\text{/hari} \\
 E_{SO_x} &= FC \times EF_{SO_x} \\
 &= 192,26 \text{ ton SO}_x\text{/hari} \times 0,0000128 \text{ ton/ton} \\
 &= 0,002 \text{ ton SO}_x\text{/hari}
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan dengan konsumsi gas yang dialirkan ke unit *flare* sebesar 17.645 lb/hr dan faktor emisi dari OGP *report*

No. 197, maka didapatkan beban emisi CO₂ sebesar 501,799 ton CO₂/hari, CH₄ sebesar 6,729 ton CH₄/hari, N₂O sebesar 0,015 ton N₂O/hari, NO_x sebesar 0,288 ton NO_x/hari, dan SO_x sebesar 0,002 ton SO_x/hari.

4.3.4 Perhitungan Beban Emisi Unit AGCU (*Combustor*)

Menurut PerMen LH No. 12 Tahun 2012, unit penangkap sulfur (yang dilengkapi dengan *thermal oxidizer* atau insenerator) adalah unit proses pengolahan yang menyisihkan atau yang menangkap dan mengkonversi polutan gas yang mengandung sulfur menjadi produk dalam fasa *liquid* atau *solid*, sementara *tail gas* (gas ikutan) yang dihasilkan diolah melalui *thermal oxidizer* (oksidasi termal) atau insinerator.

Salah satu unit pengolahan yang terdapat dalam rangkaian proses *Acid Gas Conversion Unit* adalah unit *combustor*. Pada unit *combustor* ini terjadi proses pembakaran untuk mengoksidasi gas asam sulfat (H₂S) menjadi SO₂ dan air dengan tekanan 1,18 psig dan suhu diatas 1700^oF dengan reaksi endotermis. SO₂ yang dihasilkan selanjutnya akan diubah menjadi SO₃, untuk kemudian diubah menjadi H₂SO₄ pada unit pengolahan selanjutnya. Bahan bakar yang digunakan pada proses pembakaran yang terjadi di unit *combustor* adalah *low pressure fuel gas* yang berasal dari *LP fuel gas treatment*. Tidak terdapat catatan data penggunaan *fuel* pada unit *combustor*, sehingga perhitungan beban emisi dilakukan berdasarkan hasil pengukuran emisi yang pernah dilakukan pada unit tersebut.

Berdasarkan data hasil *sampling* pada bulan April 2017 yang dicantumkan pada laporan RKL-RPL CPP dan laporan SA PPU JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, pada unit *combustor* di AGCU *system* menghasilkan emisi SO₂ sebesar 8,28 mg/Nm³ dan NO₂ sebesar 42,09 mg/Nm³, dengan laju alir gas sebesar 38,885 m³/detik dan suhu sebesar 1713 °F. Maka dari itu, untuk menghitung beban emisi NO₂ dan SO₂ pada unit AGCU dapat digunakan rumus pada Persamaan 4.4.

$$E_i = C_i \times Q \quad (4.4)$$

Keterangan:

E = Beban emisi komponen i (kg/hari).

i = Parameter emisi yang dihitung (NO₂ dan SO₂).

- C = Konsentrasi emisi gas buang (mg/m^3).
 Q = Flow gas buang (m^3/hari).

Untuk menyetarakan nilai satuan, maka sebelum menghitung beban emisi yang dikeluarkan oleh unit *combustor* pada AGCU, terlebih dahulu dilakukan konversi nilai gas yang keluar dari unit tersebut dalam satuan mg/m^3 . Untuk konversi nilai emisi dari mg/Nm^3 menjadi mg/m^3 dapat digunakan rumus pada Persamaan 4.5.

$$\frac{C_a}{C_n} = \frac{T_n}{T_a} \quad (4.5)$$

Keterangan:

- C_a = Konsentrasi gas pada keadaan aktual (mg/m^3).
 C_n = Konsentrasi gas pada keadaan normal (mg/Nm^3).
 T_a = Suhu gas pada keadaan aktual (K).
 T_n = Suhu gas pada keadaan normal (K), dengan $T = 25^\circ\text{C}$.

Berdasarkan rumus pada Persamaan 4.5, konsentrasi NO_2 dalam satuan mg/m^3 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{C_a}{C_n} &= \frac{T_n}{T_a} \\ &= \frac{C_a}{42,09 \text{ mg}/\text{Nm}^3} = \frac{298 \text{ K}}{1207,04 \text{ K}} \\ &= C_a = 10,39 \text{ mg}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

Maka, konsentrasi NO_2 yang dikeluarkan adalah $10,39 \text{ mg}/\text{m}^3$.

Sedangkan, berdasarkan rumus pada Persamaan 4.5, konsentrasi SO_2 dalam satuan mg/m^3 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{C_a}{C_n} &= \frac{T_n}{T_a} \\ &= \frac{C_a}{8,28 \text{ mg}/\text{Nm}^3} = \frac{298 \text{ K}}{1207,04 \text{ K}} \\ &= C_a = 2,04 \text{ mg}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

Maka, konsentrasi SO_2 yang dikeluarkan adalah $2,04 \text{ mg}/\text{m}^3$.

Selanjutnya, dilakukan perhitungan beban emisi NO_2 dan SO_2 pada unit *combustor* di AGCU system, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi dengan Persamaan 4.4 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} E_{\text{NO}_2} &= C_{\text{NO}_2} \times Q \\ &= 10,39 \text{ mg}/\text{m}^3 \times 38,885 \text{ m}^3/\text{detik} \\ &= 404,015 \text{ mg NO}_2/\text{detik} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 34,907 \text{ kg NO}_2/\text{hari.} \\
 E_{\text{SO}_2} &= C_{\text{SO}_2} \times Q. \\
 &= 2,04 \text{ mg/m}^3 \times 38,885 \text{ m}^3/\text{detik.} \\
 &= 79,325 \text{ mg SO}_2/\text{detik.} \\
 &= 6,854 \text{ kg SO}_2/\text{hari.}
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan dengan laju alir gas buang pada unit *combustor* di AGCU sebesar 38,885 m³/detik dengan konsentrasi emisi SO₂ sebesar 8,28 mg/Nm³ dan NO₂ sebesar 42,09 mg/Nm³, serta suhu sebesar 1713 °F, maka didapatkan beban emisi NO₂ sebesar 34,907 kg NO₂/hari dan SO₂ sebesar 6,854 kg SO₂/hari.

4.4 Analisis Hasil Perhitungan Beban Emisi

Hasil perhitungan beban emisi pada sub-bab 4.3 untuk unit GTG, *hot oil heater*, *combustor*, dan *flare* yang ada di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi dapat dilihat secara ringkas pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil Perhitungan Beban Emisi

Parameter Emisi (ton/hari)	Unit Pengolahan			
	GTG	Hot Oil Heater	Flare	Combustor
CO ₂	213.584,06	2.628.315,144	501,799	-
CH ₄	3,82	47,018	6,729	-
N ₂ O	0,38	4,701	0,015	-
NO _x	0,18	0,222	0,288	0,035
SO _x	0,001	0,001	0,002	0,007

Berdasarkan data hasil perhitungan beban emisi pada Tabel 4.3, dapat dilihat bahwa beban emisi CO₂, CH₄, dan N₂O terbesar dihasilkan oleh unit *hot oil heater*. Sedangkan, untuk beban emisi NO_x dan SO_x terbesar dihasilkan oleh unit *flare*. Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai faktor emisi yang digunakan mempengaruhi besarnya nilai beban emisi yang dihasilkan.

Selain itu, jumlah penggunaan bahan bakar yang digunakan juga mempengaruhi besarnya nilai beban emisi yang dihasilkan. Hal tersebut dapat terlihat dari hasil perbandingan beban emisi pada unit GTG dan *hot oil heater*. Kedua unit tersebut menggunakan nilai faktor emisi dan *heating value* yang sama dalam menghitung beban emisi CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan

SO_x, namun beban emisi yang dihasilkan pada unit *hot oil heater* lebih besar dibandingkan beban emisi yang dihasilkan pada unit GTG. Hal tersebut dikarenakan *fuel gas* yang digunakan pada unit *hot oil heater* lebih besar dibandingkan penggunaan *fuel gas* pada unit GTG, dengan selisih 0,92 MMscfd. Maka dari itu dari analisis perhitungan beban emisi ini dapat disimpulkan bahwa semakin besar jumlah konsumsi bahan bakar dan faktor emisi yang digunakan, maka semakin besar beban emisi yang dihasilkan.

4.5 Analisis LCA menggunakan SimaPro 8.4

Life Cycle Assessment (LCA) adalah proses objektif untuk menilai dampak lingkungan dari produk, proses, atau aktivitas. Penilaian tersebut dilakukan dengan mengidentifikasi sumber energi, penggunaan *raw material*, dan pembuangan pada lingkungan. Selain itu, metode tersebut dapat mengevaluasi dan menerapkan kemungkinan perbaikan lingkungan (Graedel dan Allenby, 1995).

Untuk melakukan analisis LCA dapat digunakan *software* SimaPro 8.4, yang mana tahapan mengolah data dalam *software* tersebut telah disesuaikan dengan tahapan analisis LCA. Adapun tahapan analisis LCA adalah *goal and scope*, *life cycle inventory*, *life cycle impact assessment*, dan interpretasi data.

4.5.1 Penentuan Goal and Scope

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dampak lingkungan yang terjadi pada proses utama dan proses pada unit-unit penunjang (unit GTG, unit *hot oil heater*, dan unit *flare*) yang ada pada kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.

Adapun ruang lingkup dalam penelitian ini terbatas pada *cradle to gate*, yang dimulai dari pengambilan gas alam dari sumur produksi (*raw material*) hingga proses pendistribusian dari produk yang dihasilkan (sebelum produk tersebut digunakan) (Hermawan, 2013). *Cradle to gate* dipilih karena berdasarkan fakta yang ada, dampak lingkungan yang terdapat di sekitar perusahaan merupakan dampak yang dihasilkan dari aktivitas internal perusahaan terutama pada bagian produksi. Selain itu, menurut Thom (2011) dalam Kautzar *et al.* (2015), fase

penggunaan produk merupakan fase yang sangat sulit untuk dievaluasi karena sulit untuk memprediksikan bagaimana konsumen akan menggunakannya.

Berdasarkan ruang lingkup yang dipilih, maka proses yang dianalisis dalam penelitian ini adalah 2 rangkaian proses utama, yang meliputi *gas and gathering production separation*, *gas treatment process* (proses pengolahan *sour gas* menjadi *sales gas*, proses regenerasi *amine* pada AGRU, proses regenerasi TEG pada *dehydration unit*, dan LP *fuel gas treatment*), *condensate stabilization system*, *produced water system*, dan *Acid Gas Conversion Unit* (AGCU), serta unit-unit pada proses penunjang, yang meliputi proses pada unit GTG, *flare*, dan *hot oil heater* yang ada di *Central Processing Plant*, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini untuk menganalisis dampak yang terjadi adalah *Eco Indicator 99*. Hal tersebut dikarenakan metode ini dinilai lebih komprehensif dalam melakukan evaluasi terhadap dampak lingkungan (Kautzar *et al.*, 2015). Pada metode ini dampak terhadap lingkungan yang dianalisis adalah *climate change*, *ozone layer depletion*, *carcinogenesis*, *respiratory organic effects*, dan *respiratory inorganic effects*. Kategori dampak lingkungan tersebut dipilih karena berkaitan dengan dampak terhadap udara. Selain itu, sesuai dengan pendekatan metode EI 99 yang termasuk ke dalam metode *endpoint* (Menoufi *et al.*, 2011), maka dilakukan juga analisis terhadap kerusakan apa yang mungkin ditimbulkan, yang terbagi dalam 3 kategori utama, yaitu *human health*, *ecosystem quality*, dan *resources*.

4.5.2 Penentuan *Life Cycle Inventory* (LCI)

Untuk melakukan penilaian dampak dari proses yang dianalisis, maka dibutuhkan *input* data pada tahap ini yang meliputi kesetimbangan material antara data bahan baku yang digunakan dan data produk yang dihasilkan, energi yang digunakan, serta data emisi yang dihasilkan. Data yang digunakan merupakan data desain produksi dalam satu kali proses, yang didapatkan dari pihak perusahaan JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi. Tahap akhir dari proses LCI adalah penggabungan *input* distribusi bahan baku, proses produksi,

serta distribusi produk sehingga akan membentuk sebuah *life cycle*. Dari *life cycle* tersebut nantinya akan diketahui proses yang memiliki dampak terbesar terhadap lingkungan (Kautzar *et al.*, 2015).

Hasil pengolahan data LCI akan menghasilkan *network*. *Network* ini memberikan informasi hubungan dari setiap proses yang memiliki pengaruh dalam menghasilkan dampak (Giandadewi dkk., 2017). Pada *network* didapatkan diagram yang menunjukkan keterkaitan antar proses yang dihubungkan oleh garis merah. Gambar *network* ini berjalan dari bawah menuju atas, dimana kegiatan yang berada dibawah merupakan pendukung dari adanya kegiatan yang berada diatasnya. Adapun arti dari ketebalan garis merah menunjukkan kepentingan hubungan dari setiap langkah serta kontribusi terhadap lingkungan (Kusumawaradani, 2017). Semakin tebal garis merah maka kontribusi yang dikeluarkan terhadap lingkungan semakin besar. Unit satuan yang digunakan pada tahap LCI adalah Pt (*point*), yang mana untuk skala 1 Pt adalah perwakilan untuk satu seperseribu beban lingkungan tahunan satu penduduk rata-rata Eropa (Kusumawaradani, 2017).

4.5.2.1 Life Cycle Inventory dari Proses Gas and Gathering Production Separation

Lapangan gas Senoro, *Central Processing Plant* (CPP) memiliki 5 kluster sumur gas yang terbagi menjadi area Utara dan area Selatan dengan jumlah sumur sebanyak 21 buah. Untuk saat ini area Selatan tidak digunakan sebagai sumur produksi yang menghasilkan *feed gas*. Sedangkan area Utara memiliki 3 kluster sumur yang akan menjadi *feed gas* untuk lapangan gas Senoro CPP, yaitu kluster 1 dengan 2 buah sumur aktif, kluster 2 dengan 7 buah sumur aktif, dan kluster 5 dengan 1 buah sumur aktif. Ketiga kluster sumur gas tersebut termasuk dalam kategori gas HPHT (*High Pressure HighTemperature*) dimana gas yang dihasilkan dari ketiga sumur tersebut memiliki tekanan yang tinggi dan suhu yang tinggi. Gas alam yang berasal dari sumur produksi ini akan naik dan masuk ke dalam pipa sumur produksi karena adanya beda tekanan. Kemudian, gas alam tersebut akan dialirkan menuju unit pertama dalam pengolahan gas di CPP, yaitu *air fin cooler*.

Pada unit *air fin cooler*, tekanan dan suhu gas akan diturunkan menjadi $\pm 90^{\circ}\text{F}$ dan 913 psig sebelum diproses dalam *production separator*. Gas alam yang diambil dari sumur produksi terdiri dari HC berat dan HC ringan (yang sebagian besar terdiri dari metana), air, dan zat pengotor lainnya. Sehingga karena terjadi proses pendinginan pada unit ini, sebagian uap air dan hidrokarbon berat yang masih terbawa aliran gas akan terkondensasi. Proses pendinginan dilakukan tidak menggunakan zat kimia, melainkan dengan udara luar yang dimasukkan ke dalam menggunakan *motor fan*. Untuk menggerakkan *motor fan* pada unit ini digunakan energi listrik yang diambil dari unit GTG. Pendinginan dalam *air fin cooler* juga bertujuan untuk menyesuaikan suhu proses yang dipersyaratkan dalam *amine unit*.

Selanjutnya, gas yang masih bercampur dengan *liquid* dari uap air dan hidrokarbon berat yang terkondensasi akan dialirkan menuju unit *production separator* untuk dilakukan pemisahan. *Production separator* dan *test separator* adalah alat separasi tiga fasa yang berfungsi untuk pemisahan *sour gas-condensate-water*. Tipe *separator* yang digunakan yaitu *over-flow wiewr type separator*. Pada unit ini akan terjadi pemisahan antara gas, kondensat, dan air berdasarkan beda densitas antara cairan dan gas. Gas dengan densitas yang lebih ringan akan mengalir ke bagian atas, sedangkan untuk cairan (air dan kondensat) akan mengalir ke bawah *vessel*. Di bagian dalam *separator* terdapat pembatas yang akan memisahkan cairan (kondensat dengan air), hal ini terjadi karena massa jenis kondensat yang lebih ringan akan berada di bagian atas air. Pembatas akan memisahkan air dengan kondensat, dimana air keluar dari sebelah kiri menuju *production water system (hydrocyclon)* dan kondensat akan keluar dari sebelah kanan menuju *condensate stabilization system (condensate surgevessel)*. Untuk *sour gas* yang telah terpisah dari air dan kondensat akan keluar dari bagian atas *vessel* dan dialirkan menuju *production filter coalescer*.

Untuk data bahan baku, data pemakaian energi, data emisi yang dihasilkan, dan data produk dari kegiatan ini dapat dilihat pada Tabel L.V.1 di Lampiran V. Sedangkan, untuk diagram alir dari kegiatan ini dapat dilihat pada Gambar L.IV.2 di Lampiran IV. Dalam proses *input* data ke *software* SimaPro,

urutan data disesuaikan dengan alur proses produksi seperti pada Gambar L.IV.2 di Lampiran IV. Sehingga nantinya didapatkan hasil *network* atau *life cycle* dari pengolahan data proses *gas and gathering production separation* seperti pada Gambar L.VI.1 di Lampiran VI.

Berdasarkan *network* proses *gas and gathering production separation* yang terdapat pada Gambar L.VI.1 di Lampiran VI, diketahui bahwa proses separasi gas alam untuk 2 rangkaian dengan jumlah 884.300 lb/hr menghasilkan dampak terhadap lingkungan sebesar $6,41 \times 10^6$ Pt. Pada proses *gas and gathering production separation*, unit yang memiliki kontribusi paling besar terhadap dampak lingkungan adalah unit *air fin cooler* sebesar $6,41 \times 10^6$ Pt. Hal tersebut dibuktikan dengan adanya garis paling tebal berwarna merah pada unit *air fin cooler*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa jumlah gas alam yang masuk pada unit *air fin cooler* lebih besar dibandingkan unit lainnya.

Apabila dilihat secara lebih spesifik, maka garis merah yang paling tebal menunjukkan aliran proses dari unit *air fin cooler* menuju unit *production separator* untuk produk *sour gas*. Hal tersebut sesuai dengan data *input* yang ada pada Tabel L.V.1 di Lampiran V bahwa jumlah *sour gas* yang berada pada gas alam yang diolah pada unit *air fin cooler* lebih besar dibandingkan dengan jumlah kondensat dan air. Selain itu, apabila dilihat dari komposisi gas alam, kandungan hidrokarbon ringan (metana) pada gas alam lebih besar dibandingkan dengan kandungan hidrokarbon berat, air, maupun zat pengotor lainnya. Sehingga produk *sour gas* yang diolah pada unit *production separator* lebih besar dibandingkan air dan kondensat, yang mempengaruhi kontribusi terhadap lingkungan pada aliran unit *air fin cooler* menuju unit *production separator*.

4.5.2.2 Life Cycle Inventory dari Produced Water System

Air yang telah terpisah dari kondensat dan *sour gas* akan dialirkan menuju unit *hydrocyclone*. Dikarenakan kemungkinan air yang berasal dari *production separator* masih mengandung kondensat, maka pada unit ini dilakukan kembali pemisahan antara *produced water* dengan kondensat. Pemisahan ini dilakukan berdasarkan perbedaan densitas. Kondensat yang

akan berada diatas air akan dialirkan menuju *condensate surge vessel*. Sedangkan *produced water* akan dialirkan dan diproses kembali di unit *degassing column*.

Pada unit *degassing column*, air kembali dipisahkan dari kandungan sisa gas yang mungkin masih terbawa. Proses pemisahan ini juga dilakukan berdasarkan perbedaan densitas. Proses ini berlangsung pada tekanan 10 psig dan suhu 120°F. Gas yang telah terpisah dari air akan dialirkan menuju unit AGCU. Sedangkan, *produced water* kemudian dialirkan menuju *produced water storage tank* untuk ditampung terlebih dahulu. Kemudian, *produced water* dialirkan menuju unit *produced water filter* dengan menggunakan *produced water booster pump*. Selanjutnya, *produced water* dialirkan menuju sumur disposal/sumur injeksi yang berada di kluster 4 menggunakan *produced water injection pump*.

Untuk data bahan baku, data pemakaian energi, data emisi yang dihasilkan, dan data produk dari kegiatan ini dapat dilihat pada Tabel L.V.2 di Lampiran V. Sedangkan, untuk diagram alir dari kegiatan ini dapat dilihat pada Gambar L.IV.3 di Lampiran IV. Dalam proses *input* data ke *software* SimaPro, urutan data disesuaikan dengan alur proses produksi seperti pada Gambar L.IV.3 di Lampiran IV. Sehingga nantinya didapatkan hasil *network* atau *life cycle* dari pengolahan data proses *produced water system* seperti pada Gambar L.VI.2 di Lampiran VI.

Berdasarkan *network* proses *produced water system* yang terdapat pada Gambar L.VI. 2 di Lampiran VI, diketahui bahwa proses pengolahan air terproduksi untuk 2 rangkaian dengan jumlah 990 Bpd menghasilkan dampak terhadap lingkungan sebesar $2,82 \times 10^5$ Pt. Pada proses *produced water system*, unit yang memiliki kontribusi paling besar terhadap dampak lingkungan adalah unit *hydrocyclone* untuk produk air terproduksi sebesar $2,44 \times 10^5$ Pt. Hal tersebut dibuktikan dengan adanya garis paling tebal berwarna merah pada unit tersebut. Kondisi ini menunjukkan bahwa jumlah air terproduksi yang diolah pada unit *hydrocyclone* lebih besar dibandingkan dengan jumlah kondensat yang terikut. Hal tersebut sesuai dengan data *input* yang ada pada Tabel L.V.2 di Lampiran V bahwa jumlah air

terproduksi yang diolah pada unit *hydrocyclone* lebih besar dibandingkan dengan jumlah kondensat.

4.5.2.3 Life Cycle Inventory dari Condensate Stabilization System

Kondensat yang telah terpisah dari *sour gas* dan air akan dialirkan menuju unit *condensate surge vessel*. Kondensat yang masuk pada unit ini tidak hanya berasal dari unit *production separator* dan *test separator*, namun juga berasal dari unit *low temperature separator*, *off-spec condenser pump*, dan *hydrocyclone*. Unit ini beroperasi pada tekanan 156 psig. Unit ini berfungsi untuk memisahkan kondensat dengan air dan gas yang masih terbawa. Proses pemisahan ini terjadi berdasarkan perbedaan densitas. Gas yang telah terpisah akan masuk ke dalam *LP fuel gas treatment* sebagai *LP fuel*. Sedangkan air yang telah terpisah akan masuk ke dalam unit *hydrocyclone*. Untuk kondensat yang telah terpisah akan dialirkan menuju *condensate coalescer*.

Pada unit *condensate coalescer*, terjadi proses penghilangan partikel-partikel yang terbawa di kondensat. Kondensat yang telah diminimalisir kandungan partikelnya maka akan masuk ke *feed condensate exchanger* untuk dipanaskan. Nantinya suhu *feed condensate* akan mengalami peningkatan dengan menyerap kondensat yang telah diolah yang merupakan *bottom product* dari unit *condensate stabilizer*.

Condensate stabilizer merupakan unit yang digunakan untuk menstabilkan kondensat dan menghilangkan kandungan fraksi ringan. Maka dari itu, pada *condensate stabilizer* akan terjadi pemanasan dengan menggunakan *reboiler* yang ada pada unit tersebut. Dari proses pemanasan, maka akan terbentuk 2 produk, yaitu *top product* dan *bottom product*.

Bottom product yang terbentuk merupakan fase *liquid*, yang mana *bottom product* ini nantinya akan dialirkan menuju *feed condensate exchanger* untuk diturunkan suhunya dengan cara diambil panasnya oleh *feed condensate* yang dialirkan dari unit *condensate coalescer*. Selanjutnya *bottom product* yang telah mengalami penurunan suhu akan dialirkan ke *stabilizer condensate cooler* untuk kembali diturunkan suhunya. Kemudian, dialirkan ke unit *condensate degassing column* untuk

memisahkan kandungan gas yang mungkin masih terdapat pada kondensat, sehingga gas yang telah terpisah dari kondensat akan masuk ke *LP flare*, sedangkan kondensat yang telah bersih dari gas akan dialirkan menuju *condensate storage tank* untuk disimpan dan selanjutnya kondensat tersebut akan dialirkan ke *Jetty Area* menggunakan *condensate transfer pump* untuk disimpan dan dilakukan *loading condensate* kepada pihak konsumen.

Sedangkan *top product* yang dihasilkan dari unit *condensate reboiler* memiliki fase gas, sehingga akan masuk ke unit *stabilizer OVHD condensor* untuk dilakukan pendinginan. Produk yang dihasilkan dari unit *stabilizer OVHD condensor* akan masuk ke *stabilizer reflux drum*. Pada unit ini akan terjadi pemisahan terhadap gas yang tidak terkondensasi dengan *liquid (condensate)* yang terkondensasi. Untuk kondensat yang terkondensasi, maka akan dialirkan kembali ke unit *condensate stabilizer* menggunakan *stabilizer reflux pump* untuk diolah kembali, sedangkan untuk gas yang tidak terkondensasi akan dialirkan ke *LP fuel gas treatment*.

Kondensat yang telah diolah harus memiliki RVP sama dengan 8, hal tersebut dikarenakan apabila nilai RVP terlalu tinggi maka kondensat akan menguap ketika proses *loading*. Karena nilai RVP menunjukkan seberapa banyak kandungan faksi yang mudah menguap.

Untuk data bahan baku, data pemakaian energi, data emisi yang dihasilkan, dan data produk dari kegiatan ini dapat dilihat pada Tabel L.V.3 di Lampiran V. Sedangkan, untuk diagram alir dari kegiatan ini dapat dilihat pada Gambar L.IV.4 di Lampiran IV. Dalam proses *input* data ke *software* SimaPro, urutan data disesuaikan dengan alur proses produksi seperti pada Gambar L.IV.4 di Lampiran IV. Sehingga nantinya didapatkan hasil *network* atau *life cycle* dari pengolahan data proses *condensate stabilization system* seperti pada Gambar L.VI.3 di Lampiran VI.

Berdasarkan *network* proses *condensate stabilization system* yang terdapat pada Gambar L.VI.3 di Lampiran VI, diketahui bahwa proses pengolahan kondensat untuk 2 rangkaian dengan jumlah 11.678 Bpd menghasilkan dampak terhadap lingkungan sebesar $4,83 \times 10^6$ Pt. Pada proses *condensate*

stabilization system, unit yang memiliki kontribusi paling besar terhadap dampak lingkungan adalah unit *condensate surge vessel* untuk produk kondensat sebesar $4,47 \times 10^6$ Pt. Hal tersebut dibuktikan dengan adanya garis paling tebal berwarna merah pada unit tersebut. Kondisi ini menunjukkan bahwa jumlah kondensat yang diolah pada unit *condensate surge vessel* lebih besar dibandingkan dengan jumlah air yang terikut. Hal tersebut sesuai dengan data *input* yang ada pada Tabel L.V.3 di Lampiran V bahwa jumlah kondensat yang diolah pada unit *condensate surge vessel* lebih besar dibandingkan dengan jumlah air atau kandungan lainnya. Selain itu, kondensat yang masuk pada unit *condensate surge vessel* berasal dari berbagai sumber, yaitu *production separator* dan *test separator*, *hydrocyclone*, *low temperature separator*, serta *off-spec condenser pump*. Hal tersebut mengakibatkan kontribusi terhadap dampak lingkungan pada unit tersebut menjadi yang paling besar pada *condensate stabilization system*.

4.5.2.4 Life Cycle Inventory dari Gas Treatment Process

Sour gas yang telah terpisah dari kandungan air dan kondensat akan dialirkan ke unit *production filter coalescer*. Pada unit ini terjadi pemisahan partikel padat yang terdapat dalam *sour gas*. Selain itu, unit ini juga digunakan untuk meminimalkan *liquid* yang mungkin masih terbawa di dalam *sour gas*, karena di unit *amine contactor* tidak boleh terdapat *liquid* yang masuk. Hal tersebut bertujuan untuk meminimalkan terjadinya *clogging* dan juga apabila terdapat *liquid* pada *sour gas* yang masuk ke unit *amine contactor* maka akan terjadi *foaming*. Unit ini memiliki tipe *on/off level control* untuk *drain valve* di hulu dan hilir elemen filter yang akan melepaskan cairan ke *closed drain header* untuk selanjutnya di-*recovery*.

Selanjutnya, *sour gas* akan dialirkan ke *Acid Gas Removal Unit (AGRU) system*. Untuk pengolahan gas, terdapat 3 unit pengolahan dalam *AGRU system*, yang meliputi *amine contactor*, *sweet gas cooler*, dan *sweet gas KO drum*. Pada unit *amine contactor*, terjadi proses pengurangan kandungan gas asam (H_2S dan CO_2) menggunakan *aMDEA (activated Methyl Diethanol Amine)* dengan metode absorpsi, sehingga akan dihasilkan *sweet gas*. Proses absorpsi pada dasarnya merupakan

suatu proses mengontakkan gas dengan *liquid* yang memiliki suhu dan tekanan yang sama, yang bertujuan hanya untuk mengurangi kandungan zat pengotor (*impurities*).

Dalam prosesnya, *sour gas* akan masuk melalui bagian bawah *amine contactor* yang akan dikontakkan dengan aMDEA yang masuk melalui bagian atas. Kandungan H₂S dan CO₂ pada *sour gas* diserap dengan larutan aMDEA dengan konsentrasi 39-42% berat. Pemurnian *sour gas* dari CO₂ ini dimaksudkan untuk meminimalisir sifat korosifnya. Selain itu, bertujuan agar tidak terjadi pembekuan CO₂ yang dapat menyebabkan *plugging* dalam unit pencairan gas menjadi LNG yang akan dilakukan oleh PT. Donggi Senoro LNG. Hal ini dapat terjadi karena titik beku H₂S dan CO₂ lebih tinggi dibandingkan dengan metana (CH₄), yakni titik beku H₂S adalah -82°C dan CO₂ adalah -56°C sedangkan titik beku CH₄ adalah -182°C. Pada tekanan tinggi dan suhu yang rendah, gas H₂S dan CO₂ membeku dan menyebabkan kebuntuan pada *tube-tube* di *heat exchanger*. Pada suhu -150°C, keberadaan H₂S dan CO₂ dapat mengganggu proses secara keseluruhan karena sifatnya yang korosif.

Selanjutnya, *sweet gas* yang dihasilkan dari unit *amine contactor* akan dialirkan menuju *sweet gas cooler*. Pada unit ini, tekanan dan suhu gas akan diturunkan. Proses pendinginan dilakukan dengan tidak menggunakan zat kimia. Pendinginan dilakukan dengan udara menggunakan *motor fan*, yang mana udara dari luar dimasukkan ke dalam sebagai pendingin. Dari proses pendinginan, maka fraksi yang mudah mencair akan berubah menjadi *liquid*. Kemudian produk dari unit *sweet gas cooler* akan dialirkan menuju unit *sweet gas KO drum* untuk ditampung. Pada unit ini, dikarenakan gas memiliki densitas yang rendah maka gas akan mengalir ke atas menuju *dehydration unit*. Sedangkan, *liquid* yang terbentuk akan dialirkan menuju *amine flash drum*.

Dalam pengolahan gas, terdapat 2 unit pengolahan dalam *dehydration unit*, yaitu *TEG contactor* dan *TEG coalescer*. *Sweet gas* yang dikeluarkan dari unit *sweet gas KO drum* akan dialirkan menuju unit *TEG contactor*. Proses pada unit ini dimulai dengan cara absorpsi antara *wet sweet gas* dengan kadar air 110 lb H₂O/MMscfd menggunakan *dry Triethylene Glycol* (TEG) secara *counter current* menjadi *dry sweet gas* dengan kadar air <10 lb

H₂O/MMscfd, kadar aktualnya sekitar 4,6 lb H₂O/MMscfd. Gas yang sudah lebih kering (*dry sweet gas*) kemudian keluar melalui *mist pad* pada bagian atas kontaktor untuk memperkecil kehilangan pelarut *glycol*.

Selanjutnya, *dry sweet gas* tersebut akan dialirkan menuju unit TEG *coalescer*, yang mana *dry sweet gas* yang telah terbentuk akan dikumpulkan pada unit ini. *Dry sweet gas* tidak sepenuhnya bebas dari cairan hidrokarbon berat, sehingga gas yang sudah didehidrasi perlu direduksi kembali dengan cara evaporasi. Tahapan terakhir dalam pengolahan gas adalah mengatur titik embun gas dan untuk meminimalkan kandungan hidrokarbon berat (C₃ dan C₄) dengan *dew point control system*. Pada *dew point control system* terdapat 3 unit pengolahan gas, yaitu *gas/gas heat exchanger*, *chiller*, dan *low temperature separator*. Pada *gas/gas heat exchanger*, suhu dari *dry sweet gas* yang masuk akan ditukar dengan suhu *sales gas* (*dry gas* yang telah selesai diolah). Maka, *dry sweet gas* tersebut akan mengalami penurunan suhu. Sedangkan untuk *sales gas* yang telah diproses di unit *low temperature separator*, yang masuk ke unit *gas/gas heat exchanger* akan mengalami kenaikan suhu.

Kemudian, *dry sweet gas* dari *gas/gas heat exchanger* akan masuk ke unit *chiller*. Pada unit ini terdapat bahan kimia, yaitu propana yang sebelumnya telah diturunkan suhu dan tekanannya dari tekanan 230 psig dan suhu 120°F menjadi 65 psig dan suhu 41°F (di unit *propane refrigerant package*). Maka, *dry sweet gas* akan kembali diturunkan suhunya melalui proses evaporasi. Proses evaporasi yang terjadi adalah dengan mengontakan propana dengan *dry gas* secara tidak langsung (*cell and tube*), yang mana gas akan berada dalam *tube-tube* yang diletakan dalam pipa besar, yang dialiri dengan propana. Tujuan dari adanya proses evaporasi adalah untuk memisahkan kandungan hidrokarbon berat (C₃ dan C₄). Hal tersebut dikarenakan apabila tidak dipisahkan, maka kandungan hidrokarbon berat akan mencair dalam pipa ketika proses distribusi gas alam.

Dry sweet gas yang telah melalui tahapan evaporasi tersebut akan mengalami penurunan suhu. Terjadi distribusi panas, dimana panas dari *dry sweet gas* akan diambil oleh *propana*. Sehingga propana akan mengalami peningkatan suhu

dan dialirkan kembali ke unit *propane refrigerant package*. Dari hasil proses evaporasi, maka kandungan hidrokarbon berat akan mencair (kondensat). Selanjutnya, hasil dari proses evaporasi ini dialirkan ke unit *low temperature separator*. Pada unit ini, maka akan terjadi pemisahan antara *dry sales gas* dan kondensat. Pemisahan didasarkan pada perbedaan densitas antara cairan dan gas. Gas dengan densitas yang lebih ringan akan mengalir ke bagian atas menuju *gas/gas heat exchanger*, sedangkan untuk kondensat akan mengalir ke bawah *vessel* menuju *condensate surge vessel*.

Dry sales gas yang telah melewati *dew point control system*, baik dari rangkaian 1 dan rangkaian 2, akan masuk ke unit *allocation gas metering* yang sama. Pada unit ini akan terjadi pengukuran jumlah *dry sales gas* yang dialirkan untuk dijual ke pihak konsumen. Sebelum *dry sales gas* didistribusikan kepada konsumen, terdapat *tapping* menuju unit GTG. Sehingga, terdapat *dry sales gas* yang diambil untuk digunakan sebagai *fuel* dalam proses pembakaran pada unit GTG. Maka dari itu, *dry sales gas* dengan jumlah 310 MMscfd sudah siap dijual menggunakan *pipeline* dengan kauntitas gas.

Untuk data bahan baku, data pemakaian energi, data emisi yang dihasilkan, dan data produk dari kegiatan ini dapat dilihat pada Tabel L.V.4 di Lampiran V. Sedangkan, untuk diagram alir dari kegiatan ini dapat dilihat pada Gambar L.IV.5 di Lampiran IV. Dalam proses *input* data ke *software* SimaPro, urutan data disesuaikan dengan alur proses produksi seperti pada Gambar L.IV.5 di Lampiran IV. Sehingga nantinya didapatkan hasil *network* atau *life cycle* dari pengolahan data proses *condensate stabilization system* seperti pada Gambar L.VI.4 di Lampiran VI.

Berdasarkan *network* dari *gas treatment process* yang terdapat pada Gambar L.VI.4 di Lampiran VI, diketahui bahwa proses pengolahan *sour gas* menjadi *sales gas* untuk 2 rangkaian dengan jumlah 342,64 MMscfd menghasilkan dampak terhadap lingkungan sebesar $2,7 \times 10^7$ Pt. Pada *gas treatment process*, unit yang memiliki kontribusi paling besar terhadap dampak lingkungan adalah unit *amine contactor* untuk produk *sweet gas* sebesar $1,82 \times 10^7$ Pt. Hal tersebut dibuktikan dengan adanya garis paling tebal berwarna merah pada unit tersebut. Sebagai

unit awal dalam pengolahan *sour gas*, volume gas yang diolah memiliki jumlah yang lebih besar dibandingkan dengan unit pengolahan lainnya dalam *gas treatment process*. Selain itu, pada unit ini juga terdapat penggunaan larutan aMDEA (*lean amine*), sehingga kondisi tersebut menambah volume bahan baku yang diolah pada unit *amine contactor*. Hal itu menjadi alasan unit *amine contactor* memiliki kontribusi yang paling besar terhadap lingkungan.

4.5.2.5 Life Cycle Inventory dari Proses Regenerasi Amine pada AGRU System

Lean amine yang diinjeksikan pada *amine contactor* bergerak berlawanan arah dengan *sweet gas* yang dialirkan. *Sweet gas* mengalir dari bawah ke atas, sedangkan *lean amine* mengalir dari atas ke bawah. *Lean amine* akan mengabsorpsi kandungan CO₂ dan H₂S pada *sour gas* sehingga dihasilkan *sweet gas* yang kemudian dialirkan ke unit *sweet gas cooler*. Sedangkan, untuk *amine* yang telah mengikat H₂S dan CO₂ disebut sebagai *rich amine*. *Rich amine* ini memiliki tekanan yang tinggi. *Rich amine* akan keluar dari bagian bawah kolom *amine contactor*, yang kemudian terdapat *valve* yang digunakan untuk menurunkan tekanan *rich amine* tersebut. Kemudian *rich amine* akan dialirkan ke unit *amine flash drum*.

Liquid yang dihasilkan pada unit *sweet gas KO drum* juga akan masuk ke dalam unit *amine flash drum*. Karena terjadi penurunan tekanan, maka sebagian gas H₂S dan CO₂ akan dipisahkan dan dialirkan menuju AGCU. Pada unit *amine flash drum*, sebagian gas asam akan dikeluarkan dari *rich amine* pada *tray* bagian atas *stripper*. *Rich amine* mengalir berlawanan arah dengan *vapor* di dalam *stripper*. *Vapor* ini mengambil gas asam yang terdapat didalam *rich amine* dan kemudian keluar dari bagian atas *stripper*, lalu masuk ke dalam kondensator, yang mana sebagian *vapor* akan terkondensasi. *Vapor* ini akan dialirkan menuju AGCU. Sedangkan *amine* yang masih dalam kondisi mengandung sebagian H₂S dan CO₂ (*rich amine*) akan dinaikkan suhunya di unit *lean/rich amine exchanger*. Pada unit ini suhu *lean amine* yang akan digunakan kembali diserap dengan *rich amine* yang akan diregenerasi. Hal tersebut dikarenakan, *lean amine* yang dihasilkan memiliki suhu yang tinggi dan tekanan

yang rendah. Sedangkan kondisi yang harus ada di *amine contactor* adalah suhu yang rendah dan tekanan yang tinggi, Maka suhu dari *lean amine* tersebut ditukar dengan *rich amine* yang akan diregenerasi.

Rich amine kemudian dialirkan menuju unit *amine regenerator* dan dipanaskan didalam *reboiler* untuk dipisahkan kembali dari H_2S dan CO_2 yang tersisa. Proses regenerasi ini dilakukan secara *flash* dan/atau *strip* melalui tahapan regenerasi. Sumber panas yang digunakan pada *reboiler* berasal dari *hot oil heater*. Didalam *reboiler*, *rich amine* dipanaskan hingga temperatur $250^{\circ}F$, sehingga gas CO_2 dan H_2S akan menguap dan terpisah dari *rich amine*. Penguapan *acid gas* tersebut disebabkan CO_2 dan H_2S jauh lebih *volatile* dibandingkan *amine*. Pemanasan *amine* dijaga pada *range* suhu $250^{\circ}F$ - $260^{\circ}F$ agar *amine* tidak mengalami degradasi.

mDEA yang sudah diregenerasi atau tidak mengikat gas H_2S dan CO_2 (telah bersih dari gas asam) akan keluar dari bagian bawah kolom *stripper* yang disebut sebagai *lean amine*. Di dalam proses regenerasi, akibat adanya pemanasan dari *reboiler*, maka memungkinkan adanya penguapan *amine*. Sehingga, didalam *amine regenerator* dilengkapi dengan sistem *amine make-up* (penambahan *amine*). Larutan *amine make-up* berasal dari *amine sump vessel* dan *amine storage tanks*. Jika suatu saat *amine* harus ditambahkan, maka *amine* yang berada di dalam *amine sump vessel* dan *amine storage tanks* akan dipompa menuju *amine sump filter*. Setelah dipompa dan disaring, kemudian dialirkan masuk menuju kolom regenerator sebagai *make-up amine*.

Lean amine yang dihasilkan memiliki kondisi suhu yang tinggi dengan tekanan yang rendah. *Lean amine* panas keluar dari bagian bawah regenerator dan mengalir menuju *lean/rich amine exchanger* menggunakan *lean amine booster*. Terjadi pertukaran panas dengan *rich amine* dingin dari *flash vessel*. *Lean amine* didinginkan lebih lanjut hingga suhu $130^{\circ}F$ pada *lean cooler*.

Suhu *lean amine* yang telah sesuai dengan ketentuan pada unit *amine contactor*, kemudian dialirkan menuju *lean amine surge vessel* untuk ditampung. Kemudian *lean amine* dialirkan menuju *amine filter* menggunakan *lean amine circulation pump*.

Unit ini merupakan pompa jenis *certrifugal* yang digunakan untuk menaikkan tekanan *lean amine* yang akan masuk ke dalam *amine contactor*. Pada unit *amine circulation pump* terjadi pencampuran aMDEA dengan *antifoam* sebanyak 2 mL/menit. *Antifoam* ini digunakan untuk mencegah terjadinya *foaming* pada saat larutan *amine* dikontakan dengan *sour gas* di unit *amine contactor*.

Untuk memastikan aMDEA yang digunakan telah bersih dari partikel-partikel atau filtrasi kotoran, serta untuk meminimalisir terjadinya *foaming* pada *amine contactor*, *amine regenerator*, dan *amine flash drum* maka dilakukan proses penyaringan di unit *amine filter*, yang mana 10% dari aliran akan masuk ke dalam *filter*. Pada unit *amine filter* ini terdapat 3 tahapan, yaitu tahap *pre-filter*, tahap *charcoal filter*, dan tahap *pasca-filter*.

Pada tahap *pre-filter* terjadi pemisahan partikel-partikel besar yang ada didalam larutan aMDEA. Selanjutnya, larutan aMDEA tersebut disaring kembali menggunakan *charcoal*, yang mana pada tahap ini terjadi proses penghilangan semua kontaminan. Setelah itu, larutan aMDEA masuk ke tahap *pasca-filter*. Dikarenakan *charcoal* merupakan karbon aktif yang memiliki bentuk seperti pasir, maka memungkinkan adanya bagian *charcoal* yang terbawa larutan aMDEA, sehingga dilakukan tahap *pasca filter*. Maka, larutan aMDEA yang akan masuk ke dalam unit *amine contactor* telah benar-benar bersih dari kontaminan.

Untuk data bahan baku, data pemakaian energi, data emisi yang dihasilkan, dan data produk dari kegiatan ini dapat dilihat pada Tabel L.V.5 di Lampiran V. Sedangkan, untuk diagram alir dari kegiatan ini dapat dilihat pada Gambar L.IV.6 di Lampiran IV. Dalam proses *input* data ke *software* SimaPro, urutan data disesuaikan dengan alur proses produksi seperti pada Gambar L.IV.6 di Lampiran IV. Sehingga nantinya didapatkan hasil *network* atau *life cycle* dari pengolahan data proses regenerasi *amine* pada AGRU *system* seperti pada Gambar L.VI.5 di Lampiran VI.

Berdasarkan *network* dari proses regenerasi *amine* pada AGRU *system* yang terdapat pada Gambar L.VI.5 di Lampiran VI, diketahui bahwa proses pengolahan *rich amine* menjadi *lean*

amine untuk 2 rangkaian menghasilkan dampak terhadap lingkungan sebesar $1,82 \times 10^7$ Pt. Pada proses regenerasi *amine* di AGRU system ini, unit yang memiliki kontribusi paling besar terhadap dampak lingkungan adalah unit *amine flash drum* untuk produk *rich amine* sebesar $1,55 \times 10^7$ Pt. Hal tersebut dibuktikan dengan adanya garis paling tebal berwarna merah pada unit tersebut. Sebagai unit awal dalam pengolahan *rich amine* menjadi *lean amine*, volume *rich amine* yang diolah memiliki jumlah yang lebih besar dibandingkan dengan unit pengolahan lainnya dalam proses regenerasi *amine*. Berdasarkan diagram alir dan data *input* pada Gambar L.IV.6 di Lampiran IV dan Tabel L.V.5 di Lampiran V, larutan *amine* yang masuk pada unit *amine flash drum* berasal dari *amine contactor* dan *sweet gas KO drum*, sehingga kontribusi terhadap lingkungan yang dihasilkan pada unit ini menjadi lebih besar.

4.5.2.6 Life Cycle Inventory dari Proses Regenerasi TEG pada Dehydration Unit

Sama halnya dengan larutan *amine*, cairan TEG yang digunakan untuk menurunkan kandungan H₂O pada *sweet gas* juga dapat diregenerasi untuk nantinya digunakan kembali. *Rich TEG* yang keluar dari unit TEG *contactor* mengandung H₂O yang tinggi, sehingga untuk melepas kandungan H₂O tersebut, *rich TEG* diolah dengan cara dipanaskan. Pada proses pemanasan, kandungan H₂O yang berada di dalam larutan *rich TEG* akan menguap dan mengalir ke AGCU system, sedangkan TEG akan kembali menjadi *lean TEG* yang dapat diinjeksikan kembali pada unit TEG *contactor*.

Untuk data bahan baku, data pemakaian energi, data emisi yang dihasilkan, dan data produk dari kegiatan ini dapat dilihat pada Tabel L.V.6 di Lampiran V. Sedangkan, untuk diagram alir dari kegiatan ini dapat dilihat pada Gambar L.IV.7 di Lampiran IV. Dalam proses *input* data ke software SimaPro, urutan data disesuaikan dengan alur proses produksi seperti pada Gambar L.IV.7 di Lampiran IV. Sehingga nantinya didapatkan hasil *network* atau *life cycle* dari pengolahan data proses regenerasi *triethylene glycol* pada *dehydration unit* seperti pada Gambar L.VI.6 di Lampiran VI.

Berdasarkan *network* dari proses regenerasi *triethylene glycol* pada *dehydration unit* yang terdapat pada Gambar L.VI.6 di Lampiran VI, diketahui bahwa proses pengolahan *rich* TEG menjadi *lean* TEG untuk 2 rangkaian menghasilkan dampak terhadap lingkungan sebesar $2,98 \times 10^6$ Pt. Pada proses regenerasi *triethylene glycol* pada *dehydration unit* ini, unit yang memiliki kontribusi paling besar terhadap dampak lingkungan adalah unit TEG *reflux condenser* untuk produk *rich* TEG sebesar $2,28 \times 10^6$ Pt. Hal tersebut dibuktikan dengan adanya garis paling tebal berwarna merah pada unit tersebut. *Rich* TEG berarti bahan kimia *glycol* memiliki kandungan H_2O yang besar didalamnya. Sehingga kontribusi terhadap lingkungan yang dihasilkan dari *rich* TEG lebih besar dibandingkan *lean* TEG. Adapun jumlah *rich* TEG yang masuk pada unit TEG *reflux condenser* lebih besar dibandingkan dengan bahan baku lain yang masuk pada unit tersebut maupun jumlah larutan TEG pada unit lainnya. Sehingga, unit TEG *reflux condenser* memiliki kontribusi terhadap lingkungan yang paling besar pada proses regenerasi *triethylene glycol* di *dehydration unit*.

4.5.2.7 Life Cycle Inventory dari Proses LP Fuel Gas Treatment

LP *fuel gas treatment* merupakan proses pengolahan kandungan gas yang memiliki tekanan rendah yang nantinya produk dari proses ini akan digunakan sebagai *fuel* pada unit lainnya, seperti unit *hot oil heater*, *combustor*, dan lain-lain. LP *fuel gas treatment* termasuk ke dalam *common system*, berbeda dengan unit HP AGRU yang memiliki 2 rangkaian, LP *fuel gas treatment* ini hanya terdiri dari 1 rangkaian yang menerima bahan baku dari unit-unit pengolahan utama yang ada di rangkaian 1 dan rangkaian 2. Adapun bahan baku yang diolah pada LP *fuel gas treatment* berasal dari gas pada unit *condensate reflux drum* dan *condensate surge vessel*, yang kemudian ditampung pada unit *stabilizer overhead filter coalescer*. Proses yang berlangsung pada LP *fuel gas treatment* ini tidak jauh berbeda dengan proses pada HP AGRU System yang digunakan dalam mengolah *sales gas*. Hanya saja volume *mDEA* yang digunakan tidak terlalu banyak. Hal tersebut dikarenakan gas yang diolah pada proses ini pun tidak terlalu banyak. Nantinya, LP *gas* yang telah diolah

menjadi *LP fuel gas* akan dialirkan menuju *LP fuel gas system* untuk ditampung terlebih dahulu dan kemudian disalurkan pada unit-unit seperti *hot oil heater*, *combustor*, dan lainnya.

Untuk data bahan baku, data pemakaian energi, data emisi yang dihasilkan, dan data produk dari kegiatan ini dapat dilihat pada Tabel L.V.7 di Lampiran V. Sedangkan, untuk diagram alir dari kegiatan ini dapat dilihat pada Gambar L.IV.8 di Lampiran IV. Dalam proses *input* data ke *software* SimaPro, urutan data disesuaikan dengan alur proses produksi seperti pada Gambar L.IV.8 di Lampiran IV. Sehingga nantinya didapatkan hasil *network* atau *life cycle* dari pengolahan data proses *LP fuel gas treatment* seperti pada Gambar L.VI.7 di Lampiran VI.

Berdasarkan *network* dari proses *LP fuel gas treatment* yang terdapat pada Gambar L.VI.7 di Lampiran VI, diketahui bahwa proses pengolahan *low pressure gas* menjadi *LP fuel* menghasilkan dampak terhadap lingkungan sebesar $2,22 \times 10^6$ Pt. Pada proses pengolahan *low pressure gas*, unit yang memiliki kontribusi paling besar terhadap dampak lingkungan adalah unit *amine absorber* sebesar $9,84 \times 10^5$ Pt. Hal tersebut dibuktikan dengan adanya garis paling tebal berwarna merah pada unit tersebut. Sebagai unit awal dalam pengolahan *sour gas* bertekanan rendah, volume gas yang diolah memiliki jumlah yang lebih besar dibandingkan dengan unit pengolahan lainnya dalam *LP fuel gas treatment*. Selain itu, pada unit ini juga terdapat penggunaan larutan *mDEA* (*lean amine*), sehingga kondisi tersebut menambah volume bahan baku yang diolah pada unit *amine absorber*. Hal itu menjadi alasan unit *amine absorber* memiliki kontribusi yang paling besar terhadap lingkungan.

4.5.2.8 Life Cycle Inventory dari Acid Gas Conversion Unit

Feed acid gas yang berasal dari AGRU sistem rangkaian 1 dan 2, *LP fuel gas treatment*, dan *degassing produced water* akan dimasukkan ke dalam *combustor* pada AGCU untuk mengoksidasi gas asam sulfat (H_2S) menjadi SO_2 dan air dengan tekanan 1,18 psig dan suhu $1787^{\circ}F$ dengan reaksi endotermis. Gas SO_2 yang dihasilkan dari *combustor* akan didinginkan dengan air secara tidak langsung pada unit *water heat boiler*. Nantinya, dari unit ini air yang dikontakan akan berubah menjadi

steam karena menyerap panas dari gas SO_2 yang dialirkan. *Steam* yang dihasilkan nantinya akan digunakan sebagai bahan baku pada unit STG. Setelah pengontakan gas SO_2 dengan air secara tidak langsung, maka suhu gas akan menurun. Penurunan suhu kembali terjadi pada unit *super heater*, yang mana agar *steam* yang digunakan untuk menggerakkan STG lebih panas, maka *steam* yang dihasilkan di unit Water Heat Boiler akan kembali dikontakan dengan gas SO_2 secara tidak langsung di unit *super heater*, sehingga suhu *steam* lebih meningkat dan suhu gas semakin menurun.

SO_2 yang dihasilkan akan dikonversi menjadi SO_3 menggunakan SO_2 *converter* dengan tekanan 0.31 psig dan suhu 482°F . SO_2 *conversion* merupakan reaksi oksidasi SO_2 menggunakan gas oksigen dan dibantu oleh katalis Vanadium untuk menghasilkan SO_3 . Reaksi ini terjadi secara eksotermis. Suhu gas semakin diturunkan dengan bantuan udara luar, yang mana udara tersebut menjadi panas dan dialirkan masuk ke unit *combustor*.

SO_3 dan H_2O yang terbentuk akan ditambahkan *silica oil* untuk mengubah SO_3 menjadi $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{gas})$, untuk selanjutnya dikondensasi dalam *WSA condenser* agar didapatkan $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{liquid})$ dengan tekanan 0 psig dan suhu 158°F . H_2SO_4 yang terbentuk akan ditampung didalam unit *acid vessel*, kemudian didinginkan kembali di *acid cooler* dengan bantuan *acid pump* untuk disalurkan. Proses pendinginan ini dilakukan dengan *cooling water* yang dikontakan secara tidak langsung. H_2SO_4 yang terbentuk belum dapat didistribusikan karena belum mencapai spesifikasi produk yaitu 98,2%. Untuk mendapatkan H_2SO_4 yang *on spec*, H_2SO_4 96% ini diproses kembali dalam *Sulfuric Acid High Concentration (SAHC)* untuk menaikkan konsentrasi menjadi 98.2%.

Pada proses analisis dampak untuk AGCU *system* ini, nilai emisi yang dimasukkan ke dalam *software* SimaPro disesuaikan dengan hasil perhitungan emisi untuk unit *combustor* pada sub-bab 4.3.4. Untuk data bahan baku, data pemakaian energi, data emisi yang dihasilkan, dan data produk dari kegiatan ini dapat dilihat pada Tabel L.V.8 di Lampiran V. Sedangkan, untuk diagram alir dari kegiatan ini dapat dilihat pada Gambar L.IV.9 di Lampiran IV. Dalam proses *input* data ke *software*

SimaPro, urutan data disesuaikan dengan alur proses produksi seperti pada Gambar L.IV.9 di Lampiran IV. Sehingga nantinya didapatkan hasil *network* atau *life cycle* dari pengolahan data proses *acid gas conversion unit* seperti pada Gambar L.VI.8 di Lampiran VI.

Berdasarkan *network* dari proses *acid gas conversion unit* yang terdapat pada Gambar L.VI.8 di Lampiran VI, diketahui bahwa proses pengolahan gas asam (H_2S) menjadi H_2SO_4 menghasilkan dampak terhadap lingkungan sebesar $4,91 \times 10^5$ Pt. Pada proses pengolahan gas asam ini, unit yang memiliki kontribusi paling besar terhadap dampak lingkungan adalah unit *combustor* sebesar $4,42 \times 10^5$ Pt. Kondisi tersebut dikarenakan pada unit *combustor* terjadi proses pembakaran yang menghasilkan emisi NO_2 sebesar 34,907 kg NO_2 /hari dan SO_2 sebesar 6,854 kg SO_2 /hari. Selain itu, pada unit *combustor* juga terdapat penggunaan LP *fuel gas* sebagai bahan bakar yang berasal dari LP *fuel gas treatment* dan raw LP *fuel KO drum*. Sehingga, kontribusi terhadap lingkungan yang diberikan unit *combustor* lebih besar dibandingkan unit lainnya pada AGCU *system* ini.

4.5.2.9 Life Cycle Inventory dari Proses pada Unit GTG

Sebagaimana yang telah dijelaskan pada sub-bab 4.3.1, unit GTG merupakan unit pembakaran dalam yang menggunakan *fuel gas* sebagai bahan baku pembakaran. Bahan baku yang digunakan berasal dari *sales gas* yang diambil sesuai kebutuhan pembakaran pada unit GTG. Pada proses analisis dampak untuk unit GTG ini, nilai emisi yang dimasukkan ke dalam *software* SimaPro disesuaikan dengan hasil perhitungan emisi pada sub-bab 4.3.1. Maka dari itu, untuk data bahan baku, data pemakaian energi, data emisi yang dihasilkan, dan data produk dari kegiatan ini dapat dilihat pada Tabel L.V.9 di Lampiran V. Sehingga nantinya didapatkan hasil *network* atau *life cycle* dari pengolahan data proses pada unit GTG seperti pada Gambar L.VI.9 di Lampiran VI.

Berdasarkan *network* dari proses pada unit GTG yang terdapat pada Gambar L.VI.9 di Lampiran VI, diketahui bahwa proses pembakaran pada unit GTG untuk menghasilkan energi listrik memberikan dampak terhadap lingkungan sebesar $2,35 \times$

10⁶ Pt. Pada proses pembakaran di unit GTG ini, unit yang memiliki kontribusi paling besar terhadap dampak lingkungan adalah unit *Gas Turbine Generator package* sebesar 2,08 x 10⁶ Pt. Kondisi tersebut dikarenakan pada unit GTG *package* terjadi proses pembakaran dengan menggunakan *sales gas* sebesar 3,99 MMscfd sebagai bahan bakar. Selain itu, proses pembakaran pada unit tersebut juga menghasilkan emisi CO₂ sebesar 213.584,06 ton CO₂/hari, CH₄ sebesar 3,82 ton CH₄/hari, N₂O sebesar 0,38 ton N₂O/hari, NO_x sebesar 0,18 ton NO_x/hari, dan SO_x sebesar 0,001 ton SO_x/hari. Penggunaan *sales gas* sebagai bahan bakar dan emisi yang dihasilkan membuat kontribusi terhadap lingkungan yang diberikan unit GTG *package* lebih besar dibandingkan unit lainnya.

4.5.2.10 Life Cycle Inventory dari Proses pada Unit Flare

Sebagaimana yang telah dijelaskan pada sub-bab 4.3.3, unit *flare* merupakan unit suar bakar yang digunakan sebagai pembakar gas buang/gas limbah dari proses karena kondisi untuk menjaga peralatan jika terjadi *overpressure* di bejana atau peralatan. Terkadang, gas buang memang sengaja dialirkan ke unit *flare* karena kebutuhan, misalnya kondisi *offspec* atau kondisi *shutdown* untuk perbaikan peralatan. Pada proses analisis dampak untuk unit *flare* ini, nilai emisi yang dimasukkan ke dalam *software* SimaPro disesuaikan dengan hasil perhitungan emisi pada sub-bab 4.3.3. Maka dari itu, untuk data bahan baku, data pemakaian energi, data emisi yang dihasilkan, dan data produk dari kegiatan ini dapat dilihat pada Tabel L.V.10 di Lampiran V. Sehingga nantinya didapatkan hasil *network* atau *life cycle* dari pengolahan data proses pada unit *flare* seperti pada Gambar L.VI.10 di Lampiran VI.

Berdasarkan *network* dari proses pada unit *flare* yang terdapat pada Gambar L.VI.10 di Lampiran VI, diketahui bahwa proses pada unit *flare* memberikan dampak terhadap lingkungan sebesar 1,46 x 10⁵ Pt. Pada proses di unit *flare* ini, unit yang memiliki kontribusi paling besar terhadap dampak lingkungan adalah unit HP/LP *flare header* sebesar 1,39 x 10⁵ Pt. Hal tersebut jumlah gas yang masuk pada unit tersebut berasal dari berbagai sumber unit-unit pengolahan utama dengan jumlah yang cukup besar, yaitu 17.645 lb/hr. Sehingga, beban kerja pada unit

flare header ini lebih besar dibandingkan unit lainnya pada rangkaian *flare*. Hal itu menjadi alasan unit HP/LP *flare header* memiliki kontribusi yang paling besar terhadap lingkungan.

4.5.2.11 Life Cycle Inventory dari Proses pada Unit Hot Oil Heater

Sebagaimana yang telah dijelaskan pada sub-bab 4.3.2, unit *hot oil heater* merupakan unit pembakaran luar yang menggunakan *fuel gas* sebagai bahan baku pembakaran. Bahan baku yang digunakan berasal dari *LP fuel gas treatment* sesuai kebutuhan pembakaran pada unit *hot oil heater*. Pada proses analisis dampak untuk unit *hot oil heater* ini, nilai emisi yang dimasukkan ke dalam *software* SimaPro disesuaikan dengan hasil perhitungan emisi pada sub-bab 4.3.2. Maka dari itu, untuk data bahan baku, data pemakaian energi, data emisi yang dihasilkan, dan data produk dari kegiatan ini dapat dilihat pada Tabel L.V.11 di Lampiran V. Sehingga nantinya didapatkan hasil *network* atau *life cycle* dari pengolahan data proses pada unit *hot oil heater* seperti pada Gambar L.VI.11 di Lampiran VI.

Berdasarkan *network* dari proses pada unit *hot oil heater* yang terdapat pada Gambar L.VI.11 di Lampiran VI, diketahui bahwa proses pembakaran pada unit *hot oil heater* untuk menghasilkan energi panas memberikan dampak terhadap lingkungan sebesar $2,53 \times 10^7$ Pt. Kondisi tersebut dikarenakan pada unit *hot oil heater* terjadi proses pembakaran dengan menggunakan *LP fuel gas* sebesar 4,91 MMscfd sebagai bahan bakar. Selain itu, proses pembakaran pada unit tersebut juga menghasilkan emisi CO₂ sebesar 2.628.315,144 ton CO₂/hari, CH₄ sebesar 47,018 ton CH₄/hari, N₂O sebesar 4,701 ton N₂O/hari, NO_x sebesar 0,222 ton NO_x/hari, dan SO_x sebesar 0,001 ton SO_x/hari. Penggunaan *LP fuel gas* sebagai bahan bakar dan emisi yang dihasilkan membuat kontribusi terhadap lingkungan yang diberikan unit *hot oil heater* besar dibandingkan unit lainnya.

4.5.3 Analisis Hasil Life Cycle Inventory

Berdasarkan hasil analisis data pada tahap *life cycle inventory*, maka didapatkan besarnya kontribusi dampak

terhadap lingkungan dari setiap proses yang dianalisis sebagai berikut:

1. *Gas and gathering production separation* sebesar $6,41 \times 10^6$ Pt.
2. *Produce water system* sebesar $2,82 \times 10^5$ Pt.
3. *Condensate stabilization system* sebesar $4,83 \times 10^6$ Pt.
4. *Gas treatment process* sebesar $2,7 \times 10^7$ Pt.
5. Proses regenerasi *amine* pada *AGRU system* sebesar $1,82 \times 10^7$ Pt.
6. Proses regenerasi TEG pada *dehydration unit* sebesar $2,98 \times 10^6$ Pt.
7. *LP fuel gas treatment* sebesar $2,22 \times 10^6$ Pt.
8. *Acid gas conversion unit* sebesar $4,91 \times 10^5$ Pt.
9. *Unit Gas Turbine Generator (GTG)* sebesar $2,35 \times 10^6$ Pt.
10. *Unit flare* sebesar $2,53 \times 10^7$ Pt.
11. *Unit hot oil heater* sebesar $1,46 \times 10^5$ Pt.

Proses pengolahan gas (*gas treatment process*) memiliki nilai kontribusi besaran dampak terbesar dibandingkan dengan proses pengolahan lainnya. Hal tersebut dikarenakan proses pengolahan gas (*gas treatment process*) ini merupakan proses pengolahan produk utama yang dilakukan oleh JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi pada CPP, sehingga unit rangkaian yang dianalisis lebih kompleks dengan beban *material* (bahan) yang lebih besar dibandingkan dengan proses lainnya.

4.5.4 Penilaian Dampak (*Life Cycle Impact Assessment*)

Setelah dilakukan *penginputan* data dan *networking*, maka akan diketahui unit apa yang akan memiliki kontribusi paling besar terhadap dampak ke lingkungan. Pada tahap ini akan dilakukan penilaian dampak sebanyak 4 kali, yaitu *characterization*, *normalization*, *weighting score*, dan *single score*. Pada tahap penilaian dampak dalam penelitian ini, metode pada SimaPro 8.4 yang digunakan adalah metode *Eco Indicator 99*. Metode *Eco Indicator 99* (EI 99) adalah metode yang paling penting dan direkomendasikan berdasarkan ISO 14040-43 (Giandadewi, dkk., 2017). Metode ini berbasis pada pendekatan akhir yang menilai dampak secara keseluruhan hingga kerusakan apa yang mungkin ditimbulkan. Metode EI 99 ini memiliki 11

kategori dampak, yaitu *climate change*, *ozone layer depletion*, *acidification/ eutrophication*, *carcinogenesis*, *respiratory organic effects*, *respiratory inorganic effects*, *ionizing radiation*, *ecotoxicity*, *land use*, *mineral resources*, dan *fossil fuel resources* yang terlibat dalam 3 kategori utama, yaitu *human health*, *ecosystem quality*, dan *resources*. Berikut ini adalah penjelasan mengenai masing-masing kategori utama yang terdapat pada metode EI 99 ini:

1. Dampak proses produksi terhadap kesehatan manusia (*human health*) dinyatakan dengan unit DALY (*Disability Adjusted Life Years*), yang artinya merupakan jumlah tahun yang hilang akibat gangguan kesehatan cacat atau kematian dini. Ukuran DALY diterima seseorang dari keseluruhan beban penyakit. Untuk satu DALY sama dengan satu tahun dari hidup sehat yang hilang (Kusumawaradani, 2017). Kategori dampak lingkungan yang masuk ke dalam kategori kesehatan manusia apabila dilihat pada Gambar 2.3 adalah *respiratory organic and inorganic effects*, *carcinogenesis*, *climate change*, *ozone layer depletion*, dan *ionizing radiation* (Goedkoop dan Spriensma, 2000).
2. Dampak pada kualitas ekosistem (*ecosystem quality*) merupakan dampak yang dapat mempengaruhi kehidupan kualitas ekosistem di sekitar lingkungan pada proses produksi. Akibat dari dampak ini adalah hilangnya spesies/ekosistem di daerah tersebut. Satuan dari kategori ini adalah PDF.m².year. Satu PDF.m².year sama dengan kerusakan spesies atau ekosistem seluas 1 m² di permukaan bumi dalam 1 tahun (Kusumawaradani, 2017). Kategori dampak lingkungan yang masuk ke dalam kategori kerusakan kualitas ekosistem apabila dilihat pada Gambar 2.3 adalah *ecotoxicity*, *acidification/eutrophication*, dan *land use* (Goedkoop dan Spriensma, 2000).
3. Dampak terhadap penurunan sumber daya alam (*resources*) merupakan dampak yang berpengaruh terhadap kerusakan sumber daya yang akan dialami oleh generasi yang akan datang atau ketersediaan sumber daya yang tak bisa digantikan. Satuan MJ *surplus*

digunakan untuk kategori dampak yang nantinya dikelompokkan kedalam nilai kerusakan *resources*. Satu MJ *surplus* sama dengan satu kerusakan sumber daya alam yang dieksploitasi dan energi yang dikeluarkan dalam 1 tahun di bumi (Kusumawaradani, 2017). Kategori dampak lingkungan yang masuk ke dalam kategori dampak terhadap penurunan sumber daya alam apabila dilihat pada Gambar 2.3 adalah *mineral* dan *fossil fuel* (Goedkoop dan Spriensma, 2000).

Sebagaimana yang telah dijelaskan pada sub-bab 4.5.1, dalam penelitian ini, kategori dampak lingkungan yang akan dianalisis adalah *climate change*, *ozone layer depletion*, *carcinogenesis*, *respiratory organic effects*, dan *respiratory inorganic effects*. Kategori dampak lingkungan tersebut dipilih karena berkaitan dengan dampak terhadap kualitas udara. Selain itu, sesuai dengan pendekatan metode EI 99 yang termasuk ke dalam metode *endpoint* (Menoufi *et al.*, 2011), maka dilakukan juga analisis terhadap kategori kerusakan yang mungkin ditimbulkan, yang terbagi dalam 3 kategori utama, yaitu *human health*, *ecosystem quality*, dan *resources*. Berikut ini merupakan hasil analisis dampak dari setiap proses utama maupun penunjang (unit GTG, *flare*, dan *hot oil heater*) pada *software* SimaPro 8.4 dengan metode EI 99:

1. Pada proses *gas and gathering production separation*, unit *air fin cooler* menghasilkan dampak terbesar dibandingkan unit lainnya dengan nilai sebesar 2,14 MPt. Adapun kategori kerusakan terbesar yang dihasilkan adalah kategori penurunan sumber daya alam (*resources*) dibandingkan dengan kategori kerusakan lainnya. Pada Gambar 4.2 dapat dilihat hasil tahapan *single score* dari setiap unit dalam proses *gas and gathering production separation* dengan nilai rincian terlampir pada Tabel L.VII.1 di Lampiran VII.
2. Pada proses *produced water system*, unit *degassing column* memiliki nilai yang setara dengan unit *produced water storage tank*, *booster pump*, *filter*, dan *injection pump*. Hal tersebut dikarenakan beban yang masuk pada unit-unit tersebut sama besarnya. Namun, apabila

dibandingkan dengan unit lainnya dalam *produced water system*, maka kelima unit tersebut menghasilkan dampak terbesar dengan nilai sebesar 35,19 kPt (0,035 MPt). Adapun kategori kerusakan terbesar yang dihasilkan adalah kategori penurunan sumber daya alam (*resources*) dibandingkan dengan kategori kerusakan lainnya. Pada Gambar 4.4 dapat dilihat hasil tahapan *single score* dari setiap unit dalam proses *produced water system* dengan nilai rincian terlampir pada Tabel L.VII.2 di Lampiran VII.

3. Pada proses *condensate stabilization system*, unit *condensate stabilizer* menghasilkan dampak terbesar dibandingkan unit lainnya dengan nilai sebesar 0,65 MPt. Adapun kategori kerusakan terbesar yang dihasilkan adalah kategori penurunan sumber daya alam (*resources*) dibandingkan dengan kategori kerusakan lainnya. Pada Gambar 4.6 dapat dilihat hasil tahapan *single score* dari setiap unit dalam proses *condensate stabilization system* dengan nilai rincian terlampir pada Tabel L.VII.3 di Lampiran VII.
4. Pada *gas treatment proces*, unit *amine contactor* menghasilkan dampak terbesar dibandingkan unit lainnya dengan nilai sebesar 2,66 MPt. Adapun kategori kerusakan terbesar yang dihasilkan adalah kategori penurunan sumber daya alam (*resources*) dibandingkan dengan kategori kerusakan lainnya. Pada Gambar 4.8 dapat dilihat hasil tahapan *single score* dari setiap unit dalam proses *gas treatment process* dengan nilai rincian terlampir pada Tabel L.VII.4 di Lampiran VII.
5. Pada proses regenerasi *amine* di *AGRU system*, unit *amine exchanger* menghasilkan dampak terbesar dibandingkan unit lainnya dengan nilai sebesar 3,55 MPt. Adapun kategori kerusakan terbesar yang dihasilkan adalah kategori penurunan sumber daya alam (*resources*) dibandingkan dengan kategori kerusakan lainnya. Pada Gambar 4.10 dapat dilihat hasil tahapan *single score* dari setiap unit dalam proses regenerasi *amine* dengan nilai rincian terlampir pada Tabel L.VII.5 di Lampiran VII.

6. Pada proses regenerasi TEG di *dehydration unit*, unit TEG *still column* dan TEG *reboiler* menghasilkan dampak terbesar dibandingkan unit lainnya dengan nilai sebesar 0,74 MPt. Adapun kategori kerusakan terbesar yang dihasilkan adalah kategori penurunan kesehatan manusia (*human health*) dibandingkan dengan kategori kerusakan lainnya. Pada Gambar 4.12 dapat dilihat hasil tahapan *single score* dari setiap unit dalam proses regenerasi TEG dengan nilai rincian terlampir pada Tabel L.VII.6 di Lampiran VII.
7. Pada proses LP *fuel gas treatment*, unit *regenerator (acid gas)* menghasilkan dampak terbesar dibandingkan unit lainnya dengan nilai sebesar 0,72 MPt. Adapun kategori kerusakan terbesar yang dihasilkan adalah kategori penurunan kesehatan manusia (*human health*) dibandingkan dengan kategori kerusakan lainnya. Pada Gambar 4.14 dapat dilihat hasil tahapan *single score* dari setiap unit dalam proses LP *fuel gas treatment* dengan nilai rincian terlampir pada L.VII.7 di Lampiran VII.
8. Pada proses *acid gas conversion unit*, unit *SO₂ converter* menghasilkan dampak terbesar dibandingkan unit lainnya dengan nilai sebesar 49,13 kPt (0,049 MPt). Adapun kategori kerusakan terbesar yang dihasilkan adalah kategori penurunan sumber daya alam (*resources*) dibandingkan dengan kategori kerusakan lainnya. Pada Gambar 4.16 dapat dilihat hasil tahapan *single score* dari setiap unit dalam proses *acid gas conversion unit* dengan nilai rincian terlampir pada L.VII.8 di Lampiran VII.
9. Unit *Gas Turbine Generator* menghasilkan dampak dengan nilai sebesar 2,08 MPt. Adapun kategori kerusakan terbesar yang dihasilkan adalah kategori penurunan kesehatan manusia (*human health*) dibandingkan dengan kategori kerusakan lainnya. Pada Gambar 4.18 dapat dilihat hasil tahapan *single score* dari unit *gas turbine generator* dengan nilai rincian terlampir pada Tabel L.VII.9 di Lampiran VII.
10. Unit *flare* menghasilkan dampak dengan nilai sebesar 53,73 kPt (0,053 MPt). Adapun kategori kerusakan terbesar yang dihasilkan adalah kategori penurunan

sumber daya alam (*resources*) dibandingkan dengan kategori kerusakan lainnya. Pada Gambar 4.20 dapat dilihat hasil tahapan *single score* dari unit *flare* dengan nilai rincian terlampir pada L.VII.10 di Lampiran VII.

11. Unit *hot oil heater* menghasilkan dampak dengan nilai sebesar 25,22 MPt. Adapun kategori kerusakan terbesar yang dihasilkan adalah kategori penurunan kesehatan manusia (*human health*) dibandingkan dengan kategori kerusakan lainnya. Pada Gambar 4.22 dapat dilihat hasil tahapan *single score* dari unit *hot oil heater* dengan nilai rincian terlampir pada L.VII.11 di Lampiran VII.

Besarnya nilai kategori kerusakan penurunan sumber daya alam (*resources*) dan penurunan kesehatan manusia (*human health*) pada proses yang dianalisis dibandingkan dengan kategori kerusakan kualitas ekosistem (*ecosystem quality*), disebabkan oleh penggunaan gas alam yang tergolong sebagai bahan bakar fosil, yang mana gas alam ini merupakan bahan baku utama yang diolah. Sehingga penggunaan gas alam tersebut akan mengakibatkan berkurangnya ketersediaan gas alam di bumi yang memunculkan dampak terhadap penurunan sumber daya alam.

Untuk kategori kerusakan terhadap kesehatan manusia (*human health*) pada proses utama disebabkan oleh penggunaan energi listrik pada proses utama. Energi listrik yang digunakan berasal dari unit *Gas Turbine Generator* (GTG), yang mana dalam proses produksi energi listrik tersebut terjadi proses pembakaran. Proses tersebut menghasilkan emisi CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, dan SO_x. Selain itu, pada proses utama juga terjadi proses pemanasan pada unit-unit *reboiler* dengan menggunakan *hot oil* yang telah dipanaskan pada *hot oil heater*, yang mana dalam proses pemanasan *hot oil* juga terjadi proses pembakaran yang menghasilkan emisi. Sehingga dampak yang ditimbulkan dari pembakaran pada unit *hot oil heater* berpengaruh pada proses ini. Sedangkan kategori kerusakan terhadap kesehatan manusia (*human health*) pada proses penunjang disebabkan oleh proses pembakaran pada unit GTG, *hot oil heater*, maupun *flare*. Untuk besarnya emisi pada ketiga unit tersebut dapat dilihat pada hasil perhitungan beban emisi di sub-bab 4.3.

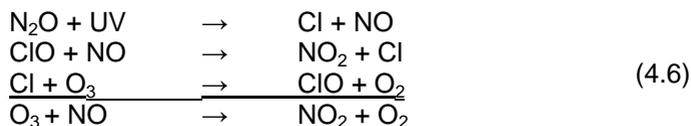
Kategori kerusakan pada kesehatan manusia (*human health*) akibat emisi CO₂, CH₄, N₂O, SO_x dan NO_x dipengaruhi oleh kategori dampak lingkungan yang ditimbulkan, yaitu dampak *ozone layer depletion*, *climate change*, *respiratory organic effects*, dan *respiratory inorganic effects*.

Emisi CO₂, CH₄, dan N₂O merupakan emisi gas rumah kaca yang berfungsi menyerap radiasi inframerah dan ikut menentukan suhu atmosfer (Martono, 2015). Awalnya, sinar matahari masuk ke lapisan atmosfer dan memancarkan panas. Sebagian radiasi matahari dalam bentuk gelombang pendek yang diterima permukaan bumi dipancarkan kembali ke atmosfer dalam bentuk radiasi gelombang panjang. Energi yang masuk ke bumi mengalami pemantulan oleh awan atau partikel sebesar 25% dan diserap awan sebesar 25%. Lalu 45% energi diadsorpsi permukaan bumi, sedangkan 5% nya dipantulkan kembali oleh permukaan bumi. Namun sebagian radiasi yang dipantulkan kembali tetap terperangkap di atmosfer bumi akibat menumpuknya jumlah gas rumah kaca. Radiasi gelombang yang tertahan akibat adanya gas rumah kaca akan menimbulkan efek panas yang disebut efek rumah kaca (Sulistiyono, 2012).

Dengan kondisi gas rumah kaca yang berlebihan di atmosfer, maka akan mengakibatkan pemanasan global. Penyebab utama pemanasan ini adalah pembakaran bahan bakar fosil yang melepas CO₂ dan gas rumah kaca lainnya ke atmosfer. Dengan semakin meningkatnya konsentrasi GRK di atmosfer, maka semakin banyak panas yang terperangkap di bawahnya (Sulistiyono, 2012). Menurut IPCC (2006), gas CO₂ dan CH₄ merupakan emisi GRK yang paling potensial sebagai penyebab pemanasan global. Pemanasan global merupakan indikasi dari perubahan iklim. Penelitian yang dilakukan oleh Monahan & Powell (2011) dan You *et al.* (2011) menunjukkan bahwa CO₂ sangat berpengaruh terhadap perubahan iklim. Sedangkan, gas N₂O tidak hanya merupakan gas rumah kaca, melainkan juga berpotensi sebagai penyebab penipisan lapisan ozon dengan bantuan sinar matahari. Reaksi N₂O ketika merusak lapisan ozon dapat dilihat pada Persamaan 4.6.

Secara tidak langsung, dampak *ozone depletion* akan mempengaruhi terjadinya perubahan iklim. Hal tersebut dikarenakan menipisnya lapisan ozon akan menyebabkan

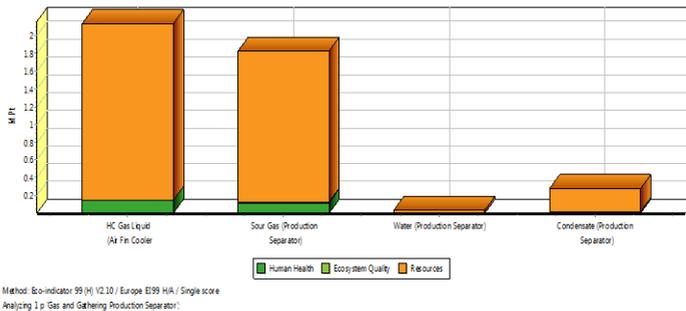
semakin banyak sinar matahari yang masuk ke bumi, sedangkan gas rumah kaca yang semakin semakin meningkat akan mengakibatkan sinar matahari yang dipancarkan kembali oleh bumi akan tertahan dibawah lapisan GRK. Kondisi tersebut akan berpengaruh pada peningkatan suhu rata-rata permukaan bumi (pemanasan global) yang berdampak pada perubahan iklim yang terjadi.



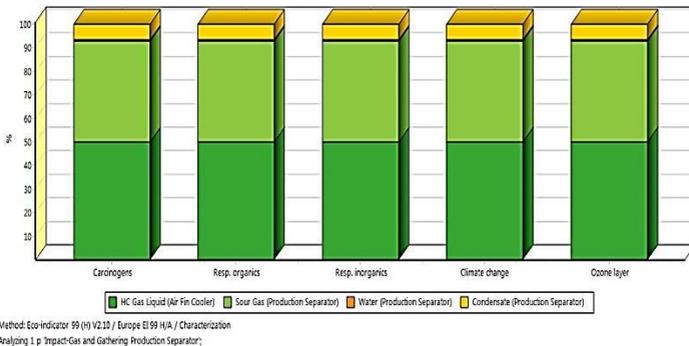
Untuk gas SO_x dan NO_x sendiri memiliki pengaruh pada kategori *respiratory organic effects* dan *respiratory inorganic effects*. Gas SO_x yang mudah menjadi asam akan menyerang selaput lendir pada hidung, tenggorokan, dan saluran pernapasan yang lain sampai ke paru-paru pada konsentrasi >0,4 ppm. Terpapar SO_x dalam waktu yang lama akan menyebabkan peradangan selaput lendir yang akan menimbulkan kelumpuhan pada sistem pernapasan, kerusakan pada dinding paru-paru, hingga kematian.

Selain keempat dampak diatas, kandungan gas alam yang diolah di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi juga menimbulkan dampak *carcinogenesis* yang berpengaruh pada kategori kerusakan kesehatan manusia. Hal tersebut dikarenakan pada gas alam yang diolah tersebut mengandung *benzene* dan *toluene*, yang merupakan hidrokarbon aromatik dan memiliki sifat karsinogenik. Kondisi tersebut juga dipengaruhi oleh larutan aMDEA maupun TEG yang digunakan. Karena pada saat TEG menyerap air dan aMDEA menyerap gas asam di unit *contactor*, sebenarnya tidak hanya air atau gas asam saja yang terserap, tetapi juga menyerap hidrokarbon. Kekuatan penyerapan aMDEA dan TEG terhadap hidrokarbon parafin, seperti metana, etana, dan lainnya tidak terlalu besar. Namun, hidrokarbon aromatik seperti *benzene*, *toluene*, *ethylbenzene*, dan *xylene* (BTEX) dengan mudah terserap. Kondisi tersebut juga menyebabkan polusi pada udara sekitar (Septian, 2016).

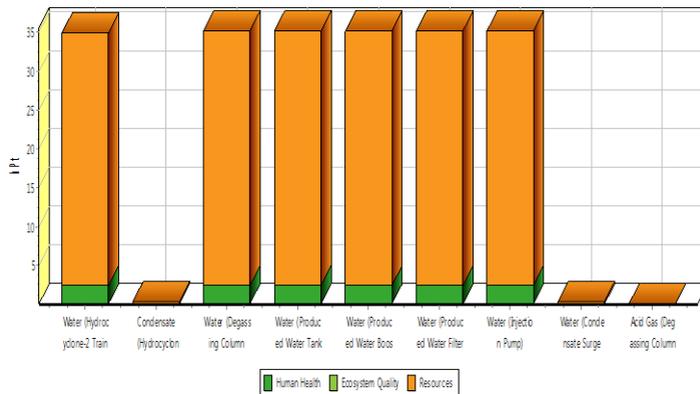
Untuk melihat besarnya kategori dampak *ozone layer depletion*, *climate change*, *carcinogenesis*, dan *respiratory effects* pada setiap proses yang dianalisis dapat dilihat pada Gambar 4.3, Gambar 4.5, Gambar 4.7, Gambar 4.9, Gambar 4.11, Gambar 4.13, Gambar 4.15, Gambar 4.17, Gambar 4.19, Gambar 4.21, dan Gambar 4.23.



Gambar 4. 2 Diagram Tahapan *Single Score* pada *Gas and Gathering Production Separation*
Sumber: SimaPro 8.4

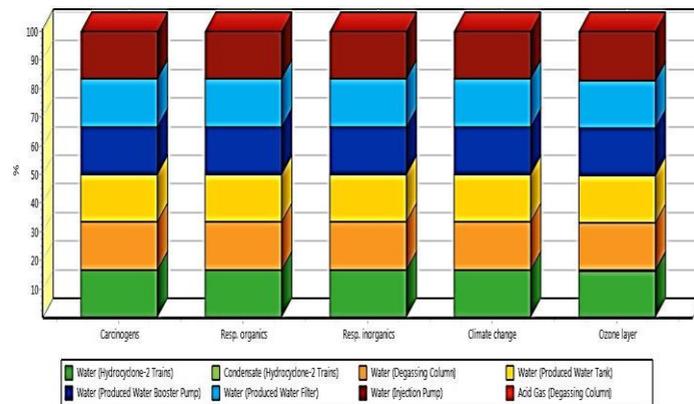


Gambar 4. 3 Diagram Tahapan *Karakterisasi* pada *Gas and Gathering Production Separation*
Sumber: SimaPro 8.4



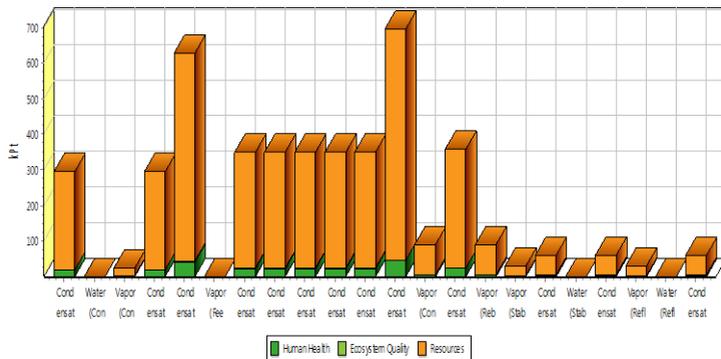
Method: Eco-indicator 99 (H) V2.10 / Europe-El 99 (H)A / Single score
 Analyzing 1 p Produced Water System;

Gambar 4. 4 Diagram Tahapan *Single Score* pada *Produced Water System*
 Sumber: SimaPro 8.4



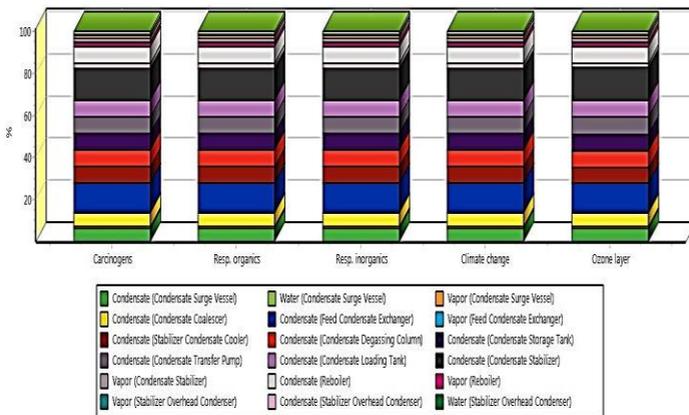
Method: Eco-indicator 99 (H) V2.10 / Europe-El 99 (H)A / Characterization
 Analyzing 1 p Impact-Produced Water System;

Gambar 4. 5 Diagram Tahapan *Karakterisasi* pada *Produced Water System*
 Sumber: SimaPro 8.4



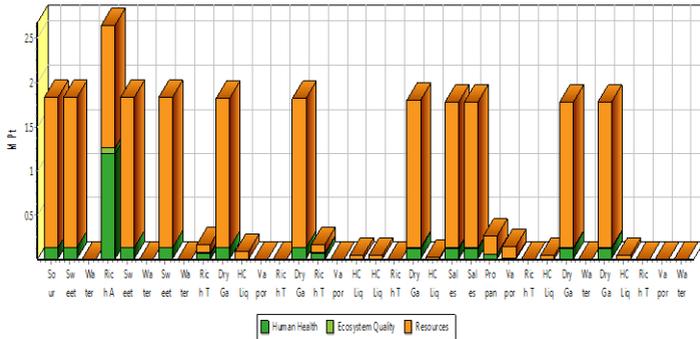
Method: Eco-indicator 99 (H) V2.10 / Europe E199 H(A) / Single score
 Analyzing 1 p. 'Condensate Stabilization System';

Gambar 4. 6 Diagram Tahapan Single Score pada Condensate Stabilization System
 Sumber: SimaPro 8.4

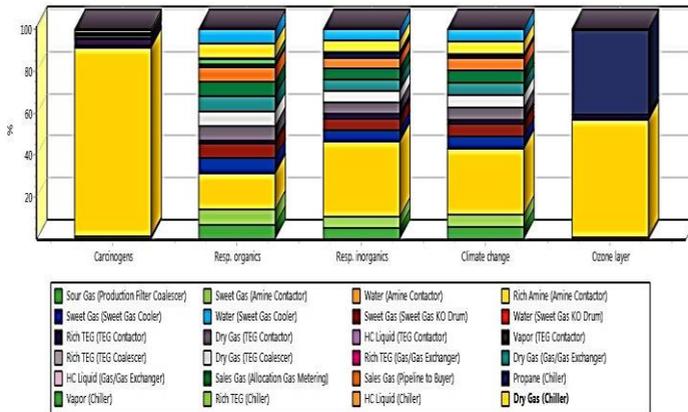


Method: Eco-indicator 99 (H) V2.10 / Europe E199 H(A) / Characterization
 Analyzing 1 p. 'Impact-Condensate Stabilization System';

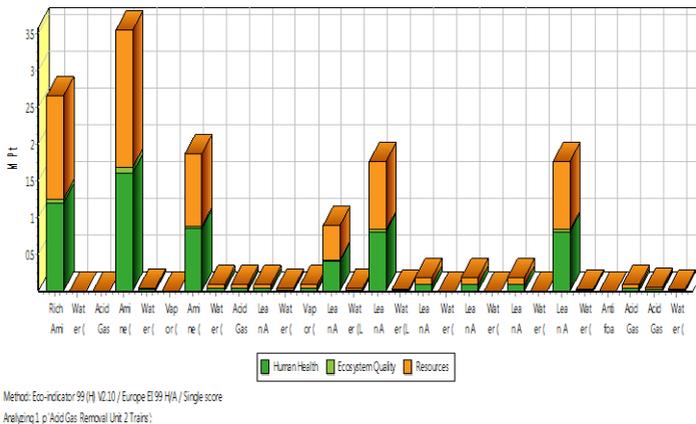
Gambar 4. 7 Diagram Tahapan Karakterisasi pada Condensate Stabilization System
 Sumber: SimaPro 8.4



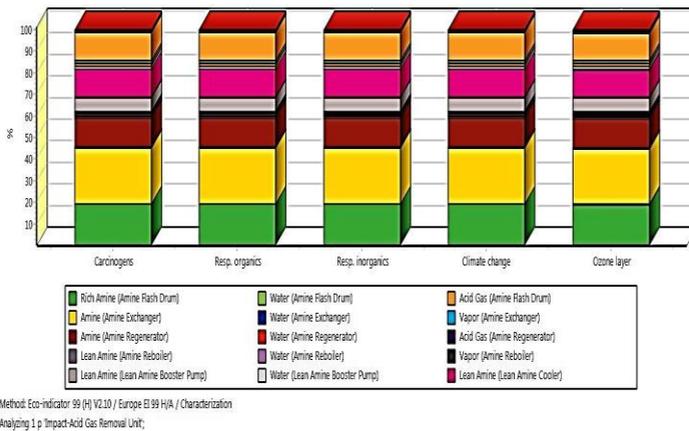
Gambar 4. 8 Diagram Tahapan *Single Score* pada Gas Treatment Process
Sumber: SimaPro 8.4



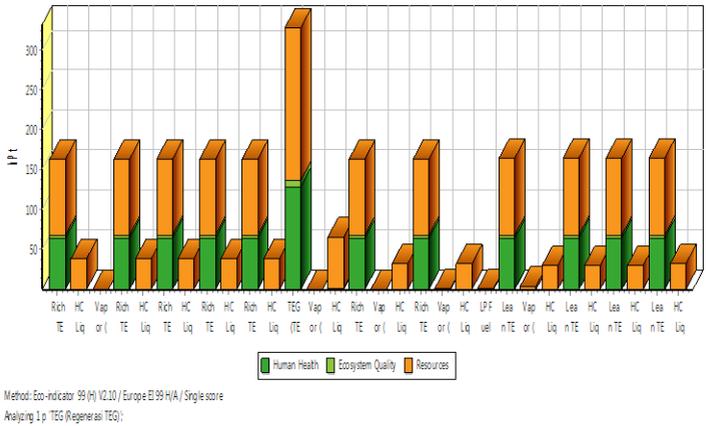
Gambar 4. 9 Diagram Tahapan Karakterisasi pada Gas Treatment Process
Sumber: SimaPro 8.4



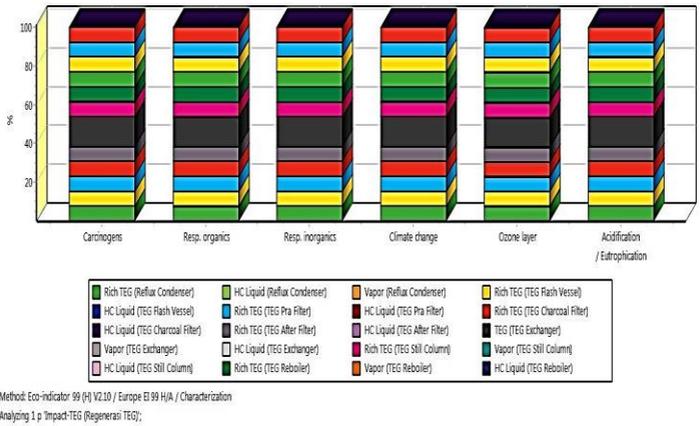
Gambar 4. 10 Diagram Tahapan *Single Score* pada Proses Regenerasi *Amine* di *AGRU System*
 Sumber: SimaPro 8.4



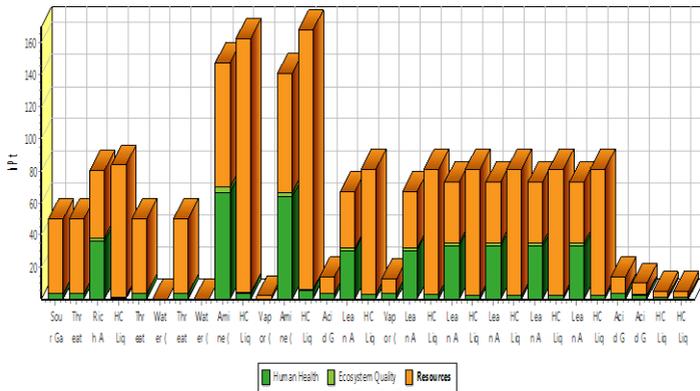
Gambar 4. 11 Diagram Tahapan Karakterisasi pada Proses Regenerasi *Amine* di *AGRU System*
 Sumber: SimaPro 8.4



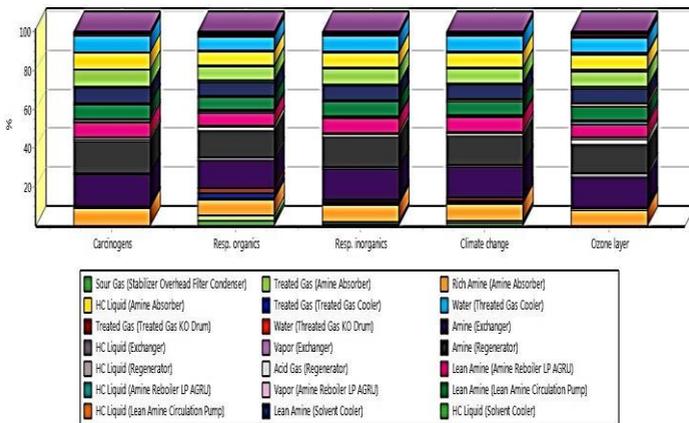
Gambar 4. 12 Diagram Tahapan *Single Score* pada Proses Regenerasi TEG di *Dehydration Unit*
Sumber: SimaPro 8.4



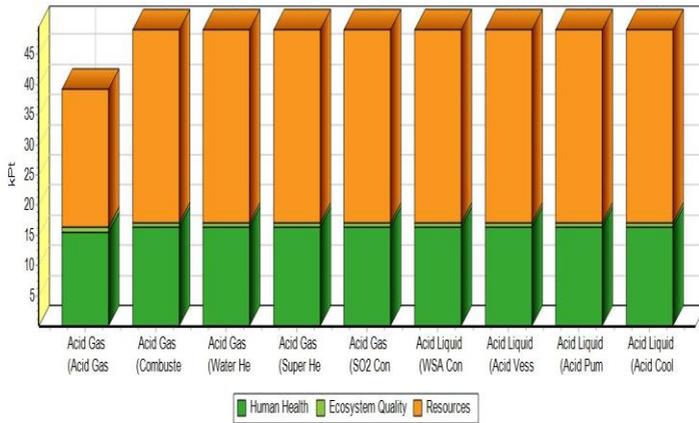
Gambar 4. 13 Diagram Tahapan Karakterisasi pada Proses Regenerasi TEG di *Dehydration Unit*
Sumber: SimaPro 8.4



Gambar 4. 14 Diagram Tahapan *Single Score* pada LP Fuel Gas Treatment
Sumber: SimaPro 8.4

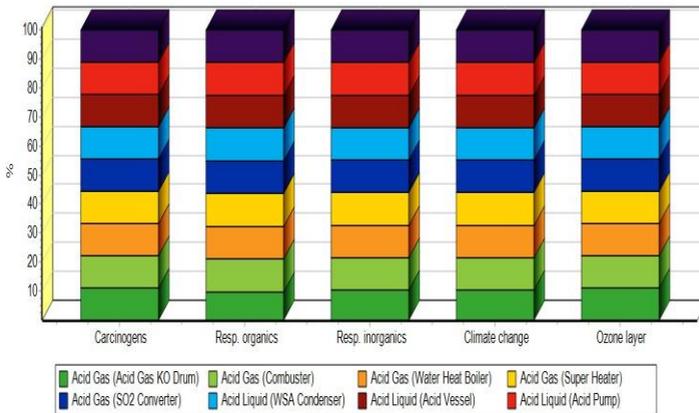


Gambar 4. 15 Diagram Tahapan Karakterisasi pada LP Fuel Gas Treatment
Sumber: SimaPro 8.4



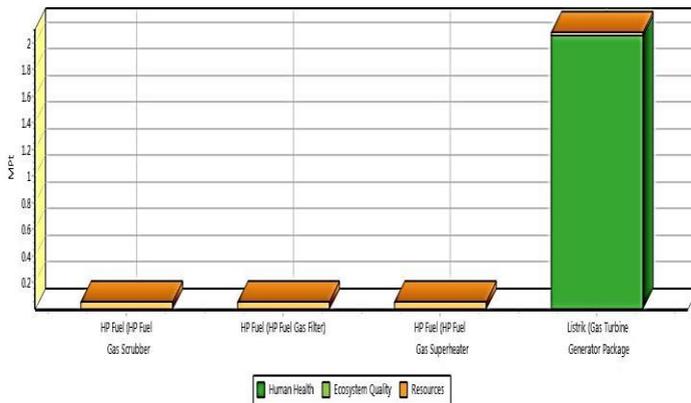
Method: Eco-indicator 99 (H) V2.10 / Europe EI 99 H/A / Single score
 Analyzing 1 p 'Impact-Acid Gas Conversion Unit';

Gambar 4. 16 Diagram Tahapan *Single Score* pada *Acid Gas Conversion Unit*
 Sumber: SimaPro 8.4



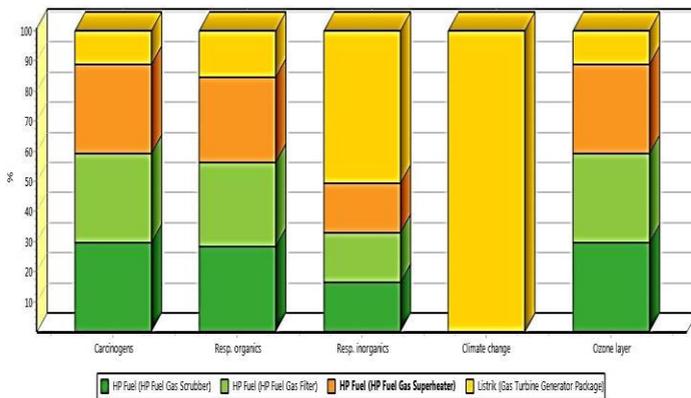
Method: Eco-indicator 99 (H) V2.10 / Europe EI 99 H/A / Characterization
 Analyzing 1 p 'Impact-Acid Gas Conversion Unit';

Gambar 4. 17 Diagram Tahapan *Karakterisasi* pada *Acid Gas Conversion Unit*
 Sumber: SimaPro 8.4



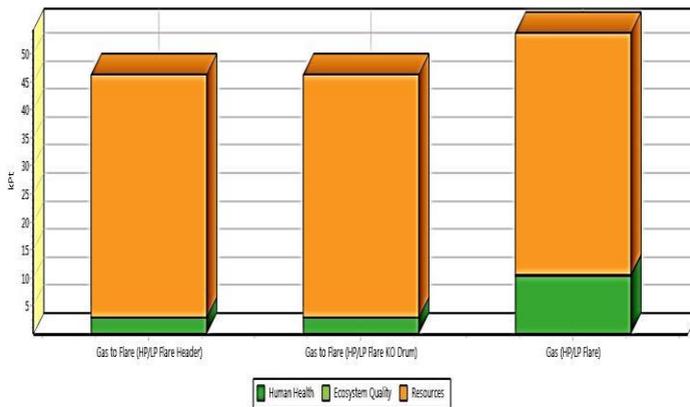
Method: Eco-indicator 99 (H) V2.10 / Europe El 99 H(A) / Single score
 Analyzing 1 p (Impact-Gas Turbine Generator);

Gambar 4. 18 Diagram Tahapan *Single Score* pada Unit *Gas Turbine Generator*
 Sumber: SimaPro 8.4



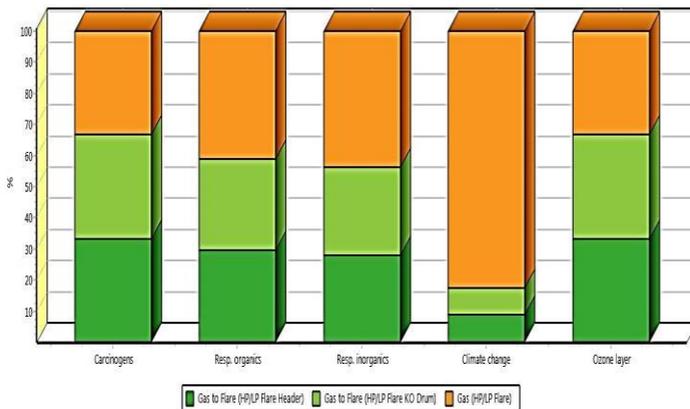
Method: Eco-indicator 99 (H) V2.10 / Europe El 99 H(A) / Characterization
 Analyzing 1 p (Impact-Gas Turbine Generator);

Gambar 4. 19 Diagram Tahapan *Karakterisasi* pada Unit *Gas Turbine Generator*
 Sumber: SimaPro 8.4



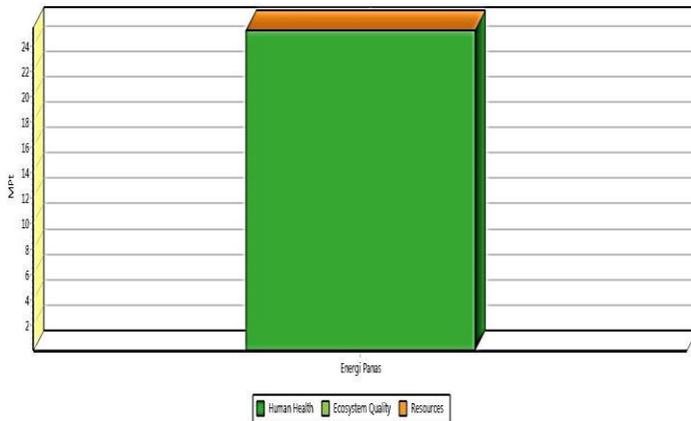
Method: Eco-indicator 99 (H) V2.10 / Europe EI 99 H(A) / Single score
 Analyzing 1 p 'Impact+HPI)LP Flare';

Gambar 4. 20 Diagram Tahapan *Single Score* pada Unit *Flare*
 Sumber: SimaPro 8.4

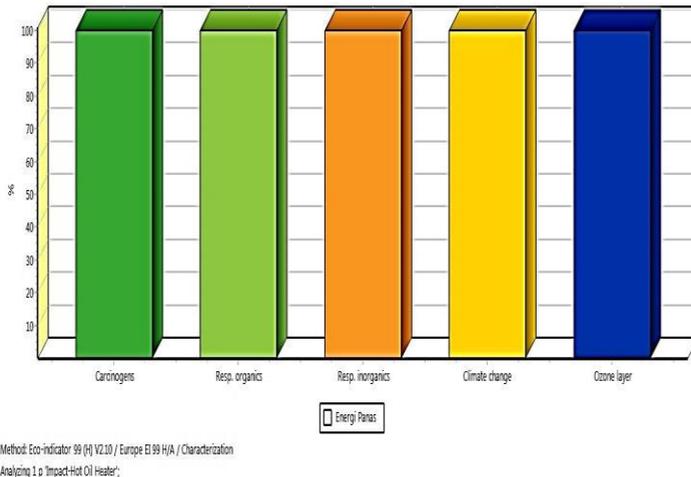


Method: Eco-indicator 99 (H) V2.10 / Europe EI 99 H(A) / Characterization
 Analyzing 1 p 'Impact+HPI)LP Flare';

Gambar 4. 21 Diagram Tahapan *Karakterisasi* pada Unit *Flare*
 Sumber: SimaPro 8.4



Gambar 4. 22 Diagram Tahapan *Single Score* pada Unit *Hot Oil Heater*
Sumber: SimaPro 8.4



Gambar 4. 23 Diagram Tahapan *Karakterisasi* pada Unit *Hot Oil Heater*
Sumber: SimaPro 8.4

4.5.5 Analisis Hasil *Life Cycle Impact Assessment*

Hasil analisis tahap *life cycle impact assessment* pada setiap proses yang dianalisis dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil Analisis *Life Cycle Impact Assessment*

Proses	Unit dengan Nilai Dampak Terbesar	Total Nilai Dampak (MPt)
<i>Gas and gathering production separation</i>	<i>Air fin cooler</i>	2,14
<i>Produce water system</i>	<i>Degassing column, produced water storage tank, booster pump, filter, dan injection pump</i>	0,035
<i>Condensate stabilization system</i>	<i>Condensate stabilizer</i>	0,65
<i>Gas treatment process</i>	<i>Amine contactor</i>	2,66
Proses regenerasi <i>amine</i> pada <i>AGRU system</i>	<i>Amine exchanger</i>	3,55
Proses regenerasi <i>TEG</i> pada <i>dehydration unit</i>	<i>TEG still column dan TEG reboiler</i>	0,74
<i>LP fuel gas treatment</i>	<i>Regenerator (acid gas)</i>	0,72
<i>Acid gas conversion unit</i>	<i>SO₂ converter</i>	0,049
Unit <i>Gas Turbine Generator</i>	-	2,08
Unit <i>flare</i>	-	0,053
Unit <i>hot oil heater</i>	-	25,22

Berdasarkan Tabel 4,4, diketahui bahwa proses yang memiliki dampak paling besar terhadap lingkungan adalah proses pada unit *hot oil heater* dengan nilai dampak sebesar 25,22 MPt. Hasil analisis pada *software* SimaPro 8.4 untuk nilai kategori kerusakan pada unit *hot oil heater* adalah 552 DALY untuk kategori *human health*. Hal ini berarti apabila kehidupan seseorang yang seharusnya bisa mencapai usia 600 tahun, harus rela berkurang usianya sebanyak 552 tahun atau harus rela mengalami cacat dalam usia 552 tahun dalam hidupnya. Untuk kategori *ecosystem quality* adalah sebesar $1,27 \times 10^3$ PDF.m².year yang berarti pada area per meter persegi dalam satu tahun terjadi kepunahan terhadap 1.270 spesies hewan atau tumbuhan. Sedangkan untuk kategori *resources* sebesar 51,1 MJ *surplus* adalah kelebihan

energi yang digunakan pada saat ini yang seharusnya dapat digunakan untuk kepentingan di masa depan.

4.6 Hubungan Alternatif Perbaikan dengan *Impact* pada Analisis LCA

Berdasarkan hasil analisis dampak dengan menggunakan metode LCA pada sub-bab 4.5, diketahui bahwa proses eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi memberikan dampak yang sangat besar terhadap kategori kerusakan *resources* (sumber daya) dan kategori kerusakan kesehatan manusia (*human health*). Untuk kategori *resources* disebabkan oleh penggunaan gas alam sebagai bahan baku pada proses tersebut yang mempengaruhi ketersediaan gas alam sebagai bahan bakar fosil. Sedangkan kategori *human health* ditimbulkan dari emisi yang dilepas oleh unit GTG, *hot oil heater*, dan *flare* pada saat proses pembakaran. Oleh karena itu, diperlukan suatu alternatif perbaikan untuk mereduksi dampak lingkungan yang timbul akibat proses utama maupun penunjang (proses pada unit GTG, *hot oil heater*, dan *flare*) pada kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.

Alternatif yang digunakan pada proses utama maupun penunjang (proses pada unit GTG, *hot oil heater*, dan *flare*) pada kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi merupakan alternatif yang didapatkan dari hasil analisis dan hasil diskusi dengan pihak terkait yang bekerja pada proses pengolahan gas alam di CPP, JOB Tomori serta dosen pembimbing. Hasil analisis dilakukan dengan cara analisis literatur yang didapatkan pada jurnal maupun analisis terhadap laporan perusahaan-perusahaan di bidang eksplorasi dan produksi yang berada di dalam negeri. Sedangkan, hasil diskusi dilakukan dengan cara bertukar pendapat dengan pihak terkait yang bekerja di proses eksplorasi dan produksi serta dosen pembimbing terkait kondisi aktual lapangan dan alternatif yang mungkin untuk diterapkan, sehingga proses produksi dapat bekerja lebih maksimal untuk mengurangi dampak lingkungan yang terjadi. Beberapa alternatif yang digunakan sebagai tujuan untuk mengurangi dampak lingkungan yang terjadi sesuai analisis LCA dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Alternatif Perbaikan yang direncanakan

No.	Alternatif	Rincian Kegiatan	Fungsi
1.	Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU (*).	<p>LP fuel gas excess yang hendak dibuang ke unit flare dialirkan kembali ke dalam unit combustor pada sistem AGCU. Penambahan volume LP fuel yang digunakan pada unit combustor akan meningkatkan laju alir gas outlet unit tersebut. Pada prosesnya, gas outlet dari unit combustor akan dialirkan menuju unit SO₂ converter. Namun sebelum masuk unit tersebut, suhu gas harus diturunkan terlebih dengan cara mengontakan air dengan gas secara tidak langsung pada unit waste heat boiler, yang mana air tersebut akan berubah menjadi steam karena menerima panas. Dikarenakan laju gas outlet pada unit combustor meningkat, maka volume air yang dibutuhkan juga semakin banyak, sehingga steam yang dihasilkan akan lebih besar.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • LP fuel yang hendak dibakar pada unit flare akan menurun, sehingga dampak resources pada unit flare juga akan menurun. Hal tersebut juga berpengaruh pada dampak human health (climate change) pada unit tersebut, yang mana semakin sedikit hidrokarbon yang dibakar maka emisi yang dihasilkan semakin menurun. • Steam yang dihasilkan pada AGCU akan meningkat, sehingga energi listrik yang dihasilkan pada unit Steam Turbine Generator (STG) juga akan meningkat. Hal tersebut akan berpengaruh pada beban kerja dari unit GTG (Beban kerja unit GTG tidak besar). • Penurunan beban kerja dari unit GTG akan mempengaruhi penggunaan

No.	Alternatif	Rincian Kegiatan	Fungsi
			<p><i>sales gas</i> yang harus di <i>tapping</i> ke unit GTG, yang mana terjadi penurunan penggunaan gas sebagai bahan bakar unit GTG. Hal tersebut akan mempengaruhi jumlah emisi yang dihasilkan.</p>
2.	<p>Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> ke dalam unit <i>Production Separator</i> dengan proses kompresi (*).</p>	<p><i>LP fuel gas excess</i> dari <i>LP fuel header</i> memiliki tekanan sebesar 100 psig, sedangkan tekanan gas yang masuk pada unit <i>production separator</i> adalah 1000 psig. Maka dari itu, <i>LP fuel gas excess</i> yang ingin dialirkan kembali pada unit <i>production separator</i> harus dinaikan tekanan gas nya terlebih dahulu dari 100 psig menjadi 1000 psig. Untuk menaikkan tekanan gas tersebut maka dibutuhkan unit kompresor. Dikarenakan perbandingan tekanan keluar dengan tekanan masuk melebihi 4, maka dibutuhkan unit kompresor yang disusun dalam 2 tahap. Diantara kompresor tersebut dibuat <i>intercooler</i> untuk menurunkan suhu gas. Hal tersebut dikarenakan proses menaikkan tekanan akan menyebabkan suhu gas juga ikut</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>LP fuel</i> yang hendak dibakar pada unit <i>flare</i> akan menurun, sehingga dampak <i>resources</i> pada unit <i>flare</i> juga akan menurun. Hal tersebut juga berpengaruh pada dampak <i>human health (climate change)</i> pada unit tersebut, yang mana semakin sedikit hidrokarbon yang dibakar maka emisi yang dihasilkan semakin menurun. • Penggunaan kembali <i>LP fuel gas excess</i> pada proses utama akan meningkatkan jumlah <i>sales gas</i> yang dihasilkan. • Memperpanjang umur sumur

No.	Alternatif	Rincian Kegiatan	Fungsi
		<p>meningkat, sedangkan peningkatan suhu yang terlalu tinggi sangat dihindari dikarenakan dapat menurunkan efisiensi kompresor. Sebelum <i>LP fuel gas excess</i> dialirkan ke unit kompresor, terdapat unit <i>KO drum</i> untuk memisahkan kandungan <i>liquid</i> yang masih terikat pada gas. Sehingga, tidak terdapat <i>liquid</i> yang masuk pada unit kompresor.</p>	<p>produksi.</p>
3.	<p>Pembangunan <i>Mini LPG Plant</i> dengan memanfaatkan gas suar bakar (**).</p>	<p>Dalam produksi LPG dari gas suar bakar (<i>flare</i>) harus mempertimbangkan laju alir gas umpan yang akan diproses, yaitu minimum 1 MMscfd (Dewi, 2009). Awalnya gas dimampatkan dengan kompresor, kemudian didinginkan hingga terbentuk aliran dua fasa sebelum nantinya masuk ke unit <i>separator</i>. Pada unit <i>separator</i>, fluida dipisahkan antara gas dan <i>liquid</i>. <i>Liquid</i> yang keluar akan dialirkan ke <i>Demetanizer-Deetanizer</i>. Sedangkan gas yang dihasilkan akan keluar menuju <i>refrigerant</i> untuk didinginkan hingga terbentuk <i>liquid</i>, yang nantinya aliran dua fasa ini dimasukkan ke dalam <i>Demetanizer-</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>LP fuel</i> yang hendak dibakar pada unit <i>flare</i> akan menurun, sehingga dampak <i>resources</i> pada unit <i>flare</i> juga akan menurun. Hal tersebut juga berpengaruh pada dampak <i>human health (climate change)</i> pada unit tersebut, yang mana semakin sedikit hidrokarbon yang dibakar maka emisi yang dihasilkan semakin menurun. • Dihasilkan LPG yang dapat digunakan sebagai bahan bakar, sehingga tidak

No.	Alternatif	Rincian Kegiatan	Fungsi
		<p><i>Deetanizer</i> dari bagian atas. <i>Liquid</i> yang terproduksi pada <i>Demetanizer-Deetanizer</i> adalah <i>liquid</i> dengan komponen C_{3+} yang nantinya akan masuk ke fraksinasi <i>Depropanizer-Debutanizer</i>. Pada unit <i>Depropanizer-Debutanizer</i> akan terbentuk <i>liquid</i> kondensat yang akan dialirkan menuju tanki kondensat dan gas C_3 serta C_4 yang terbentuk akan didinginkan dan dimasukkan ke dalam <i>flash tank</i> untuk diambil fasa <i>liquid</i>nya. <i>Liquid</i> yang terbentuk kemudian akan disimpan pada tanki LPG.</p>	<p>terdapat LP <i>fuel</i> sisa yang harus dibuang/dibakar pada unit <i>flare</i>.</p>
4.	<p>Pemanfaatan mikroalga <i>Chlorella Vulgaris</i> untuk mereduksi CO_2 serta polutan lainnya (***)</p>	<p>Emisi gas yang dihasilkan dari unit-unit pembakaran dialirkan ke dalam <i>photobioractor</i> yang telah diisi dengan air tawar dan mikroalga <i>Chlorella Vulgaris</i>.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mereduksi emisi gas CO_2 dan polutan lainnya seperti NO_x yang dihasilkan pada unit-unit pembakaran. • Mikroalga <i>Chlorella Vulgaris</i> dapat dipanen sebagai bahan baku <i>biofuel</i> yang prosesnya memiliki efisiensi 40% lebih tinggi dibandingkan dengan membuat <i>biofuel</i> dari bahan baku minyak kelapa sawit.

Sumber : (*) : Aziz, 2017.

(**) : Pramono dan Rubiandini, 2011.

(***) : Ni'matulloh, 2012.

4.7 Pemilihan Alternatif Terbaik dengan AHP

AHP adalah metode dalam sistem pengambilan keputusan yang menggunakan beberapa variabel dengan proses analisis bertingkat. Analisis dilakukan dengan memberi nilai prioritas dari tiap-tiap variabel, kemudian melakukan perbandingan berpasangan dari variabel-variabel dan alternatif-alternatif yang ada (Saaty, 2008 dalam Purnomo, dkk., 2013). AHP dapat dipakai untuk menentukan pembobotan baik kriteria maupun alternatif (Saputri dan Wiguna, 2013).

Metode AHP ini membantu memecahkan persoalan yang kompleks dengan menstruktur suatu hierarki kriteria, pihak yang berkepentingan, hasil, dan dengan menarik berbagai pertimbangan guna mengembangkan bobot atau prioritas (Adhi, 2010). Pada penerapan metode AHP yang diutamakan adalah kualitas data dari responden, dan tidak tergantung pada kuantitasnya (Saaty, 1993 dalam Susanto, 2008). Oleh karena itu, penilaian AHP memerlukan pakar sebagai responden dalam pengambilan keputusan dalam pemilihan alternatif. Para pakar disini merupakan orang-orang kompeten yang benar-benar menguasai, mempengaruhi pengambilan kebijakan atau benar-benar mengetahui informasi yang dibutuhkan. Untuk jumlah responden dalam metode AHP tidak memiliki perumusan tertentu, namun hanya ada batas minimum yaitu dua orang responden (Saaty, 1993 dalam Susanto, 2008).

Dalam penelitian ini dipilih metode AHP dalam analisis hasil kuesioner dikarenakan metode AHP mempermudah peneliti dalam melakukan perhitungan serta menghindari adanya ketidakkonsistenan dalam melakukan perbandingan berpasangan. Langkah-langkah dalam analisis AHP yang dilakukan dalam penelitian ini diuraikan sebagai berikut:

1. Menyusun hierarki dari permasalahan yang dihadapi.
2. Penilaian kriteria dan alternatif dengan skala terbaik 1-9 melalui perbandingan berpasangan.
3. Menentukan prioritas dengan pertimbangan-pertimbangan terhadap perbandingan berpasangan.

4. Mengukur konsistensi pemberian nilai dalam perbandingan antar kriteria dan alternatif.

4.7.1 Pemilihan Kriteria dalam Prosedur AHP

Setelah mengetahui dampak lingkungan yang terjadi berdasarkan hasil analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) serta alternatif perbaikan yang mungkin diterapkan, maka langkah selanjutnya adalah menentukan kriteria penilaian. Terdapat tiga kriteria yang digunakan pada penelitian ini, yaitu biaya investasi dan produksi, kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan, serta kemudahan dalam pelaksanaan. Kriteria tersebut didasarkan pada aspek finansial, lingkungan, dan operasional. Hal tersebut bertujuan untuk melihat keefektifan dari alternatif perbaikan yang akan diterapkan. Berikut ini adalah penjelasan secara singkat untuk setiap kriteria yang dibandingkan:

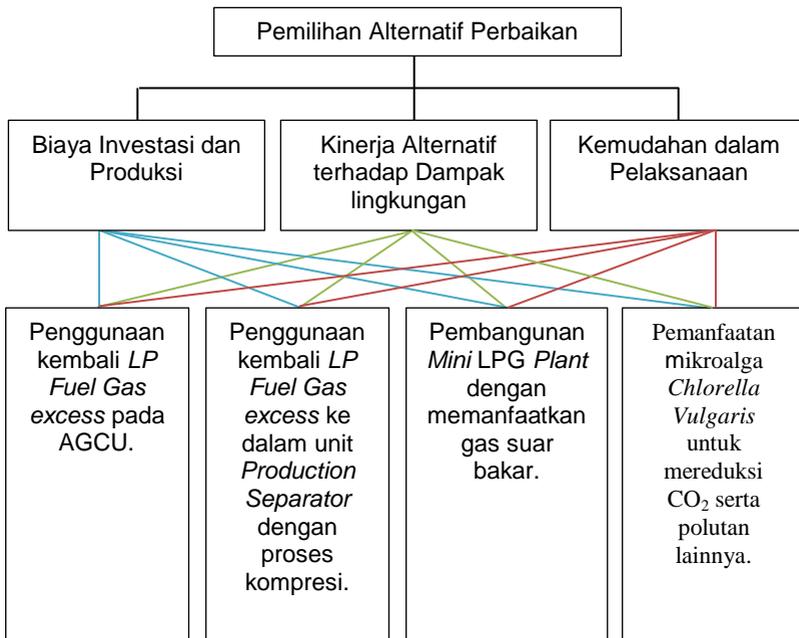
- Berdasarkan biaya investasi dan produksi.
Kriteria biaya investasi merupakan biaya yang dikeluarkan untuk pembelian mesin ataupun peralatan baru, penambahan tenaga kerja, dan biaya pelatihan untuk menambah wawasan tenaga kerja dalam pengoperasian alternatif yang dipilih. Sedangkan, biaya produksi merupakan biaya yang dikeluarkan untuk semua bahan yang digunakan pada operasional alternatif, biaya perawatan alternatif, serta biaya perbaikan alternatif.
- Berdasarkan kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan.
Kriteria kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan merupakan kriteria yang menunjukkan seberapa besar pengaruh alternatif yang dipilih terhadap optimalisasi reduksi dampak dari hasil analisis LCA.
- Berdasarkan kemudahan dalam pelaksanaan.
Kriteria kemudahan dalam pelaksanaan merupakan kriteria yang menunjukkan tingkat kesulitan dalam operasional alternatif yang dipilih terbilang rendah.

4.7.2 Penyusunan Hierarki AHP

Permasalahan yang akan diselesaikan diuraikan dalam bentuk unsur-unsur yang terpisah dan digambarkan dalam bentuk hierarki. Penyusunan hierarki dimulai dengan menentukan tujuan

yang merupakan sasaran sistem secara keseluruhan pada level teratas. Pada penelitian ini yang menjadi tujuan adalah pemilihan alternatif terbaik yang dapat dilakukan pada proses eksplorasi dan produksi gas alam.

Level berikutnya terdiri dari kriteria-kriteria untuk menilai atau mempertimbangkan alternatif-alternatif yang ada. Sebagaimana yang telah disebutkan pada sub-bab 4.7.1, kriteria-kriteria dalam penelitian ini adalah biaya investasi dan produksi, kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan, serta kemudahan dalam pelaksanaan. Sedangkan, pada level paling bawah terdiri dari alternatif-alternatif perbaikan yang akan dipilih untuk mengurangi dampak lingkungan yang terjadi. Untuk hierarki proses eksplorasi dan produksi gas alam yang dianalisis dapat dilihat pada Gambar 4.24



Gambar 4. 24 Hierarki Proses Eksplorasi dan Produksi Gas Alam

4.7.3 Penilaian Kriteria dan Alternatif

Setelah pembuatan hierarki selesai, maka langkah selanjutnya adalah penilaian terhadap kriteria dan alternatif perbaikan. Pada tahap ini dilakukan perbandingan berpasangan dengan membandingkan elemen secara berpasangan sesuai kriteria yang diberikan dengan menggunakan bentuk matrik (Setiawan, 2016).

Pengisian angka-angka pada matriks diperoleh dari hasil jawaban kuesioner yang diberikan kepada beberapa responden. Untuk bentuk kuesioner yang diberikan kepada responden dapat dilihat pada Lampiran II. Adapapun pengisian kuesioner dilakukan dengan cara-cara sebagai berikut:

1. Pembobotan dilakukan dengan perbandingan berpasangan, yaitu membandingkan kriteria penilaian atau alternatif perbaikan disebelah kiri dengan kriteria penilaian atau alternatif perbaikan disebelah kanan.
2. Kolom penilaian sebelah kiri (kolom sama penting (1) ke kiri) digunakan jika kriteria atau alternatif perbaikan sebelah kiri memiliki derajat lebih tinggi. Sebaliknya, kolom penilaian sebelah kanan (kolom sama penting (1) ke kanan) digunakan jika kriteria atau alternatif perbaikan sebelah kanan memiliki derajat lebih tinggi.
3. Responden diminta untuk memberikan tanda centang yang sesuai dengan arti penilaian.
4. Penilaian harus konsisten.

Pada penelitian ini, jumlah responden yang mengisi kuesioner terdiri dari 14 orang. Untuk rincian pihak responden dapat dilihat pada Lampiran III. Pemilihan responden ini didasarkan pada posisi struktural yang terdapat pada perusahaan dan keterkaitannya dengan objek penelitian. Berdasarkan hasil pengisian kuesioner oleh para responden, diperoleh data yang langsung diisikan ke dalam empat model matriks perbandingan berpasangan, yaitu:

- a. Matriks perbandingan berpasangan antar kriteria.
- b. Matriks perbandingan berpasangan antar alternatif perbaikan berdasarkan kriteria biaya investasi dan produksi.

- c. Matriks perbandingan berpasangan antar alternatif perbaikan berdasarkan kriteria kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan.
- d. Matriks perbandingan berpasangan antar alternatif perbaikan berdasarkan kriteria kemudahan dalam pelaksanaan.

Untuk hasil matriks perbandingan berpasangan dapat dilihat pada Lampiran III. Dikarenakan matriks perbandingan berpasangan diperoleh dari sampel data sebanyak 14 responden, maka perlu dibuat rata-rata untuk masing-masing elemen dengan cara mengalikan semua elemen matriks banding yang seletak, kemudian diakar pangkatkan dengan banyaknya responden. Sehingga didapatkan matriks perhitungan rata-rata untuk masing-masing elemen. Berikut ini adalah contoh perhitungan perbandingan rata-rata antara kriteria biaya investasi dan produksi dengan kriteria kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan:

- Hasil kuesioner perbandingan berpasangan antara kriteria biaya invstasi dan produksi dengan kriteria kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan adalah 1/2, 1/3, 1/6, 4, 1, 1/7, 1, 1, 1, 7, 1, 1, 1/7, dan 3.
- Perbandingan rata-rata.

$$= (1/2 \times 1/3 \times 1/6 \times 4 \times 1 \times 1/7 \times 1 \times 1 \times 1 \times 7 \times 1 \times 1 \times 1/7 \times 3)^{(1/14)}$$

$$= 0,805.$$

Untuk hasil perbandingan rata-rata pada setiap elemen dapat dilihat pada Tabel 4.6-Tabel 4.7, dengan definisi kode sebagai berikut:

- K1 berarti kriteria biaya investasi dan produksi.
- K2 berarti kriteria kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan.
- K3 berarti kriteria kemudahan dalam pelaksanaan.
- A1 berarti alternatif perbaikan penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* pada AGCU.
- A2 berarti alternatif perbaikan penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* ke dalam unit *production separator* dengan proses kompresi.

- A3 berarti alternatif perbaikan pembangunan *Mini LPG Plant* dengan memanfaatkan gas suar bakar.
- A4 berarti alternatif perbaikan pemanfaatan mikroalga *Chlorella Vulgaris* untuk mereduksi CO₂ serta polutan lainnya.

Tabel 4. 6 Matriks Perbandingan Rata-Rata Antar Kriteria

Kode	K1	K2	K3
K1	1.000	0.805	1.249
K2	1.394	1.000	2.563
K3	0.714	0.390	1.000

Tabel 4. 7 Matriks Perbandingan Rata-Rata Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Biaya Investasi dan Produksi

Kode	A1	A2	A3	A4
A1	1.000	1.703	2.155	2.817
A2	0.587	1.000	3.493	3.055
A3	0.464	0.286	1.000	1.419
A4	0.355	0.327	0.705	1.000

Tabel 4. 8 Matriks Perbandingan Rata-Rata Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kinerja Alternatif

Kode	A1	A2	A3	A4
A1	1.000	0.631	1.295	1.355
A2	1.585	1.000	2.335	3.013
A3	0.772	0.428	1.000	1.731
A4	0.738	0.332	0.578	1.000

Tabel 4. 9 Matriks Perbandingan Rata-Rata Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kemudahan Pelaksanaan

Kode	A1	A2	A3	A4
A1	1.000	2.746	4.258	4.116
A2	0.364	1.000	3.915	2.750
A3	0.235	0.255	1.000	1.456

Kode	A1	A2	A3	A4
A4	0.243	0.364	0.687	1.000

4.7.4 Penentuan Prioritas

Synthesis of priority adalah penentuan prioritas dari elemen yang terdapat dalam matriks perbandingan berpasangan. Hal ini sering kali disebut sebagai bobot atau kontribusi terhadap tujuan pengambilan keputusan (Setiawan, 2016). Hal-hal yang dilakukan dalam langkah ini adalah sebagai berikut:

- Menjumlahkan nilai-nilai dari setiap kolom pada matriks.
- Membagi setiap nilai dari kolom dengan total kolom yang bersangkutan untuk memperoleh normalisasi matriks.
- Menjumlahkan nilai-nilai dari setiap matriks dan membaginya dengan jumlah elemen untuk mendapatkan nilai rata-rata atau bobot.

Penentuan prioritas atau bobot dilakukan sebanyak jumlah matriks perbandingan yang telah dibuat. Dalam penelitian ini penentuan prioritas/bobot yang dibuat akan mewakili:

- Matriks perbandingan rata-rata antar kriteria.
- Matriks perbandingan rata-rata antar alternatif perbaikan berdasarkan kriteria biaya investasi dan produksi.
- Matriks perbandingan rata-rata antar alternatif perbaikan berdasarkan kriteria kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan.
- Matriks perbandingan rata-rata antar alternatif perbaikan berdasarkan kriteria kemudahan dalam pelaksanaan.

Berikut ini adalah contoh perhitungan penentuan prioritas atau bobot untuk kriteria biaya investasi dan produksi:

- Hasil perbandingan rata-rata antara kriteria biaya investasi dan produksi dengan kriteria kinerja alternatif seperti yang terlihat pada Tabel 4.6 adalah 0,805.
- Hasil perbandingan rata-rata antara kriteria kinerja alternatif dengan semua kriteria yang dapat dilihat pada Tabel 4.6 (dibaca vertikal) adalah 0,805; 1; dan 0,390.
- Jumlah nilai perbandingan rata-rata untuk kriteria kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan.

$$= 0,805 + 1 + 0,390.$$

$$= 2,195.$$

- Normalisasi matriks antara kriteria biaya investasi dan produksi dengan kriteria kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan.
= nilai perbandingan rata-rata antara kriteria biaya investasi dan produksi dengan kriteria kinerja alternatif/ jumlah nilai perbandingan rata-rata untuk kriteria kinerja alternatif.
 $= 0,805/ 2,195.$
 $= 0,367.$
- Dilakukan perhitungan normalisasi matriks antara kriteria biaya investasi dan produksi dengan kriteria lainnya seperti cara diatas. Maka didapatkan nilai normalisasi matriks untuk kriteria biaya investasi dan produksi dengan kriteria lainnya adalah 0,322; 0,367; dan 0,259.
- Jumlah nilai normalisasi matriks untuk kriteria biaya investasi dan produksi.
 $= 0,322 + 0,367 + 0,259.$
 $= 0,948.$
- Nilai rata-rata atau bobot untuk kriteria biaya investasi dan produksi.
= Jumlah nilai normalisasi matriks/ jumlah elemen.
 $= 0,948/ 3.$
 $= 0,316.$

Untuk penjumlahan nilai kolom pada setiap elemen dapat dilihat pada Tabel 4.10-Tabel 4.13. Sedangkan, untuk hasil normalisasi dan pembobotan pada setiap elemen dapat dilihat pada Tabel 4.14-Tabel 4.17, dengan definisi kode seperti pada sub-bab 4.7.3.

Tabel 4. 10 Penjumlahan Nilai Kolom Antar Kriteria

Kode	K1	K2	K3
K1	1.000	0.805	1.249
K2	1.394	1.000	2.563
K3	0.714	0.390	1.000
Total	3.108	2.195	4.812

Tabel 4. 11 Penjumlahan Nilai Kolom Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Biaya Investasi dan Produksi

Kode	A1	A2	A3	A4
A1	1.000	1.703	2.155	2.817
A2	0.587	1.000	3.493	3.055
A3	0.464	0.286	1.000	1.419
A4	0.355	0.327	0.705	1.000
Total	2.406	3.316	7.352	8.292

Tabel 4. 12 Penjumlahan Nilai Kolom Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kinerja Alternatif

Kode	A1	A2	A3	A4
A1	1.000	0.631	1.295	1.355
A2	1.585	1.000	2.335	3.013
A3	0.772	0.428	1.000	1.731
A4	0.738	0.332	0.578	1.000
Total	4.095	2.391	5.208	7.098

Tabel 4. 13 Penjumlahan Nilai Kolom Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kemudahan Pelaksanaan

Kode	A1	A2	A3	A4
A1	1.000	2.746	4.258	4.116
A2	0.364	1.000	3.915	2.750
A3	0.235	0.255	1.000	1.456
A4	0.243	0.364	0.687	1.000
Total	1.842	4.366	9.859	9.321

Tabel 4. 14 Normalisasi dan Bobot Antar Kriteria

Kode	K1	K2	K3	Total	Bobot
K1	0.322	0.367	0.259	0.948	0.316
K2	0.449	0.456	0.533	1.437	0.479
K3	0.230	0.178	0.208	0.615	0.205

Tabel 4. 15 Normalisasi dan Pembobotan Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Biaya Investasi dan Produksi

Kode	A1	A2	A3	A4	Total	Bobot
A1	0.416	0.513	0.293	0.340	1.562	0.390
A2	0.244	0.302	0.475	0.368	1.389	0.347
A3	0.193	0.086	0.136	0.171	0.586	0.147
A4	0.148	0.099	0.096	0.121	0.463	0.116

Tabel 4. 16 Normalisasi dan Pembobotan Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kinerja Alternatif

Kode	A1	A2	A3	A4	Total	Bobot
A1	0.244	0.264	0.249	0.191	0.948	0.237
A2	0.387	0.418	0.448	0.424	1.678	0.419
A3	0.189	0.179	0.192	0.244	0.803	0.201
A4	0.180	0.139	0.111	0.141	0.571	0.143

Tabel 4. 17 Normalisasi dan Pembobotan Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kemudahan Pelaksanaan

Kode	A1	A2	A3	A4	Total	Bobot
A1	0.543	0.629	0.432	0.442	2.045	0.511
A2	0.198	0.229	0.397	0.295	1.119	0.280
A3	0.128	0.059	0.101	0.156	0.444	0.111
A4	0.132	0.083	0.070	0.107	0.392	0.098

Berdasarkan nilai pembobotan pada setiap elemen seperti yang terlihat pada Tabel 4.14-Tabel 4.17, maka didapatkan peringkat prioritas sementara sebagai berikut:

1. Untuk perbandingan antar kriteria, didapatkan hasil:
 - a. Kinerja alternatif terhadap dampak memiliki prioritas tertinggi, sebesar 0,479.
 - b. Biaya investasi dan produksi memiliki prioritas kedua, sebesar 0,316.
 - c. Kemudahan dalam pelaksanaan memiliki prioritas terendah, sebesar 0,205.

2. Untuk perbandingan antar alternatif perbaikan berdasarkan kriteria biaya investasi dan produksi, didapatkan hasil:
 - a. Penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* pada AGCU memiliki prioritas tertinggi, sebesar 0,390.
 - b. Penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* ke dalam unit *production separator* dengan proses kompresi memiliki prioritas kedua, sebesar 0,347.
 - c. Pembangunan *Mini LPG Plant* dengan memanfaatkan gas suar bakar memiliki prioritas ketiga, sebesar 0,147.
 - d. Pemanfaatan mikroalga *Chlorella Vulgaris* untuk mereduksi CO₂ serta polutan lainnya memiliki prioritas terendah, sebesar 0,116.
3. Untuk perbandingan antar alternatif perbaikan berdasarkan kriteria kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan, didapatkan hasil:
 - a. Penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* ke dalam unit *production separator* dengan proses kompresi memiliki prioritas tertinggi, sebesar 0,419.
 - b. Penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* pada AGCU memiliki prioritas kedua, sebesar 0,237.
 - c. Pembangunan *Mini LPG Plant* dengan memanfaatkan gas suar bakar memiliki prioritas ketiga, sebesar 0,201.
 - d. Pemanfaatan mikroalga *Chlorella Vulgaris* untuk mereduksi CO₂ serta polutan lainnya memiliki prioritas terendah, sebesar 0,143.
4. Untuk perbandingan antar alternatif perbaikan berdasarkan kriteria kemudahan dalam pelaksanaan, didapatkan hasil:
 - a. Penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* pada AGCU memiliki prioritas tertinggi, sebesar 0,511.
 - b. Penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* ke dalam unit *production separator* dengan proses kompresi memiliki prioritas kedua, sebesar 0,280.
 - c. Pembangunan *Mini LPG Plant* dengan memanfaatkan gas suar bakar memiliki prioritas ketiga, sebesar 0,111.
 - d. Pemanfaatan mikroalga *Chlorella Vulgaris* untuk mereduksi CO₂ serta polutan lainnya memiliki prioritas terendah, sebesar 0,098

Pada hasil pembobotan perbandingan antar kriteria, kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan memiliki prioritas tertinggi, yang disusul oleh kriteria biaya investasi dan produksi, serta kriteria kemudahan dalam pelaksanaan. Berdasarkan hasil analisis kuesioner pada keterangan yang diberikan oleh pihak responden dalam pemilihan kriteria, kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan merupakan kriteria paling penting dan utama dalam memilih alternatif perbaikan. Hal tersebut bertujuan untuk membuat proses produksi lebih maksimal dan ramah terhadap lingkungan dengan meminimalisir potensi dampak lingkungan yang ditimbulkan. Namun demikian, pemilihan kriteria tersebut tetap harus dipertimbangkan prinsip keekonomiannya, karena biaya investasi dan produksi juga menjadi hal yang penting dalam menjalankan sebuah proyek perbaikan untuk menghitung tingkat modal yang diperlukan dan hasil atau keuntungan yang didapatkan. Sedangkan, kriteria kemudahan dalam pelaksanaan dan pengoperasian suatu alternatif memiliki prioritas terendah karena dapat dimitigasi menggunakan prosedur operasional.

Selanjutnya, untuk mengambil keputusan terhadap alternatif perbaikan yang dipilih dengan nilai prioritas tertinggi, maka dilakukan penentuan prioritas atau bobot akhir. Penentuan prioritas akhir dilakukan dengan cara mengalikan setiap bobot alternatif perbaikan dengan setiap bobot kriteria. Berikut ini adalah contoh perhitungan bobot akhir untuk alternatif perbaikan penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* pada AGCU secara keseluruhan:

- Bobot kriteria biaya investasi dan produksi adalah 0,316.
- Bobot kriteria kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan adalah 0,479.
- Bobot kriteria kemudahan dalam pelaksanaan adalah 0,205.
- Bobot alternatif perbaikan penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* pada AGCU disetiap kriteria.
 - a. Berdasarkan kriteria biaya investasi dan produksi sebesar 0,390.
 - b. Berdasarkan kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan sebesar 0,237.
 - c. Berdasarkan kemudahan dalam pelaksanaan sebesar 0,511.

- Bobot akhir alternatif perbaikan penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* pada AGCU di setiap kriteria.
 - a. Berdasarkan kriteria biaya investasi dan produksi.
= $0,390 \times 0,316$.
= 0,123.
 - b. Berdasarkan kriteria kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan.
= $0,237 \times 0,479$.
= 0,113.
 - c. Berdasarkan kriteria kemudahan dalam pelaksanaan.
= $0,511 \times 0,205$.
= 0,105.
- Bobot akhir alternatif perbaikan penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* pada AGCU secara keseluruhan.
= Berdasarkan kriteria 1 + kriteria 2 + kriteria 3.
= $0,123 + 0,113 + 0,105$.
= 0,342.

Untuk hasil perhitungan bobot akhir setiap alternatif perbaikan dapat dilihat pada Tabel 4.18, dengan definisi kode seperti pada sub-bab 4.7.3.

Tabel 4. 18 Pembobotan Akhir Setiap Alternatif Perbaikan

Kode	K1	K2	K3	Total	Prioritas	%
A1	0.123	0.113	0.105	0.342	2	34.2
A2	0.110	0.201	0.057	0.368	1	36.8
A3	0.046	0.096	0.023	0.165	3	16.5
A4	0.037	0.068	0.020	0.125	4	12.5

Berdasarkan hasil pembobotan pada Tabel 4.18, didapatkan hasil akhir sebagai berikut:

1. Penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* ke dalam unit *production separator* dengan proses kompresi memiliki prioritas tertinggi, sebesar 36,8%.
2. Penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* pada AGCU memiliki prioritas kedua, sebesar 34,2%.
3. Pembangunan *Mini LPG Plant* dengan memanfaatkan gas suar bakar memiliki prioritas ketiga, sebesar 16,5%.

4. Pemanfaatan mikroalga *Chlorella Vulgaris* untuk mereduksi CO₂ serta polutan lainnya memiliki prioritas terendah, sebesar 12,5%.

Maka, alternatif perbaikan yang paling mungkin diterapkan berdasarkan hasil kuesioner adalah penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* ke dalam unit *production separator*. Berdasarkan hasil analisis kuesioner pada keterangan yang diberikan oleh pihak responden dalam pemilihan alternatif perbaikan, penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* ke dalam unit *production separator* dengan proses kompresi dianggap sebagai alternatif perbaikan yang paling efektif dalam mengurangi dampak terhadap lingkungan. Hal tersebut dikarenakan *recovery* dan efisiensi dari proses penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* ke dalam unit *production separator* dengan proses kompresi sangat tinggi, yang mana akan mengurangi proses pembakaran pada unit *flare*, sehingga mengurangi emisi gas buang yang dihasilkan.

Selain itu, produk yang dihasilkan pada alternatif perbaikan tersebut berupa *sales gas* dapat langsung memiliki nilai jual yang ekonomis dan menaikkan jumlah *sales gas* yang dihasilkan. Penggunaan kembali sisa gas ke dalam proses akan mengurangi pengambilan gas alam dari sumur produksi untuk mencapai target produk yang dihasilkan, sehingga akan memperpanjang usia sumur produksi.

Baik dari sisi konstruksi maupun operasional, modifikasi peralatan utama yang sudah ada pada *existing plant* untuk alternatif perbaikan penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* ke dalam unit *production separator* dengan proses kompresi ini tidak perlu dilakukan. Namun, diperlukan penambahan unit *multistage gas compressor* dan *intercooler*, yang mana membutuhkan biaya yang cukup besar. Selain itu, diperlukan studi kelayakan lebih dalam untuk penerapan alternatif ini. Apabila dilakukan perbandingan antara keuntungan dan kerugian dari penerapan alternatif ini, maka biaya investasi dan produksi dapat diatasi dengan adanya peningkatan pendapatan perusahaan dari peningkatan jumlah produk *sales gas* yang dapat dijual ke pihak konsumen.

4.7.5 Pengukuran Konsistensi Logis

Dalam pembuatan keputusan, penting untuk mengetahui seberapa baik konsistensi yang ada pada hasil kuesioner. Hal tersebut dikarenakan keputusan berdasarkan pertimbangan dengan konsistensi yang rendah sangat tidak diharapkan. Pengukuran konsistensi dilakukan sebanyak jumlah matriks perbandingan yang ada. Dalam penelitian ini pengukuran konsistensi dilakukan sebanyak 4 kali, yaitu konsistensi antar kriteria, konsistensi antar alternatif perbaikan berdasarkan biaya investasi dan produksi, konsistensi antar alternatif perbaikan berdasarkan kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan, dan konsistensi antar alternatif perbaikan berdasarkan kemudahan dalam pelaksanaan. Berikut ini adalah contoh perhitungan konsistensi antar kriteria

- Mengalikan nilai perbandingan rata-rata antar kriteria (Tabel 4.6) dan bobot setiap kriteria (Tabel 4.14). Setiap nilai pada kolom pertama dikalikan dengan prioritas relatif elemen pertama, nilai pada kolom kedua dikalikan dengan prioritas relatif elemen kedua, dan seterusnya. Kemudian jumlahkan setiap barisnya.

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0,805 & 1,249 \\ 1,394 & 1 & 2,563 \\ 0,714 & 0,390 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,316 \\ 0,479 \\ 0,205 \end{pmatrix}.$$

$$= \begin{pmatrix} 0,316 & 0,386 & 0,256 \\ 0,441 & 0,479 & 0,525 \\ 0,226 & 0,187 & 0,205 \end{pmatrix}.$$

$$= \begin{pmatrix} 0,958 \\ 1,445 \\ 0,618 \end{pmatrix}.$$

- Hasil dari penjumlahan baris dibagi dengan elemen prioritas relatif yang bersangkutan (bobot setiap kriteria).

$$= \begin{pmatrix} 0,958 \\ 1,445 \\ 0,618 \end{pmatrix} : \begin{pmatrix} 0,316 \\ 0,479 \\ 0,205 \end{pmatrix}.$$

$$= \begin{pmatrix} 3,030 \\ 3,017 \\ 3,011 \end{pmatrix}.$$

- Jumlahkan hasil bagi diatas dengan banyaknya elemen yang ada. Hasil dari perhitungan ini disebut λ_{maks} .
 $= (3,030 + 3,017 + 3,011) / 3$.
 $= 3,019$.
- Hitung nilai *consistency index* (CI), seperti pada persamaan 2.5.
 $= (\lambda_{maks}-n) / (n-1)$.
 $= (3,019-3) / (3-1)$.
 $= 0,01$.
- Hitung *consistency ratio* (CR), seperti pada persamaan 2.6. Untuk $n = 3$, maka $IR = 0,58$ (Tabel 2.6).
 $= CI / IR$.
 $= 0,01 / 0,58$.
 $= 0,02$.
- Karena $CR \leq 0,10$ berarti preferensi responden adalah konsisten dan hasil perhitungan dapat dinyatakan benar.

Untuk hasil perhitungan konsistensi logis setiap elemen lainnya dapat dilihat pada Tabel 4.19-Tabel 4.22, dengan definisi kode seperti pada sub-bab 4.7.3.

Tabel 4. 19 Konsistensi Antar Kriteria

Kode	K1	K2	K3	Bobot	Konsistensi
K1	1.000	0.805	1.249	0.316	3.030
K2	1.394	1.000	2.563	0.479	3.017
K3	0.714	0.390	1.000	0.205	3.011
CI					0.01
n = 3, maka IR					0.58
CR					0.02

Tabel 4. 20 Konsistensi Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Biaya Investasi dan Produksi

Kode	A1	A2	A3	A4	Bobot	Konsistensi
A1	1.000	1.703	2.155	2.817	0.390	4.158
A2	0.587	1.000	3.493	3.055	0.347	4.152
A3	0.464	0.286	1.000	1.419	0.147	4.034

Kode	A1	A2	A3	A4	Bobot	Konsistensi
A4	0.355	0.327	0.705	1.000	0.116	4.074
CI						0.03
n = 4, maka IR						0.90
CR						0.04

Tabel 4. 21 Konsistensi Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kinerja Alternatif terhadap Dampak Lingkungan

Kode	A1	A2	A3	A4	Bobot	Konsistensi
A1	1.000	0.631	1.295	1.355	0.237	4.032
A2	1.585	1.000	2.335	3.013	0.419	4.038
A3	0.772	0.428	1.000	1.731	0.201	4.035
A4	0.738	0.332	0.578	1.000	0.143	4.014
CI						0.01
n = 4, maka IR						0.90
CR						0.01

Tabel 4. 22 Konsistensi Antar Alternatif Perbaikan berdasarkan Kemudahan dalam Pelaksanaan

Kode	A1	A2	A3	A4	Bobot	Konsistensi
A1	1.000	2.746	4.258	4.116	0.511	4.215
A2	0.364	1.000	3.915	2.750	0.280	4.182
A3	0.235	0.255	1.000	1.456	0.111	4.014
A4	0.243	0.364	0.687	1.000	0.098	4.082
CI						0.04
n = 4, maka IR						0.90
CR						0.05

Berdasarkan hasil perhitungan konsistensi logis untuk setiap elemen pada Tabel 4.19-Tabel 4.22, nilai semua $CR \leq 0,10$ berarti preferensi responden adalah konsisten dan hasil perhitungan dapat dinyatakan benar.

Maka dari itu, kesimpulan untuk analisis alternatif perbaikan dalam penelitian ini adalah kriteria pemilihan alternatif perbaikan yang memiliki nilai prioritas tertinggi adalah kriteria kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan dengan nilai sebesar 47,9%. Sedangkan, untuk alternatif perbaikan yang paling mungkin diterapkan dan memiliki nilai prioritas tertinggi adalah alternatif perbaikan penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* ke dalam unit *production separator* dengan proses kompresi dengan nilai sebesar 36,8%. Kriteria dan alternatif perbaikan dipilih oleh pihak responden dengan nilai persentase tingkat kevalidasian menggunakan pengujian rasio konsistensi (*consistency ratio*) adalah $\leq 0,10$, yang berarti preferensi responden adalah konsisten dan hasil perhitungan dapat dinyatakan benar

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kuantitas beban emisi yang dihasilkan pada masing-masing unit sumber emisi tidak bergerak yang dianalisis berbeda-beda. Semakin besar jumlah konsumsi bahan bakar dan faktor emisi yang digunakan, maka semakin besar beban emisi yang dihasilkan. Beban emisi CO₂, CH₄, dan N₂O terbesar berturut-turut sebesar 2.628.315,144 ton CO₂/hari; 47,018 ton CH₄/hari; dan 4,701 ton N₂O/hari yang dihasilkan oleh unit *hot oil heater*. Sedangkan, untuk beban emisi NO_x dan SO_x terbesar berturut-turut sebesar 0,288 ton NO_x/hari dan 0,002 ton SO_x/hari yang dihasilkan oleh unit *flare*.
2. Dampak terbesar pada proses eksplorasi dan produksi gas alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi adalah dampak pada kategori penurunan sumber daya alam (*resources*) dan penurunan kesehatan manusia (*human health*). Sedangkan proses yang memiliki dampak paling besar terhadap lingkungan adalah proses pada unit *hot oil heater* dan nilai dampak sebesar 25,22 MPt dengan nilai masing-masing kategori kerusakan sebesar 552 DALY untuk kategori *human health*, $1,27 \times 10^3$ PDF.m².year pada kategori *ecosystem quality*, dan 51,1 MJ *surplus* untuk kategori *resources*.
3. Kriteria pemilihan alternatif perbaikan yang memiliki nilai prioritas tertinggi adalah kriteria kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan dengan nilai sebesar 47,9%. Sedangkan, untuk alternatif perbaikan yang paling mungkin diterapkan dan memiliki nilai prioritas tertinggi adalah alternatif perbaikan penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* ke dalam unit *production separator* dengan proses kompresi dengan nilai sebesar 36,8%. Kriteria dan alternatif perbaikan dipilih oleh pihak responden dengan nilai persentase tingkat kevalidasian menggunakan pengujian rasio konsistensi (*consistency ratio*) adalah \leq

0,10, yang berarti preferensi responden adalah konsisten dan hasil perhitungan dapat dinyatakan benar

5.2 Saran

Dari penelitian ini dapat diberikan saran yang diharapkan bermanfaat bagi penelitian selanjutnya, antara lain sebagai berikut:

1. Dapat dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai dampak pengolahan air limbah dan TPS limbah padat B3 yang ada pada CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi dengan menggunakan metode *Life Cycle Assessment (LCA)*.
2. Dapat dilakukan perbandingan penelitian mengenai kajian dampak proses eksplorasi dan produksi gas alam terhadap lingkungan dengan menggunakan metode penilaian dampak SimaPro yang lain, seperti IMPACT 2000+, EDIP 2003, EPD 2013, dan lain-lain.
3. Dapat dilakukan perbandingan penelitian mengenai kajian dampak proses eksplorasi dan produksi gas alam terhadap lingkungan dengan menggunakan *software* analisis LCA yang lain, seperti GaBi dan openLCA..
4. Dapat dilakukan kajian lebih mendalam mengenai biaya, keefektifan, dan kelayakan penerapan alternatif perbaikan penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* ke dalam unit *production separator* dengan proses kompresi dalam mereduksi dampak lingkungan yang terjadi pada proses eksplorasi dan produksi gas alam di JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhi, A. 2010. "Pengambilan Keputusan Pemilihan Handphone Terbaik dengan Analytical Hierarchy Process (AHP)." **Dinamika Teknik**, Vol. 4 (2): 24-33.
- API. 2009. **Compendium of Green House Gas Emissions Methodologies for the Oil and Natural Gas Industry.**
- Aziz, A. 2017. **Study on Flare Excess Gs in Senoro CPP to Minimize Gas Emission and Economical Benefit.** Semarang: Universitas Diponegoro.
- Barata. 2005. "Monitoring dan Pemantauan Pencemaran Udara PT. Semen Baturaja". **Jurnal Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.**
- Bogja, A., Paolotti, L., Castelline, C. 2009. "Environmental Impact Evaluation of Conventional, Organic, and Organic-plus Poultry Production System Using Life Cycle Assessment. **World's Poultry Science**, Vol. 66.
- Braunlich, M., O. Aballain, T. Marik, P. Jockel, C.A.M. Brenninkmeijer, J. Cjappellaz, JM. Barnola, R. Mulvaney, and W.T. Sturges. 2001. "Changes in Global Atmospheric Methane Budget Over the Last Decades Inferred from 13C and D Isotopic Analysis of Antarctic firn air." **Journal of Geophysical Research**, Vol. 106 (17): 20.465-20.481.
- Cahyono, W.E. 2010. "Pengaruh Pemanasan Global Terhadap Lingkungan Bumi." **Jurnal Bidang Pengkajian Ozon dan Polusi Udara**, LAPAN : 28-31.
- Cicerone, R. J., & Oremland, R. S. 1988. "Biogeochemical Aspects of Atmospheric Methane." **Global biogeochemical cycles**, Vol. 2 (4): 299-327.
- Cita, F., dan Ariadji, T. 2010. "Sensitivitas Konsentrasi Larutan *Methyl Diethanol Amine* untuk Proses Penghilangan Gas Pengotor Hidrogen Sulfida dan Pengolahan Limbah Sulfur pada Lapangan Gas X". **Jurnal Teknik, Universitas Gajah Mada.**
- Daniel, J. 1999. **Introduction to Atmospheric Chemistry.** Princeton University Press: 25-26. ISBN 0-691-00185-5, <<http://www-as.harvard.edu/people/faculty/djj/book/>>.
- Deariska dan Sophiana, I. 2015. **Laporan Kerja Praktik Senoro**

- Gas Central Processing Plant JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi-Indonesia.** Semarang: Universitas Diponegoro.
- Departemen Kesehatan RI. 2010. **Capaian Pembangunan Kesehatan Tahun 2011.** Jakarta.
- Dewi, I. F. K. 2009. **Pemanfaatan Gas Suar Bakar untuk Produksi LPG.** Depok: Universitas Indonesia.
- Donsius dan Akmal Fuadi. 2017. **Studi Absorpsi CO₂ dalam Larutan MDEA-TEA dengan Katalis PZ.** Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Finnveden, *et al.* 2009. "Recent Developments in Life Cycle Assessment." **Journal of Environmental Management**, Vol. 91: 1-21.
- Giandadewi, D. S., Pertiwi A., Winardi D. N. 2017. "Potensi Dampak Lingkungan dalam Sistem Produksi Minyak Kelapa Sawit Mentah (Crude Palm Oil-CPO) dengan menggunakan Metode Life Cycle Assessment (Eco Indicator 99)." **Jurnal Teknik Lingkungan**, Vol. 6 (1): 1-10.
- Goedkoop, M. dan Renilde Spriensma. 2000. **The Eco Indicator 99-A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment.** Belanda: PreConsultant.
- Graedel dan Allenby. 1995. "Streamlined Life Cycle Assessment". **Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.**
- Hamonangan, S. P., Naniek U. H., Arfan B. 2017. "Evaluasi Dampak Proses Produksi dan Pengolahan Limbah Minuman Isotonik Mizone terhadap Lingkungan dengan Metode Life Cycle Assessment." **Jurnal Fakultas Teknik**, Universitas Diponegoro.
- Hermawan, F., Puti F. M., Muhamad A., R. Driejana. 2013. "Peran Lice Cycle Analysis (LCA) pada Material Konstruksi dalam Upaya Menurunkan Dampak Emisi Karbon Dioksida pada Efek Gas Rumah Kaca." **Konferensi Nasional Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret.**
- Herrmann, I. T. dan Moltesen A. 2014. "Does It Matter Which Life Cycle Assessment (LCA) Tool You Choose?-A Comparative Assessment of SimaPro and GaBi." **Journal of Cleaner Production**, Vol. 86: 163-169.
- Herprayoga, R. 2014. **Kajian Life Cycle Assessment (LCA) untuk Mereduksi Dampak Pencemaran Udara PT.**

- Semen Bosowa Maros dengan Pendekatan Analytical Hierarchy Process (AHP).** Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Hoffer, C. 1966. **Minyak Bumi**, <URL: <http://repository.usu.ac.id/bitstream/handle/123456789/64547/Chapter%2011.pdf?sequence=4&isAllowed=y>>.
- Iglesias, D. J., Angeles C., Eva B., Eduardo P, Milloa, dan Manual T. 2006. "Responses of Citrus Plant to Ozone: Leaf Biochemistry, Antioxidant Mechanisms and Lipid Peroxidation." **Plant Physiology and Biochemistry**, Vol. 44 (2-3): 125-131.
- International Energy Agency. 2010. **Electricity information**. France.
- IPCC. 2006. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 3: Mobile Combustion**. Paris, France: OECD.
- International Standards Organization 14040. 1997. **Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework**.
- Irsyaduzzaqi dan Tutuka Ariadji. 2010. "Teknik Penghilangan Gas Karbon Dioksida dan Penanganan Limbah Karbon Dioksida di Lapangan." **Jurnal Institut Teknologi Bandung**.
- Isaksen, I.S.A., T.K. Berntsen, S.B. Dalsøren, K. Eleftheratos, Y. Orsolini, B. Rognerud, F. Stordal, O.A. Søvde, C. Zerefos, and C.D. Holmes. 2014. "Atmospheric Ozone and Methane in a Changing Climate." **Atmosphere**, Vol. 5: 518-535; doi:10.3390/atmos5030518, ISSN 2073-4433.
- Jafar, N., Muh. Taufiq A.I., Sri Widodo. 2016. "Analisis *Glycol* Proses *Dehydration* Gas Stasiun G-8 Aset Tarakan Provinsi Kalimantan Timur." **Jurnal Geomine**, Vol. 4 (2): 76-79.
- Jeroen. 2002. **World's Leading LCA Software Package**. United States: PreSustainability Installation Manuals of Simapro.
- Jones, R. L. and Pyle, J. A. 1984. "Observations of CH₄ and N₂O by the Nimbus-7 SAMS: a Comparison with In Situ Data and Two Dimensional Numerical Model Calculations." **J. Geophys. Res.**, 89, 5263–5279.

- Kautzar, G. Z., Yeni S., Rahmi Y. 2015. "Analisis Dampak Lingkungan Pada Aktivitas *Supply Chain* Produk Kulit Menggunakan Metode LCA dan ANP". **Jurnal Rekayasa dan Manajemen Sistem Industri**, Vol. 3 (1): 200-211.
- Kementerian Keuangan RI. 2015. **Opsi Kebijakan Fiskal dalam Mempromosikan Penyerapan dan Penyimpanan Karbon pada Industri Minyak dan Gas di Indonesia**. Jakarta.
- Kementerian Lingkungan Hidup RI. 2012. **Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca**. Jakarta.
- Kidnay, A., dan Parrish, W. 2006. **Fundamental of Natural Gas Processing**. Boca Raton: CRC Press Taylor and Francis Group, LLC.
- Kong, S. 2014. **Life Cycle Assessment of Gas to Liquid Fuel on Energy Balance and GHG Emission**. London: Department of Civil Engineering and Geomatic Engineering.
- Kusminingrum, N. *et al.* 2008. **Polusi Udara Akibat Aktivitas Kendaraan Bermotor di Jalan Perkotaan Pulau Jawa dan Bali**. Bandung: Pusat Litbang Jalan dan Jembatan.
- Kusumawaradani, B. 2017. **Identifikasi Dampak Material pada Proses Produksi Batik Cap terhadap Lingkungan dengan menggunakan Software SimaPro**. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Lacson, J.G. 1999. **CEH Product Review: Natural Gas**. Chemical Economics Handbook. SRI International. Menlo Park, CA. Volume 4. Section 229.
- Lattanzio, R. K. 2015. **Life Cycle Greenhouse Gas Assessment of Coal and Natural Gas in The Power Sector**. Congressional Research Service.
- Lelieveld, J. O. S., Crutzen, P. J., dan Dentener, F. J. 1998. "Changing Concentration, Lifetime and Climate Forcing of Atmospheric Methane." **Tellus B**, Vol. 50 (2):128-150.
- Lopez, J., *et al.* 2018. "Hydrogen/Formic Acid Production From Natural Gas With Zero Carbon Dioxide Emissions". **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, Vol. 49: 84-93.
- Masithah, I. 2016. **Menipisnya Lapisan Ozon**. Pendidikan Biologi.

- Marsella, V dan Maharani, Y. 2012. **Simulasi Optimalisasi Regenerasi Amine menambahkan Flash Tank dan Reboiler di CO₂ Removal Plant PT. Rekayasa Industri-Pertamina EP Field Subang**. Bandung: Politeknik Negeri Bandung.
- Martono. 2015. "Fenomena Gas Rumah Kaca". **Jurnal Forum Teknologi**, Vol. 5 (2): 78-85.
- Menoufi, K. A. I., Casol A. C., Cabeza L. F. **Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment Methodologies: A State of The Art**. Lleida: Universitat de Lleida.
- Monahan, J. dan Powell J.C. 2011. "An Embodied Carbon and Energy of Modern Methods of Construction in Housing: A Case Study Using A Life Cycle Assessment Framework." **Energy and Buildings**, Vol. 43: 179-188.
- Mukono. 2005. **Technology, Sustainability, and Rural Development in Africa**. Uganda: Carol Bunga Idembe.
- Napitupulu, F. H. 2006. "Pengaruh Nilai Kalor (Heating Value) Suatu Bahan Bakar Terhadap Perencanaan Volume Ruang Bakar Ketel Uap berdasarkan Metode Penentuan Nilai Kalor Bahan Bakar yang digunakan." **Jurnal Sistem Teknik Industri**, Vol. 7 (1): 60-65.
- Ni'Matulloh. 2012. **Pengaruh CO₂Tinggi dan NO_x Berbasis Komposisi Gas Buang PLTU Terhadap Pertumbuhan Mikroalga *Chlorella Vulgaris* Dalam Sistem Kultivasi Semi Kontinu**. Depok: Universitas Indonesia.
- Pawitan, H. 1989. **Termodinamika Atmosfer**. Pusat Antar Universitas Ilmu Hayat. Bogor: IPB Press
- Peraturan Menteri RI. 2012. Jakarta. **Pedoman Perhitungan Beban Emisi Kegiatan Industri Minyak dan Gas Bumi**. Jakarta.
- Peraturan Presiden RI. 2011. **Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca**. Jakarta.
- Pramono, R. Y. dan Rubiandini, R. S. 2011. "Studi Kasus Pembangunan Mini LPG Plant dengan Memanfaatkan Flare Gas Lapangan X ditinjau dari Aspek Teknis dan Ekonomis." **Jurnal Institut Teknologi Bandung**.
- PreConsultant. 2016. **All About SimaPro 8.4**, <URL: <https://www.pre-sustainability.com/>>.

- PreConsultant. 2016. **SimaPro Database Manual** <URL: <https://www.pre-sustainability.com/>>.
- PreConsultant. 2017. **What's New in Simapro 8.4**, <URL: <https://www.pre-sustainability.com/>>.
- Primanda, H. 2017. **Life Cycle Assessment (LCA) Emisi Pada Proses Produksi Bahan Bakar Minyak (Bbm) Jenis Bensin Dengan Pendekatan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP)**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Prodjosantoso, A. K. 1992. "Globalisasi Masalah Penipisan Lapisan Ozon dan Usaha-Usaha Penanggulangannya." **Cakrawala Pendidikan**, No. 1.
- PT. Pertamina (Persero) Refinery Unit III Plaju-S.Gerong. 2016. **Laporan Perhitungan Beban Emisi PT. Pertamina (Persero) Refinery Unit III Plaju-S. Gerong**. Palembang: PT. Pertamina (Persero) Refinery Unit III Plaju-S. Gerong.
- Pujadi dan Melfa Yola. 2013. "Analisis *Sustainability Packaging* dengan Metode *Life Cycle Assessment (LCA)*". **Jurnal Teknik Industri, Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sultan Syarif Kasim Riau**.
- Purnomo, E. N. S., Sari W. S., Rini. A. 2013. "Analisis Perbandingan menggunakan Metode AHP, TOPSIS, dan AHP-TOPSIS dalam Studi Kasus Sistem Pendukung Keputusan Penerimaan Siswa Program Akselerasi." **Jurnal ITSMART**, Vol. 2 (1): 16-23. ISSN: 2.301-7.201.
- Repele, M., A. Paturska, K. Valters, G. Bazbauers. "Life Cycle Assessment of Biomethane Supply System Based on Natural Gas Infrastructure." **Argonomy Research**, Vol. 12 (3): 999-1.006.
- Riyanty, F.P.E. 2015. **Kajian Dampak Proses Pengolahan Air di IPA Siwalanpanji terhadap Lingkungan dengan Menggunakan Metode Life Cycle Assessment (LCA)**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sagala, A. 2012. **Petunjuk Teknik Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) di Sektor Industri**. Jakarta: Badan Pengkajian Kebijakan Iklim dan Mutu Industri.
- Samiaji, T. 2011. "Gas CO₂ di Wilayah Indonesia". **Jurnal Komposisi Atmosfer**, Vol.12 (2): 68-75.

- Samiaji, T. 2012. "Karakterisasi Gas N₂O (Nitrogen Oksida) di Atmosfer Indonesia." **Jurnal Lapan**, Vol. 13: 147-154.
- Sandra, C. 2013. **Pengaruh Penurunan Kualitas Udara terhadap Fungsi Paru dan Keluhan Pernafasan pada Polisi Lalu Lintas**. Surabaya: Polwitabes.
- Santoso, H. dan Ronald. 2012. "Rekayasa Nilai dan Analisis Daur Hidup Pada Model Alat Potong Kuku Dengan Limbah Kayu di CV. Piranti Works". **Jurnal Teknik Industri Universitas Diponegoro**, Vol. 7 (1): 19-26.
- Saputri, E.D. dan Putu A. W. 2013. "Analisa Pemilihan Alternatif Proyek Manajemen Air di PT X dengan Metode Multi Criteria Decision Making (MCDM)." **Prosiding Seminar Nasional Manajemen Teknologi XVIII**, ISBN: 978-682-97491-7-5.
- Sari, A.T. 2017. **Life Cycle Assessment (LCA) Emisi pada Proses Produksi Bahan Bakar Minyak (BBM) Jenis Solar dengan Pendekatan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP)**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sastrawijaya. 2009. **Pencemaran Lingkungan**. Jakarta: Rineka Cipta.
- Segala, A. 2012. **Draft Petunjuk Teknis Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) di Sektor Industri**. Jakarta: Badan Pengkajian Kebijakan Iklim dan Mutu Industri.
- Septian, A. 2016. **Gas Dehydration**. Bontang: LNG Academy 3.
- Setiawan, S. 2016. "Sistem Pendukung Keputusan Pemilihan Kendaraan Dinas menggunakan Analytical Hierarchy Process." **Bina Insani ICT Journal**, Vol. 3 (1): 122-135, ISSN: 2355-3421 (Print), ISSN: 2527-9777 (Online).
- Shaliha, R. 2014. **Laporan Kerja Praktik JOB Pertamina-Talisman Jambi Merang**. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Simamora, R. 2000. **Hukum Minyak dan Gas Bumi**. Jakarta: Djambatan.
- Sirait, M. 2016. "Potensi Dampak Lingkungan pada Proses Produksi Liquid Cristal Display (LCD) Komputer." **JEMIS**, Vol. 4 (1): 40-48.

- Sitepu, H. 2011. **Model Pengembangan Rusunawa Ramah Lingkungan Melalui Optimasi Pelaksanaan Green Construction di Batam**. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Slamet, L. 2014. "Potensi Emisi Metana (CH₄) Ke Atmosfer Akibat Banjir." **Berita Dirgantara**, Vol. 15 (1).
- Spath, P. dan Mann, M.K. 2000. **Life Cycle Assessment of A Natural Gas Combined-Cycle Power Generation System**. Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Sugiyono, A. 1990. "Proyeksi Pemanfaatan Gas Alam untuk Pembangkit Tenaga Listrik". **Jurnal BPP Teknologi**.
- Sulistiyono. 2012. "Pemanasan Global (*Global Warming*) an Hubungannya dengan Penggunaan Bahan Bakar Fosil". **Jurnal Forum Teknologi**, Vol. 2 (2): 47-56.
- Susanto, Y. A. 2008. **Perencanaan Penilaian Kinerja Karyawan Berdasarkan Metode Kompetensi Spencer di PT. Tekun Asas Sumber Makmur**. Jakarta: Binus University.
- Syukur, H. 2016. "Potensi Gas Alam di Indonesia". **Jurnal Forum Teknologi**, Vol. 6 (1): 64-73.
- Thom, M. J., Kraus J. L., dan Parker D. R. 2011. **Life Cycle Assessment as a Sustainability Management Tool: Strength, Weakness, and Other Considerations**. Wiley Periodicals.
- Turconi, R., Boldrin, A., Astrup, T. 2013. "Life Cycle Assessment (LCA) of Electricity Generation Technologies: Overview, Comparability, and Limitations". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 28: 555-565.
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 1986. 4th Edition, Vol. A17: 74-101, Weinheim (Federal Republic of Germany): VCH.
- U.S. Department of Energy. 1998. **Annual Energy Outlook 1999**. Washington, D.C.: Energy Information Administration, Office of Energy Markets and End Use
- Utina, R. 2015. "Pemanasan Global : Dampak dan Upaya Meminimalisasinya". **Jurnal Saintek Universitas Negeri Gorontalo**, Vol. 3 (3): 1-11.
- UU RI. 2001. Undang-Undang Republik Indonesia Nomer 22 Tahun 2001. **Minyak dan Gas Bumi**. Jakarta: Sekretariat Kabinet RI.

- UU RI. 2009. Undang-Undang Republik Indonesia Nomer 13 Tahun 2009. **Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Minyak dan Gas Bumi.** Jakarta: Sekretariat Kabinet RI.
- Venkataramanan, M. dan Smitha. 2011. **Causes and Effects of Global Warming.** India: Department of Economics, D.G. Vaishnav College.
- Wahyuni, P. dan Made. S. 2011. "Global Warming: Ancaman Nyata Sektor Pertanian dan Upaya Mengatasi Kadar CO₂ Atmosfer." **Jurnal Sains dan Teknologi**, Vol. 11 (1).
- Warneck. 1988. **In Climate Science of Methane, Chapter II.** Inggris: University of Oxford.
- Widowati dan Sutoyo. 2009. "Upaya Mengurangi Penipisan Lapisan Ozon." **Busana Sains**, Vol. 9 (2): 141-146.
- You, F. *et al.* 2011. "Carbon Emissions in The Life Cycle of Urban Building System in China-A Case Study of Residential Buildings." **Ecological Complexity**, Vol. 8: 201-212.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

LAMPIRAN I

Nilai Kalor berdasarkan Bahan Bakar (API Compendium 2009)

Tabel L.I. 1 Nilai Kalor berdasarkan Bahan Bakar

Bahan Bakar	Kepadatan yang Khas		Nilai Kalor yang Lebih Tinggi		Nilai Kalor yang Lebih Rendah		Karbon, % by wt
Asetilen	0,0686 lb/ft ^{3a}	1,10 kg/m ³	1,47x10 ³ Btu/ft ³	5,9x10 ⁷ J/m ³	1,33x10 ³ Btu/ft ³	4,97x10 ⁷ J/m ³	92,3
Aspal dan Minyak Jalan	8,61 lb/gal	1032,09 kg/m ³	6,64x10 ⁶ Btu/bbl	4,40x10 ⁷ J/m ³	6,30x10 ⁶ Btu/bbl	4,18x10 ¹⁰ J/m ³	83,47
Gas Aviasi	5,89 lb/gal	705,74 kg/m ³	5,05x10 ⁶ Btu/bbl	3,35 x10 ⁷ J/m ³	4,80x10 ⁶ Btu/bbl	3,18x10 ¹⁰ J/m ³	85,00
Butana (cairan)	4,86 lb/gal	582,93 kg/m ³	4,33x10 ⁶ Btu/bbl	2,87 x10 ⁷ J/m ³	4,11x10 ⁶ Btu/bbl	2,73x10 ¹⁰ J/m ³	82,8
Antrasit, Batubara	No data	No data	1,13 x10 ⁶ Btu/bbl	2,63 x10 ⁷ J/m ³	1,07 x10 ⁴ Btu/bbl	2,49x10 ⁷ J/kg	No data

Bahan Bakar	Kepadatan yang Khas		Nilai Kalor yang Lebih Tinggi		Nilai Kalor yang Lebih Rendah		Karbon, % by wt
	No data	No data	1,19 x10 ⁶ Btu/bbl	2,78 x10 ⁷ J/m ³	1,13x10 ⁴ Btu/bbl	2,64x10 ¹⁰ J/m ³	
Batubara, Beraspal	No data	No data	1,19 x10 ⁶ Btu/bbl	2,78 x10 ⁷ J/m ³	1,13x10 ⁴ Btu/bbl	2,64x10 ¹⁰ J/m ³	No data
Minyak Mentah	7,29 lb/gal	873,46 kg/m ³	5,80 x10 ⁶ Btu/bbl	3,87 x10 ⁷ J/m ³	5,51x10 ⁶ Btu/bbl	3,66x10 ¹⁰ J/m ³	84,8
Minyak Sulingan (Diesel)	7,07 lb/gal	847,31 kg/m ³	5,83 x10 ⁶ Btu/bbl	1,94 x10 ⁷ J/m ³	5,53x10 ⁶ Btu/bbl	3,67x10 ¹⁰ J/m ³	86,3
Etana (cairan)	3,11 lb/gal	372,62 kg/m ³	2,92 x10 ⁶ Btu/bbl	3,99 x10 ⁷ J/m ³	2,77x10 ⁶ Btu/bbl	1,84x10 ¹⁰ J/m ³	80,0
Minyak Bahan Bakar #4	7,59 lb/gal	909,48 kg/m ³	6,01 x10 ⁶ Btu/bbl	2,76 x10 ⁷ J/m ³	5,71x10 ⁶ Btu/bbl	3,79x10 ¹⁰ J/m ³	86,4
Iso butana	4,69 lb/gal	561,59 kg/m ³	4,16 x10 ⁶ Btu/bbl	2,76 x10 ⁷ J/m ³	3,95x10 ⁶ Btu/bbl	2,62x10 ¹⁰ J/m ³	82,8
Bahan Bakar Jet	6,81 lb/gal	815,56 kg/m ³	5,67 x10 ⁶ Btu/bbl	3,76 x10 ⁷ J/m ³	5,39x10 ⁶ Btu/bbl	3,57x10 ¹⁰ J/m ³	86,30

Bahan Bakar	Kepadatan yang Khas		Nilai Kalor yang Lebih Tinggi		Nilai Kalor yang Lebih Rendah		Karbon, % by wt
Minyak Tanah	6,83 lb/gal	818,39 kg/m ³	5,67 x10 ⁶ Btu/bbl	3,76 x10 ⁷ J/m ³	5,39x10 ⁶ Btu/bbl	3,57x10 ¹⁰ J/m ³	86,01
Batubara Muda	No data	No data	6,43 x10 ⁶ Btu/bbl	1,50 x10 ⁷ J/kg	6,11x10 ⁶ Btu/bbl	1,42x10 ⁷ J/kg	No data
Lubrikan	7,52 lb/gal	900,70 kg/m ³	6,07 x10 ⁶ Btu/bbl	4,02x10 ⁷ J/m ³	5,76x10 ⁶ Btu/bbl	3,82x10 ¹⁰ J/m ³	85,80
Aneka Ragam Produk	7,29 lb/gal	873,46 kg/m ³	5,80 x10 ⁶ Btu/bbl	3,85x10 ⁷ J/m ³	5,51x10 ⁶ Btu/bbl	3,65x10 ¹⁰ J/m ³	85,49
Bensin Motor	6,20 lb/gal	742,39 kg/m ³	5,25 x10 ⁶ Btu/bbl	3,49x10 ⁷ J/m ³	4,99x10 ⁶ Btu/bbl	3,31x10 ¹⁰ J/m ³	86,60
Gas Alam (diolah)	0,042 lb/ft ³	0,6728 kg/m ³	1,020 Btu/ft ³ 1,004 Btu/ft ³ 1,027 Btu/ft ³	3,80x10 ⁷ J/m ³ 3,74x10 ⁷ J/m ^{3h} 3,83x10 ⁷	918 Btu/fft ³ 903 Btu/fft ³ 924 Btu/fft ³	3,42x10 ⁷ J/m ³ 3,37x10 ⁷ J/m ³ 3,44x10 ⁷	76wt% C

Bahan Bakar	Kepadatan yang Khas		Nilai Kalor yang Lebih Tinggi		Nilai Kalor yang Lebih Rendah		Karbon, % by wt
				J/m ³		7 J/m ³	
Gas Alam (mentah/tidak diolah)			1,235 Btu/ft ³	4,60x10 ⁷ J/m ³ h	1.111 Btu/fft ³	4,14 x10 ⁷ J/m ³	
Bensin Alamif	5,54 lb/gal	663,70 kg/m ³	4,62x10 ⁶ Btu/bbl	3,07 x10 ⁷ J/m ³	4,39x10 ⁶ Btu/bbl	2,91x10 ¹⁰ J/m ³	83,70
Pentana Plus	5,54 lb/gal	663,70 kg/m ³	4,62x10 ⁶ Btu/bbl	3,07 x10 ⁷ J/m ³	4,39x10 ⁶ Btu/bbl	2,91x10 ¹⁰ J/m ³	83,70
Bahan Baku Petrokimia	5,95 lb/gal	712,49 kg/m ³	5,25x10 ⁶ Btu/bbl	3,48 x10 ⁷ J/m ³	4,99x10 ⁶ Btu/bbl	3,31x10 ¹⁰ J/m ³	84,11
Kokas Minyak Bumi	No data	No data	6,02x10 ⁶ Btu/bbl	4,00 x10 ⁷ J/m ³	5,72x10 ⁶ Btu/bbl	3,80x10 ¹⁰ J/m ³	92,28
Minyak Lilin	6,76 lb/gal	809,50 kg/m ³	5,54x10 ⁶ Btu/bbl	3,67x10 ⁷ J/m ³	5,26x10 ⁶ Btu/bbl	3,49x10 ¹⁰ J/m ³	85,29

Bahan Bakar	Kepadatan yang Khas		Nilai Kalor yang Lebih Tinggi		Nilai Kalor yang Lebih Rendah		Karbon, % by wt
Propana (gas)	0,12 lb/ft ³	1,90 kg/m ³	2.516,1 x10 ⁶ Btu/bbl	9,37x10 ⁷ J/m ³	2.314,9 Btu/ft ³	8,63x10 ¹⁰ J/m ³	81,8
Propana (cairan)	4,22 lb/gal	505,61 kg/m ³	3,82 x10 ⁶ Btu/bbl	2,54x10 ⁷ J/m ³	3,63x10 ⁶ Btu/bbl	2,41x10 ¹⁰ J/m ³	81,8
Sisa Minyak #5	7,93 lb/gal	950,22 kg/m ³	6,30 x10 ⁶ Btu/bbl	4,18x10 ¹⁰ 0 J/m ^{3d}	5,99x10 ⁶ Btu/bbl	3,97x10 ¹⁰ J/m ³	88,7
Sisa Minyak #6	8,29 lb/gal	992,8 kg/m ³	6,29x10 ⁶ Btu/bbl	4,17x10 ¹⁰ 0 J/m ³	5,97x10 ⁶ Btu/bbl	3,96x10 ¹⁰ J/m ³	85,68
Nafta Khusus	6,46 lb/gal	774,49 kg/m ³	5,25x10 ⁶ Btu/bbl	3,48x10 ¹⁰ 0 J/m ³	4,99x10 ⁶ Btu/bbl	3,31x10 ¹⁰ J/m ³	84,76
Still gas	No data	No data	6,00x10 ⁶ Btu/bbl	3,98x10 ¹⁰ 0 J/m ³	5,70x10 ⁶ Btu/bbl	3,78x10 ¹⁰ J/m ³	No data
Minyak yang belum selesai	7,29 lb/gal	873,46 kg/m ³	5,83x10 ⁶ Btu/bbl	3,87x10 ¹⁰ 0 J/m ³	5,53x10 ⁶ Btu/bbl	3,67x10 ¹⁰ J/m ³	85,49

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

LAMPIRAN II

KUESIONER KEGIATAN EKSPLORASI DAN PRODUKSI GAS ALAM

Perkenalkan saya, Nadia Andistiara, mahasiswi S1 Departemen Teknik Lingkungan, ITS, Surabaya. Saat ini saya sedang melakukan penelitian mengenai Kajian Dampak Eksplorasi dan Produksi Gas Alam terhadap Lingkungan dengan menggunakan Metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Keluaran dari penelitian ini adalah alternatif perbaikan yang dapat digunakan untuk mereduksi dampak terhadap lingkungan dari proses pengolahan gas alam di JOB Tomori. Saya memohon kesediaan Bapak/Ibu sebagai responden untuk mengisi kuesioner terkait dengan pilihan alternatif yang sesuai untuk diterapkan di JOB Tomori. Apabila membutuhkan informasi lebih lanjut, maka dapat menghubungi saya melalui email (nadia.andistiara@gmail.com) atau di No. HP (087873762738). Atas bantuan Bapak/Ibu, saya ucapkan terima kasih.

JOB Tomori merupakan salah satu industri pengolahan gas alam dengan proses utama pada *Central Processing Plant* yang mencakup *gas gathering and production separation, gas treatment process, condensate stabilization system, produced water system*, dan *Acid Gas Conversion Unit* (AGCU) dalam *Wet Sulfuric Acid (WSA) facilities*. Sebagai penunjang operasional proses utama, terdapat unit *Gas Turbine Generator* (GTG) dan *hot oil heater* yang digunakan sebagai penghasil energi listrik dan energi panas. Selain itu, terdapat unit *flare* yang digunakan untuk membakar gas alam yang tersisa dari kegiatan produksi untuk alasan keamanan.

Proses eksplorasi dan produksi gas alam yang dilakukan oleh JOB Tomori menimbulkan dampak terhadap lingkungan. Penilaian dampak terhadap lingkungan dilakukan dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). LCA adalah proses objektif untuk menilai dampak lingkungan dari produk, proses, atau aktivitas. Penilaian tersebut dilakukan dengan mengidentifikasi sumber energi, penggunaan *raw material*, dan pembuangan pada

lingkungan. Selain itu, metode tersebut dapat mengevaluasi dan menerapkan kemungkinan perbaikan lingkungan.

Berdasarkan hasil analisis LCA, diketahui bahwa proses utama dan proses pada unit *flare* memberikan dampak yang sangat besar terhadap kerusakan *resources* (sumber daya) yang disebabkan oleh penggunaan gas alam pada proses tersebut. Sedangkan proses pada unit GTG dan *hot oil heater* memberikan dampak yang sangat besar terhadap dampak perubahan iklim yang berdampak pada kesehatan manusia. Dampak tersebut ditimbulkan dari emisi yang dilepas oleh unit GTG dan *hot oil heater*.

Oleh karena itu, diperlukan suatu alternatif perbaikan untuk mereduksi dampak lingkungan yang timbul akibat proses eksplorasi dan pengolahan gas alam. Adapun tujuan dari kuesioner ini adalah sebagai dasar analisis alternatif yang paling sesuai dan mungkin diterapkan di JOB Tomori. Pengolahan kuesioner ini menggunakan metode AHP (*Analytical Hierarchy Process*). Beberapa alternatif perbaikan yang direncanakan berdasarkan analisis dampak dengan metode LCA dapat dilihat pada Tabel L.II.2.

I. Identitas Responden

Nama :
Jabatan :

II. Petunjuk Pengisian

Dalam kuesioner ini terdapat 2 bagian yang harus diisi. Pada bagian pertama terdapat perbandingan kriteria, yang mana hasilnya nanti digunakan sebagai dasar dalam pemilihan alternatif perbaikan yang paling memungkinkan untuk diterapkan. Sedangkan, pada bagian kedua terdapat perbandingan alternatif perbaikan yang akan dipilih. Responden diminta untuk memberikan skala prioritas, baik pada perbandingan kriteria maupun alternatif, dengan memberikan tanda centang pada kolom skala. Dalam kolom skala terdapat rentang angka 1 sampai 9 ke kiri dan ke kanan yang menunjukkan arah prioritas. Semakin tinggi angka skala yang dipilih, berarti tingkat prioritas kriteria maupun alternatif tersebut juga semakin besar. Berikut ini

adalah definisi angka skala yang digunakan dan contoh pemilihan prioritas yang dapat dilakukan oleh responden:

Definisi angka skala:

- 1 : Kedua kriteria sama penting.
- 3 : Kriteria yang dipilih sedikit lebih penting dibanding kan kriteria pembandingnya.
- 5 : Kriteria yang dipilih lebih penting dibandingkan kriteria pembandingnya.
- 7 : Kriteria yang dipilih sangat lebih penting dibanding kan kriteria pembandingnya.
- 9 : Kriteria yang dipilih mutlak lebih penting dibanding kan kriteria pembandingnya.
- 2, 4, 6, 8 : Nilai tengah.

Contoh pemilihan prioritas yang dapat dilakukan oleh responden dapat dilihat pada Tabel L.II.1.

Tabel L.II. 1 Contoh Petunjuk Pengisian Penilaian

Krite ria	Skala Prioritas																	Krite ria
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
A							√											B
Keterangan:																		



Dengan memberi tanda centang pada skala 3 ke arah kriteria A, berarti kriteria A sedikit lebih penting dibandingkan dengan kriteria B. Responden juga diharapkan memberikan keterangan apabila ingin memberikan justifikasi penilaian pada kolom keterangan. Keterangan dapat didasarkan pada kondisi eksisting proses penggunaan atau keterbatasan yang dimiliki oleh pengelola dalam mengelola.

III. Pertanyaan Kuesioner

1. Perbandingan Kriteria Pemilihan Alternatif.

Pada perbandingan kriteria, terdapat 3 kriteria yang akan dibandingkan, yaitu biaya investasi dan produksi, kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan, dan kemudahan dalam pelaksanaan. Hasil dari perbandingan ini menunjukkan kriteria

mana yang menjadi prioritas responden sebagai dasar pemilihan alternatif nantinya. Berikut ini adalah penjelasan secara singkat untuk setiap kriteria yang dibandingkan:

- Berdasarkan biaya investasi dan produksi.
Kriteria biaya investasi merupakan biaya yang dikeluarkan untuk pembelian mesin ataupun peralatan baru, penambahan tenaga kerja, dan biaya pelatihan untuk menambah wawasan tenaga kerja dalam pengoperasian alternatif yang dipilih. Sedangkan, biaya produksi merupakan biaya yang dikeluarkan untuk semua bahan yang digunakan pada operasional alternatif, biaya perawatan alternatif, serta biaya perbaikan alternatif.
- Berdasarkan kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan.
Kriteria kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan merupakan kriteria yang menunjukkan seberapa besar pengaruh alternatif yang dipilih terhadap optimalisasi reduksi dampak dari hasil analisis LCA.
- Berdasarkan kemudahan dalam pelaksanaan.
Kriteria kemudahan dalam pelaksanaan merupakan kriteria yang menunjukkan tingkat kesulitan dalam operasional alternatif yang dipilih terbilang rendah.

2. Perbandingan Alternatif Perbaikan.

Penentuan skala prioritas dalam setiap alternatif perbaikan dilakukan berdasarkan kriteria yang ada. Pada perbandingan alternatif, terdapat 4 alternatif pada masing-masing kriteria, yaitu:

- Penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* pada AGCU.
- Penggunaan kembali *LP Fuel Gas excess* ke dalam unit *Production Separator* dengan proses kompresi.
- Pembangunan *Mini LPG Plant* dengan memanfaatkan gas suar bakar.
- Pemanfaatan mikroalga *Chlorella Vulgaris* untuk mereduksi CO₂ serta polutan lainnya.

Pemilihan kriteria yang lebih penting dalam kegiatan eksplorasi dan produksi gas alam dapat dilakukan pada Tabel L.II.3, sedangkan untuk pemilihan alternatif perbaikan dapat dilakukan pada Tabel L.II.4-Tabel L.II.6.

Tabel L.II. 2 Alternatif Perbaikan yang direncanakan

No.	Alternatif	Rincian Kegiatan	Fungsi
1.	Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU (*).	<p>LP fuel gas excess yang hendak dibuang ke unit flare dialirkan kembali ke dalam unit combustor pada sistem AGCU. Penambahan volume LP fuel yang digunakan pada unit combustor akan meningkatkan laju alir gas outlet unit tersebut. Pada prosesnya, gas outlet dari unit combustor akan dialirkan menuju unit SO₂ converter. Namun sebelum masuk unit tersebut, suhu gas harus diturunkan terlebih dengan cara mengontakan air dengan gas secara tidak langsung pada unit waste heat boiler, yang mana air tersebut akan berubah menjadi steam karena menerima panas. Dikarenakan laju gas outlet pada unit combustor meningkat, maka volume air yang dibutuhkan juga semakin banyak, sehingga steam yang dihasilkan akan lebih besar.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • LP fuel yang hendak dibakar pada unit flare akan menurun, sehingga dampak resources pada unit flare juga akan menurun. Hal tersebut juga berpengaruh pada dampak human health (climate change) pada unit tersebut, yang mana semakin sedikit hidrokarbon yang dibakar maka emisi yang dihasilkan semakin menurun. • Steam yang dihasilkan pada AGCU akan meningkat, sehingga energi listrik yang dihasilkan pada unit Steam Turbine Generator (STG) juga akan meningkat. Hal tersebut akan berpengaruh pada beban kerja dari unit GTG (Beban kerja unit GTG tidak besar). • Penurunan beban kerja dari unit GTG akan mempengaruhi penggunaan

No.	Alternatif	Rincian Kegiatan	Fungsi
			<p><i>sales gas</i> yang harus di <i>tapping</i> ke unit GTG, yang mana terjadi penurunan penggunaan gas sebagai bahan bakar unit GTG. Hal tersebut akan mempengaruhi jumlah emisi yang dihasilkan.</p>
2.	<p>Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> ke dalam unit <i>Production Separator</i> dengan proses kompresi (*).</p>	<p><i>LP fuel gas excess</i> dari <i>LP fuel header</i> memiliki tekanan sebesar 100 psig, sedangkan tekanan gas yang masuk pada unit <i>production separator</i> adalah 1000 psig. Maka dari itu, <i>LP fuel gas excess</i> yang ingin dialirkan kembali pada unit <i>production separator</i> harus dinaikan tekanan gas nya terlebih dahulu dari 100 psig menjadi 1000 psig. Untuk menaikkan tekanan gas tersebut maka dibutuhkan unit kompresor. Dikarenakan perbandingan tekanan keluar dengan tekanan masuk melebihi 4, maka dibutuhkan unit kompresor yang disusun dalam 2 tahap. Diantara kompresor tersebut dibuat <i>intercooler</i> untuk menurunkan suhu gas. Hal tersebut dikarenakan proses menaikkan tekanan akan menyebabkan suhu gas juga ikut</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>LP fuel</i> yang hendak dibakar pada unit <i>flare</i> akan menurun, sehingga dampak <i>resources</i> pada unit <i>flare</i> juga akan menurun. Hal tersebut juga berpengaruh pada dampak <i>human health (climate change)</i> pada unit tersebut, yang mana semakin sedikit hidrokarbon yang dibakar maka emisi yang dihasilkan semakin menurun. • Penggunaan kembali <i>LP fuel gas excess</i> pada proses utama akan meningkatkan jumlah <i>sales gas</i> yang dihasilkan. • Memperpanjang umur sumur

No.	Alternatif	Rincian Kegiatan	Fungsi
		meningkat, sedangkan peningkatan suhu yang terlalu tinggi sangat dihindari dikarenakan dapat menurunkan efisiensi kompresor. Sebelum <i>LP fuel gas excess</i> dialirkan ke unit kompresor, terdapat unit <i>KO drum</i> untuk memisahkan kandungan <i>liquid</i> yang masih terikat pada gas. Sehingga, tidak terdapat <i>liquid</i> yang masuk pada unit kompresor.	produksi.
3.	Pembangunan <i>Mini LPG Plant</i> dengan memanfaatkan gas suar bakar (**).	Dalam produksi LPG dari gas suar bakar (<i>flare</i>) harus mempertimbangkan laju alir gas umpan yang akan diproses, yaitu minimum 1 MMscfd. Awalnya gas dimampatkan dengan kompresor, kemudian didinginkan hingga terbentuk aliran dua fasa sebelum nantinya masuk ke unit <i>separator</i> . Pada unit <i>separator</i> , fluida dipisahkan antara gas dan <i>liquid</i> . <i>Liquid</i> yang keluar akan dialirkan ke <i>Demetanizer-Deetanizer</i> . Sedangkan gas yang dihasilkan akan keluar menuju <i>refrigerant</i> untuk didinginkan hingga terbentuk <i>liquid</i> , yang nantinya aliran dua fasa ini dimasukkan ke dalam <i>Demetanizer-Deetanizer</i> dari	<ul style="list-style-type: none"> • <i>LP fuel</i> yang hendak dibakar pada unit <i>flare</i> akan menurun, sehingga dampak <i>resources</i> pada unit <i>flare</i> juga akan menurun. Hal tersebut juga berpengaruh pada dampak <i>human health (climate change)</i> pada unit tersebut, yang mana semakin sedikit hidrokarbon yang dibakar maka emisi yang dihasilkan semakin menurun. • Dihasilkan LPG yang dapat digunakan sebagai bahan bakar, sehingga tidak

No.	Alternatif	Rincian Kegiatan	Fungsi
		<p>bagian atas. <i>Liquid</i> yang terproduksi pada <i>Demetanizer-Deetanizer</i> adalah <i>liquid</i> dengan komponen C_{3+} yang nantinya akan masuk ke fraksinasi <i>Depropanizer-Debutanizer</i>. Pada unit <i>Depropanizer-Debutanizer</i> akan terbentuk <i>liquid</i> kondensat yang akan dialirkan menuju tanki kondensat dan gas C_3 serta C_4 yang terbentuk akan didinginkan dan dimasukkan ke dalam <i>flash tank</i> untuk diambil fasa <i>liquid</i>nya. <i>Liquid</i> yang terbentuk kemudian akan disimpan pada tanki LPG.</p>	<p>terdapat LP <i>fuel</i> sisa yang harus dibuang/dibakar pada unit <i>flare</i>.</p>
4.	<p>Pemanfaatan mikroalga <i>Chlorella Vulgaris</i> untuk mereduksi CO_2 serta polutan lainnya (***)</p>	<p>Emisi gas yang dihasilkan dari unit-unit pembakaran dialirkan ke dalam <i>photobioractor</i> yang telah diisi dengan air tawar dan mikroalga <i>Chlorella Vulgaris</i>.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mereduksi emisi gas CO_2 dan polutan lainnya seperti NO_x yang dihasilkan pada unit-unit pembakaran. • Mikroalga <i>Chlorella Vulgaris</i> dapat dipanen sebagai bahan baku <i>biofuel</i> yang prosesnya memiliki efisiensi 40% lebih tinggi dibandingkan dengan membuat <i>biofuel</i> dari bahan baku minyak kelapa sawit (CPO).

Sumber : (*) : Aziz, 2017.
 (**) : Pramono dan Rubiandini, 2011.
 (***) : Ni'matulloh, 2012.

Tabel L.II. 3 Pemilihan Kriteria yang Lebih Penting dalam Kegiatan Eksplorasi dan Produksi Gas Alam

Kriteria	Skala Prioritas																Kriteria	
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8		9
Biaya investasi dan produksi																		Kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan
Biaya investasi dan produksi																		Kemudahan dalam pelaksanaan
Kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan																		Kemudahan dalam pelaksanaan
Keterangan:																		

Tabel L.II. 4 Pemilihan Alternatif Perbaikan berdasarkan Biaya Investasi dan Produksi

Alternatif	Skala Prioritas																	Alternatif
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> pada AGCU																		Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> ke dalam unit <i>Production Separator</i> dengan proses kompresi
Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> pada AGCU																		Pembangunan <i>Mini LPG Plant</i> dengan memanfaatkan gas suar bakar
Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> pada AGCU																		Pemanfaatan mikroalga <i>Chlorella Vulgaris</i> untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya
Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> ke dalam unit																		Pembangunan <i>Mini LPG Plant</i> dengan memanfaatkan gas suar bakar

Alternatif	Skala Prioritas																Alternatif		
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8		9	
<i>Production Separator</i> dengan proses kompresi																			
Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> ke dalam unit <i>Production Separator</i> dengan proses kompresi																			Pemanfaatan mikroalga <i>Chlorella Vulgaris</i> untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya
Pembangunan <i>Mini LPG Plant</i> dengan memanfaatkan gas suar bakar																			Pemanfaatan mikroalga <i>Chlorella Vulgaris</i> untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya
Keterangan:																			

Tabel L.II. 5 Pemilihan Alternatif Perbaikan berdasarkan Kinerja Alternatif terhadap Dampak Lingkungan

Alternatif	Skala Prioritas																	Alternatif
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> pada AGCU																		Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> ke dalam unit <i>Production Separator</i> dengan proses kompresi
Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> pada AGCU																		Pembangunan <i>Mini LPG Plant</i> dengan memanfaatkan gas suar bakar
Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> pada AGCU																		Pemanfaatan mikroalga <i>Chlorella Vulgaris</i> untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya
Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> ke dalam unit																		Pembangunan <i>Mini LPG Plant</i> dengan memanfaatkan gas suar bakar

Alternatif	Skala Prioritas																Alternatif		
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8		9	
<i>Production Separator</i> dengan proses kompresi																			
Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> ke dalam unit <i>Production Separator</i> dengan proses kompresi																			Pemanfaatan mikroalga <i>Chlorella Vulgaris</i> untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya
Pembangunan <i>Mini LPG Plant</i> dengan memanfaatkan gas suar bakar																			Pemanfaatan mikroalga <i>Chlorella Vulgaris</i> untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya
Keterangan:																			

Tabel L.II. 6 Pemilihan Alternatif Perbaikan berdasarkan Kemudahan dalam Pelaksanaan

Alternatif	Skala Prioritas																Alternatif	
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8		9
Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> pada AGCU																		Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> ke dalam unit <i>Production Separator</i> dengan proses kompresi
Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> pada AGCU																		Pembangunan <i>Mini LPG Plant</i> dengan memanfaatkan gas suar bakar
Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> pada AGCU																		Pemanfaatan mikroalga <i>Chlorella Vulgaris</i> untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya
Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> ke dalam unit																		Pembangunan <i>Mini LPG Plant</i> dengan memanfaatkan gas suar bakar

Alternatif	Skala Prioritas																Alternatif		
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8		9	
<i>Production Separator</i> dengan proses kompresi																			
Penggunaan kembali <i>LP Fuel Gas excess</i> ke dalam unit <i>Production Separator</i> dengan proses kompresi																			Pemanfaatan mikroalga <i>Chlorella Vulgaris</i> untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya
Pembangunan <i>Mini LPG Plant</i> dengan memanfaatkan gas suar bakar																			Pemanfaatan mikroalga <i>Chlorella Vulgaris</i> untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya
Keterangan:																			

Saran:

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

LAMPIRAN III

HASIL KUESIONER KEGIATAN EKSPLORASI DAN PRODUKSI GAS ALAM

Responden yang diambil pada kuesioner ini adalah sebagai berikut:

1. Joko Lelono (PJS. *production operation superintendent*).
2. Soekarso Bodieono (*maintenance superintendent*).
3. Lalu Aman Manfaluthy (*production operation supervisor*).
4. Aditya Bagoes Nugroho (*production planner*).
5. Imron Maulana (*mechanical supervisor*).
6. Dwi Mardani (*senior operator*).
7. Nur Widiatmoko (*senior operator*).
8. Arie Siswanto (*field operator*).
9. Stefanus Christian (*field operator*).
10. Sigit Ismaya (*control room operator*).
11. Tangkas Manuturi Siahaan (*QHSE manager*).
12. Nuke Susanti (*environmental section head*).
13. Caesoria Kinanti Purnama (*environmental engineer*).
14. Muhamad Fatoni (*area HSE superintendent*).

Petunjuk pembacaan angka perbandingan berpasangan pada rekapan hasil kuesioner ini dapat dilihat pada Tabel L.III.1.

Tabel L.III. 1 Petunjuk Pembacaan Hasil Kuesioner

Perbandingan Berpasangan Antar Kriteria		Responden
Biaya investasi dan produksi	Kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan	5
Biaya investasi dan produksi	Kemudahan dalam pelaksanaan	1/7

Pada contoh hasil kuesioner perbandingan berpasangan antar kriteria yang dapat dilihat pada Tabel L.III.1, perbandingan nilai kriteria biaya investasi dan produksi dengan kriteria kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan memiliki nilai 5, yang mana artinya nilai kriteria biaya investasi dan produksi memiliki nilai 5 kali (lebih penting) dibandingkan kriteria kinerja alternatif

terhadap dampak lingkungan. Sebaliknya, pada perbandingan kriteria biaya investasi dan produksi dengan kriteria kemudahan dalam pelaksanaan memiliki nilai 1/7, yang mana artinya nilai kriteria kemudahan dalam pelaksanaan memiliki nilai 7 kali (sangat penting) dibandingkan kriteria biaya investasi dan produksi.

Untuk hasil data kuesioner perbandingan berpasangan antar kriteria dapat dilihat pada Tabel L.III.2, sedangkan untuk hasil data kuesioner perbandingan berpasangan antar alternatif perbaikan dapat dilihat pada Tabel L.III.3-L.III.5.

Tabel L.III. 2 Hasil Kuesioner Perbandingan Berpasangan Antar Kriteria

Perbandingan Berpasangan Antar Kriteria		Responden						
		1	2	3	4	5	6	7
Biaya investasi dan produksi	Kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan	1/2	1/3	1/6	4	1	1/7	1
Biaya investasi dan produksi	Kemudahan dalam pelaksanaan	8	1/3	1	7	3	1/2	1
Kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan	Kemudahan dalam pelaksanaan	9	1/3	7	1/3	3	6	2
Perbandingan Berpasangan Antar Kriteria		Responden						
		8	9	10	11	12	13	14
Biaya investasi dan produksi	Kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan	1	1	7	1	1	1/7	3
Biaya investasi dan produksi	Kemudahan dalam pelaksanaan	1/5	1/3	7	1	3	1/7	4
Kinerja alternatif terhadap dampak lingkungan	Kemudahan dalam pelaksanaan	5	4	5	1	1	7	3

Tabel L.III. 3 Hasil Kuesioner Perbandingan Berpasangan Antar Alternatif berdasarkan Biaya Investasi dan Produksi

Perbandingan Berpasangan Antar Alternatif (Berdasarkan Biaya Investasi dan Produksi)		Responden						
		1	2	3	4	5	6	7
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	1/8	5	7	4	5	1/4	7
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	1/8	9	1	5	3	3	7
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Pemanfaatan mikroalga Chlorella Vulgaris untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya	4	1/3	1	3	3	3	7
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	1	5	7	5	3	5	3
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	Pemanfaatan mikroalga Chlorella Vulgaris untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya	8	1/5	7	3	3	3	3
Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	Pemanfaatan mikroalga Chlorella Vulgaris untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya	8	1/5	1	1/3	1	1	3

Perbandingan Berpasangan Antar Alternatif (Berdasarkan Biaya Investasi dan Produksi)		Responden						
		8	9	10	11	12	13	14
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	1/3	3	5	3	1	3	1/4
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	1/5	5	5	5	3	7	1/4
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Pemanfaatan mikroalga Chlorella Vulgaris untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya	1	5	5	5	3	7	3
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	3	3	3	3	3	7	3
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	Pemanfaatan mikroalga Chlorella Vulgaris untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya	3	3	3	3	3	7	4
Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	Pemanfaatan mikroalga Chlorella Vulgaris untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya	3	3	3	1/3	1/3	7	4

Tabel L.III. 4 Hasil Kuesioner Perbandingan Berpasangan Antar Alternatif berdasarkan Kinerja Alternatif

Perbandingan Berpasangan Antar Alternatif (Berdasarkan Kinerja Alternatif terhadap Dampak Lingkungan)		Responden						
		1	2	3	4	5	6	7
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	1/5	1/5	1/7	1/3	1	1/3	7
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	1/5	1/5	1	5	1/3	1	7
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Pemanfaatan mikroalga Chlorella Vulgaris untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya	2	1/5	1	5	1	3	1/3
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	1	1/5	7	5	1	3	7
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	Pemanfaatan mikroalga Chlorella Vulgaris untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya	2	5	7	2	1	4	3
Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	Pemanfaatan mikroalga Chlorella Vulgaris untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya	2	5	1	2	1/3	2	3

Perbandingan Berpasangan Antar Alternatif (Berdasarkan Kinerja Alternatif terhadap Dampak Lingkungan)		Responden						
		8	9	10	11	12	13	14
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	1/7	5	1/5	3	1	1	1/3
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	1/7	5	1/3	5	3	3	3
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Pemanfaatan mikroalga Chlorella Vulgaris untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya	1/5	5	1/3	5	1	7	3
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	1	3	3	3	3	3	4
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	Pemanfaatan mikroalga Chlorella Vulgaris untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya	3	3	3	4	1	7	4
Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	Pemanfaatan mikroalga Chlorella Vulgaris untuk mereduksi CO ₂ serta polutan lainnya	3	3	3	1/3	1	3	2

Tabel L.III. 5 Hasil Kuesioner Perbandingan Berpasangan Antar Alternatif berdasarkan Kemudahan Pelaksanaan

Perbandingan Berpasangan Antar Alternatif (Berdasarkan Kemudahan dalam Pelaksanaan)		Responden						
		1	2	3	4	5	6	7
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	1/4	5	7	2	3	8	7
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	1/4	9	7	5	3	8	7
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Pemanfaatan mikroalga ChlorellaVulgaris untuk mereduksi CO2 serta polutan lainnya	5	1/5	7	5	3	8	7
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	1	5	4	5	3	7	5
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	Pemanfaatan mikroalga ChlorellaVulgaris untuk mereduksi CO2 serta polutan lainnya	7	1/9	4	5	3	6	1/3
Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	Pemanfaatan mikroalga ChlorellaVulgaris untuk mereduksi CO2 serta polutan lainnya	7	1/9	4	4	1	3	1/3

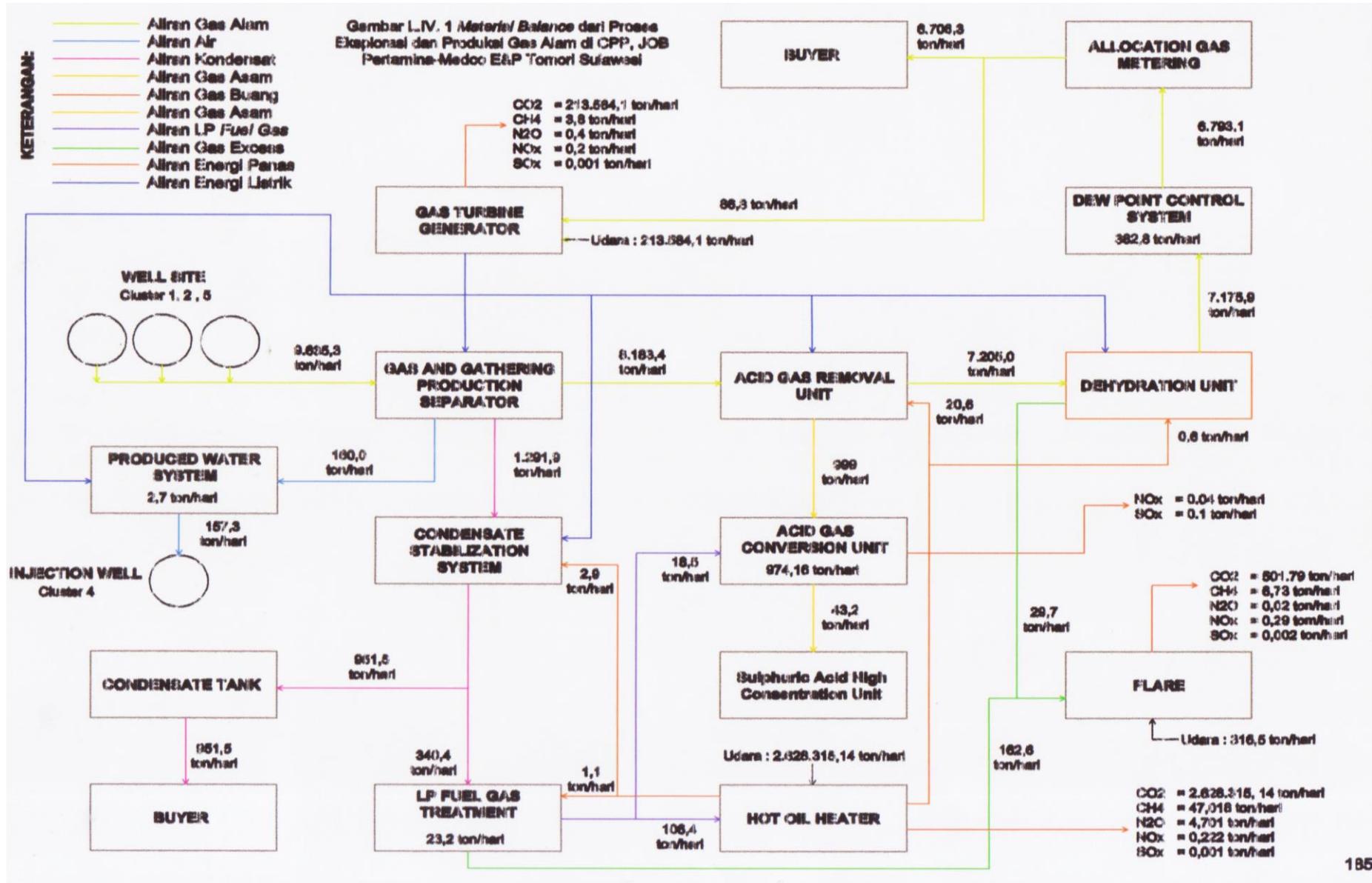
Perbandingan Berpasangan Antar Alternatif (Berdasarkan Kemudahan dalam Pelaksanaan)		Responden						
		8	9	10	11	12	13	14
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	6	5	3	3	1	7	1/4
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	6	5	3	5	3	9	4
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess pada AGCU	Pemanfaatan mikroalga ChlorellaVulgaris untuk mereduksi CO2 serta polutan lainnya	6	7	3	5	3	9	4
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	5	5	3	3	3	7	4
Penggunaan kembali LP Fuel Gas excess ke dalam unit Production Separator dengan proses kompresi	Pemanfaatan mikroalga ChlorellaVulgaris untuk mereduksi CO2 serta polutan lainnya	4	5	3	3	3	7	4
Pembangunan Mini LPG Plant dengan memanfaatkan gas suar bakar	Pemanfaatan mikroalga ChlorellaVulgaris untuk mereduksi CO2 serta polutan lainnya	4	3	3	1/3	3	1/7	3

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

LAMPIRAN IV

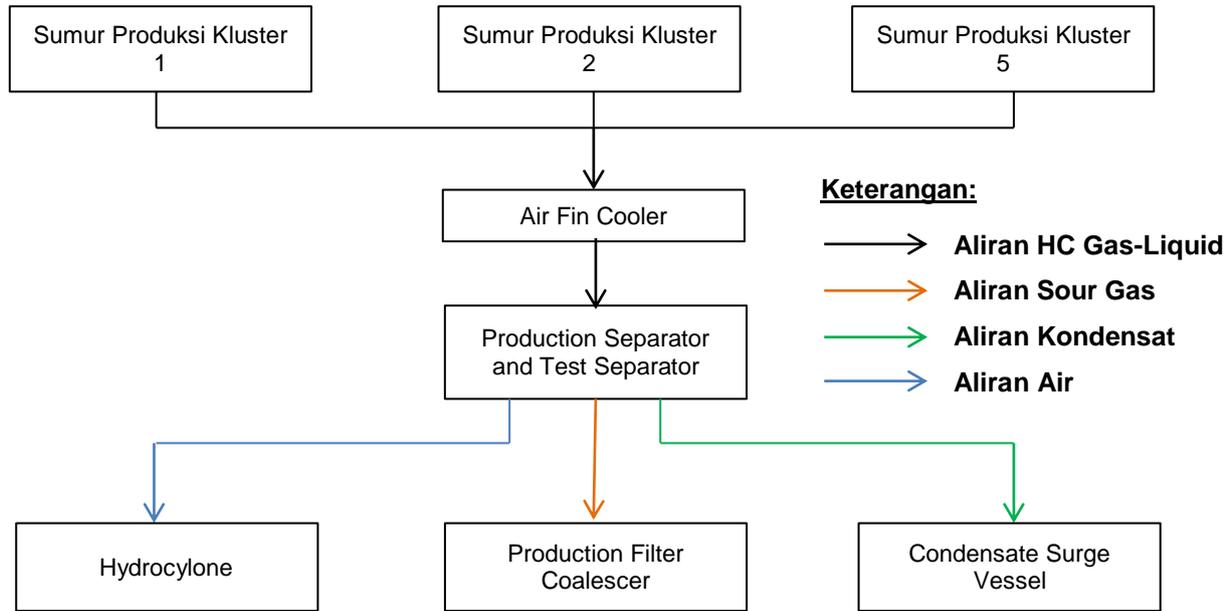
Lampiran ini berisi mengenai *material balance* proses eksplorasi dan produksi gas alam secara umum serta diagram alir proses setiap kegiatan yang dianalisis.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

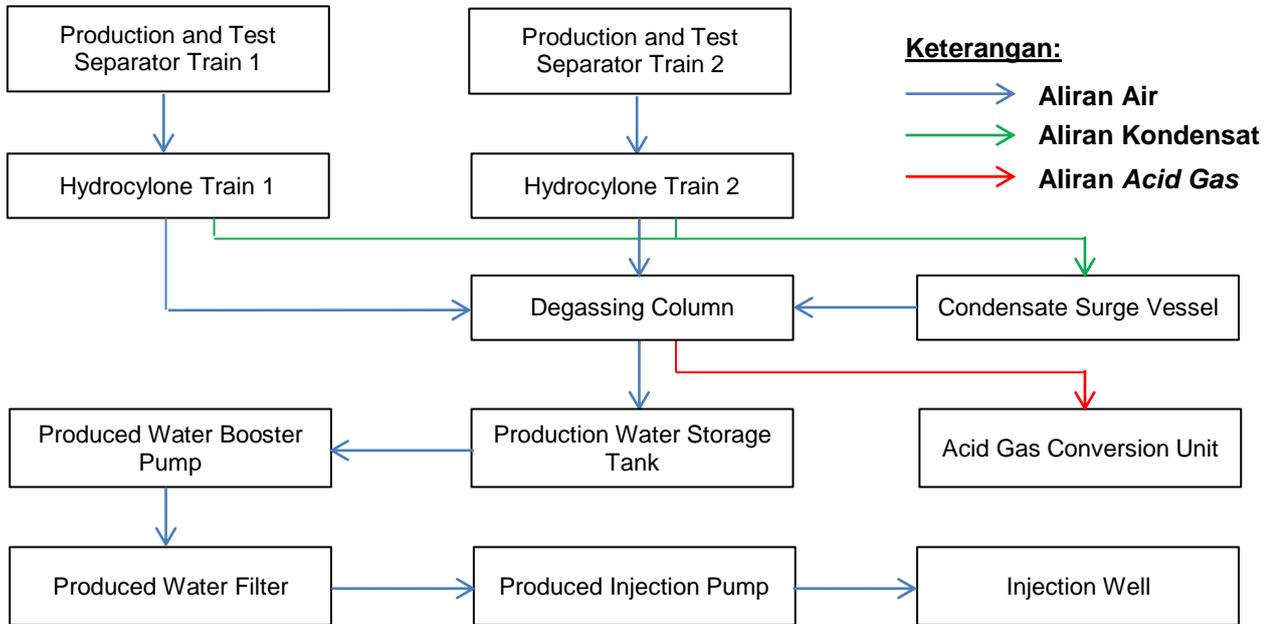


Gambar L.IV. 1 Material Balance dari Proses Eksplorasi dan Produksi Gas Alam di CPP, JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi

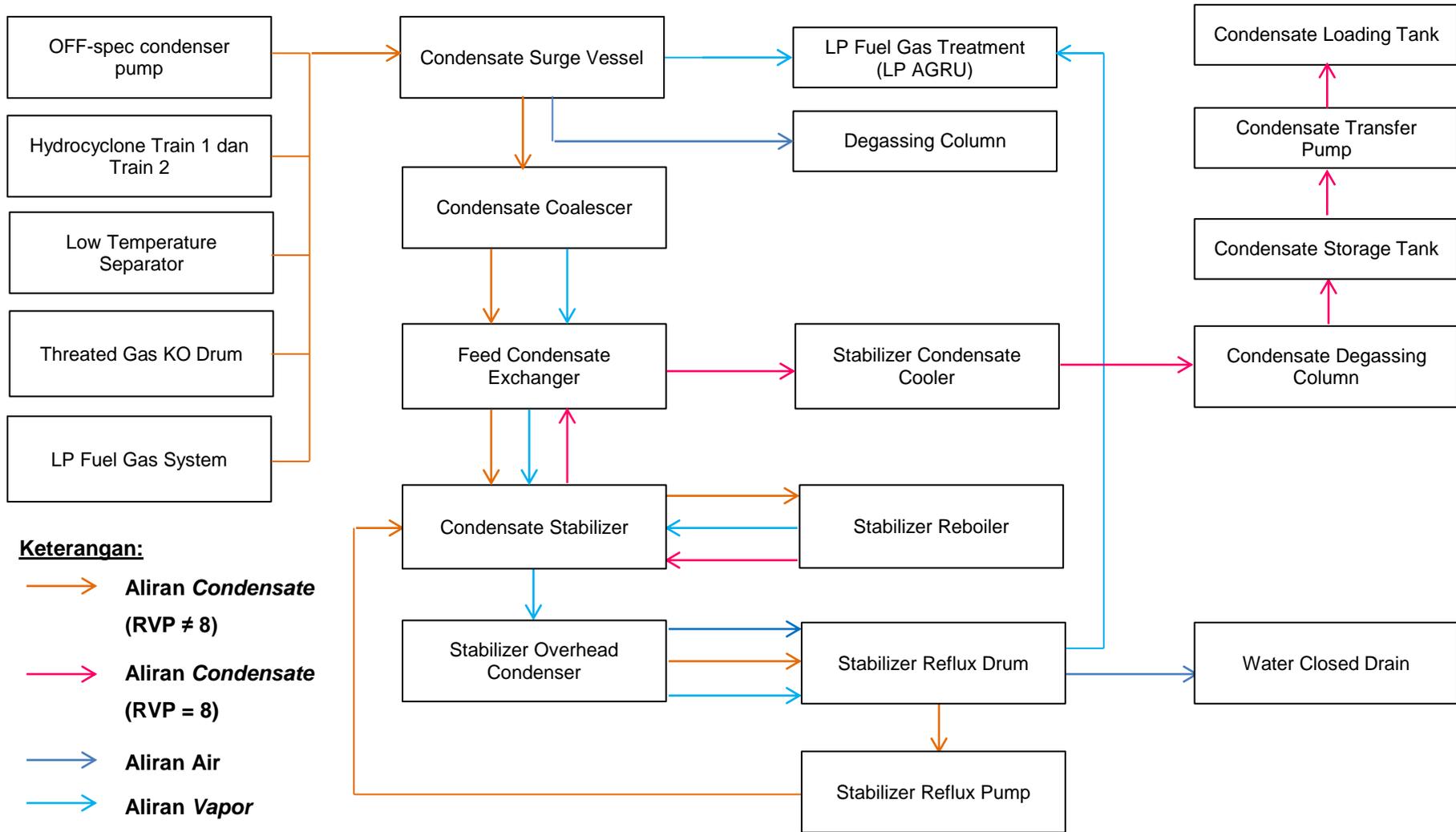
"Halaman ini sengaja dikosongkan"



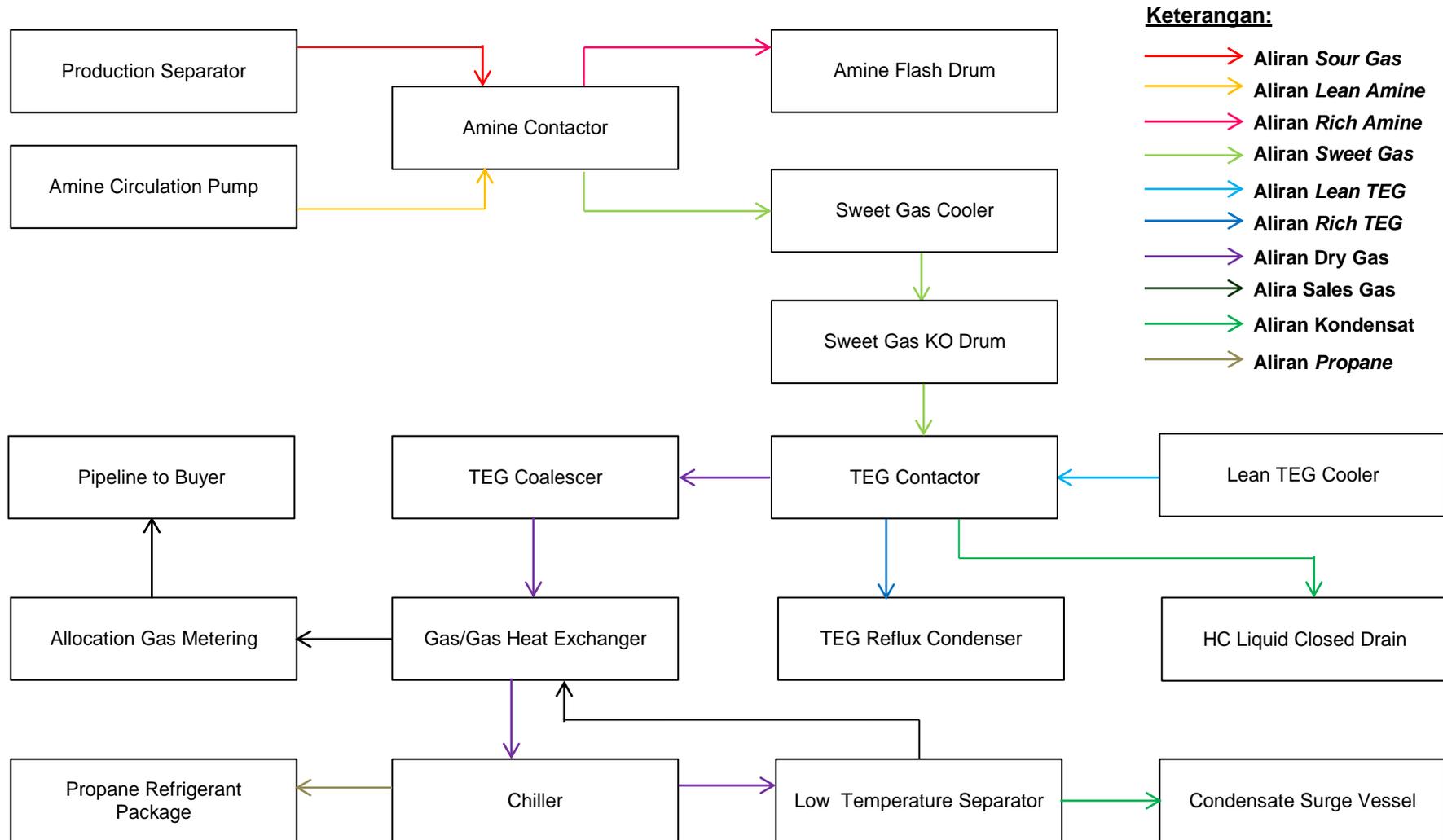
Gambar L.IV. 2 *Process Flow Diagram* dari Proses *Gas and Gathering Production System*
 Sumber : JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2014



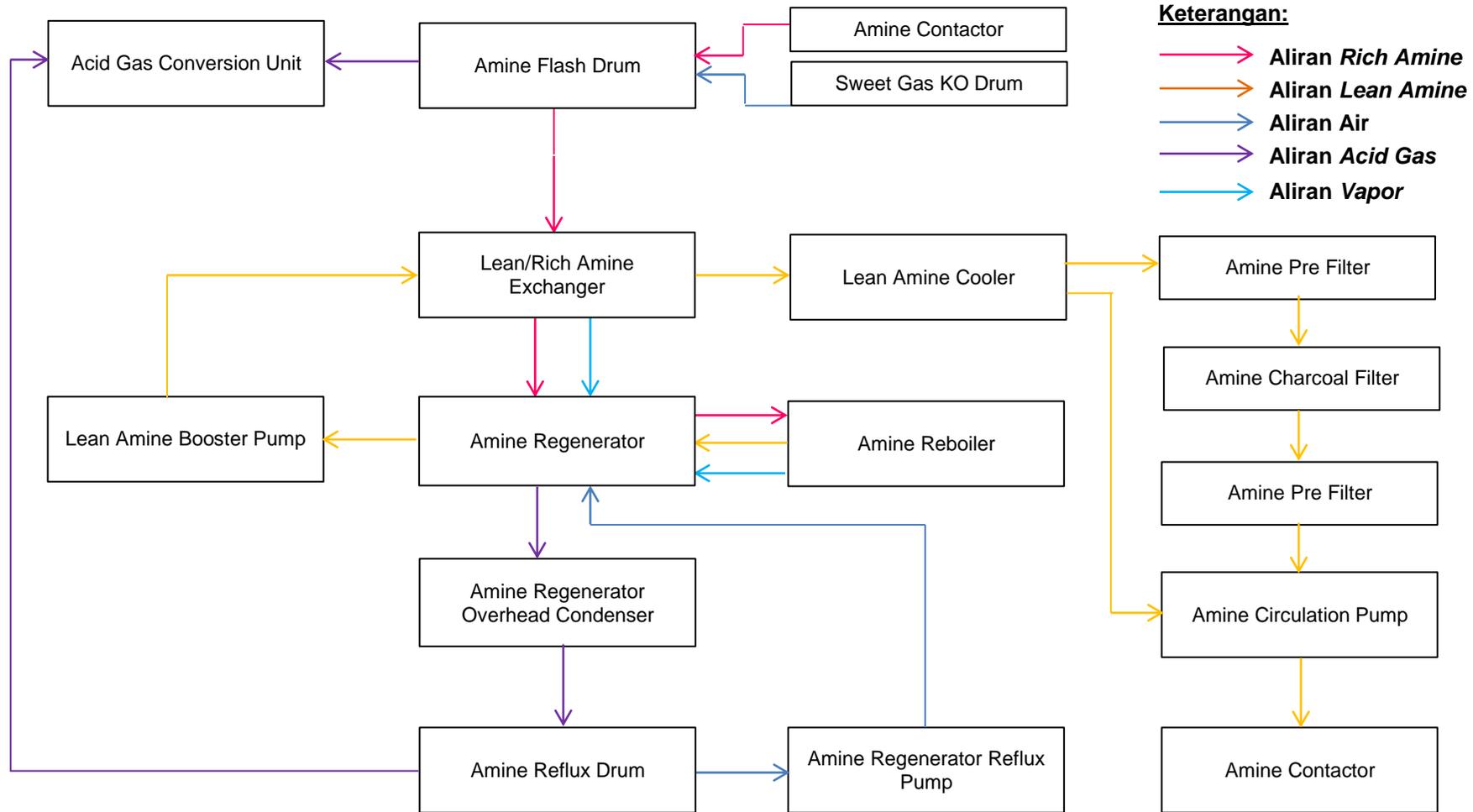
Gambar L.IV. 3 *Process Flow Diagram* dari *Production Water System*
 Sumber : JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2014



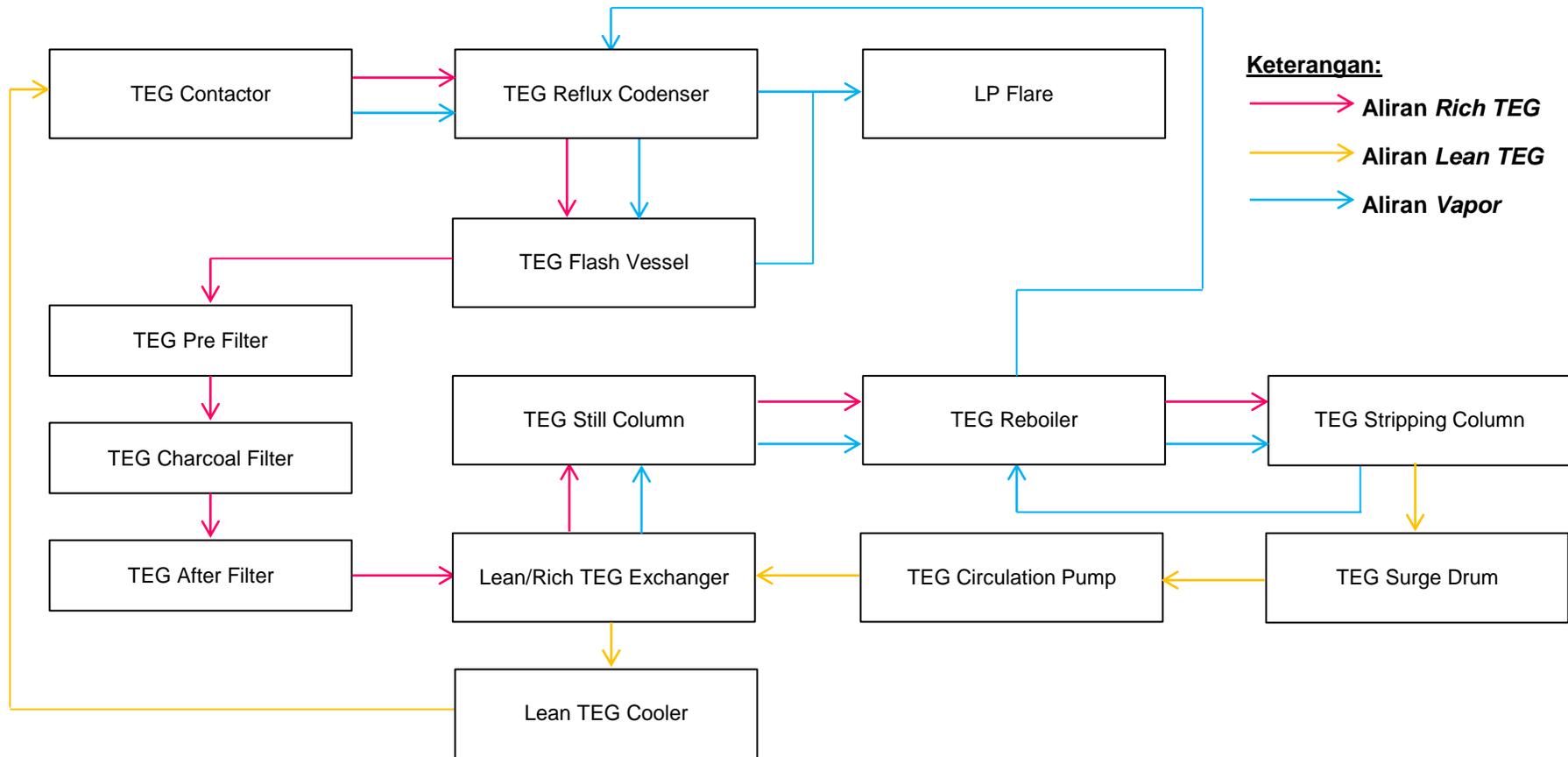
Gambar L.IV. 4 Process Flow Diagram dari Condensate Stabilization System
 Sumber : JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2014



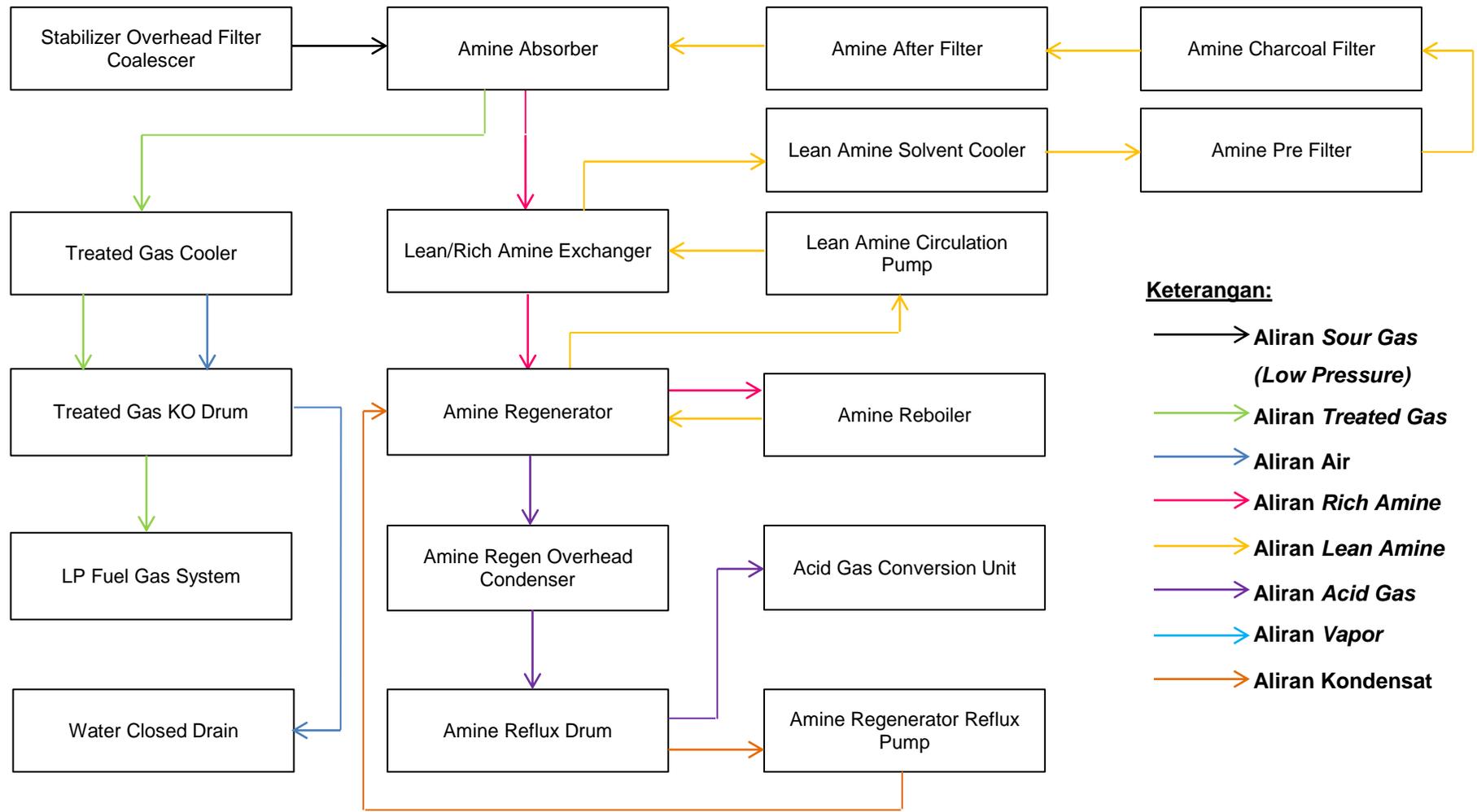
Gambar L.IV. 5 *Process Flow Diagram* dari *Gas Treatment Process*
 Sumber : JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2014



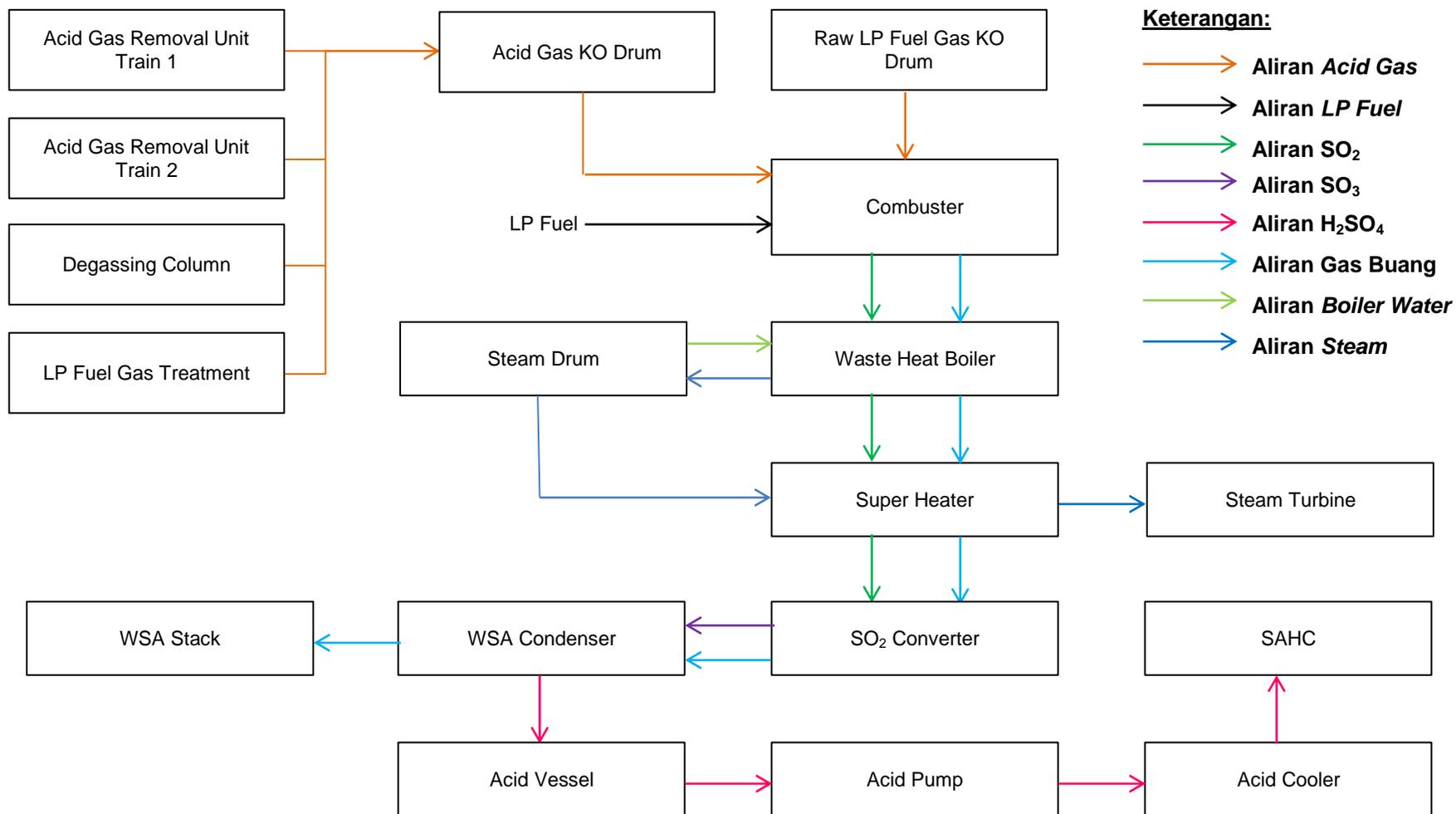
Gambar L.IV. 6 *Process Flow Diagram* dari Proses Regenerasi *Amine* pada AGRU System
 Sumber : JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2014



Gambar L.IV. 7 Process Flow Diagram dari Proses Regenerasi TEG pada Dehydration Unit
 Sumber : JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2014



Gambar L.IV. 8 *Process Flow Diagram* dari Proses *Low Pressure Gas Treatment*
 Sumber : JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2014



Gambar L.IV. 9 Process Flow Diagram dari Acid Gas Conversion Unit
 Sumber : JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2014

LAMPIRAN V

Lampiran ini berisi mengenai data bahan baku, data pemakaian energi, data emisi yang dihasilkan, dan data produk dari setiap kegiatan yang dianalisis.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

Tabel L.V. 1 Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses *Gas and Gathering Production Separation*

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
1	<i>Air fin cooler</i>	HC gas-liquid	9635332.8	kg/hari	Energi Listrik	596	kWh	-	-	-	HC gas-liquid	9635332.8	kg/hari
2	<i>Production separator dan Test Separator</i>	HC gas-liquid	9635332.8	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Sour Gas	8108682.385	kg/hari
											Air	156053.9	kg/hari
											Kondensat	1223589.7	kg/hari
3	<i>Production filter coalescer</i>	Sour gas	8108682.385	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Sour gas	8108682.385	kg/hari

Sumber: JOB Pertamina-Medco E&P Tomori, Sulawesi, 2014

Tabel L.V. 2 Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses *Produced Water System*

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
1	<i>Hydrocyclone train 1</i>	Water	78027	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Water	77239	kg/hari
											Condensate	559	
2	<i>Hydrocyclone train 2</i>	Water	78027	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Water	77239	kg/hari
											Condensate	559	
3	<i>Degassing column</i>	Water (from hydrocyclone)	154477.6	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Produced Water	157330.1	kg/hari
		Water (from condensate surge vessel)	2852.5	kg/hari							Acid Gas	152	kg/hari
4	<i>Produced water storage tank</i>	Produced Water	157330.1	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Produced Water	157330.1	kg/hari
5	<i>Produced water booster pump</i>	Produced Water	157330.1	kg/hari	Listrik	15	kW	-	-	-	Produced Water	157330.1	kg/hari

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
6	<i>Produced water filter</i>	Produced Water	157330.1	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Produced Water	157330.1	kg/hari
7	<i>Produced water injection pump to injection well</i>	Produced Water	157330.1	kg/hari	Listrik	90	KW	-	-	-	Produced Water	157330.1	kg/hari

Sumber: JOB Pertamina-Medco E&P Tomori, Sulawesi, 2014

Tabel L.V. 3 Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses *Condensate Stabilization System*

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
1	<i>Condensate surge vessel</i>	Vapor	104558.23	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Vapor (Top Product)	104558.23	kg/hari
		Condensate Water	1305204.72 2852.47	kg/hari kg/hari	-	-	-	-	-	-	Condensate Water	1305204.72 2852.47	kg/hari kg/hari
2	<i>Condensate coalescer</i>	Condensate	1305204.72	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Condensate	1304904.80	kg/hari
											Vapor	556.54	kg/hari
3	<i>Feed condensate exchanger</i>	Condensate	1304904.80	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Condensate (to Condensate Stabilizer)	962154.42	kg/hari
		Vapor	556.54	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Vapor	152245.73	kg/hari
		Condensate (Bottom Product Condensate Stabilizer)	961453.81	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Condensate (to Cooler)	1208465.47	kg/hari
4	<i>Stabilizer condensate cooler</i>	Condensate	1208465.47	kg/hari	Listrik	16	kWh	-	-	-	Condensate	1215045.13	kg/hari

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan	
								CO ₂	NO ₂	SO ₂				
5	<i>Condensate stabilizer</i>	Condensate (Feed Condensate Exchanger)	962154.42	kg/hari							Condensate (Bottom Product)	961453.81	kg/hari	
		Vapor (Feed Condensate Exchanger)	152245.73	kg/hari										
		Condensate (Reflux Pump)	164670.47	kg/hari	-	-	-	-	-	-		Vapor (Top Product)	256311.45	kg/hari
		Vapor (Reboiler)	259211.99	kg/hari								Condensate (to Reboiler)	1040531.76	kg/hari
		Condensate (Reboiler)	1027407.57	kg/hari										
6	<i>Stabilizer Reboiler</i>	Condensate (Liquid)	1040531.76	kg/hari	-	-	-	-	-		Vapor	259211.99	kg/hari	
											Condensate	1027407.57	kg/hari	
7	<i>Stabilizer Overhead Condenser</i>	Vapor (Top Product Stabilizer)	256311.45	kg/hari	-	-	-	-	-		Vapor	81586.99	kg/hari	
											Condensate	164670.47	kg/hari	
											Water	3.49	kg/hari	
8	<i>Stabilizer Reflux Drum</i>	Vapor	81586.99	kg/hari							Condensate	164670.47	kg/hari	
		Condensate	164670.47	kg/hari	-	-	-	-	-		Vapor	81586.99	kg/hari	
		Water	3.49	kg/hari							Water	3.49	kg/hari	

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
9	Stabilizer Reflux Pump	Condensate	164670.47	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Condensate	164670.47	kg/hari
10	Condensate degassing column	Condensate	1215045.13	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Condensate	1215045.13	kg/hari
11	Condensate transfer pump	Condensate	1215045.13	kg/hari	Listrik	370	kW	-	-	-	Condensate	1215045.13	kg/hari

Sumber: JOB Pertamina-Medco E&P Tomori, Sulawesi, 2014

Tabel L.V. 4 Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses *Gas Treatment Process*

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
1	Amine contactor	Sour gas	8108682.38	kg/hari							Sweet gas	7169262.94	kg/hari
		Lean Amine	6455783.06	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Rich amine	6467729.60	kg/hari
		Water	16366814.79	kg/hari							Water	17887559.84	kg/hari
2	Sweet gas cooler	Sweet Gas	7169262.94	kg/hari	Energi Listrik	44	kWh	-	-	-	Sweet gas	7204832.05	kg/hari
											Water	10687.68	kg/hari
3	Sweet gas KO drum	Sweet Gas	7204832.05	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Sweet Gas	7141902.71	kg/hari
		Water	10687.68	kg/hari							Water	10687.68	kg/hari
4	TEG contactor	Lean TEG	507042.00	kg/hari							Rich TEG (Top Product)	57.99	kg/hari
					-	-	-	-	-	-	Dry Gas	7114831.30	kg/hari
		HC Liquid	495369.02	kg/hari							Rich TEG (Bottom Product)	506986.66	kg/hari

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
		Sweet Gas	7141902.71	kg/hari							HC Liquid (Bottom Product) Vapor (Bottom Product)	443478.34	kg/hari
											HC Liquid	523986.96	kg/hari
5	TEG coalescer	Rich TEG (Top Product)	57.99	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Rich TEG	57.99	gram/detik
		Dry Gas	7114831.30	kg/hari							Dry Gas	7114831.30	MMscfd
6	Gas/Gas exchanger	Rich TEG	57.96	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Rich TEG	58.25	kg/hari
		Dry Gas	7112186.38	kg/hari							Dry Gas	7021567.21	kg/hari
		Sales Gas	6932900.54	kg/hari							HC Liquid	73738.39	kg/hari
											Sales Gas	6932900.54	kg/hari
7	Chiller	Propane Vapor	1147710.83	kg/hari							Propane	1147710.83	kg/hari
		HC Liquid	377166.73	kg/hari							Vapor	1141939.02	kg/hari
		Rich TEG	794190.15	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Rich TEG	58.25	kg/hari
		Dry Gas	58.25	kg/hari							Dry Gas	6932900.54	kg/hari
		HC Liquid	7021567.21	kg/hari							HC Liquid	165157.19	kg/hari
			73738.39	kg/hari							Water	50.06	kg/hari
8	Low temperature separator	Rich TEG	58.25	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Sales Gas (Gas Outlet)	6932900.54	kg/hari
		Dry Gas	6932900.54	kg/hari							Rich TEG (Liquid Outlet)	45.70	kg/hari
		HC Liquid	165157.19	kg/hari							Vapor (Liquid Outlet)	14533.54	kg/hari
		Water	50.06	kg/hari							HC Liquid (Liquid Outlet)	152191.27	kg/hari

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
											Water (Liquid Outlet)	46.55	kg/hari
9	Allocation Gas Metering	Sales Gas Train 1	3466450.27	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Total Sales Gas	6706629.81	kg/hari
		Sales Gas Train 2	3466450.27	kg/hari	-	-	-	-	-	-			

Sumber: JOB Pertamina-Medco E&P Tomori, Sulawesi, 2014

Tabel L.V. 5 Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses Regenerasi *Amine* di AGRU System

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
1	Amine flash drum	Rich Amine	6467729.60	kg/hari							Rich Amine	6469207.60	kg/hari
		Water	17887559.84	kg/hari							Water	16543698.04	kg/hari
		Liquid (Bottom Product Sweet Gas KO Drum)	10687.68	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Acid Gas (Top Product)	41383720.43	kg/hari
2	Lean/rich amine exchanger	Rich Amine	6469207.60	kg/hari							Rich Amine	6469207.60	kg/hari
		Water	16543698.04	kg/hari							Water	17188611.09	kg/hari
					-	-	-	-	-	-	Vapor	157692.55	kg/hari
		Lean Amine	6455783.06	kg/hari							Lean Amine	6455783.06	kg/hari
3	Amine regenerator	Water	16364447.81	kg/hari							Water	16365410.30	kg/hari
		Rich Amine	6469207.60	kg/hari	-	-	-	-	-	Acid Gas (Top Product)	1342619.92	kg/hari	
		Vapor	593327.78	kg/hari									

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
		Water	16748250.45	kg/hari							Lean Amine (Bottom Product)	6455783.06	kg/hari
		Vapor (from Reboiler)	1369128.86	kg/hari							Water (Bottom Product)	16364447.81	kg/hari
		Water (form Reboiler)	16393105.49	kg/hari							Rich Amine (to Reboiler)	7036544.95	kg/hari
		Amine (from Reboiler)	6486480.91	kg/hari									
		Water (from amine reflux pump)	373572.75	kg/hari							Water (to Reboiler)	17773935.17	kg/hari
4	Amine Reboiler	Water	17773935.17	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Vapor	1369128.86	kg/hari
		Rich Amine	7036544.95	kg/hari							Water	16393105.49	kg/hari
											Lean Amine	6486480.91	kg/hari
5	Lean amine booster pump	Lean Amine	6455783.06	kg/hari	Listrik	360	kWh	-	-	-	Lean Amine	6455783.06	kg/hari
		Water	16364447.81	kg/hari							Water	16364447.81	kg/hari
6	Lean amine cooler	Lean Amine	6455783.06	kg/hari	Listrik	264	kWh	-	-	-	Lean Amine	6455783.06	kg/hari
		Water	16365410.30	kg/hari							Water	16366814.79	kg/hari
7	Amine Pre Filter	Lean Amine	645575.73	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Lean Amine	645575.73	kg/hari
		Water	1636746.36	kg/hari							Water	1636746.36	kg/hari
8	Amine Charcoal Filter	Lean Amine	645575.73	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Lean Amine	645575.73	kg/hari
		Water	1636746.36	kg/hari							Water	1636746.36	kg/hari
9	Amine After Filter	Lean Amine	645575.73	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Lean Amine	645575.73	kg/hari
		Water	1636746.36	kg/hari							Water	1636746.36	kg/hari

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
10	Amine circulation pump	Lean Amine	6455783.06	kg/hari							Lean Amine	6455783.06	kg/hari
		Water	16366814.79	kg/hari	Listrik	2080	kWh	-	-	-	Water	16366814.79	kg/hari
		Antifoam	5.10	kg/hari									
11	Regenerator Overhead Condenser	Acid Gas (Top Product)	1342619.92	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Acid Gas (Top Product)	1342619.92	kg/hari
12	Amine Reflux Drum	Acid Gas	1342619.92	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Water	373572.75	kg/hari
											Acid Gas	989873.75	kg/hari
13	Regenerator Reflux Pump	Water (Bottom Product)	373572.75	kg/hari	Listrik	11	kWh	-	-	-	Water	373572.75	kg/hari

Sumber: JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2014

Tabel L.V. 6 Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses Regenerasi TEG di *Dehydration Unit*

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
1	TEG reflux condenser	Rich TEG (Bottom Product TEG Contactor)	506986.66	kg/hari							Rich TEG	506986.66	kg/hari
		HC Liquid (Bottom Product TEG Contactor)	443478.34	kg/hari	-	-	-	-	-	-	HC Liquid	514688.84	kg/hari
		Vapor (Bottom Product TEG Contactor)	2632.11	kg/hari								Vapor	2725.78

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
		Vapor (from reboiler and stripping column))	27394.38	kg/hari							Vapor (to LP Flare)	27394.38	kg/hari
2	TEG flash vessel	Rich TEG	506986.66	kg/hari							Rich TEG	506955.24	kg/hari
		HC Liquid	514688.84	kg/hari	-	-	-	-	-	-	HC Liquid	514688.84	kg/hari
		Vapor	2725.78	kg/hari									
3	TEG Pre Filter	Rich TEG	506955.24	kg/hari							Rich TEG	506955.24	kg/hari
		HC Liquid	514688.84	kg/hari	-	-	-	-	-	-	HC Liquid	514688.84	kg/hari
4	TEG Charcoal Filter	Rich TEG	506955.24	kg/hari							Rich TEG	506955.24	kg/hari
		HC Liquid	514688.84	kg/hari	-	-	-	-	-	-	HC Liquid	514688.84	kg/hari
5	TEG After Filter	Rich TEG	506955.24	kg/hari							Rich TEG	506955.24	kg/hari
		HC Liquid	514688.84	kg/hari	-	-	-	-	-	-	HC Liquid	514127.85	kg/hari
6	Lean/Rich TEG exchanger	Rich TEG	506955.24	kg/hari							Rich TEG	506955.24	kg/hari
		HC Liquid	514127.85	kg/hari	-	-	-	-	-	-	HC Liquid	471837.93	kg/hari
		Lean TEG	507045.21	kg/hari							Vapor	6495.16	kg/hari
		HC Liquid	430204.14	kg/hari							Lean TEG	507045.21	kg/hari
7	TEG Still Column	Rich TEG	506955.24	kg/hari							Rich TEG	506955.24	kg/hari
		HC Liquid	471837.93	kg/hari	-	-	-	-	-	-	HC Liquid	471837.93	kg/hari
		Vapor	6495.16	kg/hari							Vapor	6495.16	kg/hari
8	TEG reboiler	Rich TEG	506955.24	kg/hari							Rich TEG	506955.24	kg/hari
		HC Liquid	471837.93	kg/hari	-	-	-	-	-	-	HC Liquid	471837.93	kg/hari
		Vapor	6495.16	kg/hari							Vapor	6495.16	kg/hari

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan	
								CO ₂	NO ₂	SO ₂				
		Vapor (from stripping column)	27394.38	kg/hari							Vapor (to reflux condensor)	27394.38	kg/hari	
9	TEG stripping column	LP fuel gas	5532.01	m3/hari							Lean TEG	507045.21	kg/hari	
		Rich TEG	506955.24	kg/hari							HC Liquid	430204.14	kg/hari	
		HC Liquid	471837.93	kg/hari	-	-	-	-	-	-				
		Vapor	6495.16	kg/hari							Vapor (to reboiler)	27394.38	kg/hari	
10	TEG surge drum	Lean TEG	507045.21	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Lean TEG	507045.21	kg/hari	
		HC Liquid	430204.14	kg/hari							HC Liquid	430204.14	kg/hari	
11	TEG circulation pump	Lean TEG	507045.21	kg/hari	Listrik	74	kWh	-	-	-	Lean TEG	507045.21	kg/hari	
		HC Liquid	430204.14	kg/hari							HC Liquid	430204.14	kg/hari	
12	Lean TEG Cooler	Lean TEG	507045.21	kg/hari	Listrik	30	kWh	-	-	-	Lean TEG	507042.00	kg/hari	
		HC Liquid	473550.74	kg/hari							HC Liquid	495369.02	kg/hari	

Sumber: JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2014

Tabel L.V. 7 Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses *LP Fuel Gas Treatment*

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
1	Stabilizer OVHD Filter Coalescer	Sour Gas (Low Pressure)	186115.35	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Sour Gas (Low Pressure)	186050.61	kg/hari
2	Amine absorber	Sour Gas (Low Pressure)	186050.61	kg/hari							Threatened Gas (Top Product)	168976.02	kg/hari
		Lean Amine	195307.26	kg/hari							Rich Amine (Bottom Product)	196769.14	kg/hari

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
		HC Liquid	495565.92	kg/hari							HC Liquid (Bottom Product)	514334.38	kg/hari
3	<i>Treated gas cooler</i>	Threated Gas	168976.02	kg/hari	Listrik	4	kWh	-	-	-	Threated Gas	168770.66	kg/hari
		Water	157.27	kg/hari							Water	157.27	kg/hari
4	<i>Treated gas KO drum</i>	Threated Gas	168770.66	kg/hari	Listrik	4	kWh	-	-	-	Threated Gas (Top Product)	168770.66	kg/hari
		Water	157.27	kg/hari							Water	157.27	kg/hari
5	<i>Lean/rich amine exchanger</i>	Rich Amine	196769.14	kg/hari							Rich Amine	196769.14	kg/hari
		HC Liquid	514334.38	kg/hari							HC Liquid	504341.79	kg/hari
		Lean Amine	195307.26	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Vapor	9653.93	kg/hari
		HC Liquid	495494.73	kg/hari							Lean Amine	195307.26	kg/hari
		Water	157.27	kg/hari							HC Liquid	495518.68	kg/hari
6	<i>Amine regenerator</i>	Rich Amine	196769.14	kg/hari							Acid Gas (Top Product)	28822.83	kg/hari
		HC Liquid	504341.79	kg/hari							HC Liquid (Bottom Product)	495411.96	kg/hari
		Vapor (from Amine Exchanger)	9653.93	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Lean Amine (Bottom Product)	195307.26	kg/hari
		Vapor (from Amine Reboiler)	32492.38	kg/hari									
		HC Liquid	496104.57	kg/hari							HC Liquid	529862.14	kg/hari
		Lean Amine	195685.06	kg/hari						Rich Amine	215658.30	kg/hari	

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
		HC Liquid (Amine Reflux Pump)	8687.31	kg/hari									
7	Amine Reboiler	HC Liquid	529862.14	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Vapor	32492.38	kg/hari
		Rich Amine	215658.30	kg/hari							HC Liquid	496104.57	kg/hari
											Lean Amine	195685.06	kg/hari
8	Lean Amine Circulation Pump	HC Liquid	495411.96	kg/hari	Listrik	30	kWh	-	-	-	Lean Amine	195307.26	kg/hari
		Lean Amine	195307.26	kg/hari							HC Liquid	495494.73	kg/hari
9	Lean Amine Solvent Cooler	Lean Amine	195307.26	kg/hari	Listrik	10.8	kWh	-	-	-	Lean Amine	195307.26	kg/hari
		HC Liquid	495518.68	kg/hari							HC Liquid	495518.68	kg/hari
10	Amine Pre Filter	Lean Amine	195307.26	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Lean Amine	195307.26	kg/hari
		HC Liquid	495518.68	kg/hari							HC Liquid	495518.68	kg/hari
11	Amine Charcoal Filter	Lean Amine	195307.26	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Lean Amine	195307.26	kg/hari
		HC Liquid	495518.68	kg/hari							HC Liquid	495518.68	kg/hari
12	Amine After Filter	Lean Amine	195307.26	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Lean Amine	195307.26	kg/hari
		HC Liquid	495518.68	kg/hari							HC Liquid	495565.92	kg/hari
13	Amine Regenerator Overhead Condenser	Acid Gas	28822.83	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Acid Gas	28822.83	kg/hari
14	Amine Reflux Drum	Acid Gas	28822.83	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Acid Gas (Top Product)	18534.47	kg/hari
											HC Liquid	8687.31	kg/hari

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
15	<i>Amine Regenerator Reflux Pump</i>	HC Liquid	8687.31	kg/hari	-	-	-	-	-	-	HC Liquid	8687.31	kg/hari

Sumber: JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2014

Tabel L.V. 8 Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses *Acid Gas Conversion Unit*

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
1	Acid KO Drum	Acid Gas (H ₂ S)	1016901.89	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Acid Gas (H ₂ S)	1016901.89	kg/hari
2	Raw LP Fuel KO Drum'	Raw LP Fuel	18468.72	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Raw LP Fuel	18468.72	kg/hari
3	<i>Combuster</i>	Acid Gas (H ₂ S)	1016901.89	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Acid Gas (SO ₂)	2054408.11	kg/hari
		Raw LP Fuel	18468.72	kg/hari	-	-	-	0,035	0,007				
		LP Fuel Gas	18534.47	kg/hari									
4	<i>Waste heat boiler</i>	Acid Gas (SO ₂)	2054408.11	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Acid Gas (SO ₂)	2054408.11	kg/hari
5	<i>Super heater</i>	Acid Gas (SO ₂)	2054408.11	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Acid Gas (SO ₂)	2054408.11	kg/hari
6	<i>SO₂ converter</i>	Acid Gas (SO ₂)	2054408.11	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Acid Gas (SO ₃)	2054266.46	kg/hari
7	<i>WSA condenser</i>	SO ₃	2054266.46	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Asam Sulfat 95.5%	43180.85	kg/hari
8	<i>Acid vessel</i>	Asam Sulfat 95.5%	43180.85	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Asam Sulfat 95.5%	43180.85	kg/hari

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)			Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	NO ₂	SO ₂			
9	Acid pump	Asam Sulfat 95.5%	43180.85	kg/hari	Listrik	5.5	kWh	-	-	-	Asam Sulfat 95.5%	43180.85	kg/hari
10	Acid cooler	Asam Sulfat 95.5%	43180.85	kg/hari	-	-	-	-	-	-	Asam Sulfat 95.5%	43180.85	kg/hari

Sumber: JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2014

Tabel L.V. 9 Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses Unit Gas Turbine Generator (GTG)

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/day)					Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO _x	SO _x			
1	HP Fuel Gas Scrubber	HP Fuel	226270.73	kg/hari	-	-	-	-	-	-	-	-	HP Fuel	226270.732	kg/hari
2	HP Fuel Gas Filter	HP Fuel	226270.732	kg/hari	-	-	-	-	-	-	-	-	HP Fuel	226270.732	kg/hari
3	HP Fuel Gas Superheater	HP Fuel	226270.732	kg/hari	-	-	-	-	-	-	-	-	HP Fuel (dialirkan ke GTG package)	86477.03	kg/hari
													HP Fuel (dialirkan ke LP system)	139793.70	kg/hari
4	Gas Turbine Generator Package	HP Fuel	86477.0325	kg/hari	-	-	-	213584.06	3.82	0.38	0.18	0.001	Energi Listrik	713790	kg/hari

Sumber: JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2014

Tabel L.V. 10 Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses Unit *HP/LP Flare*

No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)					Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO _x	SO _x			
1	HP/LP Flare Header	HP Fuel	192259.92	kg/hari	-	-	-	-	-	-	-	-	HP Fuel	192259.92	kg/hari
2	HP/LP Flare KO Drum	HP Fuel	192259.92	kg/hari	-	-	-	-	-	-	-	-	HP Fuel	192259.92	kg/hari
3	HP/LP Flare	HP Fuel	192259.92	kg/hari	-	-	-	501.799	6.729	0.015	0.288	0.002	-	-	-

Sumber: JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2014

Tabel L.V. 11 Data Bahan Baku, Energi, Emisi, dan Produk pada Proses Unit *Hot Oil Heater*

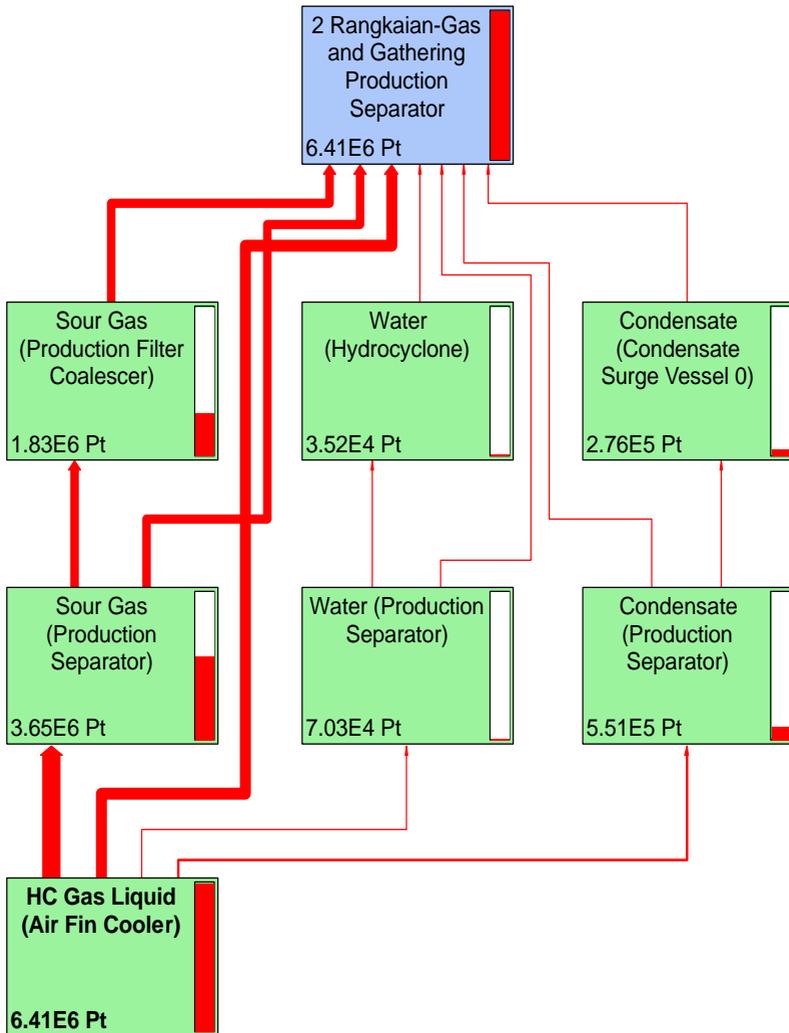
No.	Nama Alat	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Bahan bakar/energi listrik	Jumlah	Satuan	Emisi yang Dihasilkan (ton/hari)					Produk yang dihasilkan	Jumlah	Satuan
								CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO ₂	SO ₂			
1	Hot Oil Heater	LP fuel	-	kg/hari	-	-	-	2628315.14	47.018	4.701	0.222	0.001	Panas	-	kg/day

Sumber: JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi, 2014

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

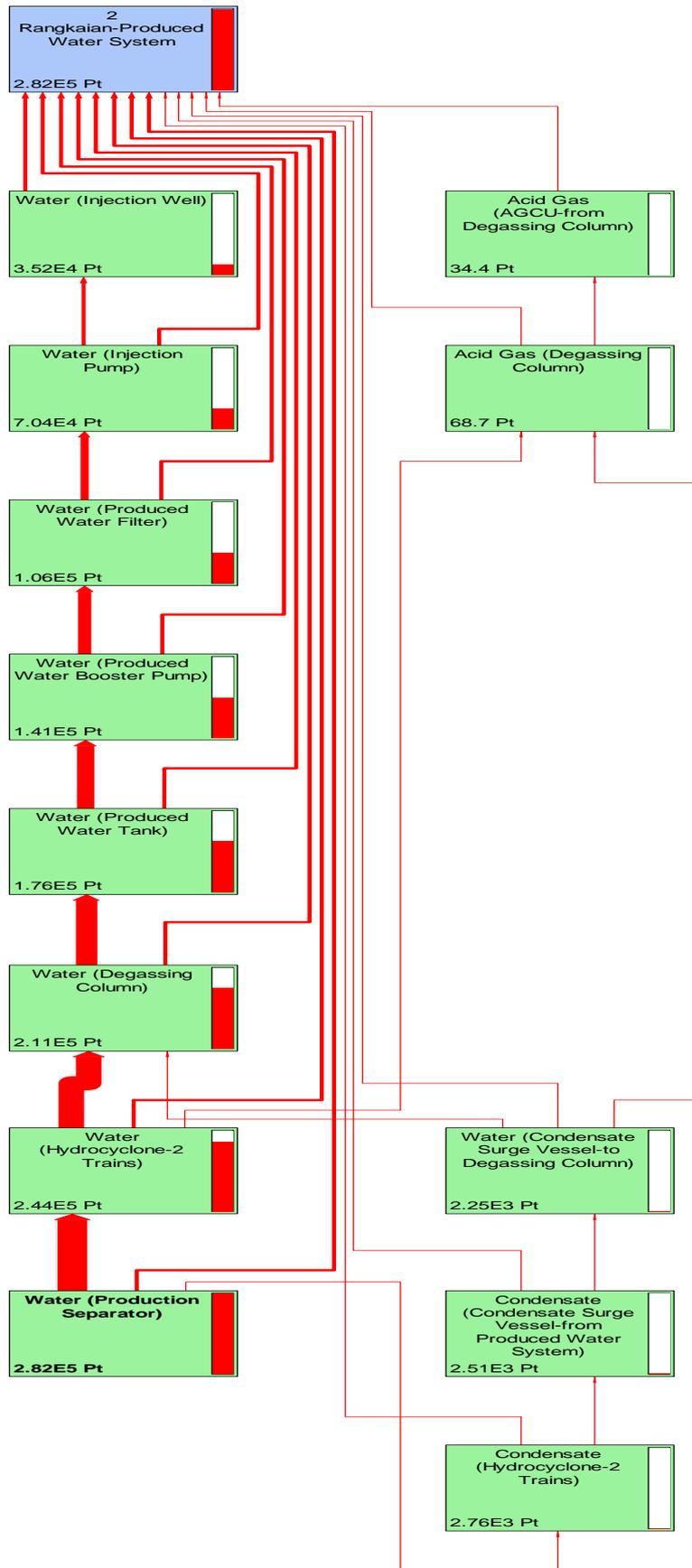
LAMPIRAN VI

Lampiran ini berisi mengenai hasil analisis LCA pada tahap *Life Cycle Inventory*.

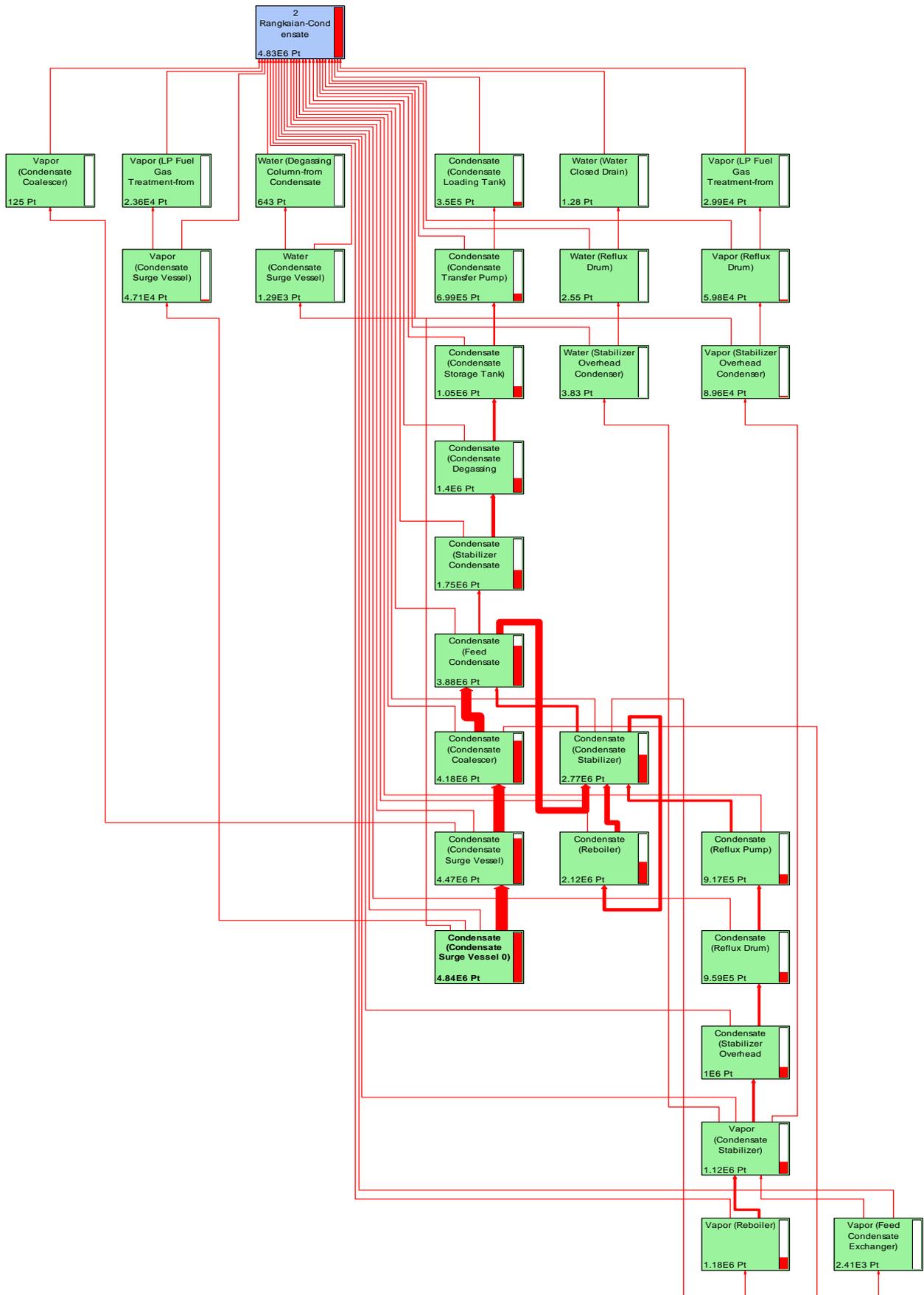


Gambar L.VI. 1 *Network dari Proses Gas and Gathering Production Separation*

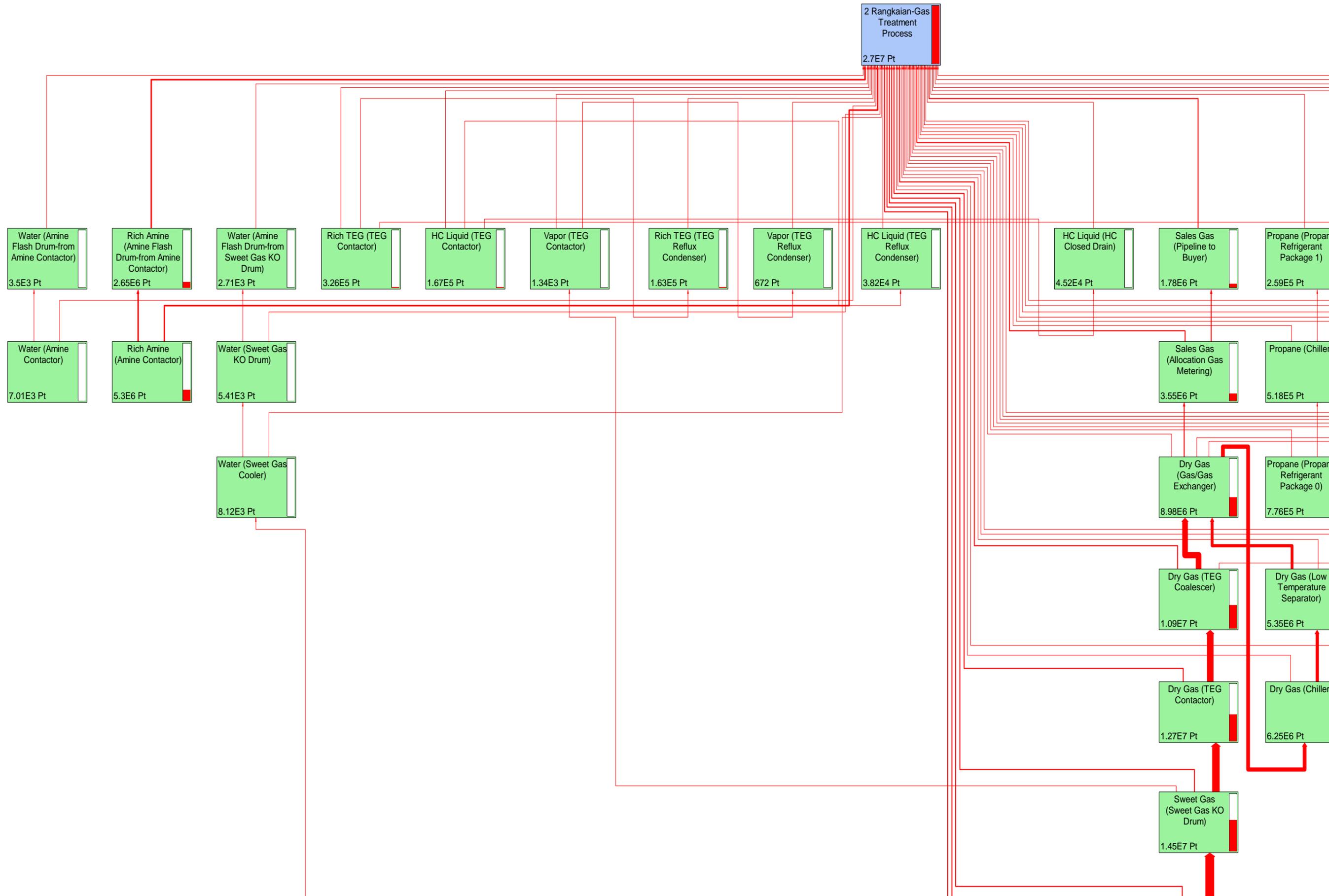
Sumber: SimaPro 8.4



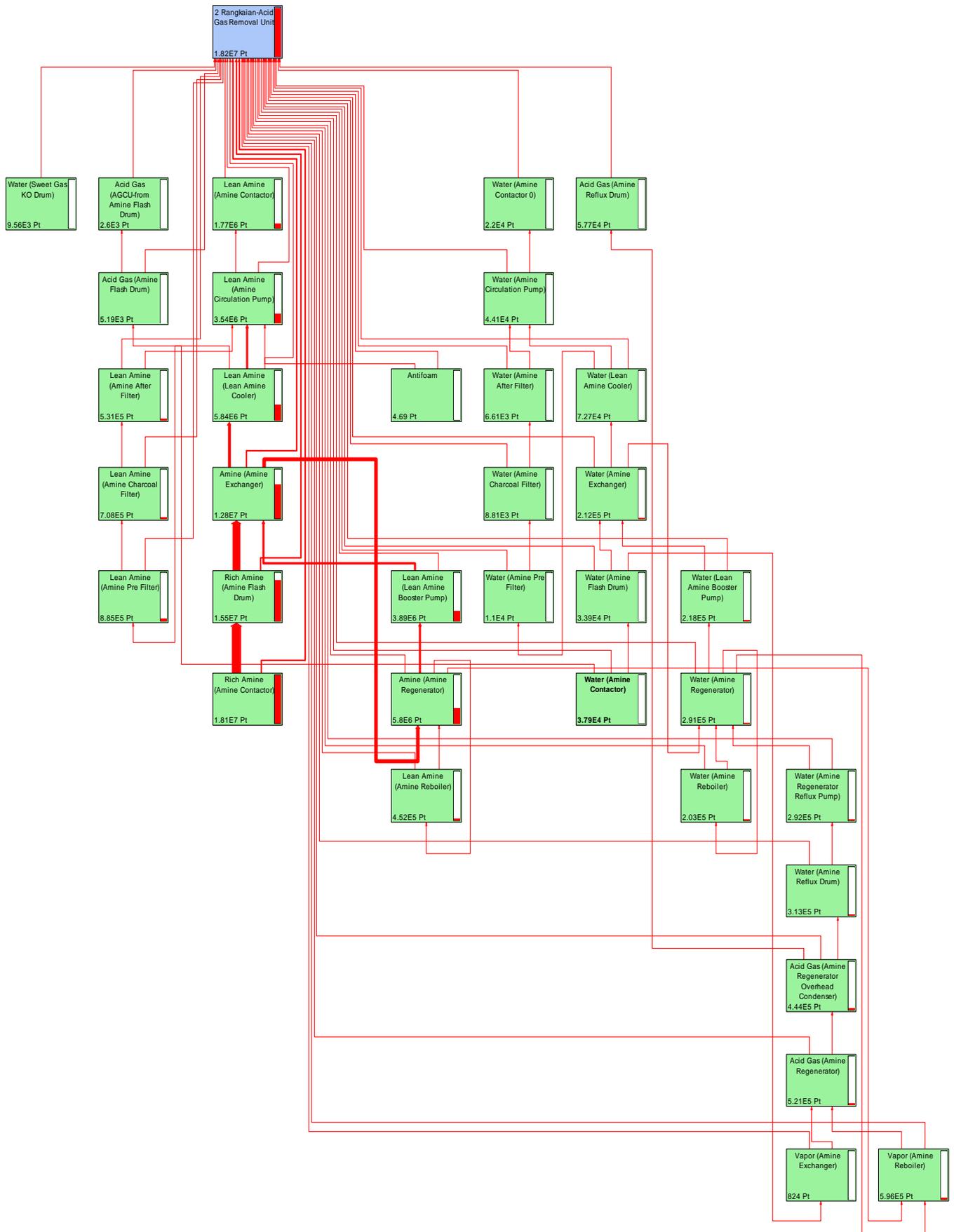
Gambar L.VI. 2 Network dari Produced Water System
 Sumber: SimaPro 8.4



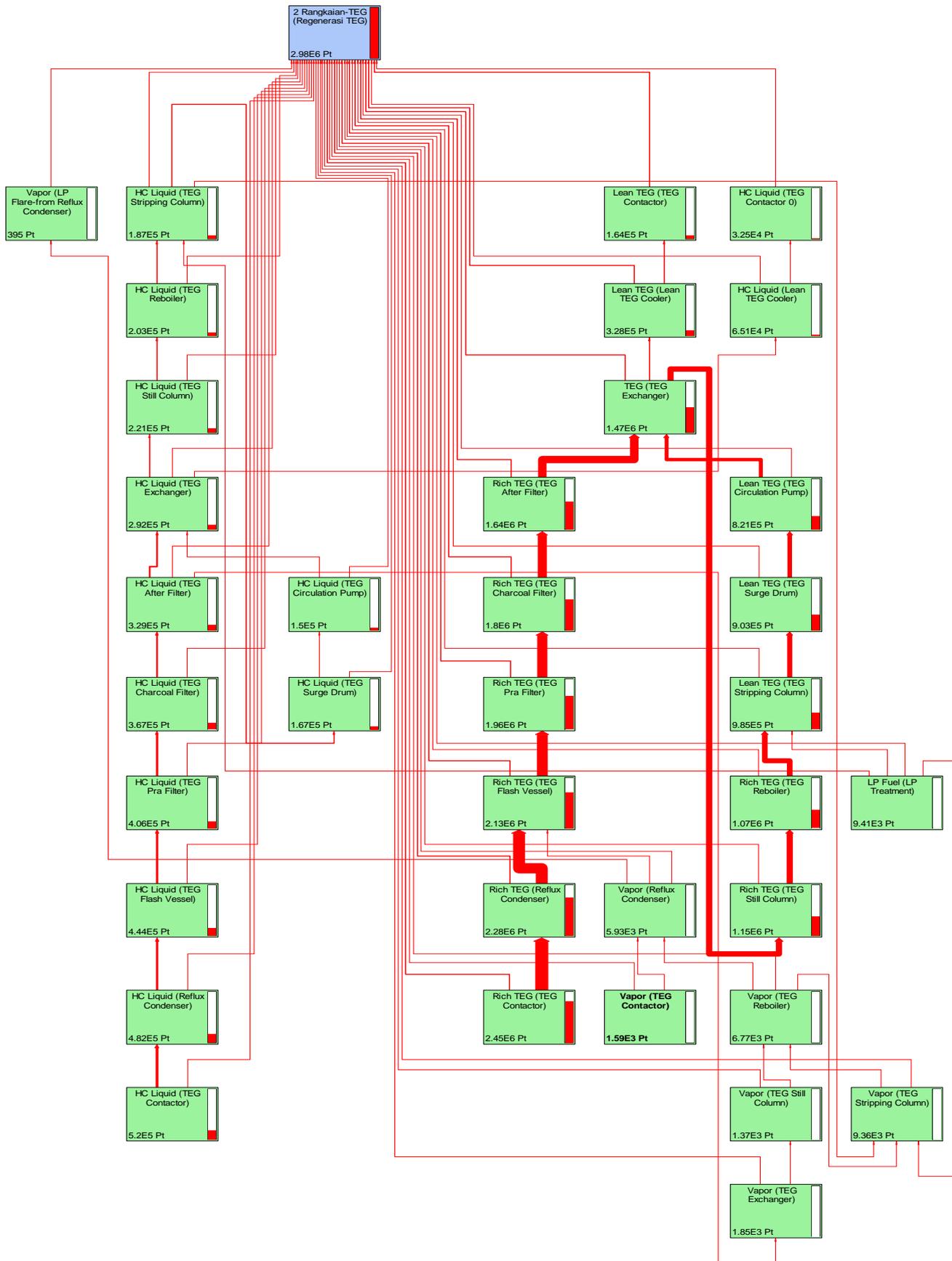
Gambar L.VI. 3 Network dari Condensate Stabilization System
 Sumber: SimaPro 8.4



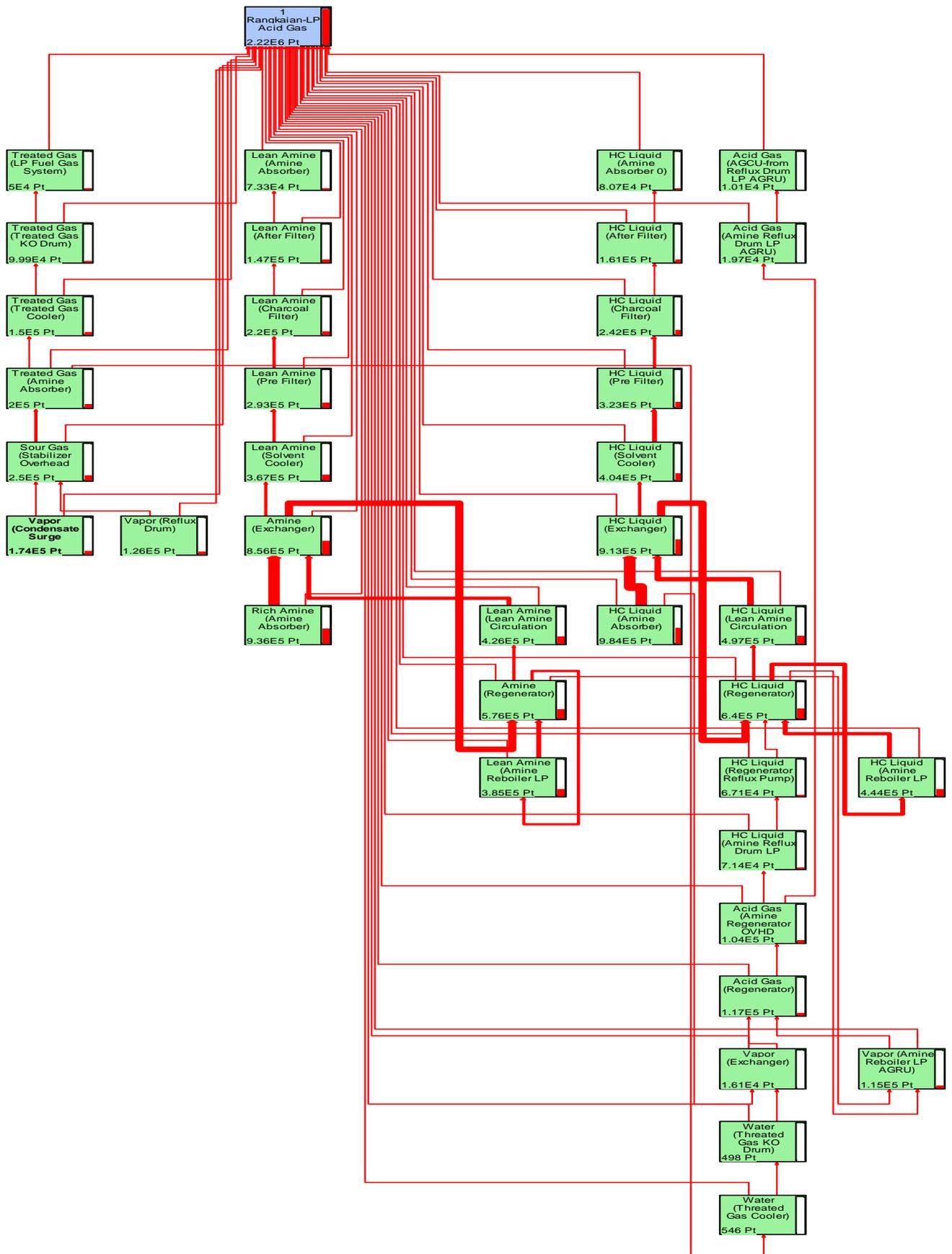
"Halaman ini sengaja dikosongkan"



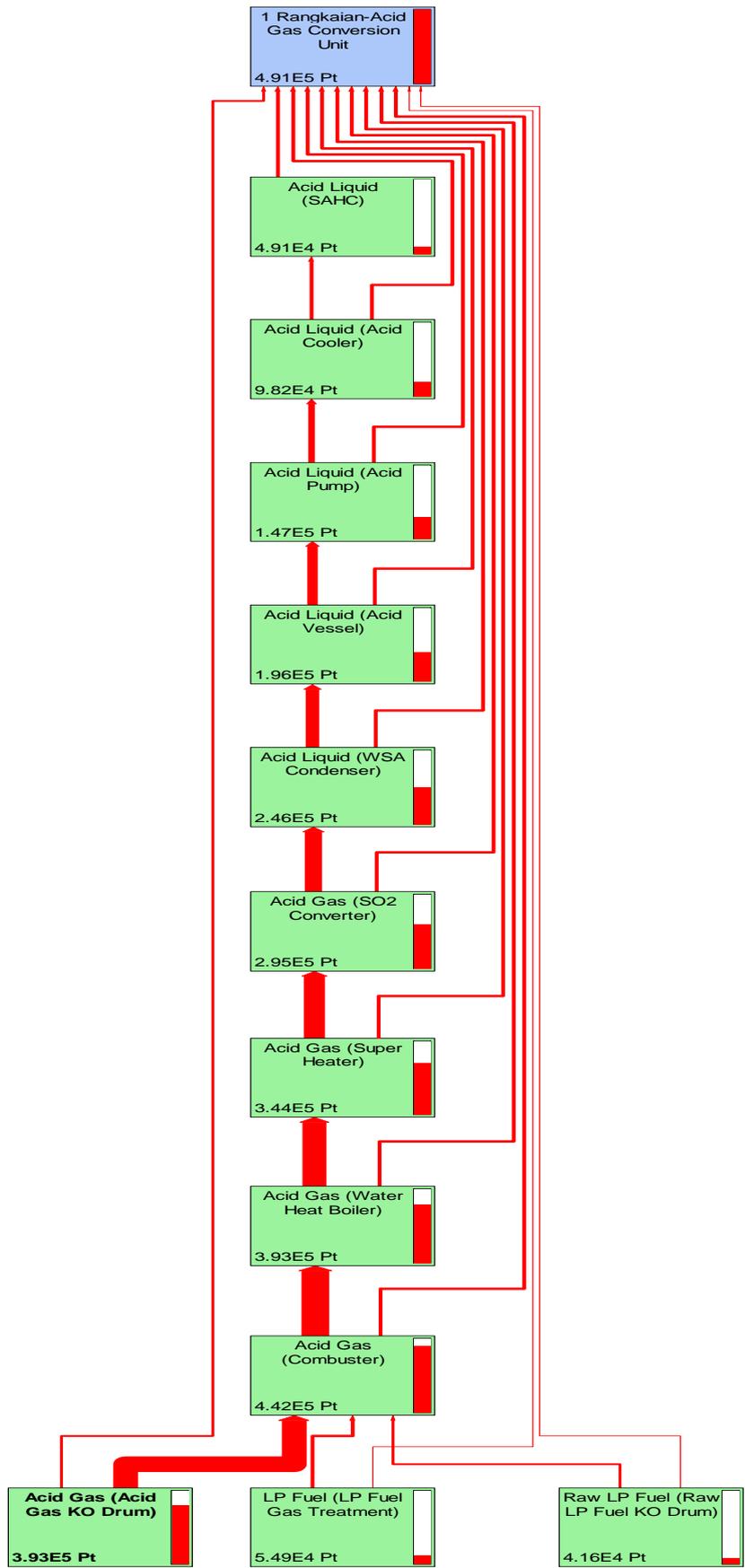
Gambar L.VI. 5 Network dari Proses Regenerasi Amine pada AGRU System
 Sumber: SimaPro 8.4



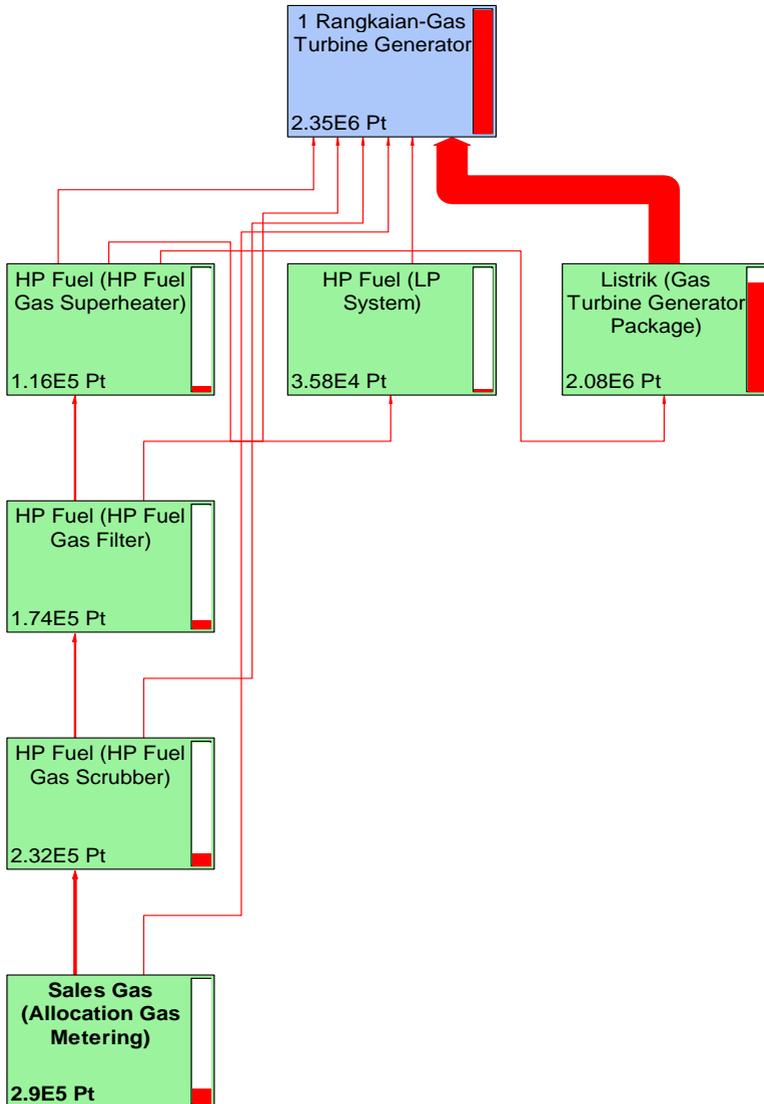
Gambar L.VI. 6 Network dari Proses Regenerasi TEG pada Dehydration Unit
 Sumber: SimaPro 8.4



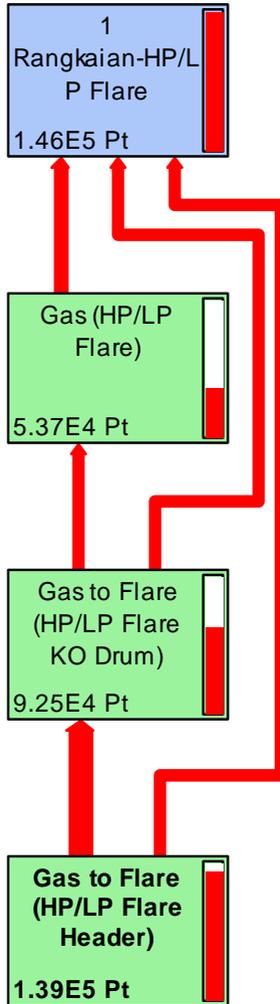
Gambar L.VI. 7 Network dari Proses LP Fuel Gas Treatment
 Sumber: SimaPro 8.4



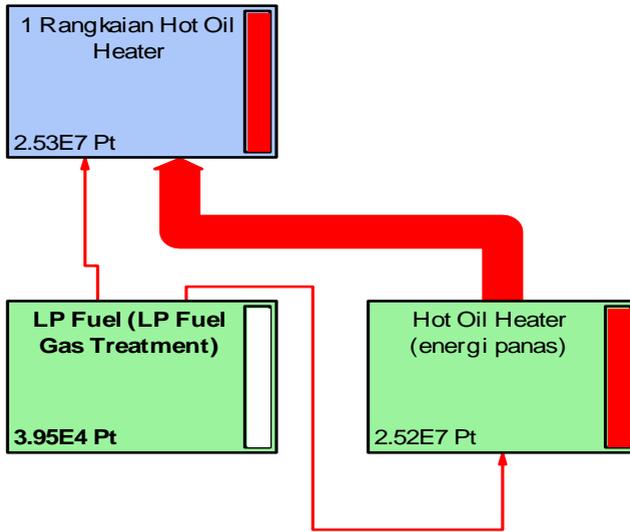
Gambar L.VI. 8 Network dari Proses Acid Gas Conversion Unit
 Sumber: SimaPro 8.4



Gambar L.VI. 9 *Network* dari Proses Unit Gas Turbine Generator
 Sumber: SimaPro 8.4



Gambar L.VI. 10 *Network* dari Proses Unit *Flare*
 Sumber: SimaPro 8.4



Gambar L.VI. 11 *Network* dari Proses Unit *Hot Oil Heater*
Sumber: SimaPro 8.4

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

LAMPIRAN VII

Lampiran ini berisi mengenai hasil analisis LCA pada tahap *Life Cycle Impact Assessment*.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

Tabel L.VII. 1 Hasil Analisis *Single Score* pada Proses *Gas and Gathering Production Separation*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)			
		HC Liquid (Air Fin Cooler)	Sour Gas (Production Separator)	Water (Production Separator)	Condensate (Production Separator)
Human Health	MPt	0,142	0,121	0,00233	0,0128
Ecosystem Quality	MPt	0,00396	0,00339	0,000066	0,000511
Resources	MPt	1,99	1,7	0,0328	0,257

Sumber: SimaPro 8.4

Tabel L.VII. 2 Hasil Analisis *Single Score* pada Proses *Produced Water System*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)								
		Water (Hydrocyclone)	Condensate (Hydrocyclone)	Water (Condensate Surge Vessel-to Degassing Column)	Water (Degassing Column)	Acid Gas (Degassing Column)	Water (Produced Water Storage Tank)	Water (Produced Water Booster Pump)	Water (Produced Water Filter)	Water (Produced water injection Pump)
Human Health	kPt	2,31	0,0167	0,0213	32,8	0,00227	32,8	32,8	32,8	32,8
Ecosystem Quality	kPt	0,0647	0,000468	0,000498	0,0653	0,000064	0,0653	0,0653	0,0653	0,0653
Resources	kPt	32,5	0,235	0,3	2,33	0,032	2,33	2,33	2,33	2,33

Sumber: SimaPro 8.4

Tabel L.VII. 3 Hasil Analisis *Single Score* pada *Condensate Stabilization System*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)								
		Condensate (Condensate Surge Vessel)	Water (Condensate Surge Vessel)	Vapor (Condensate Surge Vessel)	Condensate (Condensate Coalescer)	Condensate (Feed Exchanger)	Vapor (Feed Exchanger)	Condensate (Cooler)	Condensate (Degassing Column)	Condensate (Storage Tank)
Human Health	MPt	0,0195	0,00004	0,00156	0,0195	0,0416	0,000008	0,0231	0,0231	0,0231
Ecosystem Quality	MPt	0,000545	0,000001	0,00004	0,000545	0,00116	0,0000002	0,000649	0,000649	0,000649
Resources	MPt	0,274	0,0000599	0,022	0,274	0,586	0,000117	0,326	0,326	0,326

Sumber: SimaPro 8.4

(Lanjutan Tabel L.VII. 3) Hasil Analisis *Single Score* pada *Condensate Stabilization System*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)								
		Condensate (transfer Pump)	Condensate (Loading tank)	Condensate (Stabilizer)	Vapor (Stabilizer)	Condensate (Reboiler)	Vapor (Reboiler)	Vapor (OVHD)	Condensate (OVHD)	Water (OVHD)
Human Health	MPt	0,0232	0,0232	0,0461	0,00597	0,0236	0,00596	0,00198	0,00399	0,00000008
Ecosystem Quality	MPt	0,000649	0,000649	0,00129	0,000167	0,000662	0,000167	0,00005	0,000112	0,000000002
Resources	MPt	0,326	0,326	0,649	0,0841	0,333	0,084	0,0279	0,0562	0,000001

Sumber: SimaPro 8.4

(Lanjutan Tabel L.VII. 3) Hasil Analisis *Single Score* pada *Condensate Stabilization System*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)			
		Condensate (Reflux Drum)	Vapor (Reflux Drum)	Water (Reflux Drum)	Condensate (Reflux Pump)
Human Health	MPt	0,00399	0,00198	0,00000008	0,00399
Ecosystem Quality	MPt	0,000112	0,00005	0,000000002	0,000112
Resources	MPt	0,0562	0,0279	0,000001	0,0562

Sumber: SimaPro 8.4

Tabel L.VII. 4 Hasil Analisis *Single Score* pada Proses *Gas Treatment Process*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)										
		Sour Gas (Production Filter Coalescer)	Sweet Gas (Amine Contactor)	Water (Amine Contactor)	Rich Amine (Amine Contactor)	Sweet Gas (Sweet Gas Cooler)	Water (Sweet Gas Cooler)	Sweet Gas (Sweet Gas KO Drum)	Water (Sweet Gas KO Drum)	Rich TEG (TEG Contactor)	Dry Gas (TEG Contactor)	HC Liquid (TEG Contactor)
Human Health	MPt	0,121	0,121	0,00285	1,2	0,121	0,000179	0,121	0,000179	0,0645	0,121	0,000934
Ecosystem Quality	MPt	0,00339	0,00339	0,000105	0,0573	0,00338	0,000005	0,00338	0,000005	0,00357	0,00338	0,000169
Resources	MPt	1,7	1,7	0,000549	1,4	1,7	0,00252	1,7	0,00252	0,0951	1,7	0,0823

Sumber: SimaPro 8.4

(Lanjutan Tabel L.VII. 4) Hasil Analisis *Single Score* pada Proses *Gas Treatment Process*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)										
		Vapor (TEG Contactor)	Rich TEG (TEG Coalescer)	Dry Gas (TEG Coalescer)	Rich TEG (TEG Reflux Drum)	Vapor (TEG Reflux Drum)	HC Liquid (TEG Reflux Drum)	HC Liquid (HC Closed Drain)	Rich TEG (Gas/Ga Exchanger)	Dry Gas (Gas/Gas Exchanger)	HC Liquid (Gas/Gas Exchanger)	Sales Gas (Allocation Metering)
Human Health	MPt	0,00004	0,000007	0,121	0,0645	0,00004	0,000428	0,000506	0,000007	0,119	0,00125	0,118
Ecosystem Quality	MPt	0,000001	0,0000004	0,00338	0,00357	0,000001	0,00007	0,00009	0,0000004	0,00334	0,00004	0,0033
Resources	MPt	0,000627	0,00001	1,7	0,0951	0,000627	0,0377	0,0446	0,00001	1,68	0,0176	1,66

Sumber: SimaPro 8.4

(Lanjutan Tabel L.VII. 4) Hasil Analisis *Single Score* pada Proses *Gas Treatment Process*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)											
		Sales Gas (Pipeline)	Propana (Chiller)	Vapor (Chiller)	Rich TEG (Chiller)	HC Liquid (Chiller)	Dry Gas (Chiller)	Water (Chiller)	Dry Gas (Low Temp)	HC Liquid (Low Temp)	Rich TEG (Low Temp)	Vapor (Low Temp)	Water (Low Temp)
Human Health	MPt	0,188	0,0493	0,00957	0,000007	0,00275	0,188	0,0000008	0,188	0,00254	0,0000007	0,000218	0,0000007
Ecosystem Quality	MPt	0,0033	0,00512	0,00037	0,0000004	0,00007	0,0033	0,00000002	0,0033	0,00007	0,0000004	0,000006	0,0000002
Resources	MPt	01,66	0,204	0,137	0,00001	0,0388	01,66	0,00002	01,66	0,0357	0,00002	0,00305	0,00001

Sumber: SimaPro 8.4

Tabel L.VII. 5 Hasil Analisis *Single Score* pada Proses Regenerasi *Amine* di *AGRU System*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)								
		Rich Amine (Flash Drum)	Water (Flash Drum)	Acid Gas (Flash Drum)	Amine (Exchanger)	Water (Exchanger)	Vapor (Exchanger)	Amine (Regenerator)	Water (Regenerator)	Acid Gas (Regenerator)
Human Health	MPt	1,2	0,00264	0,000369	1,6	0,0227	0,000214	0,841	0,0408	0,036
Ecosystem Quality	MPt	0,0573	0,0001	0,00001	0,0766	0,00103	0,000008	0,0403	0,0019	0,00172
Resources	MPt	1,4	0,000508	0,00221	1,87	0,0214	0,00004	0,982	0,0426	0,0418

Sumber: SimaPro 8.4

(Lanjutan Tabel L.VII. 5) Hasil Analisis *Single Score* pada Proses Regenerasi *Amine* di *AGRU System*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)								
		Amine (Reboiler)	Water (Reboiler)	Vapor (Reboiler)	Lean Amine (Booster Pump)	Water (Booster Pump)	Lean Amine (Cooler)	Water (Cooler)	Lean Amine (Pre Filter)	Water (Pre Filter)
Human Health	MPt	0,0406	0,0196	0,036	0,403	0,0196	0,799	0,0111	0,0799	0,00111
Ecosystem Quality	MPt	0,00194	0,00091	0,00172	0,0193	0,000909	0,0382	0,000502	0,00382	0,00005
Resources	MPt	0,0473	0,205	0,0417	0,47	0,0204	0,0932	0,0105	0,0932	0,00105

Sumber: SimaPro 8.4

(Lanjutan Tabel L.VII. 5) Hasil Analisis *Single Score* pada Proses Regenerasi *Amine* di *AGRU System*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)									
		Lean Amine (Charcoal Filter)	Water (Charcoal Filter)	Lean Amine (Pasca Filter)	Water (Pasca Filter)	Lean Amine (Circulation Pump)	Water (Circulation Pump)	Antifoam	Acid Gas (OVHD)	Acid Gas (Reflux Drum)	Water (Reflux Drum)
Human Health	MPt	0,0799	0,00111	0,0799	0,00111	0,0799	0,00111	0,000009	0,036	0,0262	0,00988
Ecosystem Quality	MPt	0,00382	0,00005	0,00382	0,00005	0,00382	0,00005	0,000004	0,00172	0,00125	0,000472
Resources	MPt	0,0932	0,00105	0,0932	0,00105	0,0932	0,00105	0,000002	0,0418	0,0303	0,0114

Sumber: SimaPro 8.4

Tabel L.VII. 6 Hasil Analisis *Single Score* pada Proses Regenerasi *TEG* di *Dehydration Unit*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)									
		Rich TEG (Reflux Condenser)	Vapor (Reflux Condenser)	HC Liquid (Reflux Condenser)	Rich TEG (Flash Vessel)	HC Liquid (Flash Vessel)	Rich TEG (Pra Filter)	HC Liquid (Pra Filter)	Rich TEG (Charcoal Filter)	HC Liquid (Charcoal Filter)	Rich TEG (After Filter)
Human Health	MPt	0,0645	0,00001	0,000428	0,0645	0,000428	0,0645	0,000428	0,0645	0,000428	0,0645
Ecosystem Quality	MPt	0,00357	0,000006	0,00007	0,00357	0,00007	0,00357	0,00007	0,00357	0,00007	0,00357
Resources	MPt	0,0951	0,000382	0,0377	0,0955	0,0377	0,0955	0,0377	0,0955	0,0377	0,0955

Sumber: SimaPro 8.4

(Lanjutan Tabel L.VII. 6) Hasil Analisis *Single Score* pada Proses Regenerasi TEG di *Dehydration Unit*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)									
		HC Liquid (After Filter)	TEG (Exchanger)	Vapor (Exchanger)	HC Liquid (Exchanger)	TEG (Still Column)	Vapor (Still Column)	HC Liquid (Still Column)	Rich TEG (Reboiler)	Vapor (Reboiler)	HC Liquid (Reboiler)
Human Health	MPt	0,000428	0,129	0,000005	0,000805	0,645	0,000005	0,000402	0,645	0,00002	0,000402
Ecosystem Quality	MPt	0,00007	0,00714	0,0000009	0,000135	0,00357	0,0000009	0,00007	0,00357	0,000002	0,00007
Resources	MPt	0,0377	0,192	0,000477	0,064	0,0958	0,000477	0,032	0,0958	0,000852	0,032

Sumber: SimaPro 8.4

(Lanjutan Tabel L.VII. 6) Hasil Analisis *Single Score* pada Proses Regenerasi TEG di *Dehydration Unit*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)									
		Lean TEG (Stripping Column)	Vapor (Stripping Column)	HC Liquid (Stripping Column)	Lean TEG (Surge Drum)	HC Liquid (Surge Drum)	Lean TEG (Circulation Pump)	HC Liquid (Circulation Pump)	Lean TEG (TEG Cooler)	HC Liquid (TEG Cooler)	(LP Treatment)
Human Health	MPt	0,0646	0,000107	0,000412	0,0646	0,000412	0,0646	0,000413	0,0645	0,000404	0,000138
Ecosystem Quality	MPt	0,00357	0,00001	0,00006	0,00357	0,00006	0,00357	0,00006	0,00357	0,00007	0,000008
Resources	MPt	0,096	0,00397	0,0294	0,096	0,0294	0,096	0,0294	0,0958	0,0321	0,000816

Sumber: SimaPro 8.4

Tabel L.VII. 7 Hasil Analisis *Single Score* pada Proses LP *Fuel Gas Treatment*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)									
		LP Gas (Filter Coalescer)	Treated Gas (Amine Absorber)	Rich Amine (Amine Absorber)	HC Liquid (Amine Absorber)	Treated Gas (Gas Cooler)	Water (Gas Cooler)	Treated Gas (KO Drum)	Water (KO Drum)	Amine (Exchanger)	Vapor (Exchanger)
Human Health	MPt	0,00331	0,00331	0,0362	0,000934	0,00331	0,000003	0,00331	0,000003	0,0665	0,00002
Ecosystem Quality	MPt	0,00009	0,00009	0,00173	0,000169	0,00009	0,00000009	0,00009	0,00000009	0,00318	0,000003
Resources	MPt	0,0466	0,0466	0,0422	0,0823	0,0466	0,00004	0,0466	0,00004	0,0775	0,00164

Sumber: SimaPro 8.4

(Lanjutan Tabel L.VII. 7) Hasil Analisis *Single Score* pada Proses *LP Fuel Gas Treatment*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)									
		HC Liquid (Exchanger)	Acid Gas (Regenerator)	HC Liquid (Regenerator)	Amine (Regenerator)	Vapor (Reboiler)	Lean Amine (Reboiler)	HC Liquid (Reboiler)	Lean Amine (Circ. Pump)	HC Liquid (Circ. Pump)	Lean Amine (Cooler)
Human Health	MPt	0,036	0,637	0,00556	0,00328	0,0033	0,0303	0,00269	0.0303	0,00269	0.0331
Ecosystem Quality	MPt	0,000409	0,00305	0,000504	0,000165	0,000168	0,00145	0,000244	0.00145	0,000243	0.00159
Resources	MPt	0,159	0,0743	0,162	0,00894	0,0106	0,0354	0,0783	0.0353	0,0782	0.0386

Sumber: SimaPro 8.4

(Lanjutan Tabel L.VII. 7) Hasil Analisis *Single Score* pada Proses *LP Fuel Gas Treatment*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)										
		HC Liquid (Cooler)	Lean Amine (Pra Filter)	HC Liquid (Pra Filter)	Lean Amine (Charcoal Filter)	HC Liquid (Charcoal Filter)	Lean Amine (Pasca Filter)	HC Liquid (Pasca Filter)	Acid Gas (OVHD)	Acid Gas (Reflux Drum)	HC Liquid (Reflux Drum)	HC Liquid (Reflux Pump)
Human Health	MPt	0.00179	0.0331	0.00179	0.0331	0.00179	0.0331	0.00179	0,0033	0.00225	0.00105	0.00105
Ecosystem Quality	MPt	0.000203	0.00159	0.000203	0.00159	0.000203	0.00159	0.000203	0,000168	0.000114	0.00005	0.00005
Resources	MPt	0.0788	0.0386	0.0788	0.0386	0.0788	0.0386	0.0788	0,0106	0.0072	0.00338	0.00338

Sumber: SimaPro 8.4

Tabel L.VII. 8 Hasil Analisis *Single Score* pada Proses *Acid Gas Conversion Unit*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)								
		Acid Gas (Acid Gas KO Drum)	Acid Gas (Combuster)	Acid Gas (Water Heat Boiler)	Acid Gas (Super Heater)	Acid Gas (SO2 Converter)	Acid Liquid (WSA Condenser)	Acid Liquid (Acid Vessel)	Acid Liquid (Acid Pump)	Acid Liquid (Acid Cooler)
Human Health	kPt	15.58216	16.37929	16.37929	16.37929	16.38042	16.37929	16.37929	16.37929	16.37929
Ecosystem Quality	kPt	0.75165	0.783987	0.783987	0.783987	0.784041	0.783987	0.783987	0.783987	0.783987
Resources	kPt	22.97124	31.96488	31.96488	31.96488	31.96708	31.96488	31.96488	31.96488	31.96488

Sumber: SimaPro 8.4

Tabel L.VII. 9 Hasil Analisis *Single Score* pada Proses Unit *Gas Turbine Generator*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)			
		HP Fuel (HP Fuel Gas Scrubber)	HP Fuel (HP Fuel Gas Filter)	HP Fuel (HP Fuel Gas Superheater)	Listrik (Gas Turbine Generator Package)
Human Health	MPt	0.003839	0.003839	0.003839	2.057851
Ecosystem Quality	MPt	0.000108	0.000108	0.000108	0.000765
Resources	MPt	0.054058	0.054058	0.054058	0.02066

Sumber: SimaPro 8.4

Tabel L.VII. 10 Hasil Analisis *Single Score* pada Proses Unit *Flare*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)		
		Gas to Flare (HP/LP Flare Header)	Gas to Flare (HP/LP Flare KO Drum)	Gas (HP/LP Flare)
Human Health	kPt	2.920553	2.920553	10.30334
Ecosystem Quality	kPt	0.088435	0.088435	0.203623
Resources	kPt	43.2265	43.2265	43.2265

Sumber: SimaPro 8.4

Tabel L.VII. 11 Hasil Analisis *Single Score* pada Proses Unit *Hot Oil Heater*

Damage category	Unit	Produk (Unit Kegiatan)
		Hot Oil Heater (energi panas)
Human Health	MPt	25.216
Ecosystem Quality	MPt	8.91E-05
Resources	MPt	1.36E-06

Sumber: SimaPro 8.4

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BIOGRAFI PENULIS



Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Lahir di Jakarta pada tanggal 9 November 1996. Penulis mengenyam pendidikan dasar pada tahun 2002-2008 di SDN Manggarai 05 Pagi, Jakarta Selatan. Kemudian dilanjutkan di SMPN 73 Jakarta pada tahun 2008-2011, sedangkan pendidikan tingkat atas dilalui di SMAN 26 Jakarta pada tahun 2011-2014. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan Sarjana di Departemen Teknik

Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan, ITS, Surabaya pada tahun 2014 dan terdaftar dengan NRP 032 1144 0000 106.

Selama perkuliahan, penulis aktif sebagai panitia di berbagai kegiatan di lingkup ITS, baik tingkat jurusan, fakultas, maupun tingkat institut. Selain sebagai panitia, penulis juga aktif di bidang manajerial lainnya seperti pernah menjadi staff di Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa (PSDM) BEM FTSP ITS, staff dari *steering committee* Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan FTSLK ITS, dan kepala divisi bakti lingkungan di Kelompok Pecinta dan Pemerhati Lingkungan (KPPL) HMTL FTSLK ITS. Selain itu, penulis aktif di berbagai kepanitian tingkat regional. Penulis juga berpengalaman sebagai asisten laboratorium untuk mata kuliah Kimia Lingkungan I dan Mikrobiologi Lingkungan. Prestasi yang pernah diraih adalah juara 1 *Smart Innovation of Writing-National Writing Competition* (2018). Penulis pernah melaksanakan kerja praktik di JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi (2017) dan bekerja sebagai penilai *self assessment* Proper Biru (2018). Penulis pernah mengikuti berbagai pelatihan dalam rangka pengembangan diri. Penulis dapat dihubungi melalui email nadia.andistiara@gmail.com.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"