

KAJIAN DAMPAK EMISI UDARA TERHADAP LINGKUNGAN PADA PROSES PRODUKSI MINYAK DAN GAS BUMI DI PT. X MENGGUNAKAN METODE *LIFE CYCLE ASSESSMENT* (LCA)

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF AIR EMISSIONS ON THE ENVIRONMENT IN THE OIL AND GAS PRODUCTION PROCESS AT PT. X USING THE LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) METHOD

Theresia Canthika Saraswati¹⁾ dan Abdu Fadli Assomadi^{1*)}

¹⁾Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya 60111, Indonesia

^{*)}E-mail: assomadi@its.ac.id

Abstrak

PT. X telah melakukan kajian *Life Cycle Assessment* (LCA) pada tahun 2019. Namun, belum dibuktikan bahwa program reduksi emisi udara yang telah diimplementasikan efektif dalam mereduksi dampak lingkungan yang terjadi. Pada penelitian ini, kajian LCA dilanjutkan untuk mengidentifikasi dampak lingkungan terbesar yang terjadi dan unit *hotspot* setelah dilaksanakan program reduksi emisi udara serta mengetahui efektivitas program. *Software* SimaPro digunakan untuk melakukan analisis LCA, dengan pendekatan *midpoint* dan menggunakan metode CML-IA *Baseline*. Berdasarkan analisis LCA, dampak lingkungan terbesar yang terjadi di PT. X adalah *acidification* di SP A, B, C dan *global warming* (GWP100a) di SP D. Program reduksi emisi udara yang telah diimplementasikan sejak tahun 2019 telah efektif menurunkan dampak yang terjadi. Perbaikan yang direkomendasikan untuk mengurangi dampak *acidification* dan *global warming* adalah mengganti *diesel engine* menjadi *gas engine*, pemasangan *Non-Selective Catalytic Reduction* (NCSR), memanfaatkan gas *flare* menjadi *compressed natural gas*, dan melakukan *enhance oil recovery* menggunakan teknologi *carbon capture separation* untuk menangkap gas CO₂.

Kata kunci: Emisi udara, *life cycle assessment*, minyak dan gas bumi, *onshore*, SimaPro.

Abstract

PT. X has conducted a *Life Cycle Assessment* (LCA) study in 2019. However, it has not been proven that the air emission reduction program that has been implemented is effective in reducing the environmental impacts that occur. In this study, the LCA study is continued to identify the largest environmental impacts that occur and hotspot units after implementing the air emission reduction program and determine the effectiveness of the program. SimaPro software was used to conduct the LCA analysis, with a midpoint approach and using the CML-IA *Baseline* method. Based on the LCA analysis, the biggest environmental impacts that occur at PT X are *acidification* in SP A, B, C and *global warming* (GWP100a) in SP D. the air emission reduction program that has been implemented since 2019 has effectively reduced the impacts that occur. The recommended improvements to reduce the impact of *acidification* and *global warming* are replacing diesel engines with gas engines, installing *Non-Selective Catalytic Reduction* (NCSR), utilizing flare gas into

compresses natural gas, and enhancing oil recovery using carbon capture separation technology to capture CO₂ gas.

Keywords: Air emissions, life cycle assessment, oil and gas, onshore, SimaPro.

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang masih bergantung pada energi fosil untuk memenuhi kebutuhan energi nasional. Berdasarkan data dari Dewan Energi Nasional Republik Indonesia, pada tahun 2019 sumber energi Indonesia masih didominasi oleh bahan bakar fosil, seperti batubara (37,15%), minyak bumi (33,58%), gas (20,13%), sedangkan penggunaan Energi Baru Terbarukan (EBT) masih sedikit (9,15%). PT. X merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di kegiatan industri minyak dan gas bumi. Kegiatan yang dilakukan PT. X yaitu eksplorasi dan produksi minyak dan gas bumi yang mencakup kegiatan pencarian sumber minyak hingga produksi minyak dan gas bumi.

Namun disisi lain, produksi minyak dan gas bumi akan memberikan beberapa dampak terhadap lingkungan seperti penurunan kualitas udara dan pemanasan global (Haryanto dan Berly, 2015). Salah satu upaya yang dilakukan pemerintah Indonesia untuk mengatasi pemanasan global yaitu meratifikasi *Paris Agreement* tahun 2015. Komitmen Indonesia pada *Paris Agreement* yaitu menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK) pada tahun 2030 sebesar dua puluh sembilan persen dengan pendanaan APBN/APBD serta sampai empat puluh satu persen dengan dukungan internasional. Komitmen tersebut dituangkan dalam bentuk *Nationally Determined Contribution* (NDC). NDC merupakan rencana aksi mitigasi dan adaptasi perubahan iklim. Dalam NDC Indonesia terdapat lima sektor dalam upaya penurunan emisi GRK yaitu kehutanan, energi, pertanian, industri, dan limbah.

PT. X termasuk dalam sektor energi. Salah satu upaya yang dilakukan PT. X untuk mendukung program NDC yaitu dengan menerapkan kegiatan produksi bersih. Metode yang dilakukan PT. X untuk menerapkan produksi

bersih yaitu melakukan analisis daur hidup atau *Life Cycle Assessment*. Rujukan (Haryanto *et al.*, 2012) menjelaskan *Life Cycle Assessment* merupakan sebuah analisis keseluruhan siklus dari proses produksi hingga pengolahan limbah. Analisis LCA digunakan untuk mengetahui jumlah energi, biaya, dan dampak lingkungan yang disebabkan oleh tahapan daur hidup produk dimulai dari saat pengambilan bahan baku sampai produk itu selesai digunakan oleh konsumen. Dengan LCA, kita dapat memahami informasi detail mengenai dampak lingkungan dari suatu produksi, sehingga dapat menentukan perbaikan atau inovasi yang terbaik untuk mengurangi dampak lingkungan yang terjadi dan meningkatkan kinerja perusahaan supaya lebih *sustainable* dan optimal. Hasil dari analisis LCA dapat dijadikan acuan bagi perusahaan dalam memilih program perbaikan untuk mengurangi emisi udara yang terjadi.

PT. X telah melakukan kajian LCA pada tahun 2019. Beberapa program reduksi emisi udara telah dilaksanakan di PT. X. Namun, belum dibuktikan bahwa program reduksi emisi udara yang telah diimplementasikan efektif dalam menurunkan dampak lingkungan yang terjadi. Pada penelitian ini, kajian LCA dilanjutkan untuk mengidentifikasi dampak lingkungan terbesar yang terjadi dan unit *hotspot* setelah dilaksanakan program reduksi emisi udara, serta mengetahui efektivitas dari program reduksi emisi udara. Oleh karena itu, dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat digunakan oleh PT. X sebagai *continuous improvement* perusahaan dalam mereduksi emisi udara.

2. METODE

Analisis LCA menggunakan *software* SimaPro dengan pendekatan *midpoint*. Metode yang digunakan pada kajian ini adalah CML-IA *Baseline* dengan mengkaji dampak lingkungan *global warming (100a)*, *ozone layer depletion*, *photochemical oxidation*, *acidification*, *human*

toxicity, dan *eutrophication*. Database yang digunakan pada penelitian ini adalah Ecoinvent 3.0 *allocation cut off by classification-unit*.

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data sekunder yang mencakup inventori input dan output produksi pada tahun 2020. Input merupakan jumlah bahan baku, bahan bakar/energi, dan bahan kimia yang digunakan. Sedangkan output merupakan jumlah produk dan emisi yang dihasilkan. Unit fungsional yang digunakan yaitu per 1000 TOE minyak dan gas bumi.

Perhitungan beban emisi menggunakan perhitungan yang sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2012. Analisis *benchmarking* intensitas emisi dilakukan untuk emisi GRK, SO_x, dan NO_x. Analisis efektivitas program reduksi emisi udara dilakukan dengan melakukan perbandingan hasil kajian LCA sebelum (2018) dan sesudah dilakukan program. Hasil dari analisis LCA akan digunakan untuk menentukan rekomendasi perbaikan yang dapat diterapkan untuk mereduksi dampak yang terjadi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Penentuan Goal dan Scope

Tujuan dari analisis LCA pada penelitian ini yaitu untuk mengidentifikasi dampak lingkungan terbesar yang terjadi akibat proses produksi minyak dan gas bumi di PT. X, serta mengetahui unit kontributor terbesar sehingga dapat menentukan rekomendasi perbaikan yang tepat dalam upaya mengurangi dampak lingkungan terbesar yang terjadi. *Scope* analisis LCA yang digunakan antara lain:

- Lingkup *gate to gate* digunakan pada penelitian ini, yang berawal dari pengambilan minyak dan gas bumi dengan *wellhead* sampai produk dikirim kepada konsumen serta pembakaran gas dengan *flare*. Pada penelitian ini, stasiun pengumpul yang dikaji terdiri dari SP A, SP B, SP C, dan SP D.
- Fungsional unit dalam kajian LCA ini

adalah per 1000 TOE minyak dan gas bumi. *Output* dampak hasil kajian LCA yang dihasilkan berupa dampak dari proses produksi per satuan masa produk.

- Dalam proses produksi migas di PT. X, dihasilkan dua jenis produk yaitu minyak dan gas bumi. Oleh karena itu perlu dilakukan alokasi nilai output dampak. Besarnya alokasi persentase adalah sebagai berikut persentase produksi minyak bumi 42% persentase produksi gas bumi adalah 58%.

3.2 Life Cycle Inventory

Life Cycle Inventory dilakukan dengan mengumpulkan data inventori berupa *input* dan *output* produksi dari tiap unit. Pada analisis LCI, terdapat beberapa tahap yang terdiri dari analisis *mass balance* keseluruhan produksi, perhitungan beban emisi, dan *life cycle inventory* per unit.

3.2.1 Analisis Mass Balance

PT. X mempunyai 4 stasiun pengumpul yaitu SP A, SP B, SP C, dan SP D. Produk utama dari proses produksi migas di PT. X merupakan minyak dan gas bumi. Selain disalurkan kepada konsumen, sisa gas bumi yang tersedia dimanfaatkan di SP A, B, dan C sebagai bahan bakar gas tambahan untuk peralatan pembakaran dalam seperti mesin *genset* untuk *power plant* (pembangkit listrik), mesin penggerak kompresor, dan mesin untuk memompa minyak dan gas bumi. Terdapat beberapa asumsi yang digunakan pada penelitian ini. Asumsi dilakukan karena kurangnya ketersediaan data yang detail. Berikut asumsi yang digunakan:

- Cairan yang didapatkan dari unit *scrubber* diabaikan karena selain tidak tersedianya data, jumlahnya hanya sedikit sehingga tidak memberi perbedaan yang signifikan terhadap *input* dan *output*.
- Pengaruh penggunaan bahan kimia diabaikan karena tidak tersedia komposisi bahan kimia yang digunakan pada lembar data keselamatan bahan (LDKB). Sehingga komposisi bahan kimia tidak dimasukkan ke dalam database SimaPro. Asumsi tersebut juga digunakan pada kajian tahun

2019, sehingga masih dapat dilakukan perbandingan hasil kajian.

3.2.2 Perhitungan Beban Emisi

Berdasarkan Permen LH No.12 tahun 2012, perhitungan beban emisi dilakukan berdasarkan sumber emisi dan bergantung pada ketersediaan data perusahaan dalam memilih tingkat tier dan rumus. Dengan ketersediaan data yang ada, perhitungan menggunakan Tier 1. Sumber emisi pada kegiatan produksi minyak dan gas bumi di PT. X terdiri dari unit pembakaran dalam, tangki timbun, dan *flare*.

Perhitungan beban emisi unit pembakaran dalam dilakukan dengan mengalikan pemakaian bahan bakar tiap unit selama satu tahun dengan faktor emisi. Jumlah pemakaian bahan bakar diperoleh dari perhitungan estimasi, yaitu dengan mengkonversi *output* energi menjadi *input* energi dari unit pembakaran dalam (KLH No. 12, 2012). Perhitungan beban emisi tangki timbun dilakukan dengan mengalikan volume *throughput oil* dengan faktor emisi. Perhitungan beban emisi unit *flare* dilakukan dengan mengalikan jumlah *gas flaring* dengan faktor emisi. Hasil perhitungan beban emisi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Beban Emisi di PT. X Tahun 2020

Parameter	Beban Emisi (ton/tahun)			Total
	Pembakaran Dalam	Tangki Timbun	Flare	
CO ₂	87695,61		10385,22	98080,83
CH ₄	892,04	0,032	139,27	1031,34
N ₂ O	7,01		0,322	7,34
NO _x	2423,10		5,97	2429,07
SO _x	0,619		0,051	0,670
PM	8,88			8,88
VOC		17,67*	59,69	77,36

Keterangan: *nmVOC

Berdasarkan Tabel 1, sumber unit pembakaran dalam menghasilkan beban emisi terbesar dibandingkan unit tangki timbun dan *flare*. Di PT. X, unit pembakaran dalam digunakan pada *wellhead*, *compressor*, dan *power plant* sebagai mesin penggerak ketiga unit tersebut. Dengan

melakukan analisis LCIA, kita akan mendapatkan informasi mengenai unit yang berkontribusi terbesar terhadap dampak lingkungan.

3.2.3 LCU Per Unit

Life cycle inventory per unit merupakan tahap merekapitulasi dan menggabungkan data *input* dan *output* masing-masing unit, yang telah dilakukan pada tahap analisis *mass balance* dan perhitungan beban emisi. Melalui analisis LCI masing-masing unit, kita dapat memperkirakan unit kontributor terbesar terhadap dampak lingkungan, dengan mengidentifikasi unit yang menghasilkan beban emisi terbesar.

Unit *wellhead* merupakan penghasil emisi terbesar dengan emisi CO₂ (25011,70 ton/tahun), CH₄ (254,39 ton/tahun), N₂O (2 ton/tahun), NO_x (691,08 ton/tahun), SO_x (0,184 ton/tahun), dan PM (2,68 ton/tahun). Namun, belum pasti bahwa unit *wellhead* akan berkontribusi terbesar terhadap dampak lingkungan. Sehingga dilakukan LCIA, untuk mendapatkan informasi yang lebih spesifik serta membuktikan apakah unit *wellhead* merupakan kontributor terbesar terhadap dampak lingkungan.

3.3 Benchmarking Intensitas Emisi

Analisis *benchmarking* dilakukan dengan membandingkan intensitas emisi udara PT. X dengan perusahaan lain yang sejenis. Tujuan dilakukan analisis *benchmarking* yaitu untuk mengetahui posisi kinerja perusahaan dalam mereduksi emisi udara.

Pada penelitian ini, *benchmarking* intensitas emisi udara dilakukan dalam skala nasional dan dunia. *Benchmarking* skala nasional menggunakan grafik dari Peraturan Dirjen PPKL Nomor P.14 tahun 2020. Sedangkan *benchmarking* skala dunia menggunakan laporan *benchmarking* dan *sustainability report* tahunan masing-masing perusahaan.

Berdasarkan Peraturan Dirjen PPKL Nomor P.14 tahun 2020, Intensitas emisi yang dibandingkan terdiri dari emisi gas rumah kaca (CO₂, CH₄, dan N₂O), sulfur oksida (SO_x), dan

nitrogen oksida (NO_x) (DJPPKL, 2020). Hasil perhitungan intensitas emisi dan *benchmarking* masing-masing emisi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. *Benchmarking* Intensitas Emisi PT. X Tahun 2020

Emisi	Intensitas Emisi (ton/1000 TOE)	Skala	Peringkat
GRK	839,71	Nasional Dunia	25% terbawah
SO _x	0,00436	Nasional Dunia	50% rata-rata 25% teratas
NO _x	15,82	Nasional Dunia	25% terbawah

Berdasarkan hasil analisis *benchmarking* intensitas emisi, tahun 2020 intensitas emisi GRK dan NO_x PT. X masih berada di peringkat 25% terbawah baik dalam skala nasional maupun dunia. Oleh karena itu, analisis LCIA dan *hotspot* perlu dilakukan untuk mengetahui titik *hotspot* yang menghasilkan emisi GRK dan NO_x terbesar, sehingga peringkat intensitas emisi dapat meningkat menjadi 25% teratas.

3.4 Life Cycle Impact Assessment

Life cycle impact assessment (LCIA) mencakup perhitungan data input dan output yang dikompilasi dalam LCI akan dikaitkan dengan dampak lingkungan. Sebelum melakukan perhitungan, inventori harus disesuaikan dengan unit fungsional yang digunakan. Pada penelitian ini, LCIA terdiri dari dua langkah yaitu karakterisasi dan normalisasi. *Running* SimaPro dibagi menjadi dua. *Running* 1 merupakan gabungan dari stasiun pengumpul A, B, dan C karena ketiga stasiun pengumpul saling berhubungan. *Running* 2 dilakukan untuk stasiun pengumpul D karena alur produksinya terpisah dengan stasiun pengumpul lainnya.

3.4.1 Karakterisasi

Tahap karakterisasi merupakan tahap untuk mengidentifikasi dampak yang terjadi dengan mengalikan data LCI dengan faktor karakterisasi masing-masing kategori dampak. Output dari tahapan karakterisasi merupakan nilai besaran dampak lingkungan yang terjadi pada proses produksi migas dengan satuan masing-masing

kategori dampak. Hasil analisis karakterisasi keempat stasiun pengumpul menggunakan *software* SimaPro dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Karakterisasi Metode CML-IA Baseline

Dampak Kategori	Satuan	SP A, B, dan C	SP D
<i>Global warming</i> (GWP100a)	kg CO ₂ eq/1000 TOE	3,98×10 ⁵	3,38×10 ⁴
<i>Ozone layer depletion</i>	kg CFC-11 eq/1000 TOE	0	0
<i>Human toxicity</i>	kg 1,4-DB eq/1000 TOE	9205,51	386,50
<i>Photochemical oxidation</i>	kg C ₂ H ₄ eq/1000 TOE	19,02	1,80
<i>Acidification</i>	kg SO ₂ eq/1000 TOE	3835,63	161,04
<i>Eutrophication</i>	kg PO ₄ ³⁻ eq/1000 TOE	1003,47	42,23

a. Global Warming (GWP 100a)

Total dampak *global warming* yang terjadi di SP A, B, dan C yaitu sebesar 3,98 x 10⁵ kg CO₂ eq/1000 TOE, sedangkan dampak *global warming* yang terjadi di SP D sebesar 3,38 x 10⁴ kg CO₂ eq/1000 TOE. Berdasarkan Gambar 1, Substansi yang berkontribusi terhadap dampak *global warming* adalah emisi karbon dioksida, methana, dan dinitrogen monoksida.

b. Human Toxicity

Total dampak *human toxicity* yang terjadi di SP A, B, dan C yaitu sebesar 9205,51 kg 1,4-DB eq/1000 TOE dan 386,50 kg 1,4-DB eq/1000 TOE pada SP D. Berdasarkan Gambar 2, substansi yang berkontribusi terhadap dampak *human toxicity* adalah emisi nitrogen oksida.

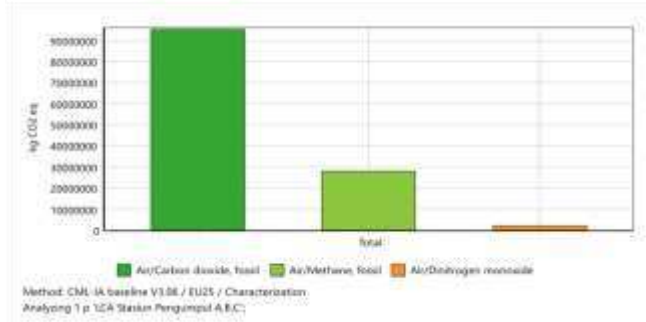
c. Photochemical Oxidation

Total dampak *photochemical oxidation* yang terjadi di SP A, B, dan C yaitu sebesar 19,02 kg C₂H₄ eq/1000 TOE dan 1,80 kg C₂H₄ eq/1000 TOE pada SP D. Berdasarkan Gambar 3, Substansi yang berkontribusi terhadap dampak

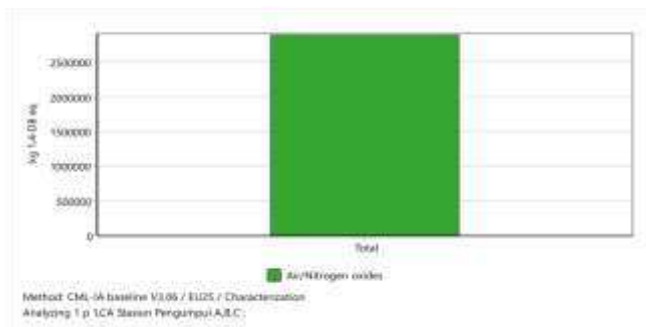
photochemical oxidation adalah emisi methana.

d. Acidification

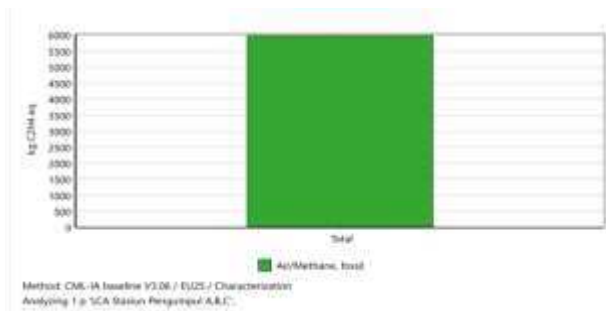
Total dampak *acidification* yang terjadi di SP A, B, dan C yaitu sebesar 3835,63 kg SO₂ eq/1000 TOE, sedangkan dampak *acidification* yang terjadi di SP D sebesar 161,04 kg SO₂ eq/1000 TOE. Berdasarkan Gambar 4, Substansi yang berkontribusi terhadap dampak *acidification* adalah emisi nitrogen oksida.



Gambar 1. Kontributor Substansi Terhadap Dampak *Global Warming (GWP 100a)*



Gambar 2. Kontributor Substansi Terhadap Dampak *Human Toxicity*

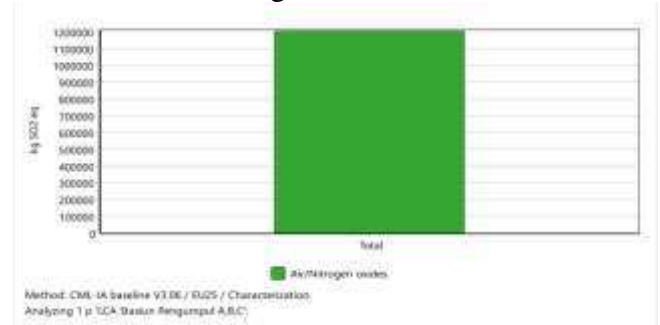


Gambar 3. Kontributor Substansi Terhadap Dampak *Photochemical Oxidation*

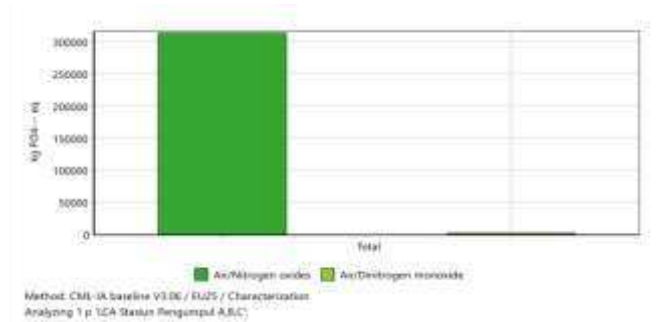
e. Eutrophication

Total dampak *eutrophication* yang terjadi di SP A, B, dan C yaitu sebesar 1003,47 kg PO₄³⁻ eq/1000 TOE dan 42,23 kg PO₄³⁻ eq/1000 TOE

pada SP D. Berdasarkan Gambar 5, substansi yang berkontribusi terhadap dampak *eutrophication* adalah emisi dinitrogen monoksida dan nitrogen oksida.



Gambar 4. Kontributor Substansi Terhadap Dampak *Acidification*



Gambar 5. Kontributor Substansi Terhadap Dampak *Eutrophication*

Berdasarkan Tabel 3, proses produksi migas di SP A, B, dan C lebih berpotensi memberikan dampak *global warming*, *human toxicity*, *photochemical oxidation*, *acidification*, dan *eutrophication* yang terjadi dibandingkan proses produksi migas di SP D. Hal ini dapat disebabkan oleh cakupan proses produksi, dimana SP A, B, dan C terdiri dari 3 stasiun pengumpul sedangkan SP D hanya terdiri dari 1 stasiun pengumpul.

Dari 6 kategori dampak yang dihitung, dampak yang terjadi hanya 5 dari 6 kategori dampak. Dampak yang tidak terjadi yaitu *ozone layer depletion*. Berdasarkan perhitungan menggunakan metode CML-IA *Baseline*, tidak ada parameter gas yang diinput yang mempengaruhi terjadinya *ozone layer depletion*. Sehingga nilai karakterisasi dampak *ozone layer depletion* sebesar 0 kg CFC-11 eq/1000 TOE.

3.4.2 Normalisasi

Tahap normalisasi merupakan tahap menghilangkan satuan dengan mengalikan nilai karakterisasi dengan faktor normalisasi. Melalui hasil normalisasi, kategori dampak yang terjadi dapat dibandingkan dan diurutkan untuk mengetahui kategori dampak terbesar yang terjadi pada proses produksi migas di keempat stasiun pengumpul.

Tabel 4. Hasil Normalisasi

Dampak Kategori	SP A, B, dan C	SP D
<i>Global warming (GWP100a)</i>	$7,2 \times 10^{-8}$	$3,36 \times 10^{-9}$
<i>Ozone layer depletion</i>	0	0
<i>Human toxicity</i>	$1,19 \times 10^{-9}$	$2,49 \times 10^{-11}$
<i>Photochemical oxidation</i>	$2,24 \times 10^{-9}$	$1,06 \times 10^{-10}$
<i>Acidification</i>	$1,36 \times 10^{-7}$	$2,86 \times 10^{-9}$
<i>Eutrophication</i>	$7,61 \times 10^{-8}$	$1,60 \times 10^{-9}$

Berdasarkan Tabel 4, dampak terbesar yang terjadi pada proses produksi migas di SP A, B, dan C adalah *acidification* sebesar $1,36 \times 10^{-11}$, sedangkan dampak terbesar yang terjadi di SP D adalah *global warming* sebesar $3,36 \times 10^{-9}$.

3.5 Interpretasi Hasil LCA

Tahap interpretasi hasil LCA merupakan tahap penentuan titik *hotspot* dan evaluasi data. *Hotspot* pada LCA merupakan unit dan substansi yang berkontribusi terbesar terhadap dampak lingkungan terbesar. Identifikasi *hotspot* menjadi acuan untuk menentukan rekomendasi perbaikan yang tepat sehingga tahap ini penting untuk dilakukan pada kajian LCA. Evaluasi data dilakukan untuk memastikan hasil kajian yang dilakukan dapat dipercaya berdasarkan kelengkapan data, konsistensi data, sensitivitas, dan kesesuaian kajian dengan tujuan dan lingkup.

3.5.1 Penentuan Hotspot

Pada analisis normalisasi, diketahui bahwa dampak terbesar yang terjadi di SP A, B, dan C yaitu *acidification* dan di SP D yaitu *global warming*. Sehingga dilakukan perbandingan dan peringkat nilai karakterisasi tiap unit pada

kedua dampak.

a. Stasiun Pengumpul A, B, dan C

Unit yang berkontribusi terbesar terhadap dampak *acidification* pada SP A, B, dan C yaitu *compressor*, dengan nilai sebesar 1683,27 kg SO₂ eq/1000 TOE.

Tabel 5. Peringkat Unit *Hotspot* Dampak *Acidification* SP A, B, dan C

Unit	Nilai <i>acidification</i> kg SO ₂ eq/1000 TOE	Peringkat
<i>Compressor</i>	1683,27	1
<i>Wellhead</i>	1120,28	2
<i>Power Plant</i>	1024,55	3
<i>Flare</i>	7,53	4
<i>Separator</i>	0	5
<i>Scrubber</i>	0	6
<i>Header SP B</i>	0	7
<i>Condensate Plant</i>	0	8
<i>FWKO</i>	0	9
<i>Oil Tank</i>	0	10
<i>Waste Pit</i>	0	11
<i>WIP</i>	0	12

Berdasarkan hasil analisis substansi menggunakan *software* SimaPro, emisi NO_x merupakan kontributor terhadap dampak *acidification* yang terjadi di unit *compressor*. Pada Gambar 2 dan Gambar 5 juga menunjukkan bahwa emisi NO_x yang dihasilkan juga berkontribusi terhadap dampak *human toxicity* dan *eutrophication* yang terjadi.

b. Stasiun Pengumpul D

Unit yang berkontribusi terbesar terhadap dampak *global warming* pada SP D yaitu pada *flare*, dengan nilai sebesar 9467,69 kg CO₂ eq/1000 TOE. Emisi GRK yang diinput ke dalam *software* SimaPro yaitu emisi CO₂, CH₄, dan N₂O. Analisis substansi dengan *software* SimaPro dapat dilihat pada Tabel 7.

Berdasarkan hasil analisis substansi, emisi CO₂ merupakan kontributor terbesar terhadap dampak *global warming* yang terjadi di unit *flare*, sehingga juga masih perlu dilakukan reduksi untuk mengurangi dampak *global warming*.

Tabel 6. Peringkat Unit *Hotspot* Dampak *Global Warming* SP D

Unit	Nilai <i>global warming</i> (GWP 100a) kg CO ₂ eq/1000 TOE	Peringkat
Flare	9467,69	1
Power Plant	7425,19	2
Oil Tank	0,089	3
Wellhead	0	4
Separator	0	5
FWKO	0	6
Water Tank	0	7
Scrubber	0	8

Tabel 7. Persentase Kontribusi Substansi *Global Warming*

Substansi	% Kontribusi
Carbon dioxide, fossil	74%
Dinitrogen monoxide	1%
Methane, fossil	25%

Hasil *benchmarking* juga menunjukkan bahwa intensitas emisi NO_x dan GRK (CO₂, CH₄, dan N₂O) masih berada di peringkat 25% terbawah, baik skala nasional maupun skala dunia. Oleh karena itu, emisi NO_x dan GRK merupakan fokus untuk dilakukan reduksi untuk mengurangi dampak yang terjadi sehingga performa perusahaan dalam mereduksi dampak yang terjadi dan emisi semakin meningkat.

3.6 Analisis Efektivitas Program Reduksi Emisi Udara

Analisis efektifitas reduksi emisi udara dilakukan dengan membandingkan hasil kajian pada tahun 2019 dengan hasil kajian pada penelitian ini. Berdasarkan Tabel 8, terjadi penurunan pada dampak yang terjadi dan tidak ada peningkatan dampak. Sehingga terbukti bahwa program reduksi emisi yang diimplementasikan telah efektif untuk menurunkan dampak lingkungan yang terjadi. Program reduksi yang telah diimplementasikan untuk mereduksi dampak yang terjadi yaitu pemanfaatan *flare* dengan menjual gas sisa kepada pihak ketiga dan penggunaan gas jack/minicompressor, mereduksi penggunaan *diesel engine* menjadi *gas engine*, modifikasi piston pada *engine*, modifikasi ekstra *cooler* pada *compressor*, dan melakukan *general overhaul compressor*.

Tabel 8. Perbandingan Nilai Dampak pada Tahun 2018 dan 2020

Dampak Kategori	Satuan	Nilai besaran dampak lingkungan		Penurunan
		2018	2020	
<i>Global warming</i> (GWP100a)	kg CO ₂ eq/1000 TOE	7,84 x 10 ⁵	3,98 x 10 ⁵	61%
<i>Ozone layer depletion</i>	kg CFC-11 eq/1000 TOE	0	0	0%
<i>Human toxicity</i>	kg 1,4-DB eq/1000 TOE	7657,64	9205,51	7%
<i>Photochemical oxidation</i>	kg C ₂ H ₄ eq/1000 TOE	35,98	19,02	59%
<i>Acidification</i>	kg SO ₂ eq/1000 TOE	4315,31	3835,63	31%
<i>Eutrophication</i>	kg PO ₄ ³⁻ eq/1000 TOE	8194,94	1003,47	5%

3.7 Analisis Rekomendasi Perbaikan

Berdasarkan hasil analisis penentuan *hotspot*, unit *compressor* di SP Gabungan (SP A, B, dan C) dan unit *flare* di SP D merupakan fokus untuk dilakukan perbaikan.

3.7.1 Stasiun Pengumpul A, B, dan C

Berdasarkan hasil analisis LCA, substansi yang menyebabkan terjadinya dampak *acidification* adalah emisi nitrogen oksida (NO_x). Berikut merupakan rekomendasi perbaikan untuk mereduksi emisi nitrogen oksida (NO_x) yang dihasilkan unit *compressor* pada SP A, B, dan C.

- Mengganti *diesel engine* menjadi *gas engine*

Mesin berbahan bakar gas bumi biasa digunakan di industri gas bumi sebagai penggerak alat pemindahan dan pengolahan gas seperti pompa dan kompresor (USEPA, 2000). Gas bumi merupakan salah satu alternatif bahan bakar yang menjanjikan karena manfaatnya yang signifikan dibandingkan dengan bahan bakar bensin dan solar. Keuntungan pemakaian gas bumi sebagai bahan bakar yaitu ketersediaanya

yang melimpah, murah, nilai oktan yang lebih tinggi, dan menghasilkan emisi gas rumah kaca terendah diantara bahan bakar fosil lainnya (Bakar *et al.*, 2012).

Terdapat tujuh mesin *diesel* yang beroperasi pada tahun 2020. Tujuh mesin *diesel* dapat diganti menjadi gas engine agar dapat menurunkan emisi udara yang dihasilkan. Untuk mengetahui penurunan beban emisi, dilakukan perhitungan beban emisi kembali dengan merubah faktor emisi pada mesin diesel menjadi faktor emisi bahan bakar gas bumi. Hasil perhitungan beban emisi tersaji dalam Tabel 9.

Berdasarkan Tabel 9 terjadi penurunan pada beban emisi NO_x . Selain itu emisi CO_2 , SO_x , dan PM juga mengalami penurunan apabila dilakukan penggantian *diesel engine* menjadi *gas engine*. Kemudian, beban emisi N_2O tidak mengalami perubahan karena faktor beban emisi dinitrogen monoksida pada bahan bakar diesel dan gas bumi sama. Beban emisi CH_4 mengalami kenaikan namun tidak signifikan. Secara keseluruhan penggantian mesin diesel menjadi mesin gas tidak membuat perubahan yang signifikan terhadap beban emisi NO_x dan emisi lainnya, karena jumlah mesin diesel hanya sedikit. Namun, perbaikan ini direkomendasikan karena keuntungan penggunaan bahan bakar gas yang signifikan dibandingkan bahan bakar diesel (Bakar *et al.*, 2012).

Tabel 9. Perbandingan Beban Emisi Sebelum dan Setelah Penggantian Mesin Menjadi Gas Engine

Parameter	Beban Emisi (ton/tahun)	
	Sebelum	Sesudah
CO_2	87695.61	87636.72
CH_4	892.04	892.30
N_2O	7.01	7.01
NO_x	2423.10	2421.96
SO_x	0.62	0.41
PM	8.88	7.97

b. Non-Selective Catalytic Reduction (NSCR)

Non-selective catalytic reduction (NSCR) merupakan salah satu teknologi kontrol tambahan untuk mengontrol emisi nitrogen oksida dari gas buang. Teknologi NSCR

menggunakan reaksi kimia dengan katalis untuk mereduksi emisi nitrogen oksida (NO_x), karbon monoksida (CO), dan VOC menjadi air, gas karbon dioksida (CO_2), dan nitrogen (N_2) (USEPA, 2005).

Pemasangan NSCR dilakukan pada masing-masing exhaust mesin. *Exhaust* mesin dihubungkan dengan *catalyst bed*, lalu emisi nitrogen oksida (NO_x) dari gas buang akan direduksi menjadi gas nitrogen (N_2) melewati *catalyst bed*. Pada saat yang sama, gas hidrokarbon (HC) yang tidak terbakar dan karbon monoksida (CO) akan teroksidasi menjadi air dan karbon dioksida (CO_2). Katalis biasanya terbuat logam mulia seperti platinum, rhodium, atau paladium (USEPA, 2005).

Tabel 10. Perbandingan Nilai Karakterisasi Sebelum dan Sesudah Pemasangan NSCR

Dampak Kategori	Satuan	Nilai besaran dampak lingkungan	
		Sebelum	Sesudah
<i>Global warming (GWP100a)</i>	kg CO_2 eq/1000 TOE	3.98×10^5	3.98×10^5
<i>Ozone layer depletion</i>	kg CFC-11 eq/1000 TOE	0	0
<i>Human toxicity</i>	kg 1,4-DB eq/1000 TOE	9205.51	5155.09
<i>Photochemical oxidation</i>	kg C_2H_4 eq/1000 TOE	19.02	19.02
<i>Acidification</i>	kg SO_2 eq/1000 TOE	3835.63	2147.95
<i>Eutrophication</i>	kg PO_4^{3-} eq/1000 TOE	1003.47	561.94

Penambahan teknologi NSCR merupakan strategi umum untuk mengontrol emisi nitrogen oksida pada mesin yang biasanya digunakan di industri E&P (ekplorasi dan produksi) minyak yaitu mesin empat gerakan dengan kaya pembakaran (*rich-burn combustion*). NSCR sangat cocok untuk mesin dengan A:F (*air fuel ratio*) yang rendah atau *rich-burn combustion* karena rendahnya suplai oksigen akan membuat

kinerja NSCR optimum. Teknologi NSCR dapat mereduksi emisi NO_x sebesar 98% (Chapman dan Adriani, 2004).

Untuk mengetahui penurunan yang disebabkan oleh pemasangan NSCR maka dilakukan running SimaPro dengan mengurangi beban emisi nitrogen oksida pada unit compressor sebesar 98%, lalu dilakukan perbandingan. Perbandingan nilai karakterisasi sebelum dan setelah dilakukan pemasangan NSCR berdasarkan hasil running SimaPro sebagai berikut di Tabel 10.

Berdasarkan hasil running SimaPro, pemasangan NSCR menurunkan dampak yang terjadi sebesar 44% sehingga dapat diimplementasikan untuk mereduksi dampak *human toxicity*, *acidification*, dan *eutrophication* yang terjadi. Teknologi NSCR sudah dipakai secara komersil, sebagai contoh lebih dari 3000 mesin internal *combustion* di industri negara Amerika Serikat telah dilengkapi dengan teknologi NSCR (MECA, 1997).

Terdapat beberapa pertimbangan lain yang perlu diperhatikan ketika mengimplementasikan pemasangan NSCR. Rujukan (Chapman dan Adriani, 2004) menjelaskan bahwa suhu gas buang harus diperhatikan karena suhu gas buang yang tinggi (sekitar 1.300 °F) dapat merusak katalis. Tingginya suhu gas buang disebabkan karena gas buang dari exhaust mesin mengandung bahan bakar yang terlalu besar sehingga bahan bakar yang tidak terbakar pada mesin akan teroksidasi pada catalyst bed.

Penambahan pengontrol A:F (*air fuel ratio*) otomatis dan sensor oksigen biasanya digunakan untuk mengatur suplai oksigen dari gas buang yang akan memasuki *catalyst bed*. Penerapan teknologi NSCR membutuhkan biaya untuk katalis, sensor oksigen, dan pengontrol. penggantian katalis biasanya dilakukan setelah mencapai waktu operasi 20.000 jam (Chapman dan Adriani, 2004).

3.7.2 Stasiun Pengumpul D

Berdasarkan hasil analisis LCA, substansi yang berkontribusi terbesar terhadap *global warming*

adalah emisi karbon dioksida (CO_2). Rekomendasi perbaikan untuk mereduksi emisi karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan unit *flare* pada SP D yaitu dengan menerapkan *flare gas recovery*. *Flare gas recovery system* merupakan upaya pemanfaatan gas *flare* untuk mereduksi volume gas *flare* serta emisi yang dihasilkan dari *flare*. Pada SP D, jumlah gas yang dimanfaatkan masih lebih kecil daripada gas yang dibakar menggunakan *flare*, sehingga perlu dilakukan pemanfaatan yang lain. Rekomendasi pemanfaatan gas *flare* sebagai berikut.

a. *Compressed Natural Gas*

Compressed Natural Gas (CNG) merupakan gas bumi yang dikompresi agar tekanan gas menjadi tinggi. Tujuan dari kompresi adalah untuk mendapatkan volume gas bumi yang lebih besar untuk dibawa tanpa proses kondensasi. Komposisi gas harus memenuhi spesifikasi gas komersial seperti kandungan air, CO_2 dan batas kandungan hidrokarbon agar tidak terjadi kondensasi dan formasi hidrat (Nafiscatoha dan Saksono, 2019).

b. *Enhance Oil Recovery* dengan Menginjeksi Gas CO_2

Gas *flare* juga dapat dimanfaatkan untuk melakukan *Enhanced Oil Recovery* (EOR) dengan menginjeksi gas CO_2 ke dalam sumur (Sari, 2018). Injeksi CO_2 merupakan salah satu jenis pendesakan tercampur (*miscible displacement*) yaitu pendesakan suatu fluida terhadap fluida lain agar bercampur dan membentuk suatu fasa yang homogen. Tujuan pendesakan tercampur untuk menurunkan viskositas minyak yang terperangkap pada batuan didalam *reservoir* serta meningkatkan laju alirnya, sehingga minyak lebih mudah diperoleh (Ansyori, 2018).

Sebelum diinjeksi, gas CO_2 dari gas bumi perlu diekstraksi atau dipisahkan terlebih dahulu. Untuk menangkap gas CO_2 dapat menggunakan *Carbon Capture Separation* (CCS). CCS terdiri dari tiga jenis metode penangkapan yaitu *pre-combustion capture*, *post-combustion capture*, dan *oxyfuel combustion* (Harjanto et al., 2012). Teknologi CCS yang cocok untuk gas *flare* yaitu

pre-combustion capture karena penangkapan CO₂ lebih mudah juga untuk menghindari emisi gas CO₂ pada *flare*. Penempatan teknologi *pre-combustion capture* yaitu sebelum gas disalurkan ke *flare*. Sehingga sebelum gas dibakar *flare*, CO₂ ditangkap terlebih dahulu lalu diinjeksikan.

Penerapan teknologi CCS dapat mereduksi emisi CO₂ sebesar 90% (Mayar *et al.*, 2021). Untuk mengetahui penurunan yang disebabkan oleh penerapan EOR dengan teknologi CCS maka dilakukan *running* SimaPro dengan mengurangi beban emisi karbon dioksida pada unit *flare* sebesar 90%, lalu dilakukan perbandingan. Perbandingan nilai karakterisasi sebelum dan setelah dilakukan penerapan EOR dengan CCS berdasarkan hasil *running* SimaPro sebagai berikut

Tabel 11. Perbandingan Nilai Karakterisasi Sebelum dan Sesudah Penerapan EOR dengan CCS

Dampak Kategori	Satuan	Nilai besaran dampak lingkungan	
		Sebelum	Sesudah
<i>Global warming (GWP100a)</i>	kg CO ₂ eq/1000 TOE	1,69 x 10 ⁴	1,08 x 10 ⁴
<i>Ozone layer depletion</i>	kg CFC-11 eq/1000 TOE	0	0
<i>Human toxicity</i>	kg 1,4-DB eq/1000 TOE	193,25	193,25
<i>Photochemical oxidation</i>	kg C ₂ H ₄ eq/1000 TOE	0,898	0,898
<i>Acidification</i>	kg SO ₂ eq/1000 TOE	80,52	80,52
<i>Eutrophication</i>	kg PO ₄ ³⁻ eq/1000 TOE	21,12	21,12

Berdasarkan hasil *running* SimaPro, penggunaan teknologi CCS untuk melakukan program EOR dapat menurunkan dampak *global warming* sebesar 36%. Teknologi CCS dan

program EOR menawarkan peluang yang jelas untuk mencapai pengurangan emisi GRK yang mendalam dan membantu memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat namun dengan cara yang ramah lingkungan (Darmawan *et al.*, 2017).

4. KESIMPULAN

1. Dampak lingkungan terbesar yang terjadi di SP A, B, dan C adalah *acidification* sebesar 3835,63 kg SO₂ eq/1000 TOE. Sedangkan di SP D, dampak terbesar merupakan *global warming* sebesar 1,69 x 10⁴ kg CO₂ eq/1000 TOE.
2. Program reduksi emisi udara yang diimplementasikan efektif menurunkan dampak *global warming* (GWP 100a) sebesar 61%, *human toxicity* sebesar 7%, *photochemical oxidation* sebesar 59%, *acidification* sebesar 31%, dan *eutrophication* sebesar 5%.
3. Perbaikan yang direkomendasikan untuk mengurangi dampak *acidification* yaitu dengan mengganti *diesel engine* menjadi *gas engine* dan pemasangan *Non-Selective Catalytic Reduction* (NCSR). Sedangkan untuk mengurangi dampak *global warming* yaitu dengan memanfaatkan *gas flare* menjadi *compressed natural gas* dan melakukan *enhance oil recovery* menggunakan teknologi *carbon capture separation* untuk menangkap gas CO₂.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Bapak Dosen Teknik Lingkungan atas arahan dan bimbingannya selama pelaksanaan penelitian. Selain itu, terima kasih juga kepada perusahaan terkait yang telah membantu dalam pengumpulan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Ansyori, M. R. (2018). Mengenal enhanced oil recovery (EOR) sebagai solusi meningkatkan produksi minyak. *Swara Patra* 8, 2:16–22.

- Bakar, R.A., Kadirgama, K., Rahman, M.M., Sharma, K.V., dan Semin. (2012). Application of natural gas for internal combustion engines in al-megren, h.a. *Advances in Natural Gas Technology. IntechOpen*.
- Chapman, K.S. dan Adriani, A. (2004). Cost-effective reciprocating engine emissions control and monitoring for e&p field and gathering engines. *Kansas*.
- Darmawan, A., Sugiyono, A., Liang, J., Tokimatsu, K., Murata, A. (2017). Analysis of potential for CCS in Indonesia. *Energy Procedia*, 114: 7516-7520.
- Darmawan,, D. dan Saksono, N. (2019). Techno economic of cng & gtg technology applied in gas flare management. international summit on science technology and humanity. (ISETH2019) *Advancing Scientific Thought for Future Sustainable Development*.
- Direktur Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan. (2020). Peraturan Direktur Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.14/PPKL/SET/KUM.1/9/2020 tentang perubahan atas peraturan Direktur Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan nomor P.12/PPKL/SET/KUM.1/9/2018 tentang benchmarking sektor industri minyak dan gas eksplorasi dan produksi.
- Harjanto, T.R., Fahrurrozi, M., dan Bendiya, I.M. (2012). Life cycle assessment pabrik semen PT Holcim Indonesia Tbk. pabrik cilacap: komparasi antara bahan bakar batubara dengan biomassa. *Jurnal Rekayasa Proses*, 6, 2.
- Haryanto, J.T., dan Berly, M. (2015). Kodifikasi dan efektivitas kebijakan fiskal untuk menurunkan emisi gas rumah kaca pada industri semen, baja, dan pulp. *Jurnal Ilmu Sosial dan Ilmu Politik*, 19, 1:78-97.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2005). IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. *Cambridge*.
- Manufacturers of Emission Controls Association. (1997). Emission control technology for stationary internal combustion engines status report. *Washington DC*.
- Mavar, K.N., Medimurec, N.G., dan Hrncevic, L. (2021). Significance of enhanced oil recovery in carbon dioxide emission reduction. *Sustainability*, 13.
- Menteri Lingkungan Hidup. (2012). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup nomor 12 tahun 2012 tentang pedoman perhitungan beban emisi kegiatan industri minyak dan gas bumi.
- Sari, M.S. (2018). Flare gas recovery as one of the clean development mechanism (CDM) practices. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 200.
- United States Environmental Protection Agency. (2000). AP-42, Vol. I, 3:2 natural gas-fired reciprocating engines. *North Carolina*.
- United States Environmental Protection Agency. (2005). Review draft appendix b cam illustrations revision 1. *United States*.