

Analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) pada Instalasi Unit Gas Turbine Generator Area Gas Processing Facility (GPF) di Perusahaan Pengolahan Minyak Dan Gas Bumi, Jawa Timur

Dwi Teguh Santosa¹⁾, Achmad Chusnun Ni'am^{1)*}, Chandra Mukti Sri Maulana²⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Jl. Arif Rahman Hakim No.100, Klampis Ngasem, Kec. Sukolilo, Kota Surabaya, Jawa Timur 60117 Indonesia

²⁾ Magister Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Jl. Arif Rahman Hakim No.100, Klampis Ngasem, Kec. Sukolilo, Kota Surabaya, Jawa Timur 60117 Indonesia

*email: ach.niam@gmail.com

Abstrak

Proses produksi minyak dan gas bumi berpotensi menimbulkan sejumlah dampak yang dapat membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan. Selain itu, membutuhkan energi dalam jumlah yang besar dalam tahapan proses produksi. Oleh sebab itu diperlukan adanya analisis dan identifikasi dampak dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak lingkungan yang dihasilkan dari unit *Gas Turbine Generator* (GTG) yang digunakan sebagai sumber energi listrik dan panas dalam proses pengolahan migas, namun juga menghasilkan emisi yang berdampak pada lingkungan. Metode yang digunakan untuk kategori dampak pada kajian LCA yaitu SimaPro 9.0.0.48 dengan tahapan pengolahan data *set up method* (CML-IA baseline V3.05_EU25 dan Eco-Indicator 99 (H) V2.10 serta kategori dampak pemodelannya meliputi *global warming*, *acidification*, *human toxicity eutrophication*, *photochemical oxidant* pada *gas turbine generator system*. Hasil penelitian unit *Gas Turbine Generator-GPF*, menunjukkan bahwa pada proses produksi pengolahan minyak dan gas bumi setiap 1 MMSCF menghasilkan 1,986,78 kg CO₂ eq (*global warming potential* ≥ 30 %); 1,01686 kg SO₂ eq (*acidification* ≥ 40%); 0,04813 kg C₂H₄ eq (*photochemical oxidation* ± 40%); 0,11865 kg PO₄ eq (*Eutrophication* ± 40%) serta nilai penggunaan lahan *land use* ≥ 10 %, dan *ecotoxicity* ≤ 10 %. Unit Gas Turbine Generator-GPF dalam pengolahan gas bumi memberikan dampak lingkungan yang dominan pada kategori *global warming potential* dan *acidification*.

Kata kunci: *Global Warming, Gas Turbine Generator, Life Cycle Assessment, SimaPro*

Abstract

The oil and gas production process has the potential to cause several impacts that can endanger human health and the environment. In addition, it requires a large amount of energy in the production process stages. Therefore, it is necessary to analyze and identify impacts using the Life Cycle Assessment (LCA) method. This study aims to analyze the environmental impacts resulting from gas turbine generator (GTG) units used as a source of electrical and heat energy in the oil and gas processing process, but also produces emissions that have an impact on the environment. The method used for the impact category in the LCA study is SimaPro 9.0.0.48 with the data processing stages of the setup method (CML-IA baseline V3.05_EU25 and Eco-Indicator 99 (H) V2.10 and the modelling impact categories include Global Warming, Acidification, Human Toxicity, Eutrophication, and Photochemical Oxidant in the Gas Turbine Generator System. The results of the Gas Turbine Generator-GPF unit study show that in the oil and gas production process, every 1 MMSCF produces 1,986.78 kg CO₂ eq (Global Warming Potential ≥ 30%); 1.01686 kg SO₂ eq (Acidification ≥ 40%); 0.04813 kg C₂H₄ eq (Photochemical Oxidation ± 40%); 0.11865 kg PO₄ eq (Eutrophication ± 40%) and the land use value Land Use ≥ 10 %, and Ecotoxicity ≤ 10 %. Gas Turbine Generator-GPF unit in natural gas processing has a dominant environmental impact in the Global Warming Potential and Acidification categories.

Keywords: *Global Warming, Gas Turbine Generator, Life Cycle Assessment, SimaPro*

1. PENDAHULUAN

Minyak dan gas bumi merupakan sumber daya alam yang berperan penting dalam memenuhi kebutuhan energi nasional serta menopang perekonomian melalui ekspor dan industri domestik. Gas alam yang sebelumnya lebih banyak digunakan untuk ekspor, kini menjadi alternatif bahan bakar fosil karena emisinya lebih rendah dibandingkan dengan batu bara (Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, 2021). Konsumsi gas bumi di Indonesia pada tahun 2021 didominasi oleh sektor domestik sebesar 65,47%, dengan serapan terbesar di industri (27,69%), kelistrikan (11,9%), dan sektor pupuk (12,33%) (Ditjen Migas Kementerian ESDM, 2022). Meskipun memiliki banyak manfaat, kegiatan eksplorasi, produksi, dan pengolahan minyak serta gas bumi dapat berdampak negatif terhadap lingkungan, karena menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) dan polutan udara lainnya (Riva, 2006). Oleh karena itu, diperlukan metode analisis yang dapat membantu mengukur serta mengurangi dampak lingkungan dari industri ini.

Spath & Mann (2000) menemukan bahwa emisi CO₂ dalam industri gas sebagian besar berasal dari pembakaran. Sektor ini berkontribusi terhadap 122 metrik ton (MT) CO₂ pada tahun 2005 dan diperkirakan meningkat menjadi 137 MT pada 2030 (Kementerian Keuangan Indonesia, 2015). Studi Lopez (2018) menunjukkan bahwa peningkatan emisi gas rumah kaca dari sektor energi memiliki korelasi langsung dengan peningkatan produksi gas alam. Dalam konteks mitigasi, penelitian oleh Ottman (2005) menekankan pentingnya pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) sebagai metode evaluasi lingkungan berbasis siklus hidup suatu produk. Standar LCA telah diakui secara global melalui ISO 14040:2016 dan diterapkan di Indonesia melalui SNI ISO 14044:2017 (Hermawan, 2013)(Radityaningrum et al., 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak lingkungan yang dihasilkan dari unit *Gas Turbine Generator* (GTG) yang digunakan sebagai sumber energi listrik dan panas dalam proses pengolahan migas, namun juga menghasilkan emisi yang berdampak pada lingkungan. Dengan menggunakan metode LCA, penelitian ini akan mengevaluasi efisiensi energi serta merumuskan alternatif program perbaikan dalam upaya menurunkan pencemaran udara. Analisis ini juga mempertimbangkan aspek teknis, finansial, dan lingkungan agar industri migas dapat beroperasi secara berkelanjutan dan memenuhi standar regulasi yang telah ditetapkan serta diharapkan mampu mengukur kepatuhan terhadap standar yang telah ditetapkan pemerintah serta kontribusi kepedulian perusahaan terhadap kondisi kualitas lingkungan, sehingga mampu bersaing secara global.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Alat dan bahan

Penelitian ini menggunakan metode LCA yang menganalisis dampak lingkungan dari unit GTG. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan *gate-to-gate*, dengan mempertimbangkan data input-output dari operasional unit.

Alat yang digunakan:

1. Perangkat lunak SimaPro 9.0.0.48, sebagai pemodelan LCA dan analisis dampak lingkungan.
2. Gas *analyzer*, digunakan untuk mengukur emisi gas buang dari unit GTG.
3. Dokumen operasional perusahaan yang meliputi data konsumsi bahan bakar, *spare part*, bahan kimia penunjang, produksi listrik, dan emisi gas rumah kaca.

Data bahan yang digunakan:

1. Data bahan bakar gas alam (*fuel gas*) yang digunakan dalam proses GTG.
2. Data emisi gas rumah kaca (CO₂, CH₄, NO₂, SO₂, dan PM) dari operasional GTG.
3. Faktor emisi dan karakterisasi dampak lingkungan dari metode CML-IA *baseline* V3.05_EU25 dan Eco-Indicator 99 (H) V2.10.

2.2 Metode

Penelitian ini menggunakan LCA untuk menganalisis dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh unit GTG di area *Gas Processing Facility* (GPF). Metode ini dilakukan dengan pendekatan *gate-to-gate*, yang difokuskan pada proses pembangkit energi dari bahan bakar gas alam hingga emisi yang dihasilkan. Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui data hasil pengukuran emisi gas buang menggunakan *gas analyzer*, serta pencatatan konsumsi bahan bakar dan produksi listrik selama operasional GTG. Sedangkan data sekunder diperoleh dari laporan operasional perusahaan dan perhitungan sesuai referensi faktor emisi yang mengacu pada *Compendium of Greenhouse Gas Emissions Methodologies for The Natural Gas and Oil Industry-API* 2021.

Tahapan dalam metode LCA mengikuti standar ISO 14040:2016 antara lain:

1. Penentuan tujuan dan lingkup penelitian, yang menetapkan sistem batas *gate-to-gate* dengan unit fungsi 1 MMSCF gas sebagai acuan perhitungan;
2. Inventarisasi siklus hidup (*Life Cycle Inventory-LCI*);
3. Penilaian dampak siklus hidup (*Life Cycle Impact Assessment-LCIA*), dengan menggunakan pemodelan *software* SimaPro 9.0.0.48 metode CML-IA *baseline* V3.05_EU25 dan Eco-

Indicator 99 (H) V2.10. Kategori dampak lingkungan yang dianalisis mencakup *Global Warming Potential* (GWP), *acidification*, *eutrophication*, *photochemical oxidation*, dan *human toxicity*;

4. Interpretasi data, hasil pemodelan dianalisis dan dibandingkan dengan standar emisi yang berlaku untuk mengevaluasi efektivitas strategi mitigasi yang dapat diterapkan.

Rumus perhitungan efisiensi energi listrik adalah sebagai berikut:

$$\eta \text{ energi} = (s \text{ HR} \times 0,00000418) \times T_p \quad (1)$$

Dimana:

$\eta \text{ energi}$	= Efisiensi energi, dalam 1 tahun
$s \text{ HR}$	= standar deviasi <i>heat rate</i> (kCal/kWh)
0,00000418	= faktor konversi kCal ke GJ
T_p	= total produksi listrik, dalam 1 tahun

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis *Life Cycle Assessment* (LCA)

Hasil analisis LCA pada unit GTG di area GPF menunjukkan bahwa setiap produksi 1 MMSCF gas menghasilkan emisi 1.986,78 kg CO₂ eq, yang berkontribusi terhadap *Global Warming Potential* (GWP) $\geq 30\%$. Selain itu, emisi SO₂ berkontribusi terhadap *acidification potential* mencapai 1,01686 kg SO₂ eq ($\geq 40\%$), dan *photochemical oxidation* yang dihasilkan adalah 0,04813 kg C₂H₄ eq ($\pm 40\%$). Dampak lainnya meliputi *eutrophication* sebesar 0,11865 kg PO₄ eq ($\pm 40\%$), serta penggunaan lahan (*land use*) $\geq 10\%$ dan *ecotoxicity* $\leq 10\%$. Analisis dilakukan menggunakan pemodelan *software* SimaPro 9.0.0.48 dengan metode CML-IA baseline V3.05_EU25, Eco-Indicator 99 (H) V2.10, dan ReCiPe 2016 Midpoint H. Data diperoleh dari laporan operasional perusahaan serta perhitungan berdasarkan standar *Compendium of Greenhouse Gas Emissions Methodologies for The Natural Gas and Oil Industry-API* 2021. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa kategori dampak lingkungan dari pembakaran bahan bakar gas dalam unit GTG.

Emisi CO₂ merupakan penyumbang terbesar dampak lingkungan, menunjukkan bahwa pembakaran bahan bakar dalam GTG mendominasi kontribusi terhadap pemanasan global. Angka ini sangat tinggi dan menegaskan perlunya teknologi seperti *Carbon Capture and Storage* (CCS) atau peralihan ke bahan bakar rendah karbon. Studi oleh Zhang et al. (2022) menunjukkan bahwa emisi CO₂ dari fasilitas pemrosesan gas alam memberikan kontribusi

signifikan terhadap total emisi gas rumah kaca dalam siklus hidupnya. Emisi SO₂ berkontribusi paling besar terhadap dampak pengasaman (*acid rain*), melebihi CO₂ dalam proporsi dampaknya. Ini mengindikasikan adanya kandungan sulfur dalam bahan bakar atau ketidaksempurnaan pembakaran, yang harus dikendalikan melalui *Flue Gas Desulfurization* (FGD).

Tabel 1. Hasil inventori *Gas Turbine Generator*

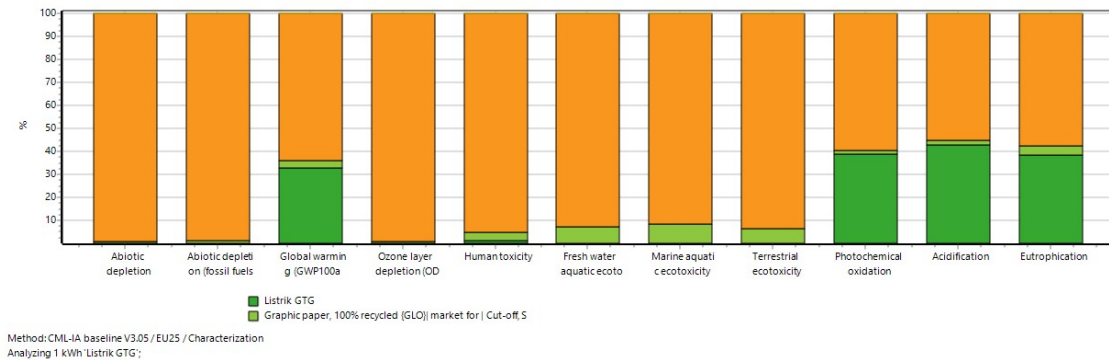
Input/ Output	Jenis Data	Jumlah	Satuan
Input	<i>Fuel Gas</i>	0,03276	MMSCF
	CO ₂	1,984848	Ton/MMSCF
	CH ₄	3,55E-05	Ton/MMSCF
Output	N ₂ O	3,6E-06	Ton/MMSCF
	SO ₂	0,00047	Ton/MMSCF
	NO ₂	0,000905	Ton/MMSCF
	PM	0,000372	Ton/MMSCF

Tabel 2. Hasil perhitungan emisi per 1 MMSCF gas

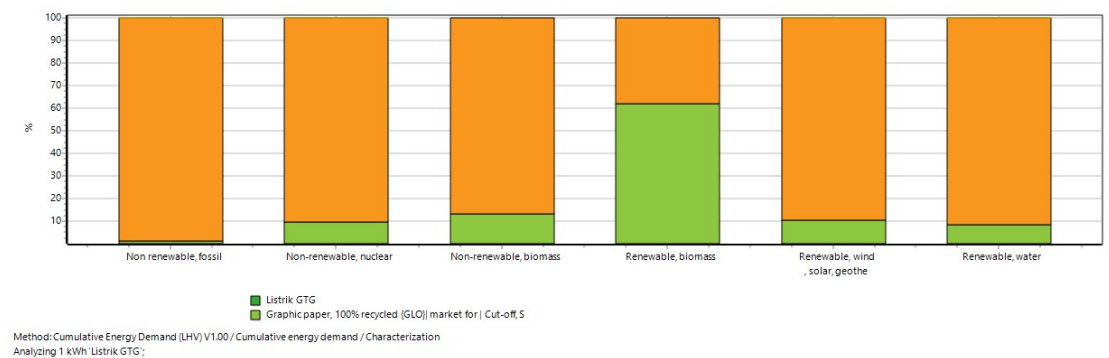
Jenis Emisi	Nilai	Dampak
CO ₂ (<i>Global Warming</i>)	1.986,78	≥30%
SO ₂ (<i>Acidification</i>)	1,01686	≥40%
C ₂ H ₄ (<i>Photochemical</i>)	0,04813	±40%
PO ₄ (<i>Eutrophication</i>)	0,11865	±40%
<i>Land Use</i>	-	≥10%
<i>Ecotoxicity</i>	-	≤10%

Photochemical oxidation menunjukkan nilai C₂H₄ kecil secara absolut, potensi pembentukan ozon troposferik cukup signifikan. Ini biasanya berasal dari senyawa hidrokarbon tak jenuh yang tidak terbakar sempurna, sehingga pemantauan dan kontrol pembakaran yang presisi sangat diperlukan. Nilai *eutrophication* menunjukkan emisi nitrogen dan fosfor dari proses pembakaran dapat menyebabkan eutrofikasi di ekosistem perairan. Pengendalian emisi NO_x melalui teknologi seperti *Selective Catalytic Reduction* (SCR) dapat membantu mengurangi dampak eutrofikasi. Nilai *Land Use* meskipun tidak kuantitatif, kontribusi ≥10% menunjukkan bahwa proses atau infrastruktur GTG memiliki jejak lahan cukup signifikan, baik dari sisi pembangunan fisik, akses utilitas, maupun area penunjang. Ini relevan untuk kajian keberlanjutan tapak dan efisiensi tata ruang. Nilai *ecotoxicity* menunjukkan kontribusi yang relatif kecil. Namun tetap perlu diwaspadai karena senyawa

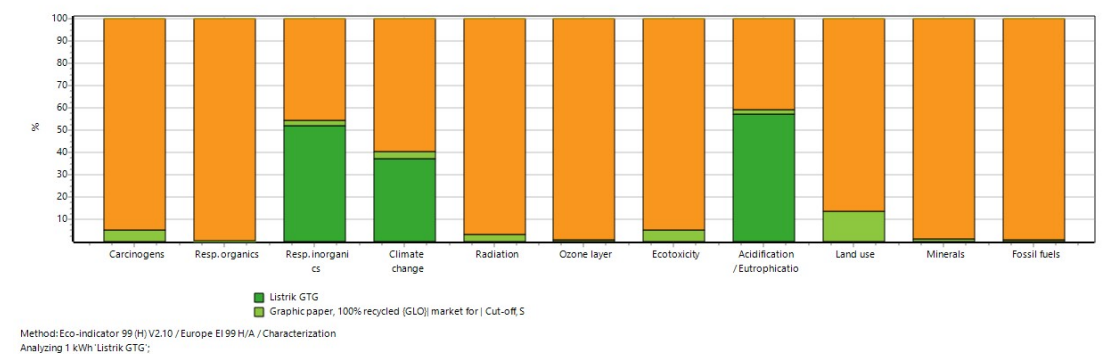
seperti logam berat atau partikulat (PM) dalam jumlah kecil pun bisa berdampak toksik terhadap lingkungan perairan dan tanah dalam jangka panjang.



Gambar 3.1 SimaPro 9.0.0.48 CML-IA baseline V3.05_EU25 – characterization



Gambar 3.2 SimaPro 9.0.0.48, Cumulative Energy Demand LHV V1.00 – characterization



Gambar 3.3 SimaPro 9.0.0.48, Eco-Indicator 99 (H) V2.10 – characterization

3.2 Alternatif program perbaikan

Berdasarkan hasil analisis LCA, emisi yang dihasilkan oleh unit GTG yaitu CO₂, NO₂, SO₂, dan CH₄ yang berkontribusi signifikan terhadap dampak lingkungan meliputi GWP, *acidification*, *eutrophication*, *photochemical oxidation*, serta *ecotoxicity*. Berikut rekomendasi yang dapat dilakukan , antara lain:

- Teknologi *Dry Low Emission* (DLE) mengurangi emisi NO_x dengan menurunkan suhu pembakaran melalui pencampuran bahan bakar dan udara sebelum pembakaran, tanpa memerlukan injeksi air atau uap. DLE telah terbukti efektif dalam menurunkan emisi NO_x hingga di bawah 25 ppm (Boyce, 2011)
- *Carbon Capture and Storage* (CCS) yang menangkap CO_2 dari sumber emisi besar seperti pembangkit listrik dan menyimpannya di lokasi geologis yang aman. Studi menunjukkan bahwa penerapan CCS pada pembangkit listrik berbahan bakar fosil dapat mengurangi emisi gas rumah kaca hingga 68–92% (Smit, K. H., & Spliethoff, H. 2010).
- Pemanfaatan model machine learning, seperti *neural networks*, dapat meningkatkan akurasi prediksi emisi CO dan NO_x dari turbin gas. Model ini memungkinkan penyesuaian operasional secara real-time untuk mengoptimalkan kinerja dan meminimalkan emisi. (Wang, et al., 2024).
- Pengendalian parameter proses seperti rasio udara terhadap bahan bakar dan suhu reaksi dalam proses termokimia dapat mengurangi emisi gas rumah kaca. Pemantauan emisi secara real-time menggunakan alat analisis gas dapat membantu dalam mengidentifikasi dan mengurangi produk samping yang tidak diinginkan (Ahmed, M. B., et al. 2025).
- Mengganti bahan bakar fosil dengan alternatif rendah karbon, seperti campuran metana-amonias, dapat mengurangi emisi CO_2 . Namun, perlu perhatian khusus terhadap peningkatan emisi NO_x yang mungkin terjadi, yang dapat diatasi dengan teknik pembakaran dua tahap (Basu & Choi, 2024).

3.2.1 Optimasi *Air Fuel Ratio* (AFR) untuk efisiensi pembakaran

AFR digunakan untuk mengatur perbandingan bahan bakar gas dan udara guna mencapai pembakaran yang lebih sempurna. Dengan rasio optimum, bukaan *control valve* dan kebutuhan *blower* dapat diminimalkan, sehingga konsumsi energi menjadi lebih efisien. Pengaturan AFR berkontribusi pada penurunan emisi CO_2 , SO_2 , NO_x , dan CH_4 , serta dampak lingkungan seperti GWP, *acidification*, *eutrophication*, *photochemical oxidant*, dan *human toxicity*.

Efisiensi terjadi jika *heat rate* saat *performance test* lebih kecil, yang menandakan pembakaran lebih sempurna dengan konsumsi bahan bakar lebih rendah. Pemasangan alat pengendali kualitas udara, seperti *scrubber* atau *catalytic converter*, yang sesuai dengan dokumen RKL.

3.2.2 Pemasangan kapasitor *bank* dan solar panel

Pemasangan kapasitor *bank* yang berfungsi untuk mengurangi energi reaktif (kVAr) yang dihasilkan sehingga dapat meningkatkan besarnya *power factor*. *Power factor* pada solar panel merupakan indikator jaringan distribusi energi listrik yang dihasilkan. Dengan *power factor* pada solar panel yang lebih tinggi dapat membuat beban GTG menjadi lebih ringan atau efisiensi energi pada GTG yang berbanding lurus dengan penurunan kebutuhan fuel gas pada GTG. Penurunan fuel gas akan berdampak pada penurunan dampak GWP, *acidification*, *eutrophication*, *photochemical oxidant*, dan *human toxicity*. Perlu adanya monitoring serta evaluasi program *preventive maintenance* yang belum optimal dan perlu dikaji ulang seperti: perawatan rutin secara berkala pada *plate lean-rich amine exchanger* untuk meningkatkan panas maksimum secara series pada unit *amine treating* sehingga pemanfaatan *heating value* dapat lebih maksimal.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan dari analisis kajian LCA pada proses produksi pengolahan minyak dan gas bumi menunjukkan bahwa setiap 1 MMSCF yang berasal dari unit proses GTG menghasilkan beban emisi CO₂ sebesar 1,9848483 ton/MMSCF, CH₄ 0,0000355 ton/MMSCF, N₂O 0,0000036 ton/MMSCF, SO₂ 0,0004702 ton/MMSCF, NO₂ 0,0009053 ton/MMSCF, dan PM 0,0003722 ton/MMSCF. Pemodelan menggunakan software SimaPro 9.0.0.48 mengungkapkan bahwa unit GTG menghasilkan dampak GWP sebesar 1,986,78 kg CO₂ eq, *acidification* mencapai 1,01686 kg SO₂ eq, *photochemical oxidation* 0,04813 kg C₂H₄ eq, dan *eutrophication* 0,11865 kg PO₄ eq. Selain itu, nilai penggunaan lahan menunjukkan *land use* ≥ 10%, dan *ecotoxicity* ≤ 10%. Dampak dominan berasal dari CO₂ dan SO₂, masing-masing berkontribusi pada GWP dan *Nn*.

Emisi lain seperti C₂H₄ dan PO₄ menunjukkan bahwa dampak sekunder dari fotokimia dan eutrofikasi juga berpengaruh. Sedangkan untuk *land use* dan *ecotoxicity*, meskipun tidak disertai nilai kuantitatif, tetap menjadi aspek penting dalam evaluasi siklus hidup terutama untuk aspek keberlanjutan jangka panjang. Saran untuk penelitian terkait kajian LCA selanjutnya mencakup pelaksanaan program monitoring *preventive maintenance*, seperti penggantian rutin pada *plate lean rich amine exchanger*, penggunaan sistem pemodelan AFR, serta pemasangan kapasitor *bank*.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, M. B., et al. (2025). Multi-objective optimization of thermochemical energy storage for emission reduction in gas power systems. *Applied Thermal Engineering*, 229, 121809. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431125011706>
- API. Estimating petroleum industry value chain (Scope 3) Greenhouse Gas Emissions Overview of methodologies climate change. *The Global Oil and Gas Industry Association for Environmental and Social Issues*; 2016: www.ipieca.org
- Basu, S., & Choi, B. C. (2024). Ammonia fired gas turbines: Recent advances and future perspectives. *Energy*, 290, 130408. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054422400046X>
- Boyce, M.P. (2011). Gas turbine engineering handbook. Fourth edition.
- Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2022). Laporan Kinerja 2021.
- EPA QA/G-8. (2002). Guidance on environmental data verification and data validation. Washington.
- EPA. (2006). Life Cycle Assessment: Principles and Practice.
- Goedkoop, M. dan Renilde Spriensma. 2000. The Eco Indicator 99-A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment. Holland : PreConsultant.
- Guinee, J. B., Huppes, G., De Koning, A., Van Oers, L., Sleeswijk, A. W., & Suh, S. (N.D.). (2002). Handbook on Life Cycle Assessment.
- Hermawan, F., Puti F. M., Muhamad A., R. Driejana. (2013). Peran Life 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.
- 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.
- 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.
- Ottman, J. 2005. Desing-Green. URL: <http://www.green-marketing.com>.
- Radityaningrum, A.D., Talent Nia Pramestiyawati, Achmad Chusnun Ni'am, Eko Wahyudi, Mohamad Ferdaus Noor Aulady, and Nur Laila Hamidah (2022). Environmental assessment using Integrated Risk Based Approach (IRBA) at Jabon Landfill, Sidoarjo. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1111 012040
- Riva. A., Angelosante, S. D., Trebeschi, C. (2006). Crude oil and gas exploratig impact and the environmental results of Life Cycle Assessment. *Energy*, 31, 138-148.
- Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional. (2021). Laporan Hasil Analisis Neraca Energi Nasional 2021.
- Sintia Pritasari (2022). Kajian dampak proses produksi natural gas terhadap lingkungan pada sebuah perusahaan minyak dan gas dengan menggunakan Life Cycle Assessment (LCA) dan *Analytical Hierarchy Process* (AHP).
- Smit, K. H., & Spliethoff, H. (2010). Carbon dioxide (CO₂) capture and storage for gas turbine systems. In A. Strömberg (Ed.), *Gas Turbine Handbook* (pp. 369-394). Woodhead Publishing. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978184569728050015X>
- SNI ISO 14040. 2016. Manajemen Lingkungan - Penilaian Daur Hidup - Prinsip dan Kerangka Kerja. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta
- SNI ISO 14044. 2017. Manajemen Lingkungan - Penilaian Daur Hidup - Persyaratan dan

Panduan. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.

Spath, P. dan Mann, M.K. (2000). *Life Cycle Assessment of a Pengolahan minyak dan gas bumi Combined-Cycle Power Generation System*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory.

Wang, J., Zhang, Y., & Zhu, Z. (2024). An emission predictive system for CO and NO_x from gas turbine based on machine learning. *Fuel*, 359, 129529.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236124005696>

Zhang, Y., et al. (2022). Life cycle assessment of carbon emission from natural gas pipelines. *Energy*, 239, 121848.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263876222003677>