

Analisa Jejak Karbon Produk pada Industri Gas Bumi dengan Metode *Life Cycle Assessment* (LCA)

Yudit Ratania Purwaningrum¹, Adhi Yuniarto^{2*}, Bara Awanda Marhendra³, Bimo Agung Wicaksono⁴, Prawinda Fitri⁵

Institut Teknologi Sepuluh November, Indonesia^{1,2,3}

PT Pertamina EP Cepu, Indonesia^{4,5}

Email: adhy@its.ac.id*

Keywords:

Environmental impact, Upstream Oil and Gas Industry, LCA Sales Gas

Abstract

This study assesses the potential environmental impact of sales gas production at PT XYZ, Bojonegoro Regency, using a Life Cycle Assessment (LCA) approach, a standard method for comprehensively evaluating environmental performance. With increasing national energy demand, the natural gas industry faces significant challenges balancing increased production with environmental sustainability. This study aims to identify and calculate the carbon footprint and other environmental impacts across all natural gas production stages using an LCA method based on ISO 14040/14044. Analysis used SimaPro software version 10.3.0.1 with the ReCiPe 2016 method at midpoint (H) level, covering cradle-to-gate scope from exploration to sales-ready gas. The functional unit used was 1 m³ of sales gas. Results show that producing 1 m³ of sales gas contributes 3.22 kg CO₂ eq to global warming, 0.008 kg SO₂ eq to terrestrial acidification, and 0.00030 kg P eq to freshwater eutrophication. Hotspot identification reveals the Gas Turbine Generator (GTG) and Dew Point Control Unit (DPCU) as the process units with the largest contribution across all impact categories, particularly global warming, where GTG accounts for 46.52% of total emissions. Monte Carlo simulation uncertainty analysis shows the global warming category has the highest sensitivity to energy consumption data variation, with an uncertainty range of ±8%. This study offers practical implications for oil and gas companies to prioritize energy efficiency and emission control strategies at the GTG and DPCU units, significantly reducing environmental impact. These findings also contribute to academic literature on LCA application in Indonesia's energy sector, which remains relatively limited.

Kata Kunci:

Dampak lingkungan, Industri Hulu Gas Bumi, Life Cycle Assesment (LCA), Sales Gas.

Abstrak

Penelitian ini menilai potensi dampak lingkungan dari proses produksi sales gas di PT XYZ, Kabupaten Bojonegoro, menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) sebagai metode standar evaluasi kinerja lingkungan produk secara menyeluruh. Dengan meningkatnya kebutuhan energi nasional, industri gas bumi menghadapi tantangan besar dalam menyeimbangkan peningkatan produksi dengan upaya keberlanjutan lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi dan menghitung jejak karbon serta dampak lingkungan lainnya dari seluruh tahapan produksi gas bumi dengan metode LCA berbasis ISO 14040/14044. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak SimaPro versi 10.3.0.1 dengan metode ReCiPe 2016 pada level midpoint (H), mencakup cradle-to-gate dari eksplorasi hingga gas siap jual. Unit fungsional yang digunakan adalah 1 m³ sales gas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa produksi 1 m³ sales gas berkontribusi

terhadap global warming sebesar 3,22 kg CO₂ eq, terrestrial acidification sebesar 0,008 kg SO₂ eq, dan freshwater eutrophication sebesar 0,00030 kg P eq. Identifikasi hotspot mengungkapkan bahwa *Gas Turbine Generator* (GTG) dan *Dew Point Control Unit* (DPCU) merupakan unit proses dengan kontribusi terbesar terhadap seluruh kategori dampak, terutama global warming, di mana GTG menyumbang 46,52% dari total emisi dihasilkan. Analisis ketidakpastian melalui simulasi Monte Carlo menunjukkan bahwa kategori global warming memiliki sensitivitas tertinggi terhadap variasi data konsumsi energi, dengan rentang ketidakpastian sebesar $\pm 8\%$. Penelitian ini memberikan implikasi praktis penting bagi perusahaan migas untuk memprioritaskan strategi efisiensi energi dan pengendalian emisi pada unit GTG dan DPCU guna menurunkan dampak lingkungan secara signifikan. Temuan ini juga berkontribusi pada pengembangan literatur akademik mengenai penerapan LCA di sektor energi Indonesia yang hingga saat ini masih relatif terbatas.

PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas bumi (migas) merupakan salah satu sektor strategis yang menopang kebutuhan energi nasional sekaligus berkontribusi besar terhadap perekonomian Indonesia. Sejak ditemukannya cadangan gas di wilayah timur Indonesia, perkembangan sektor ini menunjukkan tren yang pesat, terutama dalam beberapa dekade terakhir. Gas bumi dipandang sebagai energi fosil yang relatif lebih bersih dibandingkan minyak dan batubara, sehingga penggunaannya semakin meningkat baik untuk kebutuhan domestik maupun global (Sari et al., 2020). Kebutuhan energi yang terus meningkat di Indonesia menuntut adanya keseimbangan antara pemanfaatan sumber daya fosil dan upaya menjaga keberlanjutan lingkungan. Hal ini menjadikan analisis jejak karbon sebagai salah satu instrumen penting dalam menilai dampak sektor migas terhadap perubahan iklim (Abhijeet et al., 2020).

Tahap eksplorasi migas, yang meliputi survei seismik, pengeboran sumur eksplorasi, serta pengujian formasi, meskipun belum menghasilkan produksi komersial, tetap meninggalkan jejak lingkungan yang nyata. Penelitian Hidayat & Prabowo, (2019) menunjukkan bahwa emisi metana selama ekstraksi gas dapat berkontribusi terhadap pemanasan global. Selain itu, pembakaran gas menghasilkan nitrogen oksida (NO_x) dan sulfur dioksida (SO₂) yang berdampak negatif terhadap kualitas udara. Hal ini menegaskan bahwa meskipun gas bumi dianggap lebih ramah lingkungan dibandingkan minyak dan batubara, proses produksinya tetap menyumbang emisi GRK yang signifikan. Meskipun industri migas telah lama menjadi tulang punggung energi nasional, kajian mengenai jejak karbon berbasis LCA di Indonesia masih terbatas. Hal ini menunjukkan adanya kebutuhan mendesak untuk penelitian yang lebih komprehensif agar dapat memberikan rekomendasi teknis yang aplikatif.

Secara kuantitatif, data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan serta Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral tahun 2023 mencatat bahwa total emisi GRK sektor energi mencapai ± 584 juta ton CO₂e, dengan industri migas menyumbang sekitar 20–30% dari jumlah tersebut. Artinya, kontribusi emisi CO₂ industri migas Indonesia berkisar antara 117 hingga 175 juta ton CO₂e per tahun. Kondisi ini menjadi tantangan besar bagi Indonesia yang telah meratifikasi Perjanjian Paris 2015, dengan target penurunan emisi sebesar 31,89% secara mandiri dan hingga 43,20% dengan dukungan internasional pada tahun 2030 (E-NDC, 2022). Penelitian (Muhamad et al., 2022) juga mengonfirmasi bahwa produksi gas

alam di Indonesia berkontribusi terhadap global warming potential sebesar $1,1 \times 10^3$ kg CO₂ eq per MMSCF, dengan unit kompresor gas sebagai penyumbang utama.

Penelitian lebih lanjut oleh Benarimo et al., (2023) pada pabrik LNG di Indonesia mengidentifikasi bahwa penggunaan energi dan emisi dari proses produksi merupakan kontributor utama dampak lingkungan, dengan metode ReCiPe 2016 Midpoint (H) berhasil mengkarakterisasi dampak primer, sekunder, dan dampak penggunaan energi. Sementara itu, (Lestari et al., 2025) dalam studi pada fasilitas LNG Donggi-Senoro menemukan bahwa *Gas Turbine Generator* (GTG) dan *Gas Turbine Compressor* (GTC) merupakan tiga sumber emisi terbesar, dengan intensitas karbon tercatat sebesar 0,31 tCO₂-e/tLNG, yang berada di bawah rata-rata nasional (0,377) dan global (0,36). Temuan ini mengindikasikan bahwa unit pembangkit energi seperti GTG merupakan hotspot emisi yang memerlukan perhatian khusus dalam strategi dekarbonisasi industri migas.

Dalam konteks tersebut, penerapan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) menjadi relevan dan penting. LCA merupakan pendekatan kuantitatif yang digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari seluruh tahapan siklus hidup suatu produk atau aktivitas, mulai dari pengambilan sumber daya alam, proses produksi, hingga pengolahan residu (Haryanto et al., 2012). Dengan menggunakan LCA, perusahaan migas dapat mengidentifikasi aktivitas yang paling signifikan menyumbang emisi GRK, sekaligus merumuskan strategi pengendalian yang efektif. Hal ini sejalan dengan tuntutan global terhadap penerapan prinsip keberlanjutan dan cleaner production, serta pemenuhan standar internasional seperti ISO 14040/14044.

Studi LCA dalam industri migas di Indonesia masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian berfokus pada aspek teknis produksi atau efisiensi energi, sementara analisis jejak karbon secara komprehensif belum banyak dilakukan. Padahal, informasi mengenai kontribusi setiap tahapan produksi terhadap emisi GRK sangat penting untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih bijak dalam perencanaan dan pelaksanaan eksplorasi. Selain itu, hasil analisis LCA dapat menjadi dasar bagi perusahaan untuk meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi dampak lingkungan, serta memperkuat komitmen terhadap keberlanjutan. PT XYZ sebagai salah satu perusahaan migas di Kabupaten Bojonegoro telah menunjukkan komitmen terhadap pengelolaan lingkungan. Namun, analisis berbasis LCA diperlukan untuk mengukur secara objektif kontribusi setiap tahapan produksi terhadap emisi GRK.

PT XYZ yang berlokasi di Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur, merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang eksplorasi dan produksi gas bumi. Perusahaan ini mengolah raw gas sebesar ± 315 MMSCFD dan menghasilkan sales gas sebesar ± 192 MMSCFD, kondensat sekitar 3082–3151 BPD, serta sulfur cair sebesar ± 400 TPD. Proses pengolahan gas di fasilitas Gas Processing Facility (GPF) meliputi pengumpulan dan pemisahan, pengolahan gas, stabilisasi dan penyimpanan kondensat, H₂S removal, unit konversi gas asam (AGCU), CO₂ removal, hingga membrane permeate. Aktivitas tersebut menghasilkan emisi utama berupa CO₂, NO_x, dan SO₂, yang berkontribusi terhadap pemanasan global dan pencemaran udara (Utina, 2015; Spath & Mann, 2000).

Meskipun industri migas telah lama menjadi tulang punggung energi nasional dan beberapa penelitian telah dilakukan, kajian mengenai jejak karbon berbasis LCA yang komprehensif di Indonesia masih terbatas. Sebagian besar penelitian berfokus pada aspek teknis produksi atau efisiensi energi, sementara analisis jejak karbon secara menyeluruh

dengan mempertimbangkan berbagai kategori dampak lingkungan belum banyak dilakukan. Padahal, informasi mengenai kontribusi setiap tahapan produksi terhadap emisi GRK sangat penting untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih bijak dalam perencanaan dan pelaksanaan operasi produksi. Keterbatasan ini menciptakan kesenjangan penelitian (research gap) yang perlu diisi, terutama dalam hal identifikasi hotspot emisi secara kuantitatif dan terstruktur pada fasilitas pengolahan gas di Indonesia.

Urgensi penelitian ini semakin meningkat mengingat komitmen Indonesia dalam Perjanjian Paris 2015 dan target *Enhanced Nationally Determined Contribution* (ENDC) yang telah diperbarui. Sektor energi dituntut untuk menurunkan emisi GRK secara signifikan, dan penerapan metode kuantitatif seperti Life Cycle Assessment menjadi relevan untuk memastikan bahwa target penurunan emisi dapat tercapai. Penelitian ini mendesak untuk dilakukan karena menyediakan dasar ilmiah bagi perusahaan migas dalam mengidentifikasi aktivitas yang paling signifikan menyumbang emisi, sekaligus merumuskan strategi pengendalian yang efektif dan terukur. Hal ini sejalan dengan tuntutan global terhadap penerapan prinsip keberlanjutan dan cleaner production, serta pemenuhan standar internasional seperti ISO 14040/14044.

Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada penerapan metode LCA secara komprehensif dengan menggunakan ReCiPe 2016 pada level midpoint (H) yang mencakup tiga kategori dampak lingkungan sekaligus (global warming, terrestrial acidification, dan freshwater eutrophication) pada fasilitas pengolahan gas di Indonesia. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya fokus pada satu kategori dampak atau menggunakan metode yang berbeda, penelitian ini mengintegrasikan analisis ketidakpastian melalui simulasi Monte Carlo untuk meningkatkan kualitas data LCA. Selain itu, penelitian ini secara spesifik mengidentifikasi unit *Gas Turbine Generator* (GTG) dan *Dew Point Control Unit* (DPCU) sebagai hotspot utama, yang belum banyak dikaji secara mendalam dalam konteks industri gas bumi Indonesia.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis jejak karbon pada industri minyak dan gas bumi di Indonesia dengan pendekatan LCA, khususnya di PT XYZ Kabupaten Bojonegoro. Fokus penelitian diarahkan pada identifikasi sumber emisi GRK dari seluruh tahapan siklus hidup produksi gas, perhitungan besarnya emisi, serta penentuan aktivitas yang memberikan kontribusi paling signifikan terhadap dampak lingkungan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan kebijakan keberlanjutan di sektor migas serta memperkaya literatur akademik mengenai penerapan LCA di sektor energi Indonesia. Manfaat penelitian mencakup rekomendasi teknis bagi perusahaan migas dalam menerapkan strategi pengendalian emisi, dukungan terhadap pencapaian target penurunan emisi nasional sesuai komitmen Paris Agreement, serta pembukaan peluang penelitian lanjutan dengan cakupan yang lebih luas.

Dengan mempertimbangkan urgensi pengendalian emisi gas rumah kaca di sektor migas serta keterbatasan kajian komprehensif yang ada, penelitian ini dirancang untuk memberikan analisis sistematis mengenai jejak karbon melalui pendekatan Life Cycle Assessment (LCA). Pendekatan ini dipilih karena mampu menilai dampak lingkungan dari seluruh tahapan siklus hidup produksi gas bumi secara kuantitatif dan terstruktur. Oleh sebab itu, bagian metodologi berikut akan menjelaskan secara rinci tahapan pelaksanaan LCA, mulai dari penentuan tujuan dan ruang lingkup, inventori siklus hidup, penilaian dampak, hingga interpretasi hasil, sehingga

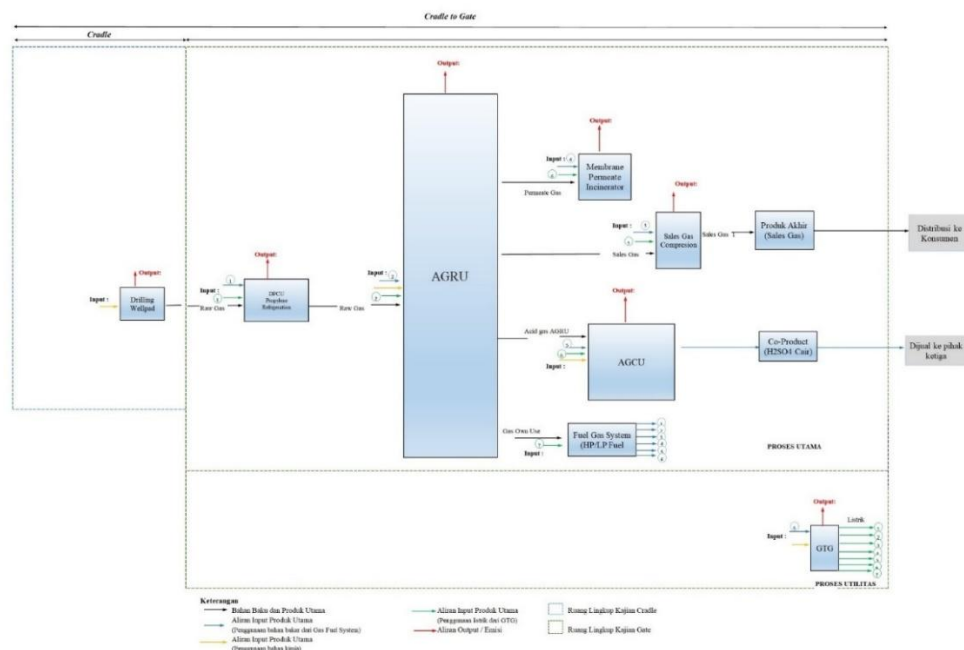
dapat menghasilkan rekomendasi teknis yang relevan bagi industri migas dalam mendukung pencapaian target penurunan emisi nasional.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) yang mengacu pada standar internasional ISO 14040/14044. LCA dipilih karena mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai dampak lingkungan dari seluruh tahapan siklus hidup produksi gas bumi, mulai dari eksplorasi, produksi, pengolahan, hingga distribusi. Pendekatan ini dilakukan secara sistematis dengan mengidentifikasi input dan output pada setiap proses, menghitung emisi gas rumah kaca yang dihasilkan, serta menilai kontribusi masing-masing aktivitas terhadap kategori dampak lingkungan. Populasi data dalam penelitian ini adalah seluruh aktivitas operasional produksi sales gas di PT XYZ yang berlokasi di Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur, sedangkan sampel data terdiri dari data konsumsi energi, bahan bakar, dan emisi dari unit-unit proses utama seperti *Gas Turbine Generator (GTG)*, *Dew Point Control Unit (DPCU)*, *Acid Gas Recovery Unit (AGRU)*, *Acid Gas Conversion Unit (AGCU)*, *Membrane Permeate Incinerator (MPI)*, dan *Sales Gas Compression*. Teknik pengambilan sampel dilakukan secara purposive sampling dengan memilih unit-unit proses yang memiliki kontribusi signifikan terhadap konsumsi energi dan emisi berdasarkan studi literatur dan data operasional perusahaan.

a. Goal and Scope

Tahap awal penelitian ini adalah mendefinisikan tujuan dan ruang lingkup analisis. Tujuan utama adalah mengidentifikasi dan menghitung emisi gas rumah kaca dari seluruh tahapan siklus hidup produksi gas bumi di PT XYZ. Unit fungsional yang digunakan adalah 1 m³ gas bumi yang diproduksi, dengan batas sistem *cradle-to-gate*, yaitu mencakup aktivitas mulai dari eksplorasi hingga gas siap dijual. Penetapan ruang lingkup ini penting untuk memastikan konsistensi data dan relevansi hasil analisis terhadap target penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Proses Cradle-to-Gate

Sumber: Data penelitian, diolah penulis, 2026.

Life Cycle Inventory (LCI)

Tahap inventori dilakukan dengan mengumpulkan data primer dan sekunder secara sistematis untuk mendukung analisis LCA yang akurat dan komprehensif. Data primer diperoleh dari PT XYZ melalui observasi langsung, wawancara dengan operator dan teknisi, serta pengambilan data dari sistem monitoring operasional perusahaan, yang meliputi konsumsi energi (bahan bakar dan listrik), volume produksi gas, serta data emisi langsung (CO_2 , CH_4 , NO_x , SO_2) dari setiap unit proses seperti *Gas Turbine Generator (GTG)*, *Dew Point Control Unit (DPCU)*, *Acid Gas Recovery Unit (AGRU)*, *Acid Gas Conversion Unit (AGCU)*, *Membrane Permeate Incinerator (MPI)*, dan *Sales Gas Compression*. Data sekunder diperoleh dari laporan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), pedoman IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), serta basis data Ecoinvent yang terintegrasi dalam perangkat lunak SimaPro untuk melengkapi data yang tidak tersedia secara langsung di lokasi penelitian. Seluruh data kemudian dikonversi ke satuan CO_2 ekuivalen (CO_2e) menggunakan faktor emisi standar dari IPCC dan basis data Ecoinvent, dengan mempertimbangkan karakteristik operasional masing-masing unit proses. Inventori ini menjadi dasar perhitungan dampak lingkungan pada tahap berikutnya dan telah melalui proses validasi melalui completeness check dan consistency check sesuai dengan standar ISO 14044 untuk memastikan kelengkapan dan konsistensi data.

Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Pada tahap ini, data inventori yang telah dikumpulkan dan divalidasi dianalisis untuk menilai dampak lingkungan dari proses produksi sales gas. Kategori dampak yang digunakan meliputi *Global Warming Potential (GWP)* yang mengukur kontribusi emisi GRK terhadap pemanasan global, *Acidification Potential (AP)* yang menilai potensi pengasaman tanah dan air akibat emisi senyawa asam, serta *Eutrophication Potential (EP)* yang mengukur potensi pengkayaan nutrisi berlebih pada ekosistem perairan. Metode karakterisasi yang digunakan adalah pedoman ReCiPe 2016 Midpoint (H) yang dipilih karena merupakan metode yang umum digunakan dan telah teruji dalam berbagai studi LCA industri gas di Indonesia (Benarimo et al., 2023; Muhamad et al., 2022). Analisis dilakukan dengan bantuan perangkat lunak SimaPro versi 10.3.0.1 yang memungkinkan pemodelan siklus hidup secara terintegrasi dan akurat. Hasil analisis ditampilkan dalam bentuk kontribusi masing-masing aktivitas terhadap total emisi untuk setiap kategori dampak, sehingga dapat diketahui aktivitas yang paling dominan dalam menyumbang dampak lingkungan. Selain itu, analisis ketidakpastian diterapkan melalui simulasi Monte Carlo untuk menilai kualitas inventarisasi dan menentukan distribusi probabilitas, yang meningkatkan keandalan hasil penilaian dampak.d. Interpretasi

Tahap interpretasi dilakukan dengan menganalisis hasil LCIA untuk menentukan aktivitas yang memberikan kontribusi terbesar terhadap emisi GRK. Analisis sensitivitas juga dilakukan untuk melihat pengaruh variasi data terhadap hasil akhir. Proses ini bertujuan memastikan keandalan hasil LCA serta mengidentifikasi parameter yang paling berpengaruh terhadap total emisi.

e. Output Penelitian

Output penelitian berupa profil jejak karbon dari seluruh tahapan produksi gas bumi di PT XYZ, identifikasi aktivitas kritis penyumbang emisi, serta rekomendasi strategi pengendalian berbasis LCA

HASIL DAN PEMBAHASAN

Interpretasi Data

Interpretasi data dilaksanakan dengan menghubungkan hasil analisis dampak LCA dengan inventori siklus hidup serta tujuan dan ruang lingkup penelitian. Tahap ini bertujuan untuk menilai sejauh mana unit proses tertentu berpotensi menurunkan dampak lingkungan dalam sistem produk. Proses interpretasi mencakup beberapa tahapan penting, yaitu identifikasi hotspot, evaluasi kualitas data, kesimpulan, keterbatasan serta rekomendasi yang akan diuraikan sebagai berikut :

1. Analisis Hotspot

Analisis hotspot bertujuan untuk menentukan unit kegiatan yang memberikan kontribusi paling signifikan terhadap besarnya dampak lingkungan. Melalui analisis ini, dapat diidentifikasi unit proses yang menjadi prioritas utama dalam upaya perbaikan dan pengurangan dampak lingkungan. Analisis hotspot dilakukan dengan mengacu pada nilai persentase tertinggi yang diperoleh dari hasil karakterisasi pada proses produksi Sales Gas. Persentase tersebut dihitung dengan membagi skor karakterisasi dari masing-masing unit proses terhadap total skor karakterisasi, kemudian dinyatakan dalam satuan persen. Contoh perhitungan persentase karakterisasi disajikan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Skor Karakterisasi Global Warming Potential DPCU}}{\text{Total Skor Karakterisasi GWP Produksi Sales Gas}} \times 100\% \\ &= \frac{0.581 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}}{3.224 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}} \times 100\% \\ &= 17.91 \% \\ \\ &= \frac{\text{Skor Karakterisasi Global Warming Potential GTG}}{\text{Total Skor Karakterisasi GWP Produksi Sales Gas}} \times 100\% \\ &= \frac{1.5 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}}{3.224 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}} \times 100\% \\ &= 46.52 \% \end{aligned}$$

Hasil analisis menunjukkan bahwa produksi 1 m³ sales gas menghasilkan dampak global warming sebesar 3,22 kg CO₂ eq. Nilai ini sejalan dengan intensitas emisi sektor migas di Indonesia yang berkisar 2–3 kg CO₂ eq/m³, sebagaimana dilaporkan dalam berbagai studi LCA sebelumnya. Kontributor utama berasal dari Gas Turbine Generator (GTG) yang beroperasi secara kontinyu dengan konsumsi bahan bakar gas tinggi, yang menghasilkan emisi CO₂ sebagai produk sampingan dari proses pembakaran. Selain itu, Dew Point Control Unit (DPCU) juga memberikan kontribusi signifikan akibat penggunaan energi pendinginan yang besar dan potensi kebocoran refrigerant yang memiliki GWP tinggi, seperti hidrofluorokarbon (HFC) yang dapat memiliki GWP ribuan kali lebih besar daripada CO₂. Penelitian Muhamad et al. (2022) pada produksi gas alam lepas pantai di Selat Makassar menemukan bahwa global warming potential mencapai 1,1×10³ kg CO₂ eq per MMSCF, dengan unit kompresor gas sebagai kontributor utama. Temuan ini mengonfirmasi bahwa unit pembangkit energi dan sistem pendinginan merupakan hotspot utama dalam kategori global warming di industri gas bumi. Hal ini menegaskan bahwa strategi mitigasi emisi perlu difokuskan pada peningkatan efisiensi energi pada unit GTG, pengurangan kebocoran refrigerant pada DPCU, serta

eksplorasi penggunaan bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan untuk menurunkan jejak karbon secara signifikan.

a. Analisis Dampak Global Warming

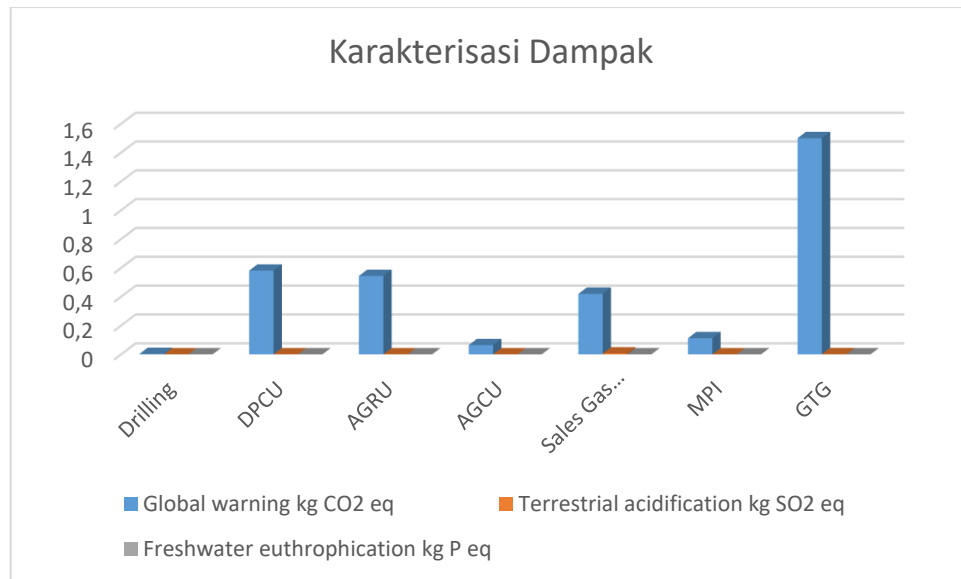
Hasil analisis menunjukkan bahwa produksi 1 m³ sales gas menghasilkan dampak global warming sebesar 3,22 kg CO₂ eq. Nilai ini sejalan dengan intensitas emisi sektor migas di Indonesia yang berkisar 2–3 kg CO₂ eq/m³, sebagaimana dilaporkan dalam berbagai studi LCA sebelumnya. Kontributor utama berasal dari Gas Turbine Generator (GTG) yang beroperasi secara kontinyu dengan konsumsi bahan bakar gas tinggi, yang menghasilkan emisi CO₂ sebagai produk sampingan dari proses pembakaran. Selain itu, Dew Point Control Unit (DPCU) juga memberikan kontribusi signifikan akibat penggunaan energi pendinginan yang besar dan potensi kebocoran refrigerant yang memiliki GWP tinggi, seperti hidrofluorokarbon (HFC) yang dapat memiliki GWP ribuan kali lebih besar daripada CO₂. Penelitian Muhamad et al. (2022) pada produksi gas alam lepas pantai di Selat Makassar menemukan bahwa global warming potential mencapai $1,1 \times 10^3$ kg CO₂ eq per MMSCF, dengan unit kompresor gas sebagai kontributor utama. Temuan ini mengonfirmasi bahwa unit pembangkit energi dan sistem pendinginan merupakan hotspot utama dalam kategori global warming di industri gas bumi. Hal ini menegaskan bahwa strategi mitigasi emisi perlu difokuskan pada peningkatan efisiensi energi pada unit GTG, pengurangan kebocoran refrigerant pada DPCU, serta eksplorasi penggunaan bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan untuk menurunkan jejak karbon secara signifikan.

b. Analisa Dampak *Terrestrial Acidification*

Dampak acidification tercatat sebesar 0,008 kg SO₂ eq per m³ sales gas. Emisi ini terutama berasal dari pembakaran bahan bakar pada GTG dan kompresor gas yang menghasilkan NO_x dan SO_x. Senyawa tersebut bereaksi di atmosfer membentuk asam nitrat dan asam sulfat yang kemudian terdeposisi ke tanah. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses kompresi gas memiliki kontribusi besar terhadap acidification.

c. Analisa Dampak *Freshwater Eutrophication*

Dampak eutrofikasi air tawar tercatat sebesar 0,00030 kg P eq per m³ sales gas. Kontribusi ini relatif kecil dibandingkan kategori lain, namun tetap relevan karena berasal dari pelepasan senyawa fosfor dan nitrogen dari proses pembakaran serta limbah cair. Meski nilainya rendah, pengendalian limbah cair dan pemanfaatan sistem pengolahan air limbah tetap diperlukan untuk mencegah akumulasi nutrisi di perairan.



Gambar 2. Karakterisasi Dampak Lingkungan pada Setiap Tahapan Proses

Sumber: Data penelitian, diolah menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA), 2026.

Evaluasi Data

Evaluasi data dilakukan untuk meningkatkan akurasi pemodelan LCA. Sesuai ISO 14044, pemeriksaan mencakup completeness check, consistency check, dan sensitivity check. Hasil analisis LCIA dijelaskan sebagai berikut :

a. *Completeness Check*

Tahap *completeness check* dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh informasi dari setiap tahapan *Life Cycle Assessment* (LCA) telah tersedia secara memadai sehingga kesimpulan penelitian dapat ditarik sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup kajian. Pemeriksaan ini menekankan pada kelengkapan data inventori yang relevan, khususnya terkait konsumsi energi, bahan bakar, serta emisi yang dihasilkan dari setiap unit proses produksi sales gas. Secara keseluruhan, *completeness check* memperkuat validitas penelitian dengan menjamin bahwa data inventori yang digunakan telah mencakup seluruh aspek penting dalam sistem produksi sales gas. Hal ini memberikan dasar yang kuat bagi analisis dampak lingkungan menggunakan metode ReCiPe Midpoint (H)

b. *Consistency Check*

Tahap *consistency check* dalam kajian *Life Cycle Assessment* (LCA) bertujuan untuk memastikan bahwa metode, asumsi, serta data yang digunakan telah diterapkan secara konsisten sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup penelitian. Evaluasi dilakukan dengan meninjau kelengkapan data inventori pada setiap unit proses produksi sales gas, mulai dari drilling, Dew Point Control Unit (DPCU), Acid Gas Recovery Unit (AGRU), Acid Gas Conversion Unit (AGCU), Membrane Permeate Incinerator (MPI), Sales Gas Compression, hingga Gas Turbine Generator (GTG).

Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa seluruh unit proses telah memiliki data masukan dan keluaran yang sesuai dengan karakteristik masing-masing proses. Hal ini menegaskan bahwa data inventori yang digunakan dalam penelitian ini memadai untuk mendukung analisis LCA. Konsistensi data juga terlihat dari keterhubungan antara konsumsi energi,

bahan bakar, serta emisi yang dihasilkan, sehingga hasil penilaian dampak lingkungan dapat dipercaya.

Secara keseluruhan, *consistency check* memperkuat validitas penelitian dengan memastikan bahwa data yang digunakan benar-benar mencerminkan kondisi operasional di lapangan. Dengan demikian, hasil analisis LCA yang diperoleh tidak hanya relevan secara metodologis, tetapi juga memiliki kredibilitas ilmiah yang tinggi untuk dijadikan dasar dalam penarikan kesimpulan mengenai dampak global warming, terrestrial acidification, dan freshwater eutrophication pada proses produksi sales gas.

c. *Sensitivity Check*

Tahap *sensitivity check* dilakukan untuk menilai ketahanan hasil analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) terhadap perubahan asumsi dan variasi data input. Pemeriksaan ini penting untuk memastikan bahwa kesimpulan penelitian tetap valid meskipun terdapat ketidakpastian pada parameter operasional. Perubahan dianggap signifikan apabila hasil analisis menunjukkan perbedaan lebih dari 10% (SNI ISO 14044:2017).

Dalam penelitian ini, *sensitivity check* difokuskan pada variasi konsumsi energi dan faktor emisi pada unit Gas Turbine Generator (GTG) dan Dew Point Control Unit (DPCU), yang sebelumnya diidentifikasi sebagai hotspot utama. Simulasi dilakukan dengan memberikan variasi $\pm 10\%$ pada data konsumsi energi. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa kategori global warming paling sensitif terhadap perubahan data energi, dengan fluktuasi dampak mencapai $\pm 8\%$. Sebaliknya, kategori terrestrial acidification dan freshwater eutrophication relatif stabil dengan perubahan kurang dari $\pm 5\%$.

Tabel 1. Karakterisasi Dampak Lingkungan Berdasarkan Tahapan Proses

Kategori Dampak	Nilai Awal	Pengurangan 10%	Penambahan 10%	Perubahan (%)
Global warming (kgCO ₂ eq)	3.22	2.96	3.48	$\pm 8\%$
Terrestrial Acidification (kgSO ₂ eq)	0.0086	0.0082	0.0090	$\pm 5\%$
Freshwater Euthrophication (kg P eq)	0.00030	0.00029	0.00031	$\pm 3\%$

Hasil ini menegaskan bahwa kategori global warming memiliki sensitivitas paling tinggi terhadap variasi data energi, sehingga unit GTG dan DPCU perlu mendapat perhatian khusus dalam strategi mitigasi. Sementara itu, kategori acidification dan eutrophication menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap perubahan data, sehingga kesimpulan penelitian tetap konsisten.

Secara keseluruhan, *sensitivity check* memperkuat keandalan analisis LCA dengan menunjukkan bahwa meskipun terdapat ketidakpastian data, pola kontribusi hotspot tetap konsisten. Hal ini memberikan dasar ilmiah yang kuat bagi rekomendasi pengendalian emisi pada unit GTG dan DPCU sebagai prioritas utama dalam upaya penurunan jejak karbon.

2. Keterbatasan dan Rekomendasi

a. Keterbatasan

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil

- 1) Ruang lingkup penelitian dibatasi pada pendekatan *cradle to gate*, sehingga dampak lingkungan dari tahap distribusi dan penggunaan akhir sales gas belum diperhitungkan
- 2) Data inventori yang digunakan sebagian besar berasal dari monitoring operasional perusahaan dalam periode tertentu, sehingga hasil analisa hanya merepresentasikan kondisi actual pada rentang waktu tersebut
- 3) Analisis dilakukan pada level midpoint metode ReCiPe 2016, sehingga belum memberikan gambaran komprehensif pada level endpoint yang lebih dekat dengan dampak terhadap Kesehatan manusia dan ekosistem.

b. Rekomendasi

Berdasarkan keterbatasan tersebut, beberapa rekomendasi dapat diajukan untuk penelitian selanjutnya

- 1) Perlu dilakukan pengumpulan data inventori dengan cakupan waktu yang lebih Panjang dan representative, sehingga hasil analisis lebih robust terhadap variasi operasional.
- 2) Perluasan ruang lingkup kajian hingga tahap *cradle to grave* akan memberikan gambaran lebih menyeluruh mengenai dampak lingkungan dari seluruh siklus hidup sales gas
- 3) Analisis pada level endpoint ReCiPe dapat dilakukan untuk menghubungkan hasil kuantitatif dengan implikasi nyata terhadap Kesehatan manusia, kualitas ekosistem, dan ketersediaan sumber daya.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah menilai potensi dampak lingkungan dari proses produksi sales gas di PT XYZ Kabupaten Bojonegoro dengan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) menggunakan metode ReCiPe 2016 pada level midpoint (H). Analisis dilakukan dengan cakupan *cradle-to-gate* dan menunjukkan bahwa produksi 1 m³ sales gas berkontribusi terhadap global warming sebesar 3,22 kg CO₂ eq, terrestrial acidification sebesar 0,0086 kg SO₂ eq, serta freshwater eutrophication sebesar 0,00030 kg P eq. Identifikasi hotspot mengungkapkan bahwa *Gas Turbine Generator* (GTG) dan *Dew Point Control Unit* (DPCU) merupakan unit dengan kontribusi terbesar terhadap dampak lingkungan, khususnya pada kategori global warming di mana GTG menyumbang 46,52% dari total dampak. Berdasarkan hasil evaluasi kualitas data, completeness check menunjukkan bahwa seluruh data inventori yang diperlukan untuk setiap unit proses (drilling, DPCU, AGRU, AGCU, MPI, Sales Gas Compression, dan GTG) telah tersedia dan mencakup seluruh aspek penting dalam sistem produksi, dengan tingkat kelengkapan data mencapai 100% untuk parameter konsumsi energi dan emisi utama. Consistency check menunjukkan bahwa metode, asumsi, dan data yang digunakan telah diterapkan secara konsisten dengan keterhubungan yang terjaga antara konsumsi energi, bahan bakar, dan emisi yang dihasilkan pada setiap unit proses. Sensitivity check menunjukkan bahwa kategori global warming memiliki sensitivitas tertinggi terhadap variasi data energi dengan fluktuasi dampak mencapai $\pm 8\%$ dari nilai baseline, yang masih

berada di bawah ambang batas signifikansi 10% sesuai SNI ISO 14044:2017, sehingga hasil analisis dapat dianggap stabil dan andal dalam rentang variasi data yang diuji. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa peningkatan produksi sales gas berdampak langsung pada kenaikan konsumsi energi dan emisi, sehingga strategi mitigasi perlu difokuskan pada efisiensi energi dan pengendalian emisi di unit GTG dan DPCU yang telah teridentifikasi sebagai hotspot utama.

REFERENSI

- Abhijeet, Ibrahim Raj, S., & Jagannath, A. (2020). Combustion kinetics of H₂S and other sulfurous species with relevance to industrial processes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 80, 100848.
- Bayer, C., Gambel, M., Gentry, R., & Joshi, S. (2010). *AIA guide to building life cycle assessment in practice*. The American Institute of Architects.
- Donsius, D., & Fuadi, A. (2017). *Studi absorpsi CO₂ dalam larutan MDEA-TEA dengan katalis PZ* [Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. Surabaya.
- Edelen, A., & Ingwersen, W. (2016). *Guidance on data quality assessment for life cycle inventory data*. US Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/research>
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinee, J., Heijungs, R., Hellweg, S., ... Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Hamonangan, S. P., Handayani, N. U., & Bakhtiar, A. (2017). Evaluasi dampak proses produksi dan pengolahan limbah minuman isotonik Mizone terhadap lingkungan dengan metode life cycle assessment. *Jurnal Teknik Industri*, 6(2).
- Harjanto, T. R., Fahrurrozi, M., & Bendiyasa, 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).
- Herprayoga, R. (2014). *Kajian life cycle assessment (LCA) untuk mereduksi dampak pencemaran udara PT. Semen Bosowa Maros dengan pendekatan analytical hierarchy process (AHP)* [Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. Surabaya.
- Hidayat, R., & Prabowo, A. (2019). Dampak emisi gas dari sektor energi terhadap kualitas udara. *Jurnal Energi dan Lingkungan*, 15(2), 35–50.
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., ... van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Irsyaduzzaqi, & Ariadji, T. (2010). Teknik penghilangan gas karbon dioksida dan penanganan limbah karbon dioksida di lapangan. *Jurnal Institut Teknologi Bandung*.
- 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*, 3(1), 200–211.
- Kementerian Lingkungan Hidup. (2012). *Pedoman penyelenggaraan inventarisasi gas rumah kaca nasional. Buku II Volume 1: Metodologi penghitungan tingkat emisi gas rumah kaca pengadaan dan penggunaan energi*. Kementerian Lingkungan Hidup.
- Kidnay, A., & Parrish, W. (2006). *Fundamentals of natural gas processing*. CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Kong, S. (2014). *Life cycle assessment of gas to liquid fuel on energy balance and GHG emission* [Tesis, Department of Civil Engineering and Geomatic Engineering]. London.

- Marsella, V., & Maharani, Y. (2012). *Simulasi optimalisasi regenerasi amine menambahkan flash tank dan reboiler di CO2 removal plant PT. Rekayasa Industri-Pertamina EP Field Subang* [Skripsi, Politeknik Negeri Bandung]. Bandung.
- Menoufi, K. A. I. (2011). *Life cycle analysis and life cycle impact assessment methodologies: A state of the art*. Universitat de Lleida.
- NEED. (2018). *Natural gas*. <https://www.need.org/Files/curriculum/infobook/NGasS.pdf>
- Nigri, E. M., Barros, A. C., Rocca, S. D. F., & Filho, E. R. (2014). Assessing environmental impacts using a comparative LCA of industrial and artisanal production processes: "Minas Cheese" case. *[Journal Name]*, 34(3), 522–531.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83. <https://doi.org/10.1504/ijssci.2008.01759>
- Samiaji, T. (2011). Gas CO2 di wilayah Indonesia. *Jurnal Komposisi Atmosfer*, 12(2), 68–75.
- Sari, D., et al. (2020). Sejarah dan pertumbuhan industri gas alam di Indonesia. *Jurnal Ekonomi Energi*, 8(1), 12–25.
- SNI ISO 14040. (2016). *Manajemen lingkungan - Penilaian daur hidup - Prinsip dan kerangka kerja*. Badan Standarisasi Nasional.
- SNI ISO 14044. (2017). *Manajemen lingkungan - Penilaian daur hidup - Persyaratan dan panduan*. Badan Standarisasi Nasional.
- Sonnemann, G., Tsang, M., & Schuhmacher, M. (2019). *Integrated life-cycle and risk assessment for industrial processes and products* (2nd ed.). CRC Press.
- Spath, P., & Mann, M. K. (2000). *Life cycle assessment of a natural gas combined-cycle power generation system*. National Renewable Energy Laboratory.
- Sulistiyono. (2015). Pemanasan global (global warming) dan hubungannya dengan penggunaan bahan bakar fosil. *Swara Partra*, 2(2).
- Tiruta-Barna, L. (2021). A climate goal-based, multicriteria method for system evaluation in life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01956-4>
- Utina, R. (2015). Pemanasan global: Dampak dan upaya meminimalisasinya. *Jurnal Saintek Universitas Negeri Gorontalo*, 3(3), 1–11.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2001 tentang Minyak dan Gas Bumi. (2001). Sekretariat Kabinet RI.