

Analisis Dampak Lingkungan Emisi Gas Rumah Kaca Menggunakan Metode *Life Cycle Assessment* di Perusahaan Penyedia Layanan dan Perakitan Sistem *Turbocharger*

Aisyah Ramadhanti Suhada¹, Restu Hikmah Ayu Murti^{1*}, Tuhu Agung Rachmanto¹,
Hendrata Wibisana², Firra Rosariawari¹

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Indonesia

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Indonesia

*Koresponden email: restu.hikmah.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 27 Oktober 2025

Disetujui: 01 November

Abstract

Greenhouse gas (GHG) emissions from the industrial sector have a significant impact on global climate change. To assess the overall environmental impact, an analysis capable of mapping emissions from various operational activities is required. This study aims to analyze GHG emissions in a manufacturing company that focuses on turbocharger system assembly and services using the Life Cycle Assessment (LCA) method. The analysis was conducted with reference to the 2006 IPCC Guidelines and openLCA software, with the scope of research covering the transportation and energy sectors within the company. The inventory results show that the energy sector is the main contributor to emissions, with the largest impact category being climate change (GWP 100a). Next, a scenario analysis was conducted, namely real conditions, the use of solar panels, the use of diesel fuel, and a mixture. A comparison of the scenarios showed that the use of renewable energy in the form of solar panels could significantly reduce GHG emissions compared to the current conditions. This study confirms that the application of LCA can provide a quantitative picture of the potential environmental impact and serve as a scientific basis for formulating GHG emission management strategies in the industrial sector.

Keywords: *carbon inventory; global warming potential; ipcc; transportation; energy*

Abstrak

Emisi gas rumah kaca (GRK) dari sektor industri sangat berdampak pada perubahan iklim global. Untuk menilai dampak lingkungan secara menyeluruh, diperlukan analisis yang mampu memetakan emisi dari berbagai aktivitas operasional. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis emisi GRK pada sebuah perusahaan manufaktur yang berfokus pada perakitan dan layanan sistem *turbocharger* menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Analisis dilakukan dengan mengacu pada pedoman IPCC Guidelines 2006 dan perangkat lunak openLCA, dengan lingkup penelitian pada sektor transportasi dan energi pada perusahaan. Hasil inventarisasi menunjukkan bahwa sektor energi menjadi kontributor utama emisi, dengan kategori dampak terbesar pada *impact category* IPCC 2013 GWP 100a. Selanjutnya dilakukan analisis skenario, yaitu kondisi *real*, penggunaan panel surya, penggunaan bahan bakar solar, serta campuran. Perbandingan skenario menunjukkan bahwa penerapan energi terbarukan berupa panel surya mampu menurunkan emisi GRK secara signifikan dibandingkan dengan kondisi saat ini. Penelitian ini menegaskan bahwa penerapan LCA dapat memberikan gambaran kuantitatif terhadap potensi dampak lingkungan sekaligus menjadi dasar ilmiah dalam perumusan strategi pengelolaan emisi GRK di sektor industri.

Kata Kunci: *inventarisasi karbon; global warming potential; ipcc; transportasi; energi*

1. Pendahuluan

Perubahan iklim telah menjadi isu lingkungan global yang mendesak. Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer memicu kenaikan suhu rata-rata bumi, yang berimplikasi pada terjadinya perubahan cuaca ekstrem, kenaikan muka air laut, hingga ancaman terhadap ketahanan pangan dan energi [1]. Menurut *World Resources Institute*, Indonesia menempati posisi keenam penghasil emisi karbon terbesar di dunia dengan total 1,98 miliar ton CO₂e per tahun, sekaligus menjadi yang tertinggi di kawasan Asia Tenggara [2]. Kondisi ini menegaskan bahwa upaya mitigasi emisi di Indonesia harus dilakukan, terutama pada sektor-sektor penyumbang utama [3].

Sektor industri merupakan salah satu penyumbang emisi GRK yang signifikan. Data Kementerian Perindustrian menunjukkan bahwa emisi dari sektor industri mencapai 238,1 juta ton CO₂e, atau sekitar 8–

20% dari total emisi nasional [4]. Hal ini menjadikan industri sebagai target penting dalam strategi pengendalian emisi nasional yang sejalan dengan komitmen Indonesia pada *Paris Agreement* dan kebijakan Nilai Ekonomi Karbon (NEK) [5]. Industri tidak hanya berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonomi, tetapi juga memiliki potensi besar dalam mendukung transisi menuju pembangunan rendah karbon [6].

Untuk menilai kontribusi emisi dari aktivitas industri, diperlukan pendekatan yang mampu memberikan gambaran kuantitatif mengenai dampak lingkungan. *Life Cycle Assessment (LCA)* merupakan salah satu metode yang diakui secara internasional untuk tujuan tersebut [7]. Sesuai dengan standar ISO 14040 [8] dan ISO 14044 [9], LCA dapat melakukan penilaian dampak lingkungan dari seluruh tahapan siklus hidup suatu produk, proses, atau sistem, mulai dari input energi dan material, aktivitas operasional, hingga keluaran berupa limbah dan emisi. Dengan cakupannya yang komprehensif, LCA tidak hanya digunakan untuk menghitung emisi, tetapi juga untuk mengevaluasi berbagai opsi pengelolaan yang lebih berkelanjutan [10].

Dalam konteks industri, emisi dari kendaraan operasional dan penggunaan energi listrik serta bahan bakar fosil pada kegiatan produksi dan transportasi internal menjadi sumber utama emisi. Sumber emisi ini seringkali belum dikelola secara sistematis, sehingga perusahaan memerlukan pendekatan berbasis sains untuk menilai dampaknya [11]. LCA dapat membantu mengidentifikasi sektor dengan kontribusi emisi terbesar sekaligus menguji efektivitas skenario mitigasi, seperti penggunaan energi terbarukan. Hal ini penting karena industri dituntut untuk tidak hanya menjaga kinerja operasional, tetapi juga menekan jejak karbon agar sejalan dengan target *Sustainable Development Goals (SDGs)*, khususnya tujuan ke 13 tentang *climate action* [12].

Penelitian ini difokuskan pada sebuah perusahaan yang bergerak di bidang perakitan dan layanan sistem *turbocharger*. Aktivitas operasional perusahaan tersebut melibatkan konsumsi energi listrik dari jaringan umum, bahan bakar kendaraan operasional, serta potensi pemanfaatan energi alternatif [13]. Perusahaan ini memiliki konsumsi energi listrik dan bahan bakar yang signifikan dalam aktivitas operasionalnya, sehingga berpotensi menghasilkan emisi GRK yang tinggi.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis dampak lingkungan yang disebabkan oleh emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh perusahaan dengan LCA serta menganalisis skenario-skenario penerapan energi untuk menekan dampak lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi strategi pengurangan emisi industri serta mendukung agenda SDGs dalam pencapaian target penurunan emisi GRK.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Life Cycle Assessment (LCA)* untuk menganalisis emisi gas rumah kaca (GRK) yang dihasilkan oleh aktivitas transportasi dan operasional perusahaan yang berfokus pada perakitan dan layanan sistem *turbocharger*. Analisis dilakukan sesuai dengan kerangka kerja ISO 14040 dan ISO 14044 yang meliputi empat tahap utama sebagaimana dijelaskan dibawah ini.

Pengumpulan Data Emisi Gas Rumah Kaca

Batasan sistem yang digunakan adalah *gate-to-gate*, yaitu hanya mencakup aktivitas di dalam lingkup perusahaan tanpa memperhitungkan dampak hulu maupun hilir [14]. Parameter yang dianalisis meliputi karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen monoksida (N₂O). Data yang diperlukan untuk sektor kendaraan adalah jenis kendaraannya, jumlah kendaraan, jarak tempuh dan jenis bahan bakar yang digunakan setiap kendaraan. Sementara untuk sektor energi adalah jam operasional perusahaan bekerja, kegiatan yang dilakukan selama jam kerja, energi listrik dari alat selama proses dan jumlah alatnya.

Menghitung Data Emisi Gas Rumah Kaca

Setelah data emisi diperoleh, langkah selanjutnya adalah menghitung menggunakan rumus yang diperlukan, sesuai dengan panduan IPCC Guidelines 2006 dengan faktor emisi. Perhitungan dilakukan dengan pendekatan tingkat ketelitian (Tier) yang sesuai, yakni sektor kendaraan menggunakan Tier 2 dan Tier 1, sementara sektor energi menggunakan Tier 1 [15].

Analisis Dampak Lingkungan menggunakan LCA

Seluruh data kemudian diolah menggunakan perangkat lunak openLCA untuk mengevaluasi dampak emisi dari seluruh siklus hidup proses industri, mulai dari penggunaan bahan bakar, konsumsi energi listrik, proses produksi, hingga distribusi produk sehingga nantinya didapat total emisi dalam satuan karbon dioksida ekuivalen atau CO₂-eq. Dampak lingkungan dievaluasi menggunakan metode IPCC 2013 GWP 100a untuk mengukur kontribusi terhadap perubahan iklim.

Interpretasi Empat Skenario

Hasil perhitungan diinterpretasikan untuk membandingkan beberapa skenario energi yang digunakan dalam produksi, yaitu:

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan empat skenario energi yang digunakan dalam produksi, yaitu:

1. Keadaan *Real*
Kondisi aktual tanpa perubahan sumber energi, mencerminkan emisi dan dampak lingkungan dari sistem produksi yang sedang berjalan.
2. Keadaan dengan Panel Surya
Skenario di mana energi produksi sebagian atau sepenuhnya didukung oleh energi terbarukan berupa panel surya, dengan tujuan melihat potensi pengurangan dampak lingkungan. 1 MWp panel surya dapat menghasilkan sekitar 3,3 MWh listrik per hari di Surabaya [16].
3. Keadaan dengan Solar
Skenario di mana penggunaan bahan bakar solar dianalisis untuk memahami perbedaan emisi dan efisiensi energi dibandingkan dengan dua skenario lainnya. 1 KVa genset dapat mengkonversi 800 watt atau 0,8 kWh [17].
4. Keadaan Campuran
Skenario di mana penggunaan energi dilakukan dengan mengombinasikan listrik, energi panel surya, dan bahan bakar diesel. Analisis dilakukan untuk memahami bagaimana kombinasi ini dapat menyeimbangkan kebutuhan energi, mengurangi emisi, serta meningkatkan efisiensi dibandingkan dengan skenario tunggal. Perbandingan antar skenario dilakukan untuk menilai potensi penurunan emisi GRK yang dapat dicapai.

3. Hasil dan Pembahasan

Dua sektor yang dihitung dalam penelitian ini adalah sektor kendaraan bermotor dan sektor konsumsi energi listrik, yang keduanya merupakan bagian dari aktivitas rutin perusahaan dalam memberikan layanan perbaikan dan memperbaiki *turbocharger*. Nilai ini akan merepresentasikan total emisi GRK yang dihasilkan oleh seluruh aktivitas operasional perusahaan dalam satuan CO₂-eq.

Perhitungan Emisi dari Sektor Kendaraan

Berdasarkan data jumlah kendaraan, jenis bahan bakar, serta jarak tempuh, dilakukan perhitungan beban emisi dari sektor kendaraan. Perhitungan ini mengacu pada metode IPCC Guidelines 2006 dengan memperhatikan parameter CO₂, CH₄, dan N₂O yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar kendaraan operasional. Perhitungan juga dilakukan dengan faktor emisi gas buang kendaraan yang tercantum pada Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 [18], densitas bahan bakar kendaraan berdasarkan SNI 06-3506-1994 [19].

Tabel 1. Total Beban Emisi Kendaraan Perusahaan

Jenis Gas	Emisi Total	GWP	Emisi Setara CO ₂
	(kg/tahun)		(kg CO ₂ -eq)
CO ₂	19,847	1	19,847
CH ₄	0,001050	28	0,029
N ₂ O	0,001439	265	0,381
Total			20,258

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Untuk menyajikan total emisi kendaraan dalam satuan yang seragam, maka emisi CH₄ dan N₂O dikonversi ke dalam satuan karbon dioksida ekuivalen (CO₂-eq) berdasarkan nilai *Global Warming Potential* (GWP), di mana nilai GWP untuk CO₂ adalah 1, CH₄ sebesar 28, dan N₂O sebesar 265 [20].

Perhitungan Emisi dari Sektor Energi

Perhitungan untuk beban emisi sektor energi ini diawali dengan mengalikan total konsumsi listrik harian dengan jumlah hari dalam seminggu. Dalam penelitian ini digunakan 6 (enam) hari sebagai dasar perhitungan, sesuai dengan jumlah hari pengambilan data di lapangan.

Tabel 2. Total Konsumsi Energi Perusahaan

Kegiatan Sektor Energi	Total Konsumsi Energi	Total Konsumsi Energi	Total Konsumsi Energi
	(kWh/Hari)	(kWh/Minggu)	(kWh/Tahun)
Kegiatan Proses Harian	1301,418	7808,508	407.344
Kegiatan Operasional Kantor	124,137	744,820	38.855
Total			446.199

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Data konsumsi listrik menunjukkan total konsumsi energi listrik dari dua kategori, yaitu kegiatan proses harian dan kegiatan operasional kantor. Konsumsi energi harian terbesar berasal dari kegiatan proses harian sebesar 1.301,418 kWh per hari, setara dengan 407.344 kWh per tahun. Sementara itu, konsumsi energi harian untuk kegiatan operasional kantor tercatat sebesar 124,137 kWh per hari atau 38.855 kWh per tahun. Jika digabungkan, total konsumsi energi perusahaan mencapai 1.425,555 kWh per hari atau 446.199 kWh per tahun.

Maka, untuk mendapatkan emisi total dari sektor listrik adalah dengan mengalikan konsumsi energi (dalam kWh) dengan faktor emisi standar. Hal tersebut dikarenakan sumber emisi berasal dari listrik yang disuplai oleh jaringan eksternal (grid), bukan dari pembakaran langsung di lokasi. Jadi, pendekatan Tier 2 tidak digunakan untuk sektor ini.

$$\begin{aligned}
 \text{CO}_2 &= \text{Total Konsumsi Energi} \times \text{Faktor Emisi CO}_2 \\
 &= 446.199 \text{ kWh/Tahun} \times 0,84 \\
 &= \mathbf{374.806,833}
 \end{aligned}$$

Total Beban Emisi Perusahaan

Setelah dilakukan perhitungan emisi gas rumah kaca (GRK) dari masing-masing sektor yang berkontribusi dalam kegiatan operasional di perusahaan, maka tahap selanjutnya adalah mengakumulasi total beban emisi dari seluruh sumber utama.

Tabel 3. Total Beban Emisi Perusahaan

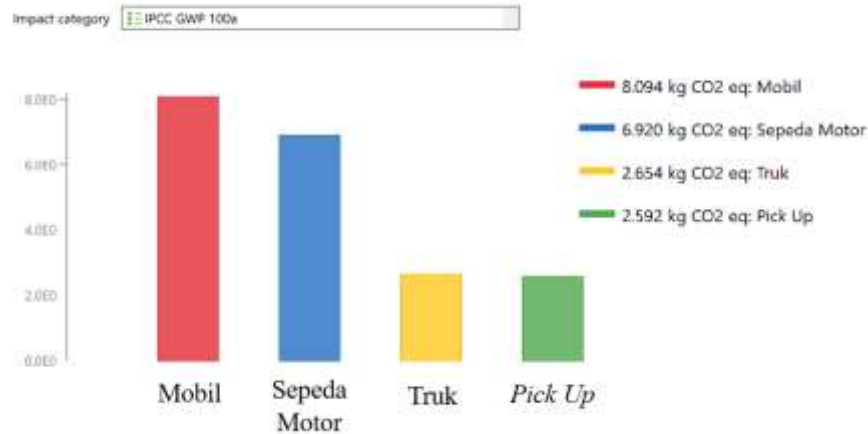
Sektor	Emisi CO ₂	Emisi CH ₄	Emisi N ₂ O	Emisi Setara CO ₂
	(kg CO ₂ -eq)	(kg CO ₂ -eq)	(kg CO ₂ -eq)	(kg CO ₂ -eq)
Kendaraan	19,847	0,029	0,381	20,258
Energi	374.807	-	-	374.807
Total	374.827	0,029	0,381	374.827

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Analisis LCA Sektor Kendaraan

Metode penilaian dampak yang digunakan adalah IPCC 2013 GWP 100a, yang mengonversi emisi gas rumah kaca menjadi nilai setara CO₂ (CO₂-equivalent) berdasarkan potensi pemanasan global dalam horizon waktu 100 tahun. Analisis LCA dalam penelitian ini dilakukan pada dua sektor yang memiliki kontribusi terhadap total emisi, dimulai dengan sektor kendaraan kemudian lanjut dengan sektor energi.

Data inventarisasi (*life cycle inventory*) sektor kendaraan ini memuat rincian aliran masuk (*input*) dan aliran keluar (*output*) pada sistem yang dianalisis. Data input mencakup jenis bahan bakar yang digunakan pada masing-masing jenis kendaraan sesuai perhitungan liter BBM dihitung menggunakan Tier 1 pada IPCC, sedangkan data output mencakup emisi gas rumah kaca (GRK) yang dihasilkan, meliputi CO₂, CH₄, dan N₂O yang dihitung menggunakan IPCC.



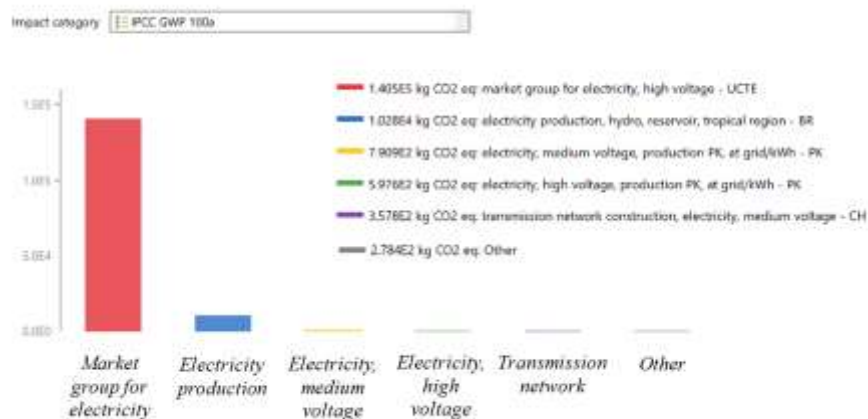
Gambar 1. Hubungan antara *Impact Category* IPCC GWP 100a dengan Jenis Kendaraan
Sumber: Hasil Analisis, 2025

Gambar 1 diatas menunjukkan kontribusi masing-masing jenis kendaraan terhadap *impact category* berdasarkan metode IPCC 2013 GWP 100a. Mobil dan sepeda motor, yang menggunakan bahan bakar bensin, menghasilkan emisi tertinggi masing-masing sebesar 8,094 kg CO₂-eq dan 6,920 kg CO₂-eq. Sementara itu, truk dan pick up berbahan bakar solar mencatat emisi lebih rendah, yakni 2,654 kg CO₂-eq dan 2,592 kg CO₂-eq. Perbedaan paling utama karena dipengaruhi oleh jumlah kendaraan yang ada pada perusahaan sehingga membuat konsumsi bahan bakar terhitung besar, dibanding kendaraan menggunakan bahan bakar solar. Selain itu, faktor emisi masing-masing jenis bahan bakar yang berbeda juga menjadi alasan.

Analisis LCA Sektor Energi

1. Skenario 1 (Keadaan Real)

Skenario pertama mencerminkan kondisi aktual penggunaan energi perusahaan tanpa adanya perubahan atau substitusi energi, jadi murni hanya menggunakan hasil total konsumsi listrik dari perusahaan. Perhitungan ini akan menggambarkan dampak lingkungan dari sistem yang sedang berjalan saat ini.



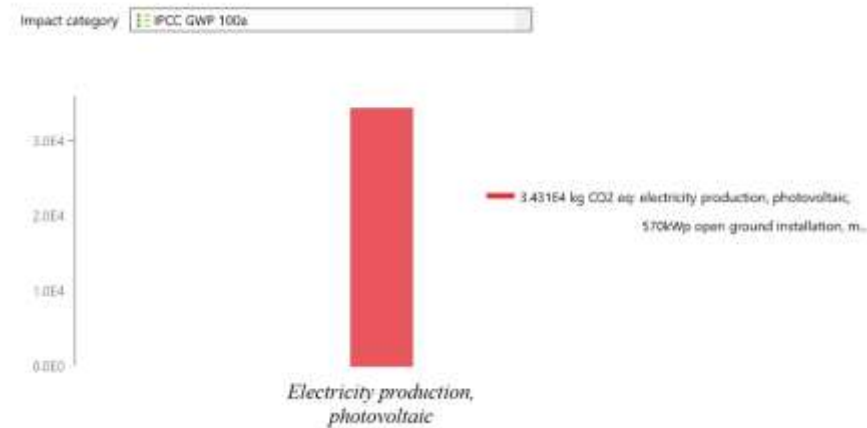
Gambar 2. Hubungan antara *Impact Category* IPCC GWP 100a dengan Keadaan Real
Sumber: Hasil Analisis, 2025

Gambar diatas menunjukkan hasil perhitungan *impact category* menggunakan metode IPCC 2013 GWP 100a yang menyajikan kontribusi emisi gas rumah kaca dalam satuan CO₂-eq dari berbagai sumber pada skenario real. Nilai tertinggi berasal dari kategori *market group for electricity, high voltage – UCTE* sebesar 1.4055×10^6 kg CO₂-eq yang menunjukkan bahwa konsumsi listrik menjadi penyumbang utama emisi pada sistem yang berjalan saat ini. Sumber emisi signifikan lainnya adalah *electricity production, hydro reservoir, tropical region – BR* sebesar 1.0284×10^6 kg CO₂-eq, serta *electricity, medium voltage, production PK, at grid/kWh – PK* sebesar 7.9092×10^3 kg CO₂-eq.

Sementara itu, kategori lain seperti transmission network construction dan kategori *Other* memberikan kontribusi relatif kecil terhadap total emisi.

2. Skenario 2 (Keadaan Panel Surya)

Pada skenario kedua, analisa dampak lingkungan apabila energi listrik digantikan total seluruhnya oleh energi terbarukan, yakni panel surya. Skenario ini bertujuan untuk memberikan skenario berbeda dari keadaan asli guna mengetahui potensi penurunan emisi melalui pemanfaatan sumber energi bersih.

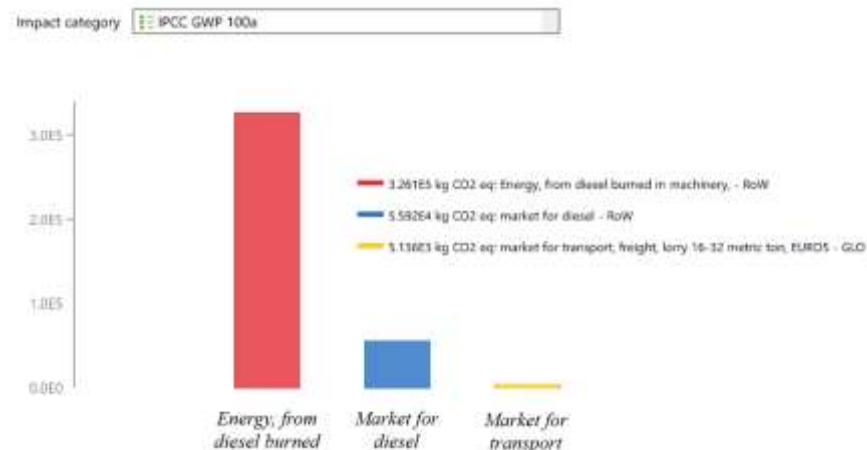


Gambar 3. Hubungan antara *Impact Category* IPCC GWP 100a dengan Keadaan Panel Surya
Sumber: Hasil Analisis, 2025

Gambar diatas menampilkan hasil perhitungan *impact category* pada skenario penggunaan panel surya dengan metode IPCC 2013 GWP 100a. Nilai emisi tercatat sebesar $3,431 \times 10^4$ kg CO₂-eq, yang seluruhnya berasal dari kategori *electricity production, photovoltaic, 570 kWp open ground installation*.

3. Skenario 3 (Keadaan Solar)

Skenario ketiga melakukan simulasi kondisi di mana energi listrik digantikan total oleh sumber energi berbasis solar (*genset*). Tujuan dari skenario ini adalah untuk membandingkan efektivitas dan efisiensi emisi dari penggunaan bahan bakar solar dibandingkan dengan dua skenario sebelumnya.

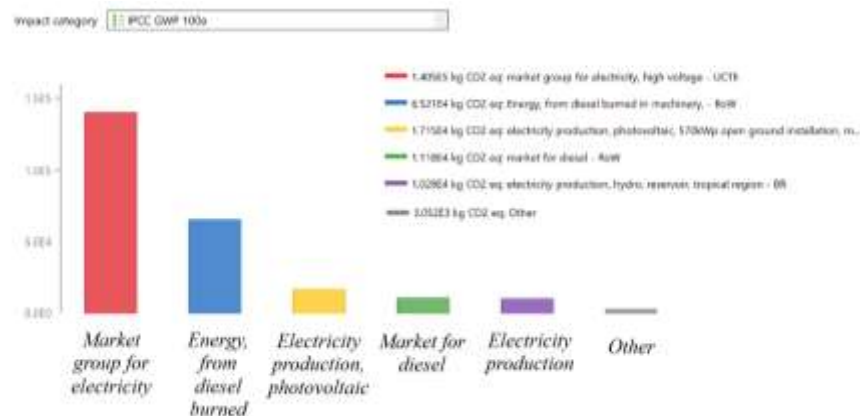


Gambar 4. Hubungan antara *Impact Category* IPCC GWP 100a dengan Keadaan Solar
Sumber: Hasil Analisis, 2025

Gambar diatas menampilkan hasil perhitungan *impact category* pada skenario solar menggunakan metode IPCC 2013 GWP 100a. Sumber emisi terbesar berasal dari kategori *Energy, from diesel burned in machinery – RoW* dengan kontribusi sebesar $3,261 \times 10^5$ kg CO₂-eq. Kontribusi signifikan lainnya berasal dari *market for diesel – RoW* sebesar $5,5924 \times 10^4$ kg CO₂-eq, sedangkan kategori *market for transport, freight, lorry 16–32 metric ton, EURO5 – GLO* memberikan kontribusi terkecil sebesar $5,1368 \times 10^3$ kg CO₂-eq. Hasil ini menunjukkan bahwa pembakaran diesel pada mesin menjadi penyumbang dominan dalam potensi pemanasan global pada skenario solar.

4. Skenario 4 (Keadaan Campuran)

Skenario campuran merupakan skenario kombinasi penggunaan tiga skenario secara bersamaan menggunakan sistem operasional perusahaan, yang dalam penelitian ini mencakup pemanfaatan listrik dan energi yang dihasilkan dari panel surya serta diesel. Skenario ini dirancang untuk merepresentasikan kondisi operasional dengan pasokan energi yang lebih beragam, sehingga diharapkan mampu menurunkan ketergantungan pada satu jenis sumber energi.



Gambar 5. Hubungan antara *Impact Category* IPCC GWP 100a dengan Keadaan Solar
Sumber: Hasil Analisis, 2025

Gambar diatas menampilkan hasil perhitungan impact category pada skenario campuran dengan metode IPCC 2013 GWP 100a. Sumber emisi terbesar berasal dari kategori *market group for electricity, high voltage – UCTE* sebesar $1,4055 \times 10^5$ kg CO₂-eq, diikuti oleh *Energy, from diesel burned in machinery – RoW* sebesar $6,52124 \times 10^4$ kg CO₂-eq. Kategori *electricity production, photovoltaic, 570 kWp open ground installation* memberikan kontribusi sebesar $7,17584 \times 10^3$ kg CO₂-eq, sedangkan *market for diesel – RoW* sebesar $1,11884 \times 10^4$ kg CO₂-eq. Kontribusi lebih kecil terlihat pada *electricity production, hydro, reservoir, tropical region – BR* sebesar $1,02824 \times 10^3$ kg CO₂-eq dan kategori *Other* sebesar $3,052 \times 10^3$ kg CO₂-eq. Hasil ini menunjukkan bahwa pada skenario campuran, sumber emisi dominan berasal dari listrik grid dan pembakaran diesel, sementara kontribusi dari panel surya relatif rendah terhadap total emisi.

5. Perbandingan Antar Skenario

Hasil analisis LCA dengan metode IPCC 2013 GWP 100a menunjukkan perbedaan signifikan pada potensi pemanasan global dari empat skenario. Skenario solar menghasilkan emisi tertinggi, yakni $3,87 \times 10^5$ kg CO₂-eq, akibat pembakaran diesel dan rantai pasok bahan bakar, disertai kelemahan berupa biaya tinggi serta ketergantungan pada energi fosil. Skenario campuran yang terdiri dari listrik 30%, panel surya 50%, diesel 20% menempati urutan kedua dengan $2,47 \times 10^5$ kg CO₂-eq. Secara konsep, skenario ini dirancang agar kegiatan *workshop* tetap berjalan meskipun terjadi pemadaman listrik, sehingga perusahaan tidak sepenuhnya bergantung pada pasokan grid.

Skenario *real* menghasilkan emisi $1,53 \times 10^5$ kg CO₂-eq, lebih rendah dari solar dan campuran, namun berisiko pada ketergantungan penuh terhadap jaringan listrik. Sebaliknya, skenario panel surya memiliki kinerja terbaik dengan emisi terendah, $3,43 \times 10^4$ kg CO₂-eq, di mana sebagian besar berasal dari proses manufaktur dan instalasi panel, sementara operasionalnya bebas emisi. Meski membutuhkan investasi awal besar dan penyimpanan energi, panel surya dinilai paling ramah lingkungan dan mendukung target transisi energi berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Analisis dampak lingkungan menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) menunjukkan bahwa skenario penggunaan panel surya menghasilkan total emisi terendah, yaitu 34,310 kg CO₂-eq, dibandingkan dengan skenario *real* sebesar 152,805 kg CO₂-eq, skenario campuran sebesar 247,372 kg CO₂-eq, dan skenario solar sebesar 387,156 kg CO₂-eq. Hasil ini menegaskan bahwa penerapan energi terbarukan mampu menurunkan emisi lebih besar dibandingkan kondisi eksisting. Meskipun demikian, skenario campuran tetap diterapkan pada tahap transisi karena dapat menjaga keberlangsungan operasional Perusahaan ketika terjadi pemadaman listrik. Secara implikatif, hasil ini menunjukkan bahwa integrasi

energi surya ke dalam sistem operasional industri berpotensi signifikan dalam menekan jejak karbon dan mendukung pencapaian target SDGs nomor 13 tentang aksi terhadap perubahan iklim.

5. Referensi

- [1] M. F. Irma and E. Gusmira, "Tingginya Kenaikan Suhu Akibat Peningkatan Emisi Gas Rumah Kaca Di Indonesia," *JSSIT J. Sains dan Sains Terap.*, vol. 2, no. 1, 2024.
- [2] World Resources Institute, "The History of Carbon Dioxide Emissions." 2024. [Online]. Available: <https://www.wri.org/insights/history-carbon-dioxide-emissions>
- [3] N. Humaida, *Dasar-Dasar Pengetahuan Lingkungan Berbasis Perubahan Iklim Global*. UrbanGreen Central Media, 2024.
- [4] Kementerian Perindustrian, "Bersama Atasi Perubahan Iklim." 2022.
- [5] Presiden Republik Indonesia, "Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 98 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Nilai Ekonomi Karbon (NEK) untuk Pencapaian Target Kontribusi yang Ditetapkan secara Nasional dan Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca dalam Pembangunan Nasional." 2021.
- [6] E. U. Lolo, R. I. Gunawan, A. Y. Krismani, and Y. S. Pambudi, "Penilaian Dampak Lingkungan Industri Tahu Menggunakan Life Cycle Assessment (Studi Kasus: Pabrik Tahu Sari Murni Kampung Krajan, Surakarta)," *J. Serambi Eng.*, vol. 6, no. 4, 2021.
- [7] openLCA, "openLCA.org," 2025. <https://www.openlca.org/>
- [8] Badan Standardisasi Nasional, *SNI ISO 14040:2016 tentang Manajemen Lingkungan - Penilaian Daur Hidup - Prinsip dan Kerangka Kerja*. 2016.
- [9] Badan Standardisasi Nasional, *SNI ISO 14044:2017 tentang Manajemen Lingkungan – Penilaian Daur Hidup – Persyaratan dan Panduan – International Standard*. 2017.
- [10] V. Rosmiati and H. Hadiyanto, "Kajian Dampak Lingkungan Pada Proses Daur Ulang Sampah Plastik Dengan Pendekatan Life Cycle Assesment," Doctoral dissertation, School of Postgraduate, 2020.
- [11] A. Zubaydah, A. Z. Sabilah, D. P. Sari, and F. N. A. Hidayah, "Mengurangi Emisi: Mendorong Transisi ke Energi Bersih untuk Mengatasi Polusi Udara," *BIOCHEPHY J. Sci. Educ.*, vol. 4, no. 1, pp. 11–21, 2024.
- [12] United Nations, "Sustainable Development," 2025. <https://sdgs.un.org/goals>
- [13] L. Prasetyani, M. A. Firdani, M. I. Baihaqi, A. Ponco, and A. Aziz, "Analisis Pengaruh Instalasi Solar PV On-Grid 2, 6 MWP terhadap Konsumsi Energi Listrik dan Transisi Energi Bersih pada Sistem Kelistrikan," *Technologic*, vol. 16, no. 1, 2025.
- [14] M. F. Nais, "Tantangan Dan Peluang Pengelolaan Lingkungan Hidup Indonesia Di Era Industri 4.0.," *Pros. Forum Ilm. Nas. Tek.*, vol. 1, no. 1, pp. 183–194, 2022.
- [15] IPCC, *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. 2006.
- [16] Reja Aton Energi, "Proyek Panel Surya Terbaru di Surabaya," 2025. <https://atonergi.com/proyek-panel-surya-terbaru-di-indonesia/#:~:text=Pendidikan Kota Surabaya,-2.,listrik untuk seluruh operasional terminal.> (accessed Mar. 18, 2025).
- [17] Hartech SBY, "Kapasitas Daya Genset," 2025. <https://hartechnsby.co.id/calculator/> (accessed Mar. 18, 2025).
- [18] Menteri Negara Lingkungan Hidup, *Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara di Daerah*. 2010.
- [19] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 06-3506-1994 Tentang Bahan Bakar Minyak Jenis Bensin, Mutu*. 1994.
- [20] IPCC, "IPCC Fifth Assessment Report (AR5)," 2014. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>