

Kuantifikasi Dampak Lingkungan *Tenant* Kawasan Industri PT X Melalui Rancang Bangun Sistem *GreenMetric* dengan Pendekatan *Gate-to-Gate* LCIA *ReCiPe* 2016 Berbasis Data RKL-RPL Rinci

Ahmad Ilham Ramadhan Kalis¹⁾, Novirina Hendrasarie^{1)*}

¹⁾ Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Jl. Rungkut Madya, Surabaya

*Email: novirina@upnjatim.ac.id

Abstrak

Evaluasi kinerja lingkungan di kawasan industri saat ini umumnya masih terbatas pada pendekatan berbasis kepatuhan (*compliance-based*) yang belum mampu merepresentasikan dampak lingkungan secara holistik. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem evaluasi "GreenMetric" berbasis *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk mengukur beban lingkungan Tenant Y di kawasan industri PT X. Metodologi yang diterapkan adalah analisis inventori *gate-to-gate* sesuai standar ISO 14040 menggunakan data RKL-RPL Rinci (Semester I 2023 – Semester I 2025) dengan metode LCIA *ReCiPe* 2016 perspektif *Hierarchist*. Hasil penelitian mengidentifikasi sektor energi fosil sebagai *environmental hotspot* utama yang mendominasi lebih dari 90% beban *Global Warming Potential* (GWP). Lonjakan dampak ekstrem tercatat pada Semester II 2024 dengan nilai GWP mencapai 26,16 juta kg CO₂-eq akibat tingginya konsumsi batubara. Namun, ditemukan anomali berupa penurunan drastis *Acidification Potential* (AP) menjadi 3.274,42 kg SO₂-eq pada periode yang sama, mengindikasikan adanya efisiensi pengendalian emisi sulfur atau penggunaan batubara rendah sulfur. Secara spesifik, setiap 1 kg produk menghasilkan jejak karbon rata-rata 0,067 kg CO₂-eq hingga 0,243 kg CO₂-eq. Simulasi skenario substitusi energi menunjukkan bahwa penerapan PLTS Atap sebesar 25% mampu mereduksi emisi hingga 802.597,84 kg CO₂-eq per bulan, yang merekomendasikan transisi energi terbarukan sebagai strategi dekarbonisasi paling efektif.

Kata kunci: *gate-to-gate*, *green industrial estate*, jejak karbon, *Life Cycle Assessment* (LCA), *ReCiPe* 2016

Abstract

Environmental performance evaluation in industrial areas is currently limited to a compliance-based approach, which often fails to represent environmental impacts holistically. This study aims to develop a "GreenMetric" evaluation system based on Life Cycle Assessment (LCA) to quantify the environmental burden of Tenant Y in the PT X industrial estate. The methodology applied is a gate-to-gate inventory analysis according to ISO 14040 standards using Detailed RKL-RPL data (Semester I 2023 – Semester I 2025) and the ReCiPe 2016 LCIA method with a Hierarchist perspective. The results identified the fossil energy sector as the main environmental hotspot, contributing over 90% to the Global Warming Potential (GWP) burden. An extreme impact spike was recorded in Semester II 2024, with GWP reaching 26.16 million kg CO₂-eq due to high coal consumption. However, an anomaly was found where Acidification Potential (AP) dropped drastically to 3,274.42 kg SO₂-eq in the same period, indicating sulfur emission control efficiency or the use of low-sulfur coal. Specifically, every 1 kg of product generates an average carbon footprint ranging from 0.067 kg CO₂-eq to 0.243 kg CO₂-eq. Energy substitution scenario simulations show that implementing 25% Rooftop Solar PV can reduce emissions by up to 802,597.84 kg CO₂-eq per month, recommending renewable energy transition as the most effective decarbonization strategy.

Keywords: *carbon footprint*, *gate-to-gate*, *green industrial estate*, *Life Cycle Assessment* (LCA), *ReCiPe* 2016

1. PENDAHULUAN

Operasional kawasan industri menghasilkan beban lingkungan signifikan yang memerlukan pengelolaan strategis (Kemenperin, 2025). Pelaporan RKL-RPL Rinci Kawasan Industri PT X yang berbasis kepatuhan (KLHK, 2020) dinilai belum mampu mengkuantifikasi dampak dan inefisiensi tenant secara aktual (Błażejowska & Jezierski, 2024). Oleh karena itu, pendekatan LCA (ISO, 2006a; 2006b) melalui sistem *GreenMetric* berbasis ReCiPe 2016 (Huijbregts *et al*, 2017) diterapkan untuk mengukur dampak lingkungan secara presisi guna mendukung strategi efisiensi sumber daya.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Lokasi dan objek penelitian

Penelitian ini merupakan studi kasus tunggal (*single case study*) di kawasan industri PT X, dengan fokus pada PT Y (sektor FMCG dan pengemasan). Penentuan objek dilakukan secara *purposive sampling* berdasarkan skala produksi masif dan intensitas sumber daya (air dan energi) yang tinggi, sehingga merepresentasikan skenario dampak lingkungan tertinggi (*worst-case scenario*) yang prioritas untuk dimitigasi.

2.2 Kerangka kerja *Life Cycle Assessment* (LCA)

Mengacu pada ISO 14040, penelitian ini menetapkan batasan sistem *gate-to-gate* dengan unit fungsional layanan operasional tenant rata-rata per bulan pada tiap periode semesteran pelaporan RKL-RPL Rinci. Ruang lingkup analisis mencakup seluruh emisi operasional *on-site* (pembakaran, listrik grid, air bersih, dan limbah cair), sedangkan aspek konstruksi, produksi bahan baku hulu (*upstream*), dan distribusi hilir (*downstream*) dikecualikan sebagai *cut-off*.

2.3 Analisa Inventori Daur Hidup (LCI)

Pada tahap ini, data aktivitas (*activity data*) dikonversi menjadi beban emisi murni atau penggunaan sumber daya. Perhitungan emisi dari konsumsi energi (listrik grid, solar, bensin, gas alam, batu bara) menggunakan persamaan berikut:

$$E_i = A_{\text{energi}} \times EF_i \quad (1)$$

Dimana E_i adalah total emisi zat i (kg), A adalah data aktivitas (kWh atau liter), dan EF_i adalah faktor emisi (*emission factor*) zat i . Faktor emisi untuk kelistrikan menggunakan faktor emisi Grid Jamali (Jawa-Madura-Bali) (DJK ESDM, 2022). Untuk memastikan akurasi perhitungan beban lingkungan dari konsumsi energi, faktor emisi kelistrikan yang digunakan

mengacu pada inventori daur hidup spesifik untuk jaringan listrik Jawa-Madura-Bali (Jamali), dan untuk bahan bakar menggunakan pedoman IPCC 2006 (IPCC, 2006). Untuk beban pencemaran air, dilakukan konversi stoikiometri dari parameter hasil uji laboratorium (Fosfat dan Nitrat) menjadi beban unsur murni Fosfor (P) dan Nitrogen (N) (Tchobanoglous *et al.*, 2014) menggunakan Persamaan (2) dan (3):

$$M_P = \left(\frac{Q \times C_{PO_4}}{1000} \right) \times 0,326 \quad (2)$$

$$M_N = \left(\frac{Q \times C_{NO_3}}{1000} \right) \times 0,226 \quad (3)$$

Dimana m_P dan m_N adalah bebas massa Fosfor dan Nitrogen (kg), Q adalah debit limbah (m^3), C adalah konsentrasi polutan (mg/L), 0,326 adalah rasio massa atom P terhadap PO_4 , dan 0,226 adalah rasio massa atom N terhadap NO_3 .

2.4 Penilaian Dampak Daur Hidup (LCIA)

Metode ReCiPe 2016 diadopsi untuk memberikan analisis dampak komprehensif pada tingkat *midpoint*. Penerapan LCA terbukti efektif mengidentifikasi *hotspot* pada instalasi pengolahan limbah guna merumuskan strategi perbaikan kinerja yang terukur. Penelitian ini mengevaluasi delapan kategori dampak utama, yaitu GWP, AP, FFP, PMFP, FEP, MEP, WCP, dan LOP. Perhitungan skor dampak (I_c) dilakukan dengan mengalikan hasil inventori (E_i) dengan Faktor Karakterisasi ($CF_{c,i}$) sesuai Persamaan (4):

$$I_c = \sum(E_i \times CF_{c,i}) \quad (4)$$

Perlu dicatat bahwa dalam metode ReCiPe 2016 *Midpoint* (Hierarchist), faktor karakterisasi untuk *Water Consumption Potential* (WCP) bernilai $1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Huijbregts *et al.*, 2017). Oleh karena itu, nilai dampak WCP secara numerik akan setara dengan volume inventori konsumsi air, namun secara terminologi LCA, nilai ini merepresentasikan potensi kelangkaan air (*scarcity potential*) yang telah dikarakterisasi, bukan sekadar data inventori mentah. Sementara itu, perhitungan LOP didasarkan pada durasi okupansi lahan (*artificial vs used forest*) untuk mengukur beban lingkungan akibat terhambatnya proses renaturalisasi lahan alami selama periode operasional. Mengingat unit fungsional berbasis waktu (1 bulan) dan luas lahan tenant bersifat tetap (konstan), maka skor LOP akan cenderung stabil di setiap periode pemantauan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Profil Inventori dan Dampak Lingkungan

Sebelum dilakukan penilaian dampak, data aktivitas operasional *tenant* yang bersumber dari laporan RKL-RPL Rinci dikompilasi sebagai inventori daur hidup (*Life Cycle Inventory*). Data yang disajikan merupakan rata-rata aktivitas bulanan dalam setiap periode semester pelaporan. Ringkasan data inventori utama disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan data inventori (rata-rata aktivitas per bulan dalam tiap semester) *tenant* Y Periode 2023-2025

Periode	Listrik PLN (kWh)	Solar (Liter)	Gas Alam (m ³)	Batubara (kg)	Air Bersih (m ³)	Debit Limbah Cair (m ³)
Sem I 2023	3.578.927	2.676	337.654	1.445.960	30.632	418,50
Sem II 2023	3.929.773	2.689	392.537	1.342.667	37.214	488,50
Sem I 2024	3.134.881	2.480	306.030	1.393.967	34.049	450,34
Sem II 2024	3.825.987	16.928	1.859.296	7.911.200	33.102	451,17
Sem I 2025	3.980.953	2.545	297.041	1.303.233	33.503	448,00

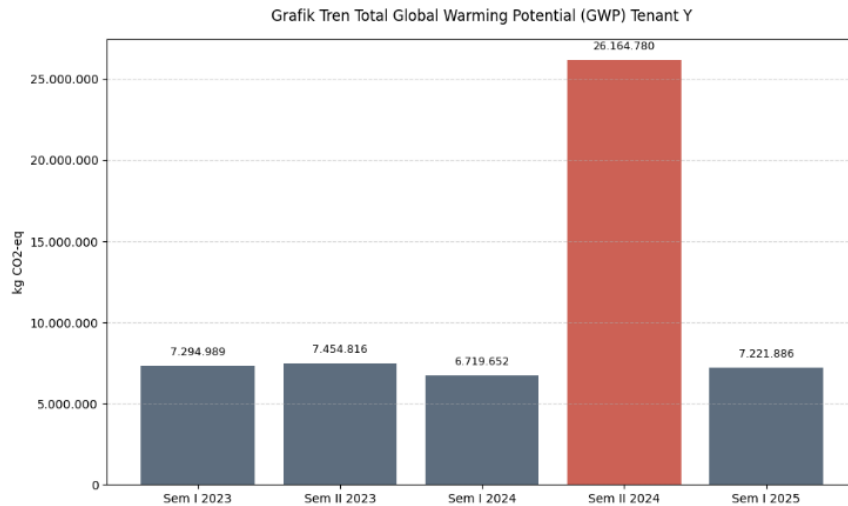
(Sumber: Data primer RKL-RPL rinci *tenant* Y Periode Semester I 2023-Semester I 2025)

Analisis neraca air PT Y menunjukkan karakteristik proses *water-consuming*, di mana hanya 1,37% (418,50 m³) air dibuang ke IPAL. Sebanyak 98,63% air habis dalam proses internal, didominasi oleh penguapan (*evaporation loss*) di unit boiler dan *cooling tower* (±90%), serta terserap produk (3,63%). Di sektor energi, terjadi lonjakan ekstrem konsumsi bahan bakar fosil pada Semester II 2024 (terutama batubara 7,9 juta kg), yang memicu dampak polusi udara signifikan. Selanjutnya, data inventori dikonversi menggunakan metode ReCiPe 2016 (Tabel 2).

Tabel 2. Rekapitulasi skor dampak lingkungan *tenant* Y bulanan (Metode ReCiPe 2016 *Hierarchist*)

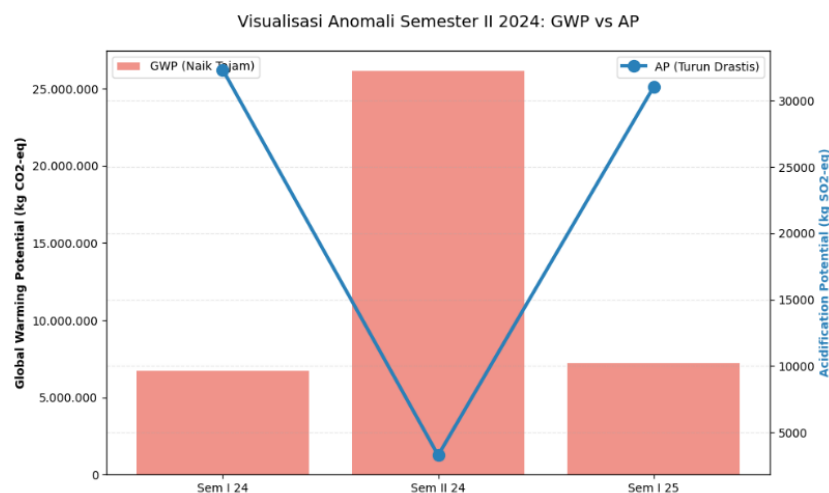
Kategori Dampak (Satuan)	Semester I 2023	Semester II 2023	Semester I 2024	Semester II 2024	Semester I 2025
GWP (kg CO ₂ -eq)	7.294.989,664	7.454.816,469	6.719.652,841	26.164.780,517	7.221.886,124
AP (kg SO ₂ -eq)	33.800,591	31.927,247	32.327,267	3.274,420	31.021,328
FFP (kg oil-eq)	1.493.680,123	1.555.793,936	1.370.117,318	505.583,205	1.468.703,676
PMFP (kg PM _{2.5} -eq)	981,074	1.075,207	860,464	1.164,039	1.087,744
EP-Fresh (kg P-eq)	0,291	1,616	0,095	0,315	1,266
EP-Marine (kg N-eq)	2,553	2,964	0,913	0,436	0,365
WCP (m ³)	30.632,000	37.214,000	34.049,000	33.102,000	33.503,000
LOP (m ² crop-eq)	2.861,407	2.861,407	2.861,407	2.861,407	2.861,407

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2025)



Gambar 1. Tren fluktuasi *Global Warming Potential* (GWP) (2023-2025)

Berdasarkan tren data yang divisualisasikan, terlihat bahwa skor GWP Tenant Y umumnya berada pada rentang stabil antara 6,7 hingga 7,4 juta kg CO₂-eq. Namun, ditemukan anomali berupa lonjakan sangat tajam pada Semester II 2024 yang mencapai nilai 26,16 juta kg CO₂-eq. Fenomena ini dipicu secara langsung oleh peningkatan masif konsumsi batubara pada periode tersebut, yang membuktikan bahwa batubara merupakan *environmental hotspot* utama bagi perusahaan. Dengan demikian, upaya dekarbonisasi melalui efisiensi energi atau substitusi bahan bakar menjadi langkah yang tidak dapat ditawar untuk menekan jejak karbon secara signifikan.

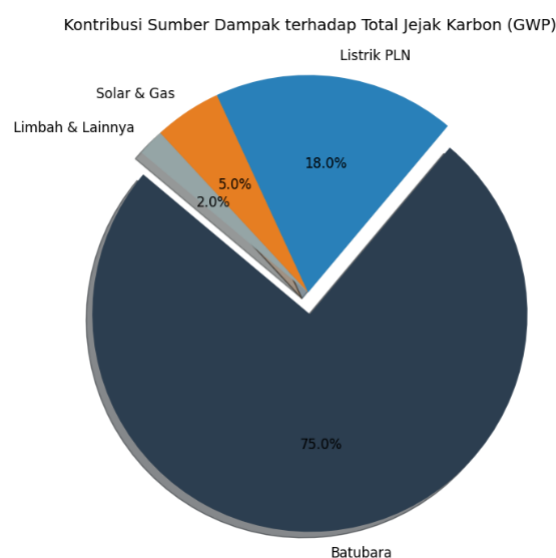


Gambar 2. Lonjakan dampak FFP dan AP pada Semester II 2024

Pada Semester II 2024, terjadi anomali berupa lonjakan konsumsi batubara (kenaikan GWP) yang dibarengi penurunan drastis nilai *Acidification Potential* (AP) menjadi 3.274,420 kg

SO₂-eq. Secara teknis, hal ini kemungkinan disebabkan oleh penggunaan batubara rendah sulfur (*Low Sulfur Coal*) atau peningkatan efisiensi sistem pengendali emisi seperti *Wet Scrubber* dan FGD dalam menyisih gas SO₂. Meski skor AP menurun, risiko kesehatan dari parameter PMFP tetap perlu diwaspadai; lonjakan pembakaran tetap berpotensi menghasilkan partikulat halus (PM_{2.5}) jika sistem *Bag Filter* atau ESP tidak bekerja optimal. Oleh karena itu, pemantauan kualitas udara dan perawatan alat pengendali emisi secara konsisten tetap menjadi prioritas utama.

3.2 Analisis *hotspot* dan dominasi energi



Gambar 3. Kontribusi sumber dampak terhadap total jejak karbon

Sektor energi fosil adalah *environmental hotspot* utama Tenant Y dengan kontribusi GWP dan FFP melebihi 90%. Hal ini dibuktikan oleh lonjakan emisi Semester II 2024 sebesar 26,16 juta kg CO₂-eq dan nilai AP 3.274,420 kg SO₂-eq akibat pembakaran batubara serta listrik PLN. Selain emisi udara, operasional pabrik menghasilkan limbah B3 *Spent Bleaching Earth* (SBE) dan limbah cair utilitas yang berisiko eutrofikasi. Strategi dekarbonisasi melalui efisiensi termal dan transisi energi terbarukan menjadi solusi krusial untuk mereduksi dampak lingkungan secara signifikan.

3.3 Skenario transisi energi dan rekomendasi

Substitusi 25% listrik PLN dengan PLTS Atap mampu mereduksi emisi Tenant Y sebesar 802.597,84 kg CO₂-eq per bulan. Dari konsumsi rata-rata 3.690.105 kWh, penggunaan tenaga surya sebesar 922.526,25 kWh akan memangkas beban *baseline* (3.210.391,35 kg CO₂-eq) secara signifikan. Dengan faktor emisi grid 0,87 kg CO₂-eq/kWh, transisi ini tidak hanya menurunkan angka GWP hingga

lebih dari 800 ton CO₂-eq/bulan, tetapi juga menekan skor kelangkaan sumber daya fosil (FFP) secara masif.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis LCA (ReCiPe 2016), profil lingkungan *Tenant Y* didominasi penggunaan energi fosil dengan indikator utama GWP dan FFP. Setiap 1 kg produk rata-rata menghasilkan jejak karbon 0,067 kg CO₂-eq, namun dapat melonjak hingga 0,243 kg CO₂-eq jika terjadi inefisiensi. Selain itu, per kg produk mengonsumsi 0,014 kg minyak mentah (FFP), 0,31 liter air, serta melepaskan 0,30 gram SO₂-eq (AP) dan 9,3 mg PM_{2.5}-eq (PMFP). Anomali Semester II 2024 menunjukkan penurunan AP meski emisi karbon naik, yang mengindikasikan penggunaan bahan bakar rendah sulfur atau optimalisasi alat pengendali emisi. Sebagai solusi, simulasi substitusi 25% listrik PLN (3.690.105 kWh/bulan) dengan PLTS Atap mampu mereduksi emisi GWP sebesar 802.597,84 kg CO₂-eq per bulan. Langkah dekarbonisasi ini menjadi strategi paling krusial untuk memperbaiki performa lingkungan dan keberlanjutan operasional perusahaan.

DAFTAR PUSTAKA

- Błażejowska, M., Jezierski, A. (2024). The effectiveness of non-financial reporting: Compliance versus impact assessment. *Economics and Environment*, 1(88)
- Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan (DJK) ESDM. (2022). Nilai Faktor Emisi GRK Sistem Ketenagalistrikan Indonesia Tahun 2021. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Holander, A., van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. (H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, Eds.). Hayama: IGES
- ISO. (2006a). ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva: International Organization for Standardization
- ISO. (2006b). ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Geneva: International Organization for Standardization
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). (2020). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.15 Tahun 2020 tentang Pelaksanaan dan Pengawasan RKL-RPL Rinci. Jakarta: KLHK
- Kementerian Perindustrian RI. (2025). Peraturan Menteri Perindustrian Nomor 26 Tahun 2025 tentang Standar Kawasan Industri dan Akreditasi Kawasan Industri. Jakarta: Kemenperin

- Nugroho, R., Hanafi, J., Shobatake, K., Chun, Y. Y., Tahara, K., Purwanto, W. W. (2022). Life cycle inventories and life cycle assessment for an electricity grid network: Case study of the Jamali grid, Indonesia. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27, 1081–1091
- RIVM. (2016). ReCiPe 2016 v1.1: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment
- Sekarani, F. A., Hendrasarie, N. (2020, May). Reduction of organic parameters in apartment wastewater using sequencing batch reactor by adding activated carbon powder. *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 506, No. 1, p. 012026). IOP Publishing
- Syitoh, N., Hendrasarie, N. (2022). Pengolahan Limbah Industri Benang Menggunakan Kombinasi Filtrasi Media Biochar dan Constructed Wetlands. *Envirous*, 3(1), 132-138
- Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). New York: McGraw-Hill Education