

Strategi Potensi Pengurangan Emisi Karbon dari Aktivitas Perkebunan dan Pabrik Kelapa Sawit

Muhammad Abil Khausar^{1*}, Suwondo², Eni Sumiarsih³

^{1,2,3} Prodi Ilmu Lingkungan Pascasarjana Universitas Riau, Provinsi Riau, Indonesia

*Correspondent email: muhammad.abil.khausar@gmail.com.

Diterima: 15 Maret 2026 | Disetujui: 29 April 2026 | Diterbitkan: 30 April 2026

Abstract. *The potential for carbon emission reductions from palm oil plantation and mill activities at PT Perkebunan Nusantara IV Region III represents a critical contribution to Indonesia's national commitment to achieving Net Zero Emissions by 2060. Operational activities—including fuel combustion in heavy machinery, generator utilization, fertilization, electricity consumption, and liquid waste treatment through Palm Oil Mill Effluent (POME) contribute significantly to greenhouse gas (GHG) emissions, particularly carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O). This study employs a quantitative approach grounded in SNI ISO 14064-1:2018, systematically calculating emissions under Scope 1, Scope 2, and partial Scope 3 categories across three operational units: Lubuk Dalam, Terantam, and Sei Pagar. The findings reveal that mobile combustion constitutes the largest emission source, followed by stationary combustion, fertilization activities, and fugitive emissions derived from POME processing. Among the three units examined, the Terantam unit generates the highest total emissions. Further analysis demonstrates that the utilization of biogas (CH₄) recovered from POME holds substantial energy generation potential, capable of producing 950,174 kWh at Lubuk Dalam, 1,929,734 kWh at Terantam, and 880,749 kWh at Sei Pagar, with an aggregate economic value exceeding Rp 4 billion annually. Based on these findings, three principal mitigation strategies were formulated: substituting diesel-powered generators with grid electricity supplied by PLN, transitioning heavy equipment to electric-based technology, and optimizing biogas utilization for electricity generation. These strategies demonstrate significant potential not only in reducing CO₂ equivalent (CO₂e) emissions but also in enhancing energy efficiency and advancing the long-term operational sustainability of the company.*

Keywords: carbon emissions; palm oil; ISO 14064

PENDAHULUAN

Perubahan iklim menjadi isu global yang menuntut berbagai sektor industri untuk menurunkan emisi Gas Rumah Kaca (GRK), termasuk industri kelapa sawit yang merupakan sektor strategis dalam perekonomian Indonesia. Aktivitas pada perkebunan dan pabrik kelapa sawit berpotensi menghasilkan emisi GRK yang signifikan, terutama karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen oksida (N₂O) yang berasal dari pembakaran bahan bakar fosil, pemupukan nitrogen, proses pengolahan Tandan Buah Segar (TBS), serta pengelolaan limbah cair POME. Indonesia, melalui komitmen *Net Zero Emission* 2060, mendorong seluruh pelaku industri termasuk sektor perkebunan untuk menerapkan strategi mitigasi GRK yang terukur dan berkelanjutan (KLHK, 2021).

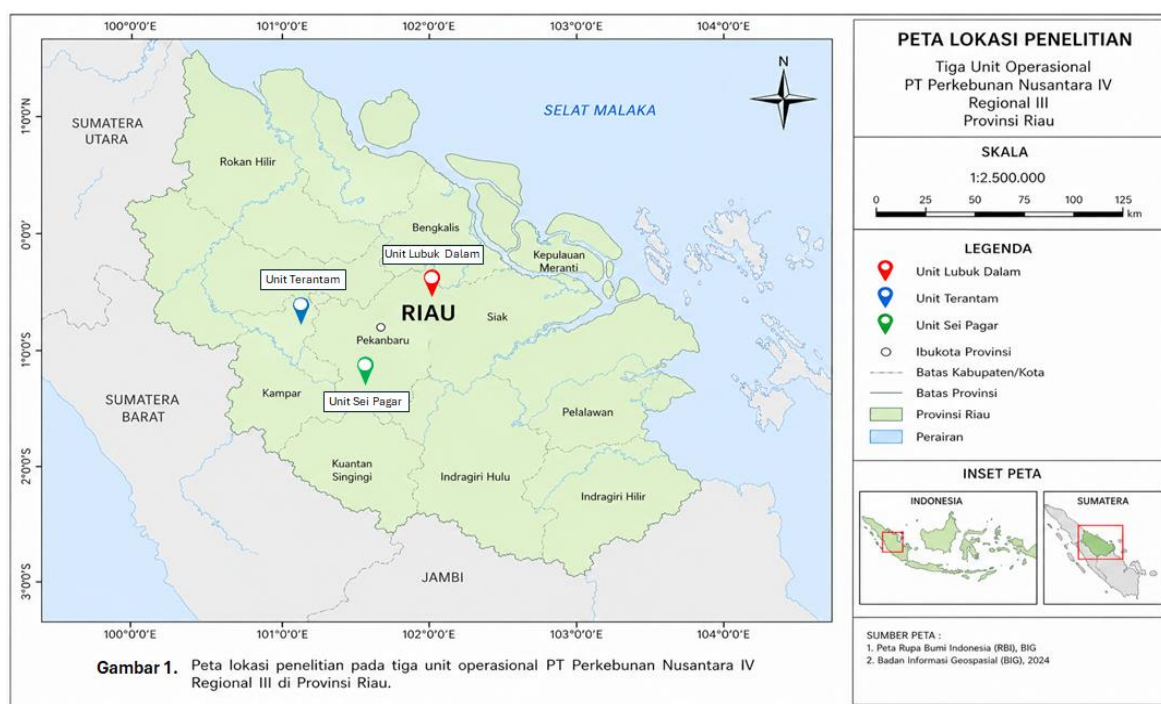
PT Perkebunan Nusantara IV (PTPN IV) Regional III merupakan salah satu perusahaan perkebunan kelapa sawit besar di Provinsi Riau dengan tingkat aktivitas operasional yang tinggi, meliputi penggunaan alat berat, konsumsi bahan bakar, pemupukan intensif, serta pengolahan limbah dalam skala besar (Jamil, 2021). Seluruh aktivitas tersebut merupakan sumber emisi langsung maupun tidak langsung sesuai kategori *Scope* 1, *Scope* 2, dan *Scope* 3 berdasarkan SNI ISO 14064-1:2018 (Mubekti, 2013). Selain menghasilkan emisi, beberapa sumber limbah seperti POME juga memiliki potensi energi melalui pemanfaatan biogas metana sebagai sumber Listrik (Wijono, 2017).



Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan menganalisis aktivitas perkebunan dan pabrik kelapa sawit yang berkontribusi sebagai sumber emisi karbon, mengevaluasi besaran emisi gas rumah kaca serta implikasinya terhadap aspek lingkungan dan ekonomi, dan merumuskan strategi dekarbonisasi yang efektif melalui substitusi bahan bakar fosil, elektrifikasi alat berat, serta optimalisasi pemanfaatan biogas CH₄ dari POME. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan kebijakan dekarbonisasi pada industri kelapa sawit serta mendukung upaya perusahaan dalam mencapai operasi yang lebih berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian



Gambar 1. Peta lokasi penelitian pada tiga unit operasional PT Perkebunan Nusantara IV Regional III di Provinsi Riau.

Gambar 1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada tiga unit operasional milik PT Perkebunan Nusantara IV Regional III yang terletak di Provinsi Riau, yakni unit Lubuk Dalam, Terantam, dan Sei Pagar. Tiap unit terdiri atas kebun kelapa sawit dan Pabrik Kelapa Sawit (PKS) dengan karakteristik penggunaan energi, aplikasi pupuk, volume limbah cair (POME), dan kegiatan transportasi yang berbeda. Perbedaan tersebut memungkinkan analisis lintas-unit untuk mengevaluasi profil emisi GRK yang variatif.

Desain Penelitian

Desain penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis inventarisasi emisi gas rumah kaca (GRK) sesuai pedoman SNI ISO 14064-1:2018 dan rekomendasi *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines* 2006 dan *Refinement* 2019 (BSN, 2020). Emisi dihitung untuk kategori *Scope 1* (emisi langsung), *Scope 2* (emisi tidak langsung dari listrik pembelian), dan seleksi kategori *Scope 3* (emisi terkait transportasi dan penggunaan pupuk).

Pengumpulan Data

Data sekunder diperoleh dari catatan operasional perusahaan dan meliputi: konsumsi bahan bakar untuk pembakaran stasioner dan bergerak (solar untuk genset, alat berat, kendaraan), aplikasi pupuk (urea, NPK), konsumsi listrik dari PLN (kWh), data transportasi dan logistik, serta data pengolahan limbah cair (POME) berupa volume dan konsentrasi COD. Data dikategorikan berdasarkan sumber emisi sesuai pedoman ISO 14064-



1:2018: penggunaan energi, pembakaran stasioner, pembakaran bergerak, proses industri, dan pengolahan limbah cair.

Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca

Pembakaran Bahan Bakar (*Scope 1*)

Emisi dari pembakaran bahan bakar untuk pembakaran stasioner dan bergerak dihitung menggunakan persamaan *Tier-1* IPCC:

$$\text{Emisi}_{\text{bahan bakar}} = \text{Konsumsi bahan bakar} \times \text{Faktor emisi} \times \text{GWP} \quad (1)$$

Faktor emisi untuk solar, CH₄, dan N₂O diambil dari IPCC 2006 Volume 2, *Chapter 3*.

Aplikasi Pupuk (Emisi N₂O)

Emisi N₂O dari aplikasi pupuk dihitung berdasarkan faktor emisi *default* IPCC:

$$\text{Emisi N}_2\text{O} = \text{N aplikasi (kg)} \times EF_{\text{N}_2\text{O}} \quad (2)$$

dengan $EF_{\text{N}_2\text{O}} = 0,01$.

Listrik yang Dibeli (*Scope 2*)

Emisi listrik pembelian dari PLN dihitung dengan:

$$\text{CO}_2e_{\text{listrik}} = \text{kWh listrik} \times EF_{\text{grid}} \quad (3)$$

dengan $EF_{\text{grid}} = 0,00094$ ton CO₂ per kWh (ESDM, 2023).

Pengolahan Limbah Cair (CH₄ dari POME)

Emisi CH₄ dari POME dihitung dengan persamaan:

$$\text{CH}_{4\text{POME}} = \text{Volume POME (m}^3\text{)} \times B_0 \times \text{MCF} \quad (4)$$

menggunakan nilai default IPCC: $B_0 = 0,25$ kg CH₄/kg COD dan $\text{MCF} = 0,8$ untuk kolam anaerobik terbuka.

Analisis Potensi Biogas menjadi Listrik

Methane yang ditangkap dikonversi ke energi:

$$\text{Energi (MJ)} = \text{CH}_4 \text{ tertangkap (kg)} \times 50 \text{ MJ/kg} \quad (5)$$

$$\text{kWh listrik} = \frac{\text{Energi (MJ)} \times \eta}{3,6} \quad (6)$$

dengan efisiensi genset biogas $\eta = 0,35$ dan utilisasi operasional $u = 0,85$. Nilai ekonomi dihitung dengan tarif listrik PLN industri.

Strategi Pengurangan Emisi Karbon

Strategi mitigasi dirumuskan menggunakan pendekatan: (1) kuantifikasi potensi pengurangan emisi berdasarkan hasil inventarisasi; (2) evaluasi teknis kelayakan (elektrifikasi, akses PLN, kondisi digester); (3) evaluasi ekonomi (substitusi bahan bakar, efisiensi energi); (4) tinjauan literatur praktik terbaik global untuk dekarbonisasi sektor sawit. Strategi utama meliputi penggantian genset diesel, elektrifikasi alat berat, dan optimalisasi biogas-to-power.

Analisis Data

Data dianalisis secara deskriptif kuantitatif dan dibandingkan antar unit. Semua hasil dikonversi dalam satuan ton CO₂e menggunakan GWP IPCC AR5, dan dilaporkan dengan tabel dan grafik untuk memudahkan interpretasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Emisi Gas Rumah Kaca pada Setiap Unit Operasional

Inventarisasi emisi menunjukkan bahwa total emisi GRK pada tiga unit operasional Lubuk Dalam, Terantam, dan Sei Pagar menunjukkan pola yang berbeda sesuai intensitas aktivitas kebun dan pabrik. Secara keseluruhan, sumber emisi terbesar berasal dari pembakaran bergerak (*mobile combustion*) yang melibatkan kendaraan operasional dan alat berat, diikuti oleh pembakaran tetap (*stationary combustion*) dari penggunaan genset diesel, pemupukan nitrogen, dan *fugitive emission* dari pengolahan limbah cair POME. Unit Terantam menghasilkan emisi CO₂e tertinggi dibanding dua unit lainnya akibat tingginya konsumsi solar alat berat, durasi operasi pabrik yang lebih panjang, dan volume POME yang lebih besar. Hasil ini sejalan dengan penelitian



terdahulu yang menunjukkan bahwa konsumsi energi fosil dan pengolahan limbah cair merupakan kontributor utama emisi GRK pada industri kelapa sawit.

Tabel 1. Jumlah Emisi GRK setiap Unit Tahun 2024

No.	Aktivitas	Satuan	Emisi GRK		
			Lubuk Dalam	Terantam	Sei Pagar
1.	Pembakaran Tetap				
	CO ₂	ton	83.744,38	404.872,37	116.959,95
	CH ₄	ton	3,52	17,01	4,91
	N ₂ O	ton	0,70	3,40	0,98
2.	Pembakaran Bergerak				
	CO ₂	ton	270.432,27	587.267,09	308.235,95
	CH ₄	ton	11,36	24,68	12,95
	N ₂ O	ton	2,27	4,94	2,59
3.	Pemupukan				
	N ₂ O	ton	11,69	12,27	7,09
4.	Pengolahan Limbah				
	CH ₄	ton	244,33	496,22	226,48
5.	Konsumsi Listrik				
	CO ₂	ton	1.083,76	-	425,68
6.	Kendaraan Karyawan				
	CO ₂	ton	141.745,68	308.675,00	68.356,60
	CH ₄	ton	20,45	44,54	9,86
	N ₂ O	ton	1,23	1,23	0,59

Setiap jenis gas dikonversi menjadi ekuivalen CO₂ (CO₂e) menggunakan nilai *Global Warming Potential* (GWP) terdapat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. Jumlah Emisi CO₂e setiap Unit Tahun 2024

No.	Aktivitas	Satuan	CO ₂ e		
			Lubuk Dalam	Terantam	Sei Pagar
1.	Pembakaran Tetap				
	CO ₂	ton	83.744,38	404.872,37	116.959,95
	CH ₄	ton	98,52	476,32	137,60
	N ₂ O	ton	186,49	901,61	260,46
2.	Pembakaran Bergerak				
	CO ₂	ton	270.432,27	587.267,09	308.235,95
	CH ₄	ton	318,16	690,90	362,63
	N ₂ O	ton	602,22	1.307,78	686,41
3.	Pemupukan				
	N ₂ O	ton	3.097,66	3.250,85	1.877,72
4.	Pengolahan Limbah				
	CH ₄	ton	6.841,25	13.894,09	6.341,39
5.	Konsumsi Listrik				
	CO ₂	ton	1.083,76	-	425,68
6.	Kendaraan Karyawan				
	CO ₂	ton	141.745,68	308.675,00	68.356,60
	CH ₄	ton	572,71	1.247,17	276,19
	N ₂ O	ton	325,22	325,22	156,84

Kontribusi Emisi Metana (CH₄) dari Limbah Cair POME

Emisi CH₄ dari POME muncul sebagai salah satu komponen penyumbang CO₂e terbesar karena metana memiliki nilai GWP 28 kali lebih tinggi dibanding CO₂. Hasil perhitungan menunjukkan potensi CH₄ yang dilepaskan yaitu: 244,33 ton di Lubuk Dalam, 496,22 ton di Terantam, dan 226,48 ton di Sei Pagar. Jumlah ini



sebanding dengan tingkat produksi limbah cair dan kapasitas olah pabrik. Terantam menjadi unit dengan emisi CH_4 terbesar karena throughput TBS dan volume POME tertinggi. Temuan ini memperkuat laporan IPCC bahwa kolam anaerobik terbuka pada fasilitas pengolahan sawit merupakan salah satu sumber emisi metana paling signifikan di sektor agroindustri.

Potensi Pemanfaatan Biogas Menjadi Energi Listrik

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa CH_4 hasil pengolahan POME memiliki potensi energi yang besar apabila ditangkap dan dikonversi menjadi listrik. Perhitungan potensi energi listrik yang dihasilkan menunjukkan: ± 950.174 kWh/tahun di Lubuk Dalam, $\pm 1.929.734$ kWh/tahun di Terantam, dan ± 880.749 kWh/tahun di Sei Pagar. Bila dikonversikan dengan tarif listrik industri PLN, total nilai ekonomi mencapai lebih dari Rp 4 miliar per tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa pemanfaatan biogas tidak hanya mengurangi emisi GRK, tetapi juga memberikan nilai ekonomi yang signifikan. Temuan ini konsisten dengan berbagai literatur yang menegaskan bahwa teknologi biogas-to-power merupakan mitigasi paling cost-effective untuk sektor kelapa sawit.

Tabel 3. Jumlah Energi Listrik dari Pengolahan CH_4

No	Unit	CH_4 , base (ton)	CH_4 , potensial (ton)	Energi (MJ)	Listrik yang Dihasilkan (kWh)	Energi Listrik Yang Dihasilkan (kWh)
1.	Lubuk Dalam	244,33	195,46	9.773.217,77	2.714.782,71	950.173,95
2.	Terantam	496,22	396,97	19.848.701,70	5.513.528,25	1.929.734,89
3.	Sei Pagar	226,48	181,18	9.059.129,26	2.516.424,79	880.748,68

Evaluasi Strategi Pengurangan Emisi

Substitusi Genset Diesel dengan Listrik PLN

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pembakaran tetap memberikan kontribusi emisi signifikan, terutama pada Unit Terantam dengan total emisi 404.872,37 ton CO_2 , jauh lebih tinggi dibanding Lubuk Dalam dan Sei Pagar. Emisi ini berasal dari penggunaan genset diesel yang beroperasi untuk keperluan penerangan perumahan karyawan, fasilitas kantor, dan operasi pendukung kebun. Penggunaan genset diesel termasuk sumber emisi kategori *Scope 1—direct emissions* berdasarkan ISO 14064-1:2018 dan pedoman IPCC (2006), karena pembakaran solar menghasilkan CO_2 , CH_4 , dan N_2O dalam jumlah langsung.

Strategi dekarbonisasi yang paling efektif adalah mengalihkan sumber listrik dari genset diesel menjadi listrik PLN. Hal ini didukung oleh faktor emisi listrik Sumatera yang lebih rendah yaitu 0,00094 t CO_2 /kWh (Kementerian ESDM, 2023), jauh lebih rendah dibanding genset diesel yang menghasilkan emisi rata-rata 0,27–0,35 kg CO_2 /kWh (IEA, 2019). Artinya, setiap 1 kWh listrik yang sebelumnya dibangkitkan oleh genset diesel dapat menurunkan emisi hingga 70–90% bila digantikan oleh listrik PLN.

Tabel 4. Jumlah Emisi dan Biaya Pemakaian Genset dan PLN

No.	Unit	Biaya Penggunaan Bahan Bakar Solar (Rp)	Emisi CO_2e dari Genset (ton)	Emisi CO_2e dari PLN	Biaya Listrik PLN
1.	Lubuk Dalam	582.577.200	82.683	44	52.439.599
2.	Terantam	2.221.343.100	315.268	529	627.587.473
3.	Sei Pagar	813.645.000	115.478	76	90.483.446

Berdasarkan data pada tiga unit kebun (Lubuk Dalam, Terantam, dan Sei Pagar), terlihat bahwa penggunaan genset menyebabkan emisi CO_2e yang sangat tinggi dibandingkan listrik PLN, sekaligus menimbulkan biaya operasional yang jauh lebih besar. Misalnya, Lubuk Dalam menghasilkan 82,683 ton CO_2e dari pembakaran solar dengan biaya Rp 582.577.200, tetapi hanya menghasilkan 47.042 kWh listrik. Hal serupa terjadi pada Sei Pagar dan Terantam, yang masing-masing menghasilkan 115,478 ton dan 315,268 ton CO_2e dari penggunaan solar untuk genset. Pola ini sejalan dengan hasil penelitian Safrizal (2020), yang menyatakan bahwa biaya operasional genset jauh lebih besar dibandingkan pasokan listrik dari PLN karena konsumsi bahan bakar dan biaya perawatan yang tinggi.



Analisis lebih jauh menunjukkan bahwa intensitas emisi genset per kWh sangat tinggi pada Lubuk Dalam (1,76 ton CO₂e/kWh) dan Sei Pagar (1,42 ton CO₂e/kWh), sedangkan Terantam walaupun memiliki nilai intensitas lebih rendah (0,56 ton CO₂e/kWh), tetap menghasilkan emisi total yang besar karena volume pemakaian solar yang tinggi. Mahendra *et al.* (2023) menunjukkan bahwa penggunaan listrik PLN/Grid lebih efisien dan lebih murah dibandingkan genset, dengan biaya energi PLN sebesar Rp1.169/kWh dan genset sebesar Rp4.529/kWh; oleh karena itu, genset tidak layak menggantikan PLN secara menyeluruh dan lebih tepat digunakan sebagai sumber cadangan. Hal ini sepenuhnya konsisten dengan data pada tabel, di mana biaya listrik PLN di seluruh unit jauh lebih kecil dibandingkan biaya solar, tetapi menghasilkan emisi yang lebih rendah secara signifikan.

Secara keseluruhan, hasil pengukuran pada tabel dan penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan genset bukan solusi yang efisien untuk operasi perkebunan sawit, karena menghasilkan emisi tinggi dan biaya energi yang besar. PLN lebih ekonomis dan lebih rendah emisi, sehingga sangat layak dijadikan sumber energi utama untuk mendukung target efisiensi dan pengurangan emisi GRK perusahaan.

Elektrifikasi Alat Berat dan Kendaraan Operasional

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pembakaran bergerak merupakan penyumbang emisi terbesar kedua setelah pembakaran tetap. Unit Terantam menghasilkan emisi CO₂e lebih dari 900.000 ton, disusul Lubuk Dalam dan Sei Pagar. Penyebab utamanya adalah konsumsi solar pada alat berat seperti *loader, excavator, road grader*, dan kendaraan operasional kebun. sektor ini termasuk dalam *Scope 1 – mobile combustion* menurut IPCC (2006).

Alat berat bertenaga listrik memiliki efisiensi energi yang lebih tinggi dan berpotensi menurunkan emisi dibandingkan alat berat berbahan bakar diesel, meskipun terdapat tantangan seperti ketersediaan infrastruktur pengisian daya (Febryawan *et al.*, 2025). Studi perbandingan alat berat listrik dan konvensional menunjukkan efisiensi energi 25–40% lebih tinggi serta pengurangan emisi hingga 60% pada alat berat listrik dibanding diesel konvensional.

Strategi yang dapat diterapkan adalah elektrifikasi armada operasional, terutama alat berat yang bekerja di sekitar pabrik dan kebun dengan pola operasi teratur. Teknologi alat berat listrik seperti *electric wheel loader, electric forklift*, dan *compact electric Excavator* saat ini sudah tersedia secara komersial dengan emisi operasional mendekati nol (*zero tailpipe emission*). Studi oleh World Bank (2021) dan McKinsey (2023) menunjukkan bahwa elektrifikasi alat berat dapat menurunkan emisi 50–90% tergantung sumber listrik.

Optimalisasi Pemanfaatan CH₄ POME menjadi Listrik (*Biogas-to-Power*)

Limbah cair POME merupakan sumber utama terbentuknya gas metana (CH₄) akibat proses dekomposisi anaerobik. Berdasarkan hasil perhitungan GRK, Unit Terantam menghasilkan potensi CH₄ tertinggi (±496 ton CH₄/tahun), diikuti Lubuk Dalam dan Sei Pagar. Karena metana memiliki nilai GWP sebesar 28 kali lebih tinggi dari CO₂ (IPCC AR5), pelepasan CH₄ dari kolam terbuka menjadikan POME sebagai penyumbang emisi besar dalam kategori limbah.

Pemanfaatan gas metana yang dihasilkan dari pengolahan limbah cair kelapa sawit (POME) sebagai sumber energi listrik merupakan strategi penting untuk mengurangi emisi gas rumah kaca sekaligus memenuhi kebutuhan energi terbarukan. Penelitian Sagala *et al.* (2024) menunjukkan bahwa biometana dari POME memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai energi listrik terbarukan dan dapat mendukung diversifikasi sumber energi di sektor kelapa sawit.

Dampak Lingkungan dan Ekonomi dari Strategi Dekarbonisasi

Implementasi ketiga strategi tersebut menghasilkan manfaat lingkungan berupa penurunan signifikan pada emisi CO₂e total perusahaan, terutama dari CH₄ POME dan konsumsi solar. Secara ekonomi, pemanfaatan listrik biogas dan penurunan konsumsi solar dapat mengurangi biaya energi pabrik, meningkatkan efisiensi operasional, serta membuka peluang mendapatkan nilai tambah karbon (*carbon value*) dan potensi *premium price* CPO rendah emisi, terutama dalam skema RSPO PalmGHG dan SPE-GRK. Pendekatan ini mendukung pencapaian target keberlanjutan perusahaan serta memenuhi tuntutan pasar global terhadap produk agroindustri berjejak karbon rendah.



SIMPULAN

Aktivitas perkebunan dan pabrik kelapa sawit terbukti menjadi sumber emisi karbon yang signifikan, terutama dari pembakaran tetap genset, pembakaran bergerak alat berat dan kendaraan, pemupukan, pengolahan limbah cair POME, konsumsi listrik PLN, serta transportasi karyawan. Dari ketiga unit yang dikaji, Unit Terantam menghasilkan emisi CO₂e paling besar dibandingkan Lubuk Dalam dan Sei Pagar karena tingginya konsumsi bahan bakar, volume limbah, dan intensitas operasional pabrik. Dampak lingkungan paling dominan berasal dari emisi CH₄ POME dan CO₂ hasil pembakaran bahan bakar fosil, yang berkontribusi besar terhadap potensi pemanasan global.

Strategi pengurangan emisi yang dinilai paling potensial meliputi substitusi genset solar ke listrik PLN, penggantian alat berat berbahan bakar solar menjadi peralatan listrik, serta optimalisasi pemanfaatan biogas CH₄ dari POME menjadi energi listrik. Strategi tersebut mampu menurunkan emisi CO₂e sekaligus memberikan manfaat ekonomi berupa penghematan biaya energi, peningkatan efisiensi operasional, dan potensi nilai tambah karbon sesuai prinsip ekonomi karbon.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2020). Gas Rumah Kaca – Bagian 1 : Spesifikasi Dengan Panduan Pada Tingkat Organisasi Untuk Kuantifikasi Dan Pelaporan Emisi Dan Serapan Gas Rumah Kaca. Jakarta, Sekretariat Pengelola Komtek Perumusan SNI.
- Febryawan, B. P., & Kamal, D. M. (2025). Analisis Perbandingan Efisiensi Bahan Bakar antara Alat Berat Listrik Dan Konvensional. *Research Gate*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 5—Waste (Chapter 6: Wastewater Treatment and Discharge)*. IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 2—Energy; Volume 5—Waste*. IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press.
- International Energy Agency. (2019). *CO₂ Emissions from Fuel Combustion. International Energy Agency*. IEA.
- Jamil, A. (2021). Statistik Perkebunan Unggulan Nasional 2020-2022. Direktorat Jenderal Perkebunan, Kementerian Pertanian Republik Indonesia, Jakarta.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2023). Faktor Emisi Pembangkit Listrik Nasional Tahun 2023. Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021). Indonesia Berambisi Kurang Emisi Gas Rumah Kaca Untuk Pengendalian Perubahan Iklim. <https://ppid.menlhk.go.id/berita/siaran-pers/6265/indonesia-berambisi->. Diakses 8 November 2023.



Mahendra, A. D., Margono., dan Amiruddin, M.,. (2023). *Analisis Perbandingan Efisiensi Pemakaian Energi Listrik antara PLN dan Genset di Pollux Mall Paragon Semarang*. Jurnal Transistor Elektro dan Informatika, (5(1), 12-19.

McKinsey & Company. (2023). *Electrifying Heavy Machinery: Pathways to Decarbonizing Construction and Mining Equipment*.

Mubekti, (2013). Estimasi Jejak Karbon Industri Kelapa Sawit. Banten, Pusat Teknologi Inventarisasi Sumberdaya Alam.

Sagala, D., Frimawaty, E., & Sodri, A. (2024). Potensi Energi Terbarukan dari Pemanfaatan Energi Biogas POME (*Palm Oil Mill Effluent*) sebagai sumber energi terbarukan di Provinsi Jambi, Jurnal Ilmu Lingkungan, 22(1), 205–214.

Wijono, A. (2017). Dampak Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca pada Pemanfaatan *Palm Oil Mill Effluent* (POME) untuk Pembangkit, dalam *Jurnal Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, SSN : 2407 – 1846, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah, Jakarta.

World Bank. (2021). *Decarbonizing Industrial Transport and Machinery*. World Bank Group.

