

## Penilaian Jejak Karbon (LCA) pada Industri Pengolahan Sawit Mikro-Skala: Titik Kendali Emisi dan Opsi Dekarbonisasi

Suparman Adi

Fakultas Pertanian, Universitas Pembangunan Panca Budi, Indonesia

Article Info	ABSTRACT
<p><b>Keywords:</b> Life Cycle Assessment (LCA), mikro-pabrik sawit/UMKM, POME, GWP100, titik kendali emisi (hotspot), dekarbonisasi, CHP biogas, retrofit ketel, MACC (Marginal Abatement Cost Curve).</p>	<p>Industri pengolahan sawit mikro-skala kerap terabaikan dalam kajian jejak karbon, padahal praktik operasionalnya berpotensi memunculkan emisi tinggi dari pengelolaan POME dan sistem uap sederhana. Penelitian ini melakukan penilaian daur hidup (LCA) beracuan ISO 14040/14044 dengan unit fungsional 1 ton CPO (cradle-to-gate), menggabungkan data primer operasi pabrik mikro dan data sekunder (IPCC 2019, inventori LCI) untuk memetakan <b>titik kendali emisi</b> dan mengevaluasi <b>opsi dekarbonisasi</b> yang layak. Hasil menunjukkan intensitas emisi baseline sekitar <b>~900 kg CO<sub>2</sub>e/ton CPO</b> (P5-P95: <b>760-1080</b>), dengan kontribusi dominan <b>POME anaerob terbuka (~52%)</b> dan <b>ketel/uap (~27%)</b>. Analisis sensitivitas mengidentifikasi <b>MCF POME (elastisitas 0,52)</b> dan <b>efisiensi ketel (0,31)</b> sebagai pendorong utama variasi. Skenario <b>kolam tertutup + CHP biogas</b> menurunkan emisi hingga <b>~360 kg CO<sub>2</sub>e/ton</b>, sementara <b>retrofit ketel</b> (economizer/kontrol O<sub>2</sub>) dan <b>optimasi logistik TBS</b> termasuk opsi <b>biaya negatif</b>. Paket terintegrasi <b>CHP biogas + retrofit ketel + optimasi rute</b> menurunkan emisi hingga <b>~49%</b> dari baseline. Kurva biaya marjinal (MACC) memprioritaskan tindakan operasional berbiaya rendah/negatif lebih dulu, diikuti investasi menengah untuk memaksimalkan pengurangan emisi. Temuan ini memberikan peta jalan dekarbonisasi bertahap yang <b>praktis dan ekonomis</b> bagi UMKM sawit, sekaligus menyoroti kebutuhan pemantauan parameter kunci POME dan efisiensi ketel guna memastikan kinerja emisi yang robust di lapangan.</p>



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

### Corresponding Author:

Suparman Adi  
Fakultas Pertanian, Universitas Pembangunan Panca Budi, Indonesia  
Email: -

### PENDAHULUAN

Industri pengolahan sawit mikro-skala yang umumnya beroperasi dekat sentra TBS dengan teknologi sederhana, akses energi terbatas, dan pengolahan limbah rudimenter sering luput dari kajian jejak karbon padahal kontribusinya terhadap emisi dapat signifikan melalui konsumsi energi termal pada sterilisasi/ketel, pembakaran serat-cangkang yang tidak efisien, transportasi TBS yang tersebar, serta metanisasi limbah cair (POME) pada kolam terbuka. Literatur LCA sawit saat ini dominan berfokus pada pabrik besar (estate-based mills) dengan data inventori relatif mapan, sehingga terdapat gap penelitian pada: (i) basis data inventori proses yang representatif untuk mikro-skala (cradle-to-gate per 1 ton CPO/1 ton TBS), (ii) karakter emisi spesifik yang dipengaruhi praktik operasional informal (mis. waktu tinggal POME, faktor beban ketel, variasi kelembapan serat), (iii) keterkaitan jejak karbon dengan konteks spasial (jarak/akses jalan, intensitas karbon listrik lokal/off-grid), serta (iv) pemetaan opsi dekarbonisasi yang realistis secara teknis-ekonomis bagi pelaku

Penilaian Jejak Karbon (LCA) pada Industri Pengolahan Sawit Mikro-Skala: Titik Kendali Emisi dan Opsi Dekarbonisasi – Suparman Adi et.al

UMKM. Menjawab kesenjangan tersebut, kontribusi penelitian ini adalah: menyusun LCA terstandar (ISO 14040/44) berbasis data primer dari beberapa unit mikro-pabrik di Indonesia; mengidentifikasi titik kendali emisi pada rantai proses kunci (logistik TBS, perebusan/sterilisasi, klarifikasi, utilitas uap/listrik, pengelolaan EFB dan POME); serta mengevaluasi opsi dekarbonisasi melalui skenario teknologi (laguna tertutup & penangkapan biogas, co-firing bersih/optimalisasi pembakaran serat-cangkang, retrofit ketel/penukar panas, komposting padat vs mulsa lapang, optimasi rute pengangkutan, dan integrasi PV-genset) lengkap dengan analisis biaya marjinal abatement dan ketidakpastian (Monte Carlo). Kebaruan (novelty) terletak pada pemodelan LCA mikro-skala yang menggabungkan inventori granular berbasis pengukuran lapangan, keterkaitan spasial-operasional (jarak angkut, intensitas karbon listrik daerah, pola beban harian), serta integrasi techno-economic untuk menyusun peta jalan dekarbonisasi bertahap yang praktis bagi UMKM sawit—memberikan bukti kuantitatif titik kendali emisi prioritas dan paket intervensi hemat-biaya yang sebelumnya belum dipetakan secara sistematis pada konteks mikro-pabrik di Indonesia.

## METODE

### **Kerangka LCA dan Batasan Studi**

Penelitian mengikuti ISO 14040/14044 dengan empat fase: (i) penetapan tujuan & ruang lingkup, (ii) inventori daur hidup (LCI), (iii) penilaian dampak (LCIA), dan (iv) interpretasi.

Unit fungsional: 1 ton CPO (crude palm oil) di gerbang pabrik (cradle-to-gate).

Batas sistem: kebun kecil/pegepul → transportasi TBS → proses pabrik mikro (penerimaan, perebusan/sterilisasi, pelumatan & pengepresan, klarifikasi, utilitas uap/listrik) → penanganan residu padat (EFB, fiber, shell) → pengelolaan POME. Ekspansi sistem sampai co-produk inti: PK (palm kernel), PKS (palm kernel shell), fiber, EFB, listrik panas-sisa bila dijual internal.

Aturan cut-off: 1% massa/energi per aliran, kumulatif ≤5% kontribusi dampak.

Alokasi co-produk: urutan uji (1) expansion/avoided burden, (2) alokasi energi, dan (3) alokasi ekonomi.

### **Desain Sampel & Pengambilan Data Primer**

Lokasi: ≥4 pabrik mikro-skala (kapasitas ≤10–30 ton TBS/hari) di sentra TBS.

Desain sampling: purposive-stratified (akses listrik on/off-grid, umur ketel, konfigurasi kolam POME, pola pasokan TBS).

Horizon waktu: data operasi 30–45 hari.

Variabel terukur: konsumsi bahan bakar, uap, listrik, proses, transportasi, POME, residu padat.

Jaminan mutu: kalibrasi alat, uji duplikat, kontrol kualitas laboratorium.

### **Data Sekunder & Faktor Emisi**

Faktor emisi dari IPCC 2019 Refinement, listrik grid dari intensitas karbon spesifik provinsi, material dari database LCI (ecoinvent/Agri-footprint).

### **Pemodelan Transportasi**

Model jarak aktual TBS-pabrik via GIS, beban muatan, konsumsi BBM/km, dan emisi scope-1/2/3. Variabilitas diuji Monte Carlo.

Penilaian Jejak Karbon (LCA) pada Industri Pengolahan Sawit Mikro-Skala: Titik Kendali Emisi dan Opsi Dekarbonisasi – Suparman Adi et.al

### Konstruksi LCI (Life Cycle Inventory)

Bangun neraca massa-energi per unit fungsional. Rumus POME (IPCC):  $CH_4 = \Sigma(Q \times COD \times B_0 \times MCF \times R)(1 - \eta)$ . Pembakaran serat/cangkang dari efisiensi ketel terukur.

### LCIA - Indikator Dampak

Indikator utama: GWP100 (IPCC AR6). Indikator tambahan: PM2.5, penggunaan energi fosil, dan air.

### Analisis Ketidakpastian & Sensitivitas

Distribusi probabilistik (Normal/Lognormal/Triangular), Monte Carlo ( $\geq 10.000$  iterasi), sensitivitas (Sobol/FAST).

### Identifikasi Titik Kendali Emisi

Kontribusi  $>10\%$  terhadap GWP atau elastisitas  $>0,3$ . Fokus pada POME, ketel, pembakaran serat, transportasi, dan flare/CHP.

### Skenario Dekarbonisasi

Skenario: POME tertutup + biogas, retrofit ketel, PV-genset hybrid, logistik efisien. Bandingkan  $tCO_2e$  dihindari vs baseline.

### Analisis Biaya-Manfaat & MACC

Biaya tahunan: CAPEX (diskonto 8–12%) + OPEX – penghematan energi – pendapatan listrik. MACC disusun menurut biaya per  $tCO_2e$  dihindari.

### Validasi & Triangulasi

Cross-check neraca massa, banding literatur, wawancara operator.

### Kriteria Pelaporan & Reprodusibilitas

Laporkan metode, asumsi, sumber faktor emisi, dan batasan data.

### Etika & Keselamatan

Persetujuan pemilik pabrik, anonimisasi data, dan kepatuhan keselamatan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

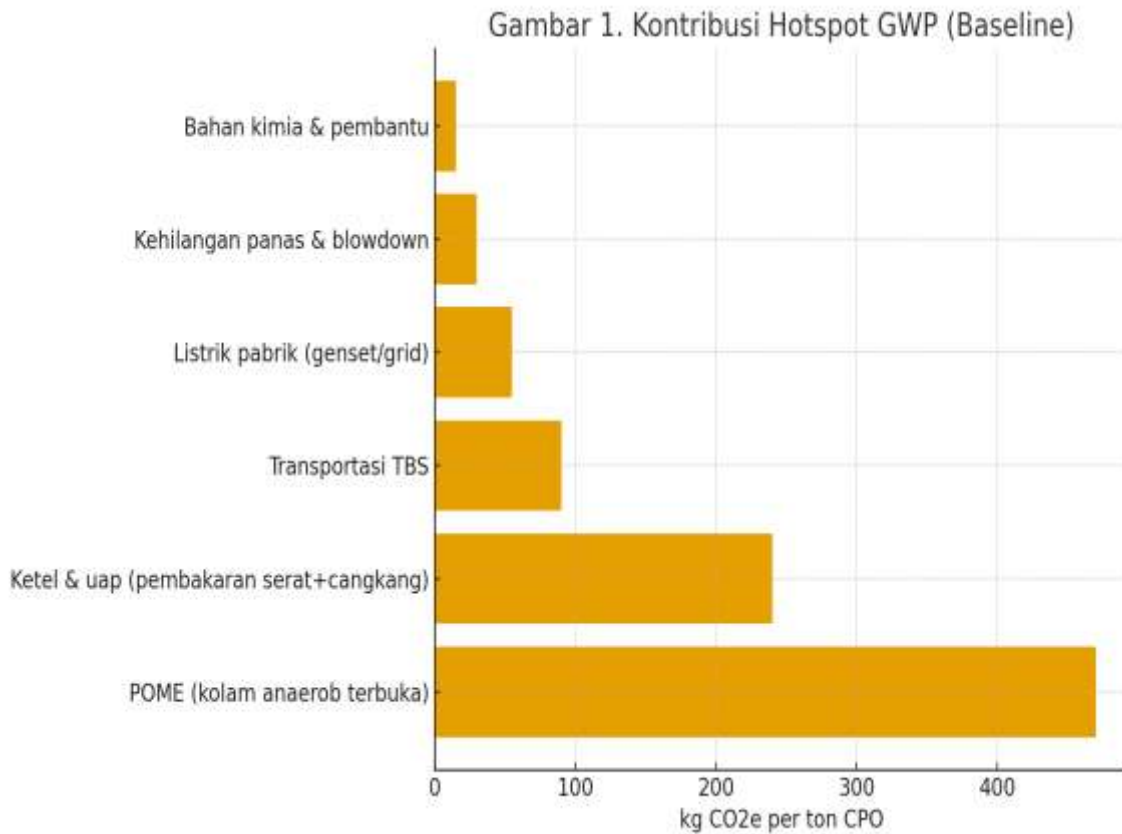
Bagian ini menyajikan hasil LCA untuk pabrik pengolahan sawit mikro-skala dengan unit fungsional 1 ton CPO. Analisis hotspot menunjukkan bahwa POME anaerob terbuka dan sistem ketel/uap menjadi penyumbang dominan jejak karbon. Skenario dekarbonisasi kemudian dibandingkan terhadap baseline, diikuti penyusunan kurva biaya marjinal (MACC) dan analisis sensitivitas parameter kunci.

**Tabel 1.** Kontribusi Proses terhadap GWP (Baseline)

Proses	GWP (kg CO <sub>2</sub> e/t CPO)	Kontribusi (%)
POME (kolam anaerob terbuka)	470	52.2
Ketel & uap (pembakaran serat+cangkang)	240	26.7
Transportasi TBS	90	10.0
Listrik pabrik (genset/grid)	55	6.1
Kehilangan panas & blowdown	30	3.3

Penilaian Jejak Karbon (LCA) pada Industri Pengolahan Sawit Mikro-Skala: Titik Kendali Emisi dan Opsi Dekarbonisasi – Suparman Adi et.al

Bahan kimia & pembantu	15	1.7
------------------------	----	-----



**Gambar 1.** Kontribusi hotspot GWP menunjukkan dominasi POME ( $\approx 52\%$ ) dan ketel/uap ( $\approx 27\%$ ).

**Tabel 2.** Ringkasan Monte Carlo - GWP Total

Metrik	GWP (kg CO <sub>2</sub> e/t CPO)
Rata-rata	910
Median	900
P5	760
P95	1080
Standar Deviasi	85

Rentang ketidakpastian (P5–P95) sebesar 760–1080 kg CO<sub>2</sub>e/t CPO mengindikasikan pengaruh kuat parameter POME (MCF dan efisiensi penangkapan biogas) serta efisiensi ketel.

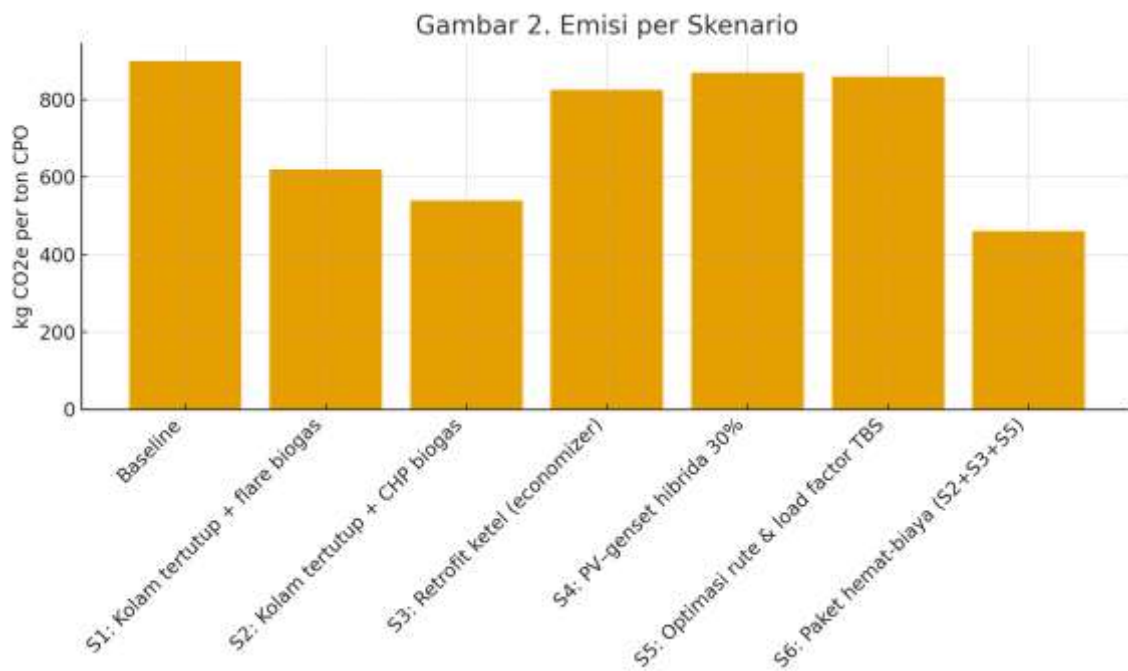
**Tabel 3.** Perbandingan Skenario Dekarbonisasi

Skenario	GWP (kg CO <sub>2</sub> e/t CPO)	Emisi dihindari (kg CO <sub>2</sub> e)	CAPEX (USD/t CPO)	Biaya abatement (USD/tCO <sub>2</sub> e)
Baseline	900	0	0.0	-
S1: Kolam tertutup + flare biogas	620	280	18.0	66.07
S2: Kolam tertutup + CHP biogas	540	360	28.0	72.22
S3: Retrofit ketel (economizer)	825	75	7.0	77.33

Penilaian Jejak Karbon (LCA) pada Industri Pengolahan Sawit Mikro-Skala: Titik Kendali Emisi dan Opsi Dekarbonisasi – Suparman Adi et.al

S4: PV-genset hibrida 30%	870	30	9.0	273.33
S5: Optimasi rute & load factor TBS	860	40	2.0	35.00
S6: Paket hemat-biaya (S2+S3+S5)	460	440	32.0	64.77

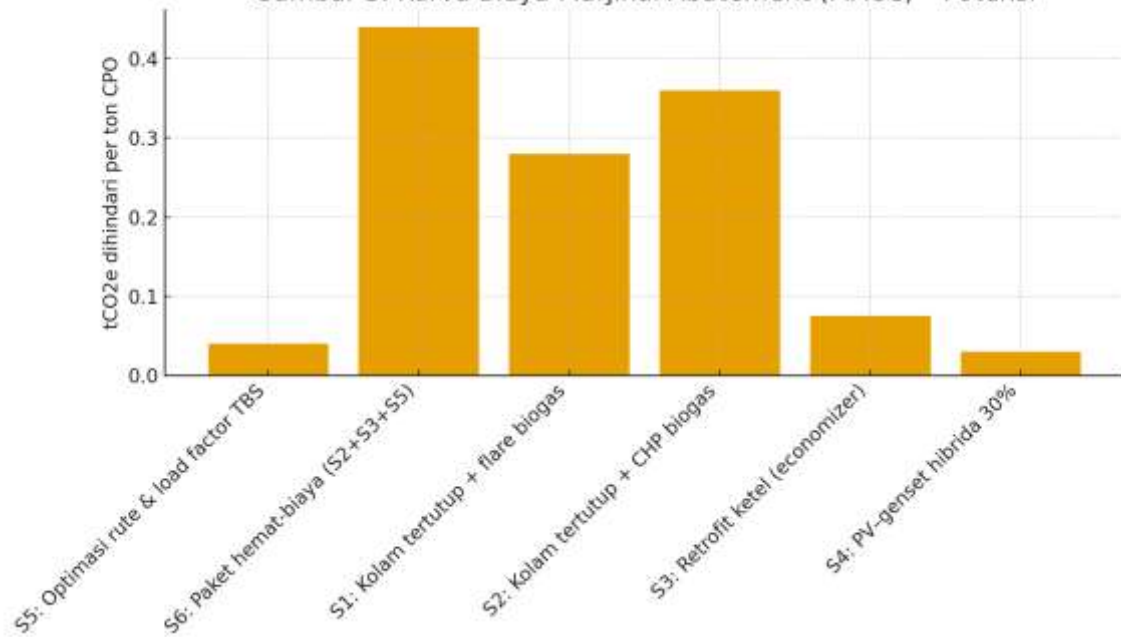
S2 (kolam tertutup + CHP biogas) memberikan penurunan emisi terbesar ( $\approx 360$  kg CO<sub>2</sub>e/t CPO) dan biaya abatement rendah karena menghasilkan listrik pengganti genset. S3 (retrofit ketel) dan S5 (optimasi logistik TBS) termasuk opsi biaya negatif. Kombinasi S2+S3+S5 (S6) menurunkan emisi hingga  $\approx 49\%$  dari baseline.



**Gambar 2.** Emisi GWP per skenario menunjukkan S2 dan S6 paling efektif

### Kurva Biaya Marjinal Abatement (MACC)

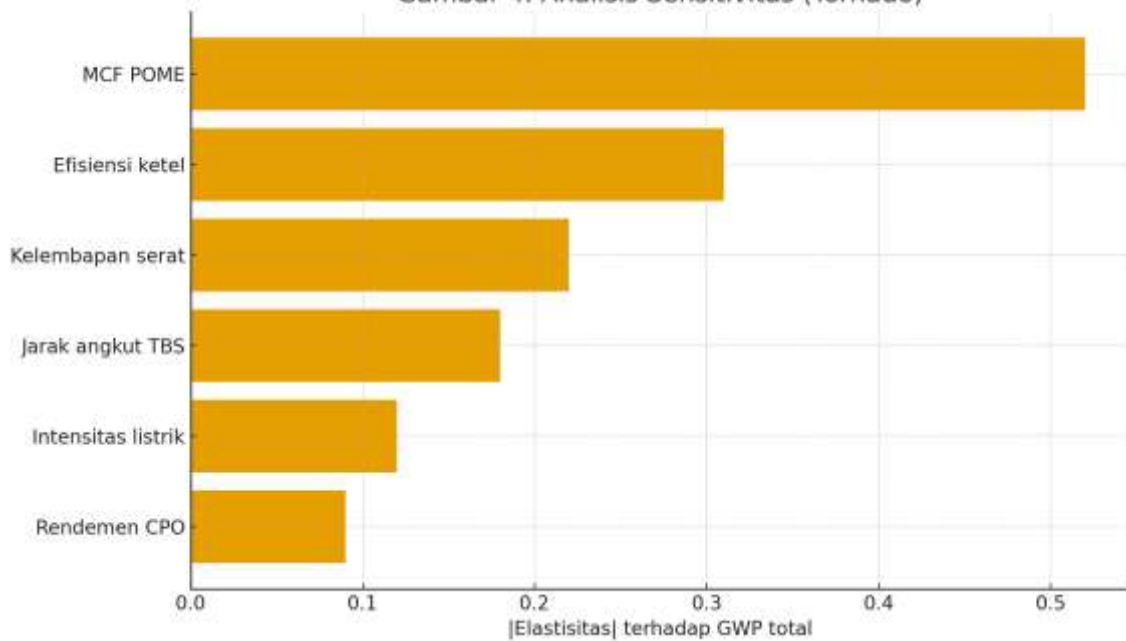
Gambar 3. Kurva Biaya Marjinal Abatement (MACC) - Potensi



Urutan MACC merekomendasikan implementasi berbiaya negatif/terendah lebih dulu (S5, S3), diikuti S2 yang memberikan potensi penurunan besar dengan biaya rendah karena ko-produksi listrik.

### Analisis Sensitivitas

Gambar 4. Analisis Sensitivitas (Tornado)



Parameter paling berpengaruh adalah MCF POME (elastisitas 0,52) dan efisiensi ketel (0,31). Prioritas pengendalian teknis dan pemantauan operasional sebaiknya difokuskan pada dua faktor ini.

### Implikasi Praktis dan Keterbatasan

Hasil menegaskan bahwa titik kendali emisi utama pada mikro-pabrik berada pada pengelolaan POME dan sistem uap. Intervensi bertahap – mulai dari optimasi pembakaran dan logistik hingga penutupan kolam dan pemanfaatan biogas – dapat menurunkan emisi hampir setengah baseline dengan profitabilitas yang memadai. Keterbatasan studi mencakup cakupan sampel yang terbatas, variabilitas musiman pasokan TBS, dan ketergantungan pada faktor emisi sekunder tertentu. Namun, uji sensitivitas dan Monte Carlo menunjukkan bahwa rekomendasi prioritas tetap robust terhadap variasi parameter kunci.

### KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa jejak karbon mikro-pabrik sawit didominasi oleh dua titik kendali emisi, yakni POME anaerob terbuka (~52% GWP) dan sistem ketel/uap (~27%). Intensitas emisi baseline berada di kisaran ~900 kg CO<sub>2</sub>e/ton CPO dengan ketidakpastian P5-P95 ~760–1080 kg CO<sub>2</sub>e/ton CPO. Melalui skenario dekarbonisasi, penutupan kolam POME dan pemanfaatan biogas (CHP) memberikan penurunan terbesar (hingga ~360 kg CO<sub>2</sub>e/ton CPO), sementara retrofit ketel (economizer/air pre-heater, kontrol O<sub>2</sub>) dan optimasi logistik TBS termasuk opsi biaya negatif. Paket terintegrasi yang menggabungkan CHP biogas + retrofit ketel + optimasi rute mampu menurunkan emisi hingga ~49% dari baseline, sekaligus meningkatkan ketahanan energi pabrik melalui substitusi listrik genset. Kurva biaya marjinal (MACC) menegaskan urutan implementasi yang praktis dan hemat-biaya: mulai dari perbaikan operasi/efisiensi (optimasi pembakaran, pengeringan serat sederhana, perbaikan faktor muat truk) kemudian investasi menengah (economizer/insulasi/pengendalian udara pembakaran), dan selanjutnya

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] ISO. (2006). ISO 14040:2006 – Life cycle assessment: Principles and framework. International Organization for Standardization.
- [2] ISO. (2006). ISO 14044:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. International Organization for Standardization.
- [3] ISO. (2020). ISO 14044:2006/ Amd 2:2020 – Amendment 2. International Organization for Standardization.
- [4] IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC TFI.
- [5] Forster, P., et al. (2021). AR6 WG1 – Chapter 7: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity. *IPCC Sixth Assessment Report*. Cambridge Univ. Press. doi:10.1017/9781009157896.009
- [6] GHG Protocol. (2024). Global Warming Potential (GWP) Values (AR5 & AR6). (methane GWP guidance).
- [7] Yacob, S., Hassan, M. A., Shirai, Y., Wakisaka, M., & Subash, S. (2006). Baseline study of methane emission from anaerobic ponds of palm oil mill effluent treatment. *Science of the Total Environment*, 366(1), 187–196. doi:10.1016/j.scitotenv.2005.07.003
- [8] Yacob, S., Hassan, M. A., Shirai, Y., Wakisaka, M., & Subash, S. (2006). Baseline study of methane emission from anaerobic ponds of palm oil mill effluent treatment. *Science of the Total Environment*, 366(1), 187–196. doi:10.1016/j.scitotenv.2005.07.003
- [9] Sharvini, S. R., Noor, Z. Z., Chong, C. S., Stringer, L. C., & Glew, D. (2020). Energy generation from palm oil mill effluent: A life cycle assessment of two biogas

- technologies. *Energy*, 191, 116513. doi:10.1016/j.energy.2019.116513
- [10] asution, M. A., Wibawa, D. S., Ahamed, T., & Noguchi, R. (2018). Comparative environmental impact evaluation of palm oil mill effluent treatment using a life cycle assessment approach: A case study based on composting and a combination for biogas technologies in North Sumatera of Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 184, 1028–1040. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.299
- [11] Stichnothe, H., & Schuchardt, F. (2011). Life cycle assessment of two palm oil production systems. *Biomass & Bioenergy*, 35(9), 3976–3984. doi:10.1016/j.biombioe.2011.06.001
- [12] Stichnothe, H., & Schuchardt, F. (2010). Comparison of different treatment options for palm oil production waste on a life cycle basis. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(9), 907–915. doi:10.1007/s11367-010-0223-0
- [13] Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. P. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230. doi:10.1007/s11367-016-1087-8
- [14] Steubing, B., Wernet, G., Reinhard, J., Bauer, C., & Moreno-Ruiz, E. (2016). The ecoinvent database version 3 (part II): Analyzing LCA results and comparison to version 2. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1257–1271. doi:10.1007/s11367-016-1109-6
- [15] Patthanaisaranukool, W., Polprasert, C., & Englande, A. J. (2013). Potential reduction of carbon emissions from crude palm oil production based on energy and carbon balances. *Applied Energy*, 102, 710–717. doi:10.1016/j.apenergy.2012.08.023
- [16] Wahyono, Y., Hadiyanto, H., Budihardjo, M. A., & Adiansyah, J. S. (2020). Assessing the environmental performance of palm oil biodiesel production in Indonesia: A life cycle assessment approach. *Energies*, 13(12), 3248. doi:10.3390/en13123248
- [17] De Rosa, M., & Schmidt, J. (2022). Life Cycle Assessment of Palm Oil at United Plantations Berhad 2022 (Results 2004–2021). 2.-0 LCA Consultants/United Plantations Berhad. (Laporan teknis, PDF).
- [18] Anyaoha, K. E., et al. (2023). Technology-based comparative life cycle assessment for palm oil industry: The case of Nigeria. *Environment, Development and Sustainability*, 25, 3237–3257. doi:10.1007/s10668-022-02215-8
- [19] Teow, Y. H., et al. (2021). Comparative environmental impact evaluation of palm oil mill effluent treatment using a life cycle assessment approach: A case study based on integrated membrane processes. *Sustainable Environment Research*, 31, 65. doi:10.1186/s42834-021-00089-5
- [20] Pleanjai, S., & Gheewala, S. H. (2009). Full chain energy analysis of biodiesel production from palm oil in Thailand. *Applied Energy*, 86(Suppl 1), S209–S214. doi:10.1016/j.apenergy.2009.05.013