

Paradoks Efisiensi Operasional dan Kesenjangan Implementasi Ekonomi Sirkular pada Pengelolaan Limbah di Pabrik Kelapa Sawit Skala Menengah Aceh Tamiang

Rita Syntia^{1*}, Fauzan², dan Muhammad Isra²

¹Program Studi Manajemen, Universitas Samudra, Langsa Lama, Kota Langsa, Indonesia; e-mail: ritasyntia@unsam.ac.id

²Program Studi Teknik Mesin, Universitas Samudra, Langsa Lama, Kota Langsa, Indonesia

ABSTRAK

Industri kelapa sawit menghadapi tekanan global untuk meningkatkan efisiensi operasional dan keberlanjutan lingkungan. Penelitian ini menganalisis efisiensi proses produksi dan strategi pengelolaan limbah dalam kerangka ekonomi sirkular di PKS skala menengah di Aceh Tamiang menggunakan pendekatan *mixed-methods* konvergen paralel. Hasil menunjukkan adanya paradoks operasional: rendemen CPO aktual (18,09%) berada di bawah standar industri (22–24%), dengan kehilangan minyak (*oil loss*) pada sludge (1,23%) yang melebihi batas ideal, sementara *oil loss* pada fiber (4,22%) masih memenuhi ambang batas (<4,5%). Konsumsi listrik tergolong efisien (21,07 kWh/ton TBS), namun konsumsi air sangat boros (4,01 m³/ton TBS). Pengelolaan limbah padat mencapai sirkularitas optimal, namun sistem lindi POME konvensional belum memanfaatkan potensi biogas. Estimasi potensi energi termal teoritis mencapai ~1.270 kWh/hari, yang setara dengan ~444 kWh/hari energi listrik aktual (dengan efisiensi konversi 35%), cukup untuk menutupi ~3,5% kebutuhan harian pabrik. Temuan ini mengungkap kesenjangan antara kepatuhan administratif ISPO dan kinerja operasional nyata. Penelitian menyimpulkan bahwa transformasi berkelanjutan memerlukan audit utilitas, retrofit sistem lindi, dan perawatan prediktif, meskipun terdapat keterbatasan generalisasi akibat pengambilan data pada satu musim.

Kata kunci: Efisiensi produksi, Pengelolaan limbah, Ekonomi sirkular, Kehilangan minyak, POME, ISPO, PKS Aceh Tamiang

ABSTRACT

The palm oil industry faces increasing global pressure to improve operational efficiency and environmental sustainability. This study analyzes production process efficiency and waste management strategies within a circular economy framework at a medium-scale palm oil mill in Aceh Tamiang, Indonesia, using a convergent parallel mixed-methods approach. The results reveal an operational paradox: the actual crude palm oil (CPO) yield (18.09%) was below the industry benchmark (22–24%), while oil loss in sludge (1.23%) exceeded the ideal limit. In contrast, oil loss in fiber (4.22%) remained within the acceptable threshold (<4.5%). Electricity consumption was considered relatively efficient at 21.07 kWh/ton FFB, whereas water consumption was relatively high at 4.01 m³/ton FFB. Solid waste management demonstrated a high level of circular utilization; however, the conventional POME lagoon-based treatment system did not recover its biogas potential. The estimated theoretical thermal energy potential reached approximately 1,270 kWh/day, corresponding to approximately 444 kWh/day of electricity at a conversion efficiency of 35%, which could cover approximately 3.5% of the mill's daily electricity demand. These findings reveal a gap between administrative compliance with the Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO) requirements and actual operational and environmental performance. The study concludes that sustainable transformation requires utility auditing, retrofitting of the POME treatment system, and predictive maintenance. However, the generalizability of the findings is limited by data collection conducted at a single site and during a single production season.

Keywords: Production efficiency, Waste management, Circular economy, Oil loss, POME, ISPO, Aceh Tamiang palm oil mill

Citation: Syntia, R., Fauzan, dan Isra, M. (2026). Paradoks Efisiensi Operasional dan Kesenjangan Implementasi Ekonomi Sirkular pada Pengelolaan Limbah di Pabrik Kelapa Sawit Skala Menengah Aceh Tamiang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(5), 1227-1234, doi:10.14710/jil.24.5.1227-1234

1. PENDAHULUAN

Industri kelapa sawit memiliki peran strategis dalam pembangunan ekonomi Indonesia sekaligus menjadi sektor yang paling disorot terkait isu lingkungan dan efisiensi produksi. Sebagai penghasil

utama minyak sawit dunia, Indonesia menghadapi tekanan global untuk memastikan praktik produksi yang efisien, rendah emisi, dan berkelanjutan sesuai prinsip *Environmental, Social, and Governance* (ESG) (Putri et al., 2022; Dharmawan et al., 2019). Namun,

peningkatan kapasitas produksi sering kali disertai tingginya intensitas penggunaan energi, air, dan bahan kimia, serta menghasilkan limbah dalam jumlah besar, terutama *Palm Oil Mill Effluent* (POME) yang memiliki kandungan bahan organik tinggi dan berpotensi menimbulkan emisi metana (Saputera et al., 2021).

Berbagai penelitian telah berfokus pada pengolahan limbah cair POME menggunakan teknologi konvensional berbasis kolam anaerobik. Sistem ini memang sederhana dan murah, namun bersifat *end-of-pipe* dan belum mampu memanfaatkan potensi biogas yang dihasilkan secara maksimal (Siagian et al., 2024). Pendekatan berbasis teknologi lanjut seperti *covered anaerobic lagoon*, *membrane bioreactor*, atau *anaerobic fixed-film reactors* menunjukkan efisiensi penghilangan *Biological Oxygen Demand* (BOD) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang lebih tinggi serta peluang pemulihan energi melalui produksi biogas (Abdeljaber et al., 2022).

Selain aspek pengelolaan limbah, efisiensi proses produksi juga menjadi tantangan utama bagi pabrik kelapa sawit. Nilai *Oil Extraction Rate* (OER) nasional masih di bawah standar optimal 22–24%, terutama akibat kehilangan minyak pada serat, *sludge*, dan tandan kosong (Kumbara et al., 2024). Ketidakseimbangan antara efisiensi energi dan konsumsi air kerap muncul sebagai paradoks operasional, di mana konsumsi listrik relatif efisien namun penggunaan air jauh melebihi batas industri (Subramaniam et al., 2014).

Dalam konteks keberlanjutan, Indonesia telah menerapkan kebijakan wajib *Indonesian Sustainable Palm Oil* (ISPO) untuk memastikan kepatuhan lingkungan dan sosial industri sawit. Meski demikian, sejumlah studi menunjukkan bahwa implementasi ISPO di tingkat pabrik masih menghadapi hambatan, seperti lemahnya indikator kinerja lingkungan, keterbatasan teknologi pemantauan, dan belum optimalnya integrasi dengan konsep ekonomi sirkular (Putri et al., 2022; Bogheiry et al., 2023).

Studi terdahulu cenderung memisahkan analisis efisiensi produksi dan pengelolaan limbah. Nugroho et al. (2021) dan Stephanie et al. (2018) fokus pada optimasi *oil loss* dan rendemen CPO, sementara Saputera et al. (2021) serta Siagian et al. (2024) mengkaji teknologi pengolahan POME secara terpisah. Masih terbatas penelitian yang mengintegrasikan secara simultan menganalisis interaksi antara parameter efisiensi produksi (rendemen, *oil loss*, konsumsi utilitas) dengan strategi pengelolaan limbah dalam satu kerangka ekonomi sirkular pada PKS skala riil, terutama dengan pendekatan metode campuran yang menggabungkan data teknis kuantitatif dan wawasan operasional kualitatif.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis secara holistik efisiensi proses produksi dan strategi pengelolaan limbah terintegrasi dalam kerangka ekonomi sirkular pada sebuah pabrik kelapa sawit skala menengah di Aceh Tamiang. Pendekatan

metode campuran digunakan untuk: (1) mengidentifikasi kesenjangan efisiensi operasional; (2) mengkuantifikasi potensi pemanfaatan limbah sebagai sumber energi dan input siklus tertutup; serta (3) merekomendasikan intervensi strategis berbasis bukti untuk peningkatan kinerja operasional dan lingkungan. Novelty penelitian ini terletak pada integrasi analitis antara efisiensi produksi dan pengelolaan limbah dalam satu kerangka ekonomi sirkular (Siagian et al., 2024; Kumbara et al., 2024; Putri et al., 2022).

2. METODE PENELITIAN

2.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus eksploratif dengan metode campuran (*mixed methods*) yang mengintegrasikan data kuantitatif dan kualitatif. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan analisis holistik terhadap efisiensi proses produksi dan strategi pengelolaan limbah dalam kerangka prinsip ekonomi sirkular. Integrasi kedua jenis data memungkinkan triangulasi untuk memperkuat validitas temuan, sebagaimana direkomendasikan dalam studi keberlanjutan agroindustri (Creswell dan Plano Clark, 2017).

2.2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di sebuah pabrik kelapa sawit skala menengah di Kabupaten Aceh Tamiang, Provinsi Aceh, dengan kapasitas operasional rata-rata 600 ton tandan buah segar (TBS) per hari. Pengumpulan data lapangan dilakukan selama 30 hari berturut-turut pada Mei 2025, mencakup dua shift operasional harian (pagi dan siang), untuk memastikan representativitas data terhadap kondisi operasional riil. Pemilihan periode Mei 2025 didasarkan pada ketersediaan akses lapangan dan representasi musim kemarau di wilayah Aceh kondisi yang meminimalkan gangguan curah hujan terhadap pengamatan proses.

2.3. Jenis dan Sumber Data

Data penelitian terdiri atas dua jenis:

a. Data kuantitatif mencakup:

1. Rendemen CPO (*Oil Extraction Rate*, OER, %),
2. Kehilangan minyak (*oil loss*) pada serat, lumpur (*sludge*), dan tandan kosong (*Empty Fruit Bunches/EFB*),
3. Konsumsi utilitas: listrik (*kWh/ton TBS*), air (*m³/ton TBS*), dan bahan bakar biomassa,
4. Volume limbah cair (POME, *m³/hari*) dan padat (EFB, serat, abu boiler),
5. Waktu henti mesin (*downtime*, jam/hari), dan frekuensi gangguan peralatan utama.

b. Data kualitatif, diperoleh melalui wawancara semi-terstruktur dengan tiga responden kunci yang memiliki akses langsung ke data operasional dan manajemen lingkungan:

1. **Document Controller** (bertanggung jawab atas dokumentasi limbah B3 dan pelaporan SIMPEL),

2. **Asisten Quality Control** (memantau efisiensi proses dan kualitas produk),
3. **Petugas HSE** (mengelola sistem keselamatan, kesehatan, dan lingkungan).

Responden dipilih berdasarkan pertimbangan ketersediaan informasi, otoritas fungsional, dan keterlibatan langsung dalam praktik operasional dan pengelolaan limbah.

2.4. Prosedur Pengumpulan Data

Data kuantitatif dikumpulkan melalui:

1. Observasi langsung di lini produksi,
2. Pencatatan harian dari *log sheet* produksi dan pemantauan utilitas,
3. Pengukuran teknis menggunakan alat terkalibrasi:
 - Flow meter Endress+Hauser Promag 50P untuk konsumsi air,
 - PowerLogic PM5500 (Schneider Electric) untuk konsumsi listrik.

Selain pengukuran utilitas, dilakukan pengambilan sampel material padat dan semi-padat secara sistematis untuk menghitung kehilangan minyak (*oil loss*) pada tiga titik kritis:

1. Sampel sludge: Diambil dari outlet *decanters* dan *sludge separator* di stasiun klarifikasi menggunakan wadah stainless steel tertutup 500 mL. Sampel diambil langsung dari aliran limbah cair sebelum masuk ke kolam IPAL untuk menghindari kontaminasi silang.
2. Sampel fiber: Diambil dari outlet *screw press* menggunakan sekop stainless steel steril, kemudian ditempatkan dalam kantong plastik tertutup rapat. Pengambilan dilakukan segera setelah proses pengepresan untuk meminimalkan penguapan minyak residual.
3. Sampel EFB (*Empty Fruit Bunches*): Diambil dari outlet *thresher* menggunakan pinset laboratorium, dengan komposisi acak dari minimal 5 tandan kosong untuk memastikan representativitas.

Setiap parameter kuantitatif diukur minimal 6 kali per hari pada titik proses kritis (sterilizer, press station, clarifier, boiler) untuk meminimalkan bias harian, menghasilkan 180 data per parameter (30 hari $\times$ 6 pengukuran). Selain itu, dilakukan uji statistik one-sample t-test untuk membuktikan signifikansi perbedaan indikator kinerja aktual terhadap benchmark industri, dengan tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$.

Data kualitatif dikumpulkan melalui wawancara berdurasi 20–30 menit per responden, dengan pedoman wawancara terstruktur dan persetujuan etis tertulis. Seluruh wawancara direkam dan ditranskrip untuk analisis lebih lanjut.

2.5. Analisis Data

a. Analisis Kuantitatif

Data kuantitatif dianalisis secara deskriptif dengan menghitung nilai rata-rata dan standar deviasi dari

parameter operasional dan lingkungan yang diamati. Analisis meliputi efisiensi produksi, konsumsi energi dan air, kehilangan minyak, timbunan limbah cair dan padat, serta downtime. Selain itu, dilakukan perbandingan antara hasil pengamatan dengan nilai acuan industri dan standar internal perusahaan. Perbedaan antara nilai hasil pengamatan dan nilai acuan dianalisis menggunakan one-sample t-test pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$.

Estimasi potensi pembentukan metana dari Palm Oil Mill Effluent (POME) dilakukan menggunakan pendekatan berbasis beban Chemical Oxygen Demand (COD) yang mengacu pada IPCC (2006). Perhitungan dilakukan secara bertahap dengan menentukan beban COD total, jumlah COD yang terdegradasi secara anaerobik, potensi pembentukan metana, penerapan Methane Correction Factor (MCF), serta potensi energi yang dihasilkan dari metana.

Beban COD total dalam POME dihitung berdasarkan volume POME dan konsentrasi COD menggunakan persamaan (Show and Lee, 2008):

$$COD_{total} = POME \times COD \quad (1)$$

dengan COD_{total} adalah beban COD total (kg COD/hari), $POME$ adalah volume POME (m^3 /hari), dan COD adalah konsentrasi COD dalam POME (kg COD/ m^3).

Jumlah COD yang terdegradasi secara anaerobik dihitung menggunakan persamaan (Show and Lee, 2008):

$$COD_{degraded} = COD_{total} \times f_{anaerobic} \quad (2)$$

dengan $COD_{degraded}$ adalah jumlah COD yang terdegradasi secara anaerobik (kg COD/hari), sedangkan $f_{anaerobic}$ adalah fraksi COD yang diasumsikan terdegradasi secara anaerobik. Dalam penelitian ini digunakan asumsi $f_{anaerobic} = 0,80$ atau 80%.

Potensi pembentukan metana selanjutnya dihitung berdasarkan kapasitas produksi metana maksimum (B_0) (Paredes et al., 2015):

$$CH_{4,potential} = COD_{degraded} \times B_0 \quad (3)$$

dengan $CH_{4,potential}$ adalah potensi pembentukan metana (kg CH_4 /hari) dan B_0 adalah kapasitas produksi metana maksimum (kg CH_4 /kg COD). Nilai $B_0 = 0,25$ kg CH_4 /kg COD digunakan sesuai dengan nilai yang digunakan dalam pendekatan IPCC (2006).

Pengaruh kondisi sistem pengolahan POME terhadap pembentukan metana selanjutnya diperhitungkan menggunakan *Methane Correction Factor* (MCF). Faktor emisi metana dihitung dengan (Paredes et al., 2015):

$$EF = B_0 \times MCF \quad (4)$$

dengan EF adalah faktor emisi metana (kg CH_4 /kg COD) dan MCF adalah *Methane Correction Factor* yang merepresentasikan kondisi sistem pengolahan dalam menghasilkan metana.

Estimasi metana setelah penerapan MCF dihitung menggunakan (Paredes et al., 2015):

$$CH_{4,MCF} = COD_{degraded} \times EF \quad (5)$$

dengan $CH_{4,MCF}$ adalah estimasi pembentukan metana setelah mempertimbangkan faktor koreksi sistem pengolahan (kg CH_4 /hari). Dalam penelitian ini digunakan nilai $MCF = 0,50$.

Untuk memperoleh volume metana, massa metana dikonversi menggunakan densitas metana pada kondisi referensi yang digunakan dalam perhitungan (Paredes et al., 2015):

$$V_{CH_4} = \frac{CH_{4,MCF}}{\rho_{CH_4}} \quad (6)$$

dengan V_{CH_4} adalah volume metana (m^3 /hari) dan ρ_{CH_4} adalah densitas metana (kg/ m^3).

Potensi energi dari metana kemudian dihitung berdasarkan volume metana dan nilai kalor rendah (*Lower Heating Value*, LHV) metana (Paredes et al., 2015):

$$E_{CH_4} = V_{CH_4} \times LHV_{CH_4} \quad (7)$$

dengan E_{CH_4} adalah potensi energi metana (MJ/hari), V_{CH_4} adalah volume metana (m^3 /hari), dan LHV_{CH_4} adalah nilai kalor rendah metana (MJ/ m^3). Nilai energi selanjutnya dikonversi dari MJ menjadi kWh menggunakan persamaan (Paredes et al., 2015):

$$E_{kWh} = \frac{E_{CH_4}}{3,6} \quad (8)$$

Kontribusi potensial energi metana terhadap kebutuhan listrik harian pabrik dihitung menggunakan persamaan (Paredes et al., 2015):

$$Contribution = \frac{E_{kWh}}{E_{Electricity}} \times 100\% \quad (9)$$

dengan *Contribution* adalah persentase kontribusi energi metana terhadap kebutuhan listrik pabrik dan $E_{Electricity}$ adalah konsumsi listrik harian pabrik (kWh/hari).

Efisiensi operasional dievaluasi melalui:

1. *Overall Equipment Effectiveness (OEE)* = *Availability* × *Performance* × *Quality* (Nakajima, 1988),
2. Perbandingan indikator kinerja dengan benchmark industri (misalnya: konsumsi air ≤1,2 m^3 /ton TBS (Subramaniam et al., 2014); oil loss di sludge <1% (Nugroho et al., 2021).

b. Analisis Kualitatif

Transkrip wawancara dianalisis menggunakan pendekatan *thematic analysis* melalui tahapan *open coding* dan *axial coding* (Braun dan Clarke, 2006). Tema utama dikelompokkan ke dalam tiga kategori:

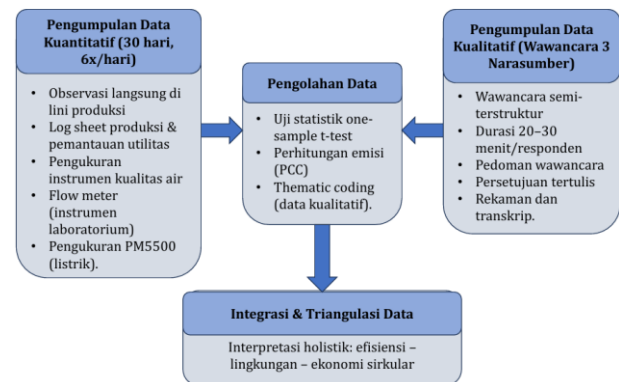
1. Efisiensi operasional,
2. Pengelolaan limbah terintegrasi,
3. Implementasi ISPO dan komitmen keberlanjutan.

2.6. Validasi dan Triangulasi

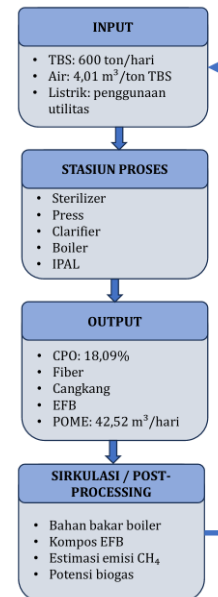
Keandalan data dijaga melalui triangulasi sumber: hasil pengukuran teknis diverifikasi dengan catatan produksi harian dari departemen QC, sedangkan data limbah dikonfirmasi melalui dokumen pemantauan IPAL dan laporan internal. Pendekatan ini mengacu pada pedoman validasi data lapangan dalam studi keberlanjutan industri sawit (Putri et al., 2022).

2.7. Diagram Alur Penelitian

Diagram alur penelitian disajikan pada Gambar 1, yang menggambarkan hubungan antara input (TBS dan energi), proses (produksi dan pengolahan limbah), output (CPO, limbah, emisi), serta analisis efisiensi dan sirkularitas.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian Kerangka Metode Mixed method



Gambar 2. Alur Operasional & Ekonomi Sirkular PKS

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Efisiensi Proses Produksi

Analisis efisiensi proses produksi di PKS skala menengah di Aceh Tamiang mengungkap paradoks operasional yang signifikan. Data dikumpulkan selama 30 hari berturut-turut pada Mei 2025, mencakup 6 pengukuran per hari pada titik proses kritis, untuk memastikan representativitas terhadap

kondisi operasional riil. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa rendemen CPO aktual sebesar $18,09\% \pm 0,15\%$ masih jauh di bawah standar industri optimal (22–24%) (Basyuni et al., 2017) serta target internal pabrik (20%). Kesenjangan ini merupakan salah satu faktor penyebab utama yang berkontribusi terhadap kehilangan minyak (oil loss) yang tinggi pada dua titik kritis: sludge ($1,23\% \pm 0,08\%$) dan fiber ($4,22\% \pm 0,21\%$).

Nilai oil loss pada sludge melebihi batas ideal ($<1,0\%$) (Nugroho et al., 2021), mengindikasikan inefisiensi dalam proses klarifikasi, kemungkinan besar akibat waktu retensi yang tidak memadai, dosis flokulan suboptimal, atau performa sentrifugal yang menurun. Sementara itu, oil loss pada fiber (4,22%) mendekati ambang toleransi industri ($<4,5\%$), menunjukkan bahwa tekanan screw press atau kondisi digester belum dioptimalkan untuk ekstraksi maksimal.

Di sisi lain, konsumsi listrik tercatat pada $21,07 \pm 0,42$ kWh/ton TBS sedikit di atas kisaran PKS berteknologi tinggi (17–19 kWh/ton TBS) (Parinduri, 2018; Banjarnahor et al., 2022), namun tetap dalam kategori efisien relatif untuk pabrik skala menengah dengan sistem konvensional (20–35 kWh/ton TBS). Nilai *Specific Energy Consumption* (SEC) sebesar 116,47 kWh/ton CPO lebih lanjut memperkuat efisiensi konversi energi.

Namun, konsumsi air mencapai $4,01 \pm 0,18$ m³/ton TBS, lebih dari tiga kali lipat dari standar efisien ($\leq 1,2$ m³/ton TBS) (Subramaniam et al., 2014). Temuan ini mengindikasikan adanya kebocoran sistematis, praktik pendinginan once-through, atau inefisiensi dalam proses sterilisasi yang perlu diverifikasi melalui audit utilitas mendalam.

Waktu henti mesin rata-rata hanya $0,59 \pm 0,12$ jam/hari ($<3\%$ dari total jam operasi), yang secara agregat tergolong baik. Namun, log perawatan menunjukkan frekuensi gangguan tinggi pada mesin kritis seperti Sterilizer, Boiler, dan Ripple Mill dengan rata-rata 3–5 insiden per bulan. Pola ini mengungkap strategi perawatan yang masih bersifat reaktif, sehingga risiko major breakdown tetap tinggi meski downtime harian rendah.

3.2. Pengelolaan Limbah: Integrasi Data Kuantitatif dan Kualitatif

3.2.1. Limbah Cair (POME): Potensi Tersembunyi dalam Sistem Lindi Konvensional

Volume harian *Palm Oil Mill Effluent* (POME) yang dihasilkan pabrik mencapai 42,52 m³/hari, diolah melalui sistem lindi biologis konvensional yang terdiri dari delapan kolam berurutan (*Cooling Pond*,

Acidification Pond, dua *Anaerobic Pond*, dua *Aerobic Pond*, dan dua *Sedimentation Pond*). Hasil wawancara dengan Document Controller (30 Mei 2025) mengonfirmasi bahwa tidak ada pemanfaatan biogas dari kolam anaerobic gas metana yang dihasilkan dibiarkan terlepas langsung ke atmosfer.

Estimasi emisi metana dilakukan menggunakan pendekatan IPCC Tier 1 (2006) dengan asumsi konservatif sebagai berikut:

- Konsentrasi COD rata-rata POME: 15.000 mg/L,
- Degradasi anaerobik: 80%,
- Faktor emisi maksimum teoritis: 0,25 m³ CH₄ per kg COD terdegradasi,
- Methane Conversion Factor (MCF) untuk *open anaerobic lagoon* di iklim tropis: 0,5 (IPCC, 2006; kisaran 0,3–0,5 untuk suhu $> 28^{\circ}\text{C}$).
Perhitungan dilakukan dalam dua tahap:
 - Tahap 1: Potensi emisi maksimum teoritis
 - Total COD harian = $42,52 \text{ m}^3 \times 15 \text{ kg/m}^3 = \mathbf{637,8 \text{ kg COD/hari}}$
 - COD terdegradasi = $637,8 \text{ kg} \times 80\% = \mathbf{510,2 \text{ kg/hari}}$
 - Emisi CH₄ teoritis = $510,2 \text{ kg} \times 0,25 \text{ m}^3/\text{kg} = \mathbf{127,6 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{hari}}$
 - Tahap 2: Emisi aktual dengan koreksi MCF
 - Emisi CH₄ aktual = $127,6 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0,5 \text{ (MCF)} = \mathbf{63,8 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{hari}}$

Nilai 63,8 m³ CH₄/hari, ini merepresentasikan estimasi emisi aktual dari kolam anaerobik terbuka di kondisi operasional riil, mengingat sebagian COD tidak sepenuhnya terkonversi menjadi metana, akibatnya:

- (1) pembentukan biomassa sel bakteri,
- (2) oksidasi aerob di permukaan kolam, dan
- (3) variabilitas suhu serta waktu retensi.

Meskipun demikian, untuk analisis potensi energi terbarukan yang terbangun, digunakan nilai potensi teoritis 127,6 m³ CH₄/hari sebagai acuan kapasitas maksimum yang dapat ditangkap melalui retrofit *covered anaerobic digester*.

Dengan nilai kalor metana 35,8 MJ/m³, potensi energi termal teoritis setara dengan ~ 1.270 kWh/hari. Namun, dengan memperhitungkan efisiensi konversi generator biogas rata-rata sebesar 35%, energi listrik aktual yang dapat dimanfaatkan pabrik adalah ~ 444 kWh/hari. Angka ini setara dengan $\sim 3,5\%$ dari total kebutuhan listrik harian pabrik (12.642 kWh/hari). Meski proporsinya tidak dominan, pemanfaatan ini tetap bernilai strategis untuk pengurangan emisi Scope 1.

Tabel 1. Indikator Kinerja Utama vs Benchmark Industri

Indikator	Nilai Aktual	Benchmark Industri	Status
Rendemen CPO	18,09 %	22–24%	Di bawah standar
Oil Loss (Sludge)	1,23%	$<1,0\%$	Melebihi batas
Oil Loss (Fiber)	4,22%	$<4,5\%$	Memenuhi
Konsumsi Listrik	21,07 kWh/ton TBS	17–19 kWh/ton TBS	Melebihi batas
Konsumsi Air	4,01 m ³ /ton TBS	$\leq 1,2 \text{ m}^3/\text{ton TBS}$	Sangat boros
Downtime Harian	0,59 jam	$<2,4 \text{ jam (10\% dari 24 jam)}$	Rendah

Tabel 2. Indikator Pemanfaatan Fiber dan Cangkang sebagai Bahan Bakar Boiler

Jenis Limbah	Volume Harian	Pemanfaatan	% Utilisasi	Status Sirkular
Fiber	~138 ton	Bahan bakar boiler	100%	☒ Tertutup
Cangkang	~24 ton (4% TBS)	Bahan bakar boiler	100%	☒ Tertutup
EFB (<i>Empty Fruit Bunches</i>)	~138 ton (23% TBS)	Kompos (G-Tube)	~50% (69 ton/hari)	☐ Partial
Abu boiler	~864 kg	Penimbunan jalan	100%	☒ Tertutup
Sludge	~12 ton	Pakan ternak komunitas	100%	☒ Simbiosis

Temuan ini mengungkap celah signifikan dalam penerapan ekonomi sirkular: sistem lindi saat ini bersifat *end-of-pipe* dan belum mengubah beban lingkungan menjadi aset energi terbarukan. Sebagaimana dijelaskan Siagian et al. (2024), integrasi *covered anaerobic lagoon* pada sistem lindi konvensional dapat meningkatkan efisiensi penangkapan biogas hingga 70–80% tanpa perlu investasi teknologi tinggi.

3.2.2. Limbah Padat: Keberhasilan Pemanfaatan dalam Rantai Nilai Tertutup

Pengelolaan limbah padat menunjukkan penerapan prinsip ekonomi sirkular yang hampir sempurna, sebagaimana dikonfirmasi melalui observasi lapangan dan wawancara dengan Asisten QC (30 Mei 2025) ditampilkan pada Tabel 2.

Pemanfaatan fiber dan cangkang sebagai bahan bakar boiler menggantikan konsumsi batubara sekitar 15–20 ton/hari, mengurangi emisi Scope 1 secara signifikan. Sementara itu, kompos dari EFB (*Empty Fruit Bunches*) memberikan nutrisi kembali ke perkebunan, menutup siklus karbon organik. Namun, pemanfaatan abu boiler untuk penimbunan jalan perlu diverifikasi melalui uji karakterisasi limbah untuk memastikan tidak mengandung logam berat yang dapat mencemari tanah (Chaiya dan Pinthong, 2024).

3.2.3. Limbah B3: Kepatuhan Administratif yang Terdokumentasi

Manajemen limbah B3 (oli bekas, baterai, filter) dilakukan sesuai regulasi melalui:

1. Penyimpanan di Tempat Penyimpanan Sementara (TPS) dengan wadah kedap dan berlabel,
2. Pencatatan harian melalui *logbook*,
3. Pelaporan elektronik via SIMPEL (Sistem Informasi Pengelolaan Limbah),

Wawancara dengan Document Controller menegaskan bahwa tidak ada temuan non-konformitas dalam audit ISPO maupun inspeksi Dinas Lingkungan Hidup selama dua tahun terakhir. Pelatihan bersertifikat BNSP untuk petugas limbah B3 juga telah dilaksanakan secara berkala. Namun, pendekatan ini masih bersifat *compliance-driven* belum ada target pengurangan volume limbah B3 atau program *cleaner production* untuk mencegah timbulnya limbah di sumber (Putri et al., 2022).

3.2.4. Integrasi dalam Kerangka Ekonomi Sirkular: Celah antara Praktik dan Potensi

Studi ini mengungkap dualitas dalam pengelolaan limbah:

1. **Limbah padat:** Telah mencapai tingkat sirkularitas tinggi melalui pemanfaatan kembali dalam rantai nilai internal (fiber/cangkang → energi; EFB → kompos; sludge → pakan ternak).
2. **Limbah cair (POME):** Masih terjebak dalam paradigma *end-of-pipe* tanpa ekstraksi nilai ekonomi dari potensi biogas
3. **Limbah B3:** Kepatuhan administratif tinggi, tetapi belum ada upaya pencegahan di sumber (*source reduction*).

Temuan ini selaras dengan studi Siagian et al. (2024) yang menunjukkan bahwa banyak PKS di Indonesia telah mengoptimalkan pemanfaatan limbah padat, tetapi mengabaikan potensi energi tersembunyi dalam POME. Implementasi *covered anaerobic lagoon* dengan investasi relatif rendah (~USD 50.000–100.000 untuk pabrik skala menengah) dapat menjadi langkah transformatif untuk mengubah POME dari beban lingkungan menjadi sumber energi terbarukan (Siagian et al., 2024; Saputera et al., 2021).

3.3. Integrasi Efisiensi dan Ekonomi Sirkular: Analisis Holistik

Penelitian ini mengungkap ketimpangan mendasar antara kepatuhan administratif terhadap standar keberlanjutan dan kinerja operasional nyata dalam kerangka ekonomi sirkular. Meskipun sistem manajemen lingkungan telah memenuhi persyaratan ISPO dibuktikan melalui audit internal/eksternal tanpa temuan non-konformitas temuan kuantitatif mengindikasikan adanya kesenjangan antara dokumen dan realitas operasional.

3.3.1. Implementasi Ekonomi Sirkular: Keberhasilan pada Limbah Padat, Celah pada Limbah Cair

Analisis integratif menunjukkan bahwa penerapan prinsip ekonomi sirkular bersifat selektif dan tidak holistik:

1. **Limbah padat:** Telah mencapai tingkat sirkularitas tinggi melalui rantai nilai tertutup:
 - Fiber dan cangkang (100%) → bahan bakar boiler → menggantikan 15–20 ton batubara/hari,
 - EFB (69 ton/hari atau 50% dari total 138 ton/hari) → kompos dengan teknologi *G-Tube* → dikembalikan ke perkebunan,
 - Sludge → pakan ternak masyarakat sekitar → simbiosis ekonomi lokal,
 - Abu boiler → penimbunan jalan operasional.

Praktik ini selaras dengan konsep *closed-loop system* dalam ekonomi sirkular (Siagian et al., 2024), di mana limbah diubah menjadi input bernilai ekonomi tanpa keluar dari sistem produksi.

2. Limbah cair (POME): Masih terjebak dalam paradigma *linear economy*:

- Volume POME 42,52 m³/hari diolah melalui sistem lindi biologis konvensional tanpa pemanfaatan biogas,
- Potensi emisi metana terestimasi **127,6 m³ CH₄/hari**,
- Potensi energi terbuang setara **~1.270 kWh/hari** atau **~3,5 % kebutuhan listrik harian pabrik**.

Temuan ini mengonfirmasi kritik Siagian et al. (2024) bahwa banyak PKS di Indonesia telah mengoptimalkan pemanfaatan limbah padat, tetapi mengabaikan potensi energi tersembunyi dalam POME sebuah celah signifikan dalam transisi menuju ekonomi sirkular yang utuh.

3.3.2. Paradoks Kepatuhan Administratif vs. Kinerja Operasional

Wawancara dengan Asisten QC mengungkap pernyataan: "*Tidak ada kendala dalam proses produksi*" sebuah klaim yang bertentangan dengan data teknis kuantitatif:

- Rendemen aktual 18,09% vs target internal 20% dan standar industri 22–24% (Basyuni et al., 2017),
- *Oil loss* di sludge 1,23% melebihi batas ideal (<1,0%) (Nugroho et al., 2021),
- Konsumsi air 4,01 m³/ton TBS >3× lipat standar efisien (≤1,2 m³/ton TBS) (Subramaniam et al., 2014).

Disparitas ini mencerminkan bias persepsi manajerial yang umum terjadi di industri pengolahan: keberhasilan memenuhi standar sertifikasi (ISPO) sering kali dianggap setara dengan kinerja operasional optimal, padahal keduanya merupakan dimensi yang berbeda (Putri et al., 2022). Audit ISPO menilai kepatuhan prosedural (dokumentasi, pelaporan, struktur organisasi), tetapi tidak secara mendalam mengukur efisiensi proses atau dampak lingkungan actual seperti emisi metana dari lindi atau pemborosan air.

3.3.3. Rekomendasi Berbasis Bukti untuk Transformasi Holistik

Berdasarkan temuan integratif, tiga intervensi strategis direkomendasikan untuk menjembatani kesenjangan antara kepatuhan administratif dan kinerja operasional berkelanjutan.

Pertama, audit utilitas mendalam untuk identifikasi kebocoran air. Konsumsi air 4,01 m³/ton TBS mengindikasikan adanya inefisiensi sistemik. Audit harus mencakup pemetaan aliran air

menggunakan *water balance diagram*, deteksi kebocoran pada pipa bawah tanah, serta evaluasi sistem pendingin (*once-through* vs *closed-loop cooling tower*). Berdasarkan data lapangan, jika efisiensi air ditingkatkan hingga standar industri (≤1,2 m³/ton TBS), penghematan air dapat mencapai 1.686 m³/hari. Pengurangan ini secara proporsional akan menurunkan volume POME dan beban hidrolis IPAL, yang berdampak pada penurunan biaya operasional secara signifikan.

Kedua, retrofit sistem lindi menjadi *covered anaerobic digester*. Investasi sebesar ~USD 50.000–100.000 untuk menutup kolam anaerobik dengan geomembran dapat mengurangi emisi metana hingga 70–80% dan menghasilkan biogas 90–100 m³ CH₄/hari. Secara finansial, dengan estimasi penghematan listrik ~444 kWh/hari (asumsi tarif industri Rp 1.500/kWh), penghematan operasional mencapai ~Rp 240 juta per tahun. Hal ini mengindikasikan estimasi *Payback Period* (PP) yang menarik, yaitu sekitar 3–5 tahun, yang dapat menjadi argumen bisnis kuat bagi manajemen untuk mengalokasikan modal (CAPEX). Intervensi ini juga akan mengurangi jejak karbon operasional sebesar ~2,5 ton CO₂e/hari.

Ketiga, transisi dari perawatan reaktif ke prediktif. Frekuensi gangguan tinggi pada mesin kritis (3–5 insiden/bulan) meski *downtime* agregat rendah mengindikasikan strategi perawatan yang rapuh. Implementasi *predictive maintenance* melalui analisis vibrasi untuk *Ripple Mill* dan *Boiler*, serta termografi untuk deteksi kebocoran uap pada *Sterilizer*, dapat mengurangi frekuensi gangguan hingga 50% dan mencegah *major breakdown* yang berpotensi menghentikan produksi selama berhari-hari.

3.3.4. Menuju Ekonomi Sirkular yang Utuh

Temuan penelitian ini menegaskan bahwa kepatuhan sertifikasi bukanlah tujuan akhir, melainkan fondasi minimal untuk transformasi berkelanjutan. PKS skala menengah di Aceh Tamiang telah berhasil dalam pemanfaatan limbah padat, tetapi perlu melangkah lebih jauh dengan:

1. Mengintegrasikan efisiensi proses (rendemen, konsumsi air) ke dalam indikator kinerja lingkungan,
2. Mengubah POME dari beban pengolahan menjadi sumber energi terbarukan,
3. Mengadopsi sistem monitoring berbasis data untuk menghubungkan kinerja operasional dengan dampak lingkungan.

Langkah-langkah ini tidak hanya memperkuat posisi kompetitif pabrik dalam menghadapi tekanan ESG global, tetapi juga memberikan kontribusi nyata terhadap target penurunan emisi GRK Indonesia sesuai komitmen *Nationally Determined Contribution* (NDC) (Bogheiry et al., 2023).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkap ketimpangan antara kepatuhan administratif ISPO dan kinerja operasional

nyata di PKS skala menengah. Terjadi paradoks di mana konsumsi listrik relatif efisien, namun rendemen CPO rendah (18,09%) akibat *oil loss* pada sludge, dan konsumsi air sangat boros (4,01 m³/ton TBS). Sementara limbah padat telah dikelola secara sirkular, limbah cair (POME) masih bersifat *end-of-pipe*, membuang potensi energi listrik aktual sebesar 3,5% kebutuhan harian yang dapat dimanfaatkan melalui retrofit biogas.

Studi ini memiliki keterbatasan karena data dikumpulkan hanya selama satu bulan pada musim kemarau, sehingga generalisasi ke seluruh PKS di Indonesia perlu dilakukan dengan hati-hati. Selain itu, perspektif manajemen puncak mengenai alokasi modal belum tergali secara mendalam. Ke depan, transformasi berkelanjutan memerlukan integrasi data teknis ke dalam indikator kinerja lingkungan, audit utilitas mendalam, dan transisi ke perawatan prediktif untuk menjembatani kesenjangan antara sertifikasi dan operasional yang benar-benar efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdeljaber, A., Zannerni, R., Masoud, W., Rocha-Meneses, L. 2022. Eco-efficiency analysis of integrated waste management strategies based on gasification and mechanical biological treatment. *Sustainability* 14(7): 3899. doi:10.3390/su14073899
- Banjarnahor, J.R., Tanjung, A., Situmeang, U. 2022. Studi efisiensi konsumsi energi listrik pada proses pengolahan kelapa sawit PT. Perawang Agro Sejahtera (PAS) Perawang. *SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi, dan Industri* 7(1): 16–22. doi:10.31849/sainetin.v7i1.10904
- Bogheiry, A., Thaha, M., Rahmah, L. 2023. Global dependence analysis on Indonesian palm oil production and its effect on environmental security. *Journal of Worldscience* 2(3): 466–482. doi:10.54975/jws.v2i3.466
- Basyuni, M., Amri, N., Putri, L.A.P., Syahputra, I., Arifiyanto, D. 2017. Characteristics of fresh fruit bunch yield and the physicochemical qualities of palm oil during storage in North Sumatra, Indonesia. *Indonesian Journal of Chemistry* 17(2): 182–190. doi:10.22146/ijc.24910.
- Braun, V., Clarke, V. 2006. Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology* 3(2): 77–101. doi:10.1191/1478088706qp063oa
- Chaiya, C., Pinthong, P. 2024. Integrating environmental and socioeconomic factors for a sustainable circular economy in Thailand. *Sustainability* 16(23): 10748. doi:10.3390/su162310748
- Creswell, J.W., Plano Clark, V.L. 2017. *Designing and Conducting Mixed Methods Research* (3Th Edition). Sage Publications, California.
- Dharmawan, A.H., Nasdian, F.T., Barus, B., Kinseng, R.A., Indaryanti, Y., Indriana, H., Mardianingsih, D.I., Rahmadian, F., Hidayati, H.N., Roslinawati, A.M. 2019. Kesiapan petani kelapa sawit swadaya dalam implementasi ISPO: persoalan lingkungan hidup, legalitas dan keberlanjutan. *Jurnal Ilmu Lingkungan* 17(2): 304–315. doi:10.14710/jil.17.2.304-315.
- IPCC. 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Volume 5: Waste. Intergovernmental Panel on Climate Change, Japan. tersedia di: www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/
- Kumbara, Firlana, Supriatna, J. 2024. Evaluasi kajian oil extraction rate (OER) optimum sebagai standar panen kelapa sawit. *Jurnal Agro Industri Perkebunan* 12(1): 19–28. <https://doi.org/10.25181/jaip.v12i1.3346>
- Nakajima, S. 1988. *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Press, Cambridge.
- Nugroho, B., Dharmawati, N.D., Faizah, K. 2021. Analisis efisiensi sludge centrifuge guna pengendalian losses minyak kelapa sawit di stasiun klarifikasi. *Majamecha* 3(2): 127–139. doi:10.36815/majamecha.v3i2.1547.
- Paredes, M.G., L.P. Güereca, L.T. Molina, A. Noyola. 2015. Methane Emissions from Stabilization Ponds for Municipal Wastewater Treatment in Mexico. *Journal of Integrative Environmental Sciences* 12 (sup1): 139–153. Doi:10.1080/1943815X.2015.1110185.
- Putri, E.I.K., Dharmawan, A.H., Amalia, R., Hospes, O., Yulian, B.E., Mardianingsih, D.I., Kinseng, R.A., Tonny, F., Pramudya, E.P., Rahmadian, F., Suradiredja, D.Y. 2022. The oil palm governance: Challenges of sustainability policy in Indonesia. *Sustainability* 14(3): 1820. doi:10.3390/su14031820
- Radwitya, E., Nopriyanti, M., Septiani, N. 2023. Analisis produktivitas pada mesin empty bunch press untuk meningkatkan oil extraction rate (OER) minyak kelapa sawit. *LIPIDA: Jurnal Teknologi Pangan dan Agroindustri Perkebunan* 3(1): 29–39. doi.org/10.58466/lipida.v3i1.1141
- Saputera, W.H., Amri, A.F., Daiyan, R., Sasongko, D. 2021. Photocatalytic technology for palm oil mill effluent (POME) wastewater treatment: Current progress and future perspective. *Materials* 14(11): 2846. doi:10.3390/ma14112846
- Show, K.Y., D.J. Lee. 2008. Carbon Credit and Emission Trading: Anaerobic Wastewater Treatment. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers* 39 (6): 557–562. Doi:10.1016/j.jcice.2008.05.014.
- Siagian, U.W.R., Wenten, I.G., Khoiruddin, K. 2024. Circular economy approaches in the palm oil industry: Enhancing profitability through waste reduction and product diversification. *Journal of Engineering and Technological Sciences* 56(1): 25–49. doi:10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.1.3
- Stephanie, H., Tinaprilla, N., Rifin, A. 2018. Efisiensi pabrik kelapa sawit di Indonesia. *Jurnal Agribisnis Indonesia* 6(1): 13–22. doi:10.25015/16515734.v6i1.1963
- Subramaniam, V., Tan, Y.A., Shamala, T., Lai, O.M., Ghazali, H.M. 2014. Water footprint assessment in the palm oil industry: A case study from Malaysia. *Journal of Cleaner Production* 66: 139–148. doi:10.1016/j.jclepro.2013.10.043