

**Analisis Kelayakan Usaha Sistem *Methane Capture*
(Studi Kasus di PT Sukses Karya Sawit, Kalimantan Barat)**

***Feasibility Analysis of Methane Capture System
(Case Study at PT Sukses Karya Sawit, West Kalimantan)***

Marco Dignity Sianipar*, Tuti Karyani, Ernah, Mahra Arari Heryanto

Program Studi Agribisnis, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran
Jl. Raya Bandung-Sumedang KM 21, Jatinangor
*Email: marcodignitysianipar2@gmail.com
(Diterima 23-01-2026; Disetujui 27-04-2026)

ABSTRAK

Pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit (*Palm Oil Mill Effluent*) di PT SKS selama ini menggunakan sistem kolam terbuka. Sistem ini melepas gas CH_4 ke atmosfer, sehingga menjadi emisi gas rumah kaca. Emisi ini dapat dikurangi dengan mengimplementasi sistem *methane capture* dengan *covered lagoon*. Penelitian ini menganalisis kelayakan usaha sistem *methane capture* di PT SKS Mill, dilihat dari aspek teknis, sosial, ekonomi, dan lingkungan, serta merumuskan strategi pengembangannya. Penelitian ini menggunakan parameter kelayakan finansial seperti *Net Present Value* (NPV) dan *Internal Rate of Return* (IRR), perhitungan reduksi emisi dengan *AMS-III.H. Methane Recovery in Wastewater Treatment Version 19.0*, dan deskripsi kualitatif dengan analisis SWOT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *methane capture* di PT SKS layak dijalankan. Secara teknis, sistem ini mampu memanfaatkan potensi biogas dari POME untuk produksi listrik. Secara sosial, proyek ini membuka lapangan kerja baru bagi masyarakat lokal. Analisis ekonomi pada model bisnis *excess power* terbukti layak dengan NPV = Rp68,3 miliar dan IRR = 19,68%. Dari aspek lingkungan, sistem ini mereduksi emisi sebesar 11.077,63 ton CO_2e /tahun. Strategi pengembangan yang utama adalah memprioritaskan pemanfaatan listrik biogas untuk menghemat penggunaan solar, serta mengoptimalkan pendapatan melalui perdagangan kredit karbon.

Kata kunci: *Methane Capture*, Kelayakan Usaha, POME, Kadar COD, Metana

ABSTRACT

The treatment of Palm Oil Mill Effluent (POME) at PT SKS had conventionally been utilizing an open pond system. This system releases methane gas (CH_4) into the atmosphere, contributing to greenhouse gas emissions. The emissions could be mitigated through the implementation of a methane capture system using a covered lagoon. This study analyzed the feasibility of the methane capture system at PT SKS by technical, social, economic, and environmental aspects, along with the development strategies. Economic feasibility featured financial parameters, such as Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR). The reduction of emission was calculated with AMS-III.H. Methane Recovery in Wastewater Treatment Version 19.0. SWOT matrix was used to formulate the development strategies. This research found that the methane capture system was feasible to implement. The system effectively converted POME biogas potential into electricity. The project created local employment. Economic analysis of the excess power business model was proved to be feasible with NPV = IDR 68.3 billion and IRR = 19.68%. The system reduced emissions by 11,077.63 tons CO_2e /year. The priority development strategy was to prioritize biogas electricity for diesel fuel savings and optimize revenue through carbon credit trading.

Keywords: *Methane Capture*, Feasibility Study, POME, COD rate, Methane Capture

PENDAHULUAN

Sektor pertanian berkontribusi terhadap 12,72% PDB Indonesia di tahun 2024. Sub sektor terbesarnya adalah perkebunan, yang mencakup 3,97% dari PDB, dan memiliki nilai ekspor US\$33,78 miliar di tahun 2023 (Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian, 2024). Kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) adalah komoditas perkebunan terbesar yang menyumbang 75,8% nilai ekspor perkebunan Indonesia. Produksi CPO dan PKO Indonesia berturut-turut 46,81 dan 4,97 juta ton di tahun 2022 (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2024).

Perkembangan industri kelapa sawit memunculkan kekhawatiran mengenai dampak negatif pada lingkungan (Purnomo *et al.*, 2020). Industri ini berkaitan dengan perubahan iklim (Oosterveer, 2015), karena memiliki emisi gas rumah kaca yang tinggi (Jamaludin *et al.*, 2019). Indonesia memproduksi 933 juta ton CO₂ dan sekitar 14% dari sektor pertanian (Climate Transparency, 2020). Indonesia memproduksi 232 juta ton CH₄, dan sekitar 30% dari pertanian (Costa *et al.*, 2021). Dalam konteks kelapa sawit, rata-rata emisi dari produksi 1 ton CPO adalah 5,7 ton CO₂ (Lam *et al.*, 2019). Dampak emisi gas rumah kaca diukur oleh nilai *Global Warming Potential* (GWP). Nilai ini mengukur kemampuan memerangkap panas (*radiative forcing*) dari pelepasan 1 unit massa emisi, secara relatif terhadap CO₂ dalam jangka waktu tertentu (IPCC, 2021). Dalam jangka 100 tahun, nilai GWP CH₄ sebesar 21 (UNFCCC, 2020), yang berarti kemampuan merangkap panas 1 ton CH₄ di atmosfer sama dengan 21 ton CO₂.

Muncul sejumlah tekanan agar industri kelapa sawit lebih bertanggung jawab sesuai dengan *Sustainable Development Goals* (Ayompe *et al.*, 2021). Berdasarkan Interpretasi Nasional Indonesia 2020 untuk Prinsip dan Kriteria RSPO 2018, perusahaan perkebunan kelapa sawit harus mengurangi pencemaran dan emisi gas rumah kaca (GRK) dengan praktik pengelolaan rendah emisi, seperti pengelolaan POME dan *methane capture*. Proses ekstraksi minyak dari tandan buah segar (TBS) menghasilkan limbah seperti: (1) Limbah padat: Tandan buah kosong (*Empty fruit bunch/EFB*), serabut buah (*fibre*), dan cangkang inti buah (*shell*), dan (2) Limbah cair pabrik kelapa sawit, atau *palm oil mill effluent* (POME). POME adalah limbah terbesar, menghasilkan 0,65 m³ POME per ton TBS (Hamzah *et al.*, 2019; Yeo *et al.*, 2020).

IOI Corporation Berhad adalah perusahaan yang menerapkan prinsip keberlanjutan. Berbasis di Malaysia, IOI memfokuskan bisnis manufaktur oleokimia untuk ekspor (IOI Group, 2024). Lahan perkebunan IOI tersebar di Malaysia dan Indonesia dengan total 200.000 Ha. Lahan IOI di Indonesia berlokasi di Kalimantan Barat, dan dikelola oleh PT Sawit Nabati Agro (SNA). Region 1 menaungi PT Sukses Karya Sawit (SKS) dan PT Berkat Nabati Sejahtera (BNS). Region 2 menaungi PT Bumi Sawit Sejahtera (BSS) dan PT Kalimantan Prima Agro Mandiri (KPAM). PT SNA memperoleh sertifikasi RSPO di tahun 2023 dan ISPO di tahun 2025. PT SKS berlokasi di Desa Pembedilan dan Air Hitam Hulu, Kabupaten Ketapang, Kalimantan Barat. PT SKS terdiri atas SKS 01 (plasma), SKS 02, SKS 03, dan SKS Mill.

POME adalah limbah terbesar di PT SKS. Setelah keluar dari pabrik, POME ditampung di *ponding system*, lalu dicek nilai baku mutunya. Setelah sesuai, POME diaplikasikan ke lahan penanaman sebagai pupuk cair. PT SKS berencana untuk memanfaatkan biogas hasil pengolahan POME untuk pembangkit listrik. POME mengandung bahan padat 2-4%, minyak 0,6-0,7%, serta *biochemical oxygen demand* (BOD) dan *chemical oxygen demand* (COD) yang tinggi (Kamyab *et al.*, 2018). POME sulit dikelola karena *voluminous* dan proses pembuangan yang kompleks. Jika langsung dibuang, POME berpotensi menimbulkan penyumbatan, akumulasi cairan, dan mematikan tanaman (Hwang, 1978), sehingga harus diolah dahulu (Mohammad *et al.*, 2021). *Ponding system* adalah teknologi pengolahan POME yang murah dan mudah pengelolannya (Zainal *et al.*, 2017). Mikroorganisme anaerob mengurai bahan organik POME, lalu menghasilkan CH₄ dan CO₂ (Jumadi *et al.*, 2020). *Anaerobic digestion* menurunkan kadar COD dan BOD, sehingga POME aman dibuang. 1 kg COD menghasilkan 0,237 g CH₄ (Sodri dan Septriana, 2022). Pengolahan 1 m³ POME menghasilkan 28-34 m³ biogas (Amin *et al.*, 2022; RSPO, 2009). *Ponding system* dapat dibagi menjadi 2 jenis: *open pond* dan *covered lagoon*.

Open pond tidak menangkap CH₄, melainkan melepaskannya ke atmosfer. CH₄ yang dilepas menjadi emisi gas rumah kaca yang memperparah perubahan iklim (Hosseini dan Wahid, 2015; Islam *et al.*, 2018). *Covered lagoon* dinilai lebih baik dalam menurunkan nilai BOD (Cheau Chin *et al.*, 2020), yang mana kolam ditutup dengan membran yang menangkap CH₄ (*methane capture*). Setelah sesuai baku mutu, POME dilepaskan ke lahan, sedangkan gas yang tertangkap dimanfaatkan untuk pembangkit listrik (Sodri dan Septriana, 2022). Pengolahan POME di PT SKS menggunakan sistem *open pond* yang menghasilkan emisi gas rumah kaca. Maka, pengolahan POME di PT SKS dapat dikembangkan dengan sistem *methane capture*, yaitu menangkap CH₄ di *covered lagoon* (Suganda *et al.*, 2024), lalu dimanfaatkan untuk pembangkit listrik (Choong *et al.*, 2018; Hambali dan Rivai, 2017). Listrik yang dihasilkan dapat memenuhi kebutuhan sendiri, dan sisanya dijual ke PLN (Lukman Hakim dan Valentino Novio, 2019).

Pemanfaatan CH₄ untuk pembangkit listrik adalah praktik berkelanjutan di industri kelapa sawit (Choong *et al.*, 2018). Penggunaannya harus bersifat *low-cost*, bersih, sesuai dengan situasi sosial,

dan mudah diimplementasikan (Situmeang *et al.*, 2022). Maka, kelayakan usaha sistem *methane capture* di PT SKS harus memperhatikan aspek teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di PT SKS, Desa Pembedilan dan Air Hitam Hulu, Kabupaten Ketapang, Kalimantan Barat, mulai Agustus sampai November 2025. Pendekatan penelitian ini adalah kualitatif, untuk mengeksplorasi kedalaman makna yang diberikan individu atau kelompok mengenai masalah tertentu (Creswell dan Creswell, 2017). Desain penelitian ini studi kasus, dengan menganalisis secara mendalam (*in-depth analysis*) suatu kasus, program, dan aktivitas (Stake, 1995).

Kelayakan usaha sistem *methane capture* di PT SKS akan dilihat dari aspek teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan, serta strategi pengembangannya (SWOT). Analisis aspek ekonomis menggunakan parameter kelayakan finansial seperti *payback period*, *net present value* (NPV), *gross* dan *net B/C*, *internal rate of return* (IRR), dan *return on investment* (ROI). Sedangkan analisis data aspek lingkungan menggunakan metode AMS-III.H. *Methane Recovery in Wastewater Treatment Version 19.0* (UNFCCC, 2019).

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Gambaran Umum PT Sukses Karya Sawit

Tabel 1. Produksi TBS, CPO, dan PK PT Sukses Karya Sawit

Komponen Produksi	Periode		
	Jul 2022-Jun 2023	Jul 2023-Jun 2024	Jul 2024-Jun 2025
PT Sukses Karya Sawit, <i>Estate</i> 02 dan 03			
TBS (ton)	82.405,74	89.380,11	89.627,89
CPO (ton)	16.166,11	19.699,25	18.656,45
OER (%)	19,62%	22,04%	20,82%
PK (ton)	2.069,79	2.085,97	2.276,17
KER (%)	2,51%	2,33%	2,54%
PT Sukses Karya Sawit 01: Koperasi NAMS dan NSM (Plasma)			
TBS (ton)	20.459,55	18.997,04	18.517,52
CPO (ton)	3.981,08	4.119,44	3.883,15
OER (%)	19,46%	21,68%	20,97%
PK (ton)	515,86	443,08	470,29
KER (%)	2,52%	2,33%	2,54%

Sumber: Dokumen internal PT SKS, diolah kembali oleh penulis

PT SKS memiliki hak guna usaha (HGU) untuk 7.310,08 Ha lahan, yang dibagi menjadi 3 *estate*: SKS 01 (Plasma), SKS 02, dan SKS 03 (inti). PT SKS memiliki pabrik kelapa sawit “SKS Mill” dengan kapasitas desain 90 ton/jam dan aktual 75 ton/jam. Pada periode Juli 2024-Juni 2025, SKS Mill mengolah 222.370,23 ton TBS. SKS Mill mengolah TBS dari jaringan pemasoknya, yaitu:

1. Kebun inti PT SKS: *Estate* 02 dan 03, sebanyak 108.145,41 ton.
2. Plasma PT SKS: *Estate* 01 yang terdiri atas Koperasi Natai Aru Mitra Sejahtera (NAMS) dan Natai Sipun Mandiri (NSM),
3. Kebun inti PT BNS: *Estate* 01, 03, dan 04,
4. Plasma PT BNS: *Estate* 02 yaitu Koperasi Sawit Sejahtera Bersama, dan
5. Petani swadaya yang bekerja sama dengan PT SKS, terdiri atas: Kelompok tani Mitra SKS Sejahtera, Koperasi Sawit Mandiri Bersama, dan Koperasi Sawit Sejahtera Bersatu.

Berdasarkan jumlah TBS olah dari setiap pemasok, kebun PT SKS itu sendiri adalah pemasok terbesar dengan persentase 59,96%. PT SKS awalnya juga mengolah buah dari PT BSS sebanyak 42.010,21 ton. Namun, buah dari PT BSS sudah tidak diolah lagi di SKS Mill sejak awal tahun 2025, dan diolah di pabrik sendiri yaitu BSS Mill. Jika mengecualikan PT BSS, jumlah TBS olah di SKS Mill adalah 180.360,02 ton.

Tabel 2. Jumlah TBS Olah di SKS Mill Berdasarkan Sumbernya

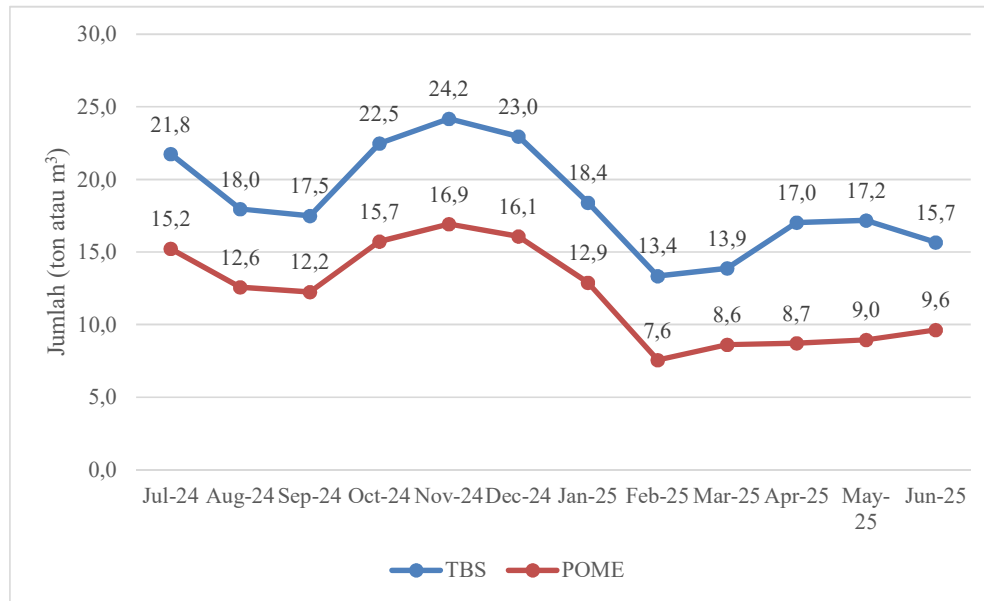
Sumber	Total TBS	Persentase
Sukses Karya Sawit 1 (Plasma)	18.517,52	8,33%
Sukses Karya Sawit 2	46.107,39	20,73%
Sukses Karya Sawit 3	43.520,50	19,57%
PT Berkat Nabati Sejahtera (4 <i>estate</i>)	69.867,27	31,42%
Petani Swadaya PT SKS	2.347,34	1,06%
PT Bumi Sawit Sejahtera (4 <i>estate</i>)	42.010,21	18,89%
Total	222.370,23	100,00%

Sumber: Dokumen internal PT SKS, diolah kembali oleh penulis

2. Produksi dan Pengolahan POME di SKS Mill

Sistem *open pond* di SKS Mill terdiri atas kolam *cooling*, anaerobik, dan *application*. SKS Mill memiliki 2 buah *cooling pond* yang berfungsi untuk menurunkan temperatur POME sampai $< 50^{\circ}\text{C}$. Setelahnya, POME dialirkan ke kolam anaerobik, yang mana bahan organik diurai dalam kondisi tanpa oksigen. Ciri-ciri kolam anaerobik yang aktif adalah ada titik-titik air yang menunjukkan produksi gas CH_4 , serta terbentuknya *scum* di permukaan. Pada *application pond*, nilai BOD dan COD lebih rendah, sehingga dapat diaplikasikan ke lahan.

Sebanyak $0,653 \text{ m}^3$ POME dihasilkan dari pengolahan 1 ton TBS di SKS Mill. Rata-rata debit POME selama setahun adalah $456,4 \text{ m}^3/\text{hari}$. Produksi POME tertinggi terdapat di November 2024, yaitu $16.927,13 \text{ m}^3$, sedangkan produksi terendah di Februari 2025, yaitu $7.555,00 \text{ m}^3$. Pada sistem *open pond* di SKS Mill, rata-rata kadar COD POME yang masuk ke kolam adalah 39.727 mg/L . Rata-rata kadar COD di kolam terakhir adalah 1.583 mg/L . Berdasarkan rumus dari Kan *et al.* (2024), maka efisiensi penurunan COD di *open pond* adalah 96%.



Gambar 1. Produksi POME di SKS Mill Periode Juli 2024-Juni 2025

Sumber: Dokumen internal PT SKS, diolah kembali oleh penulis

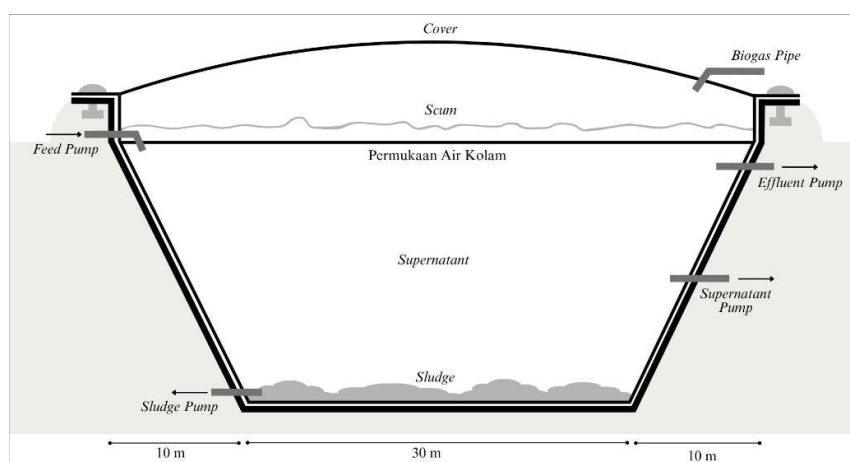
3. Analisis Kelayakan Usaha Aspek Teknis

Tabel 3. Parameter Desain Input

Parameter	Satuan	Nilai
Proyeksi TBS Olah	ton TBS/tahun	180.360,02
Rasio POME per ton TBS	$\text{m}^3/\text{ton TBS}$	0,653
Proyeksi POME	m^3/tahun	117.750,51
Rata-Rata Kadar COD	mg/L	39.727,048

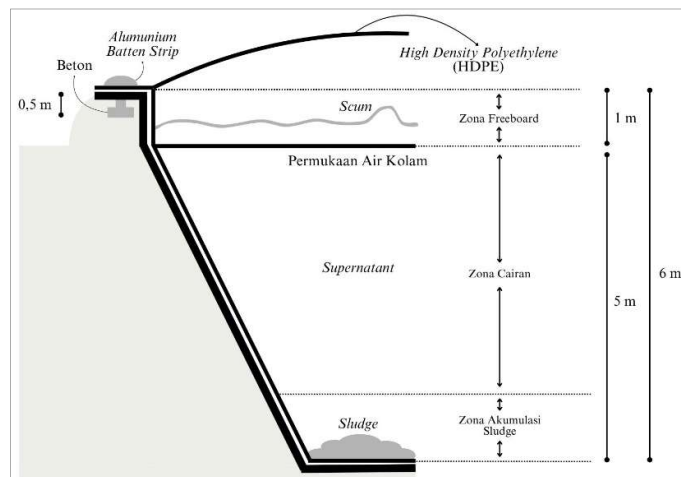
Analisis kelayakan usaha aspek teknis menjadi dasar penentuan desain *covered lagoon*. Selama Juni 2024 sampai Juni 2025, SKS Mill mengolah 222.370,23 ton TBS. Namun, PT BSS sudah tidak memasok lagi ke SKS Mill sejak Februari 2025. Maka, jumlah TBS olah yang digunakan pada analisis kelayakan ini adalah 180.360,02 ton.

Desain *covered lagoon* mencakup 2 aspek: *hydraulic retention time* (HRT) dan *organic loading rate* (OLR). HRT menunjukkan berapa hari POME bertahan di kolam. Menurut Kan *et al.* (2024), nilai HRT diperoleh dengan membagi volume *digester* dengan debit POME. *Covered lagoon* beroperasi optimal pada HRT 29-45 hari (Cheau Chin *et al.*, 2020; Mohd Yusof *et al.*, 2023). Jika HRT *covered lagoon* 35 hari, maka volume *digester* yang dibutuhkan adalah 15.702 m³. OLR menunjukkan banyaknya bahan organik yang masuk ke *digester* dalam satuan waktu (Aili Hamzah *et al.*, 2023). OLR mempengaruhi kemampuan mikroorganisme dalam mengurai bahan organik secara efisien (Sihlangu *et al.*, 2024), dan dinyatakan dalam satuan kg COD/m³/hari. Nilai OLR untuk rancangan *covered lagoon* adalah 1,11 kg COD/m³/hari. Nilai OLR ini mendekati nilai OLR optimal pada penelitian (Mohd Yusof *et al.*, 2023) yaitu 1,13-1,47 kg COD/m³/hari, dengan kapasitas desain 2,1 kg COD/m³/hari.



Gambar 2. Rancangan Struktur *Covered Lagoon*

Sumber: Galván-Arzola *et al.* (2025), Periyasamy *et al.* (2021), Owusu-Twum dan Sharara (2020), AMPC (2017), dan hasil wawancara, diolah kembali oleh penulis.

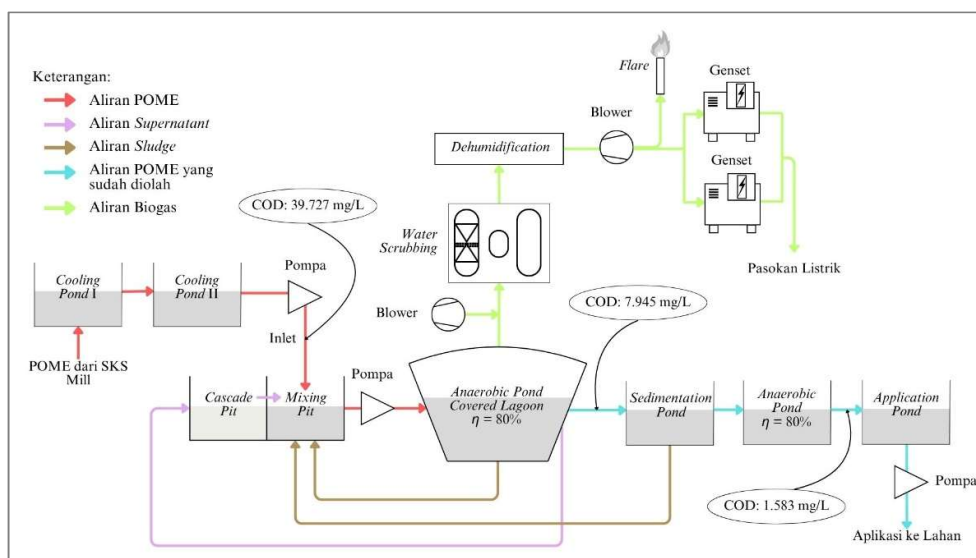


Gambar 3. Rancangan Struktur *Covered Lagoon* Berdasarkan Kedalaman

Sumber: Owusu-Twum dan Sharara (2020) dan AMPC (2017), diolah kembali oleh penulis

Berdasarkan nilai HRT dan OLR, *covered lagoon* di SKS Mill dapat mengikuti desain yang tertera di Gambar 2 dan 3. Desain *covered lagoon* pada dua gambar tersebut memiliki volume 16.000 m³, dengan panjang kolam 80 m. *Covered lagoon* memiliki lereng atau *slope*. Rahayu *et al.* (2015) merekomendasikan perbandingan kedalaman vertikal dan panjang horizontal 1:2. Kedalaman kolam adalah 5 m (tidak termasuk area *freeboard*) dan panjang horizontal lereng 10 m. Penurunan kadar COD di *covered lagoon* dihitung dengan menggunakan kadar COD yang masuk dan keluar dari *covered lagoon*. Mohd Yusof *et al.* (2023) menemukan bahwa efisiensi penurunan COD *covered lagoon* adalah 80%. Maka, kadar COD POME yang keluar dari *covered lagoon* dan masuk ke kolam anaerobik terbuka adalah 7.945,4 mg/L.

POME masuk ke *cooling pond* selama HRT 2 hari (Hadi *et al.*, 2019). *Cooling pond* idealnya terdiri atas 2, dan berfungsi sebagai tempat menurunkan temperatur POME dari 90-95°C ke < 40°C. SKS Mill dapat memanfaatkan *cooling pond* yang sudah ada. Setelahnya, POME diteruskan ke *mixing pit* dengan pompa. Pada *mixing pit*, POME dari SKS Mill bercampur dengan cairan resirkulasi. Setelahnya, *feed pump* membawa cairan dari *mixing pit* ke dalam *covered lagoon*. Sistem resirkulasi hidraulis pada *covered lagoon* bertujuan untuk mencegah akumulasi *sludge* yang berlebih di dasar *digester*. *Sludge* diteruskan ke kolam atau tangki berbeda dengan pompa, lalu disalurkan kembali ke *digester*. Ini dapat menjaga aktivitas bakteri (Lok *et al.*, 2020) dan menstabilkan nilai pH di *digester* (Sodri dan Septriana, 2022). dan mencegah pembentukan *scum* berlebih di permukaan kolam (Yong *et al.*, 2023).



Gambar 4. Alur Pengolahan POME di Covered Lagoon

Sumber: Rahayu *et al.* (2015) dan hasil wawancara dengan informan kunci yang diolah kembali oleh penulis

POME bertahan di *covered lagoon* selama HRT 35 hari, melewati proses *anaerobic digestion* pada temperatur mesofilik. Hasil dari AD adalah biogas, yang naik ke atas (*freeboard zone*) dan diteruskan ke tahap *water scrubbing* oleh *biogas pipe*. Cairan di *covered lagoon* terbagi menjadi 3: *scum*, *supernatant*, dan *sludge*. *Scum* adalah kandungan minyak dan lemak yang menjadi padat ketika temperatur < 40°C. Jika terlalu banyak, *scum* akan: (1) menghalangi kontak antara mikroorganisme dan bahan organik, sehingga menciptakan *stress environment* (Cheau Chin *et al.*, 2020), serta (2) menghalangi keluarnya gas dari cairan *digester* (Deubelin dan Steinhäuser, 2008). Lapisan *scum* yang normal dan mudah dikelola adalah setebal 20-60 cm (Vögeli *et al.*, 2014).

Sistem resirkulasi terdiri *cascade tank*, *mixing tank*, dan *sedimentation pond*. *Supernatant* (cairan bening) di *covered lagoon* dialirkan ke *cascade tank* dengan pompa. *Sludge* yang mengendap di bawah *covered lagoon* dan *sedimentation pond* dialirkan ke *mixing tank* dengan pompa. *Cascade tank* meneruskan cairan ke *mixing tank*. *Mixing tank* mencampurkan POME dari SKS Mill dan cairan resirkulasi. *Mixing tank* memiliki volume 80 m³ (Kan *et al.*, 2024), dan dapat dibuat dengan dimensi 8 × 5 × 2 m. Cairan di *mixing tank* kaya akan mikroorganisme, dan dapat membantu aktivitas mikroorganisme anaerobik di *digester* (Cheau Chin *et al.*, 2020).

POME yang sudah diolah di *covered lagoon* diteruskan ke *sedimentation pond* dan didiamkan selama 2 hari, untuk mengendapkan bahan padat dan mikroorganisme yang tersuspensi (Mohammad *et al.*, 2021; Ng, 2021). POME dari *covered lagoon* masih memiliki COD yang tinggi, karena efisiensi *covered lagoon* hanya 80% (Mohd Yusof *et al.*, 2023). POME dialirkan ke kolam anaerobik terbuka dan didiamkan selama 22 hari (Cheau Chin *et al.*, 2020). Fungsinya untuk menurunkan kadar COD yang tersisa, hingga sesuai dengan standar *land application*. Jika sudah sesuai, POME diteruskan ke *application pond* untuk diaplikasikan ke lahan.

Untuk menjaga kestabilan pH di *covered lagoon*, beberapa hal dapat dilakukan. Jika pH rendah, senyawa kapur seperti kalsium bikarbonat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) atau kapur tohor (CaO) dapat ditambahkan dengan kadar 3 g/L. Senyawa kapur berperan sebagai *buffering capacity* yang menahan perubahan pH yang terlalu cepat (Vögeli *et al.*, 2014). Sistem sirkulasi juga dapat menstabilkan nilai pH. Berdasarkan deskripsi di atas, sistem *methane capture* dengan desain *covered lagoon* yang dilengkapi dengan mekanisme resirkulasi layak untuk diterapkan di SKS Mill.

Tabel 4. Konversi Biomethane ke Listrik

Parameter	Satuan	Nilai
Nilai Kalor CH_4		
Produksi CH_4	kg CH_4 /tahun	841.692,87
Nilai Kalor CH_4	MJ/kg	50
Total Nilai Kalor	MJ/tahun	42.084.643,48
Potensi Energi dalam 1 Tahun		
Konversi Nilai Kalor ke Energi	kWh/MJ	0,277
Potensi Energi <i>Input</i>	kWh/tahun	11.657.446,24
Efisiensi <i>Gas Engine</i>	%	39
Potensi Listrik <i>Output</i>	kWh/tahun	4.546.404,03
Rasio Listrik terhadap POME	kWh/m ³ POME	38,61
Gas Engine		
Kapasitas	kW	1.025
Waktu Operasional	jam/tahun	6.000
Alokasi Listrik		
Substitusi Listrik Genset	kWh/tahun	1.566.679,31
<i>Excess Power</i>	kWh/tahun	2.979.724,73

Sumber: Hasil pengolahan data

Hasil simulasi menunjukkan bahwa produksi POME 117.750,51 m³ menghasilkan 841.692,87 kg CH_4 . Nilai produksi CH_4 ini didasarkan pada COD *removal*, yang mana 1 kg COD sama dengan 0,237 kg CH_4 (Sodri dan Septriana, 2022). Produksi CH_4 ini sudah mempertimbangkan *methane yield* dari proses *water scrubbing*. Berdasarkan Cozma *et al.* (2015), dari 225,46 kg CH_4 yang masuk ke *water scrubbing*, sebanyak 214,17 kg atau 94,9% keluar dari kolom absorpsi. Besar *methane slips* di proses *water scrubbing* 5,1%.

Biomethane memiliki *calorific value* 50-52 MJ/kg (Chin *et al.*, 2013; Sukardi dan Brata, 2021). Nilai kalor 1 MJ sama dengan 0,277 kWh listrik (Vozzola *et al.*, 2020). *Biomethane* diteruskan ke *gas engine* dengan efisiensi 39% (Sodri dan Septriana, 2022). Potensi produksi CH_4 dan energi listrik yang dihasilkan dari pengolahan POME berturut-turut adalah 841.692,87 kg CH_4 /tahun dan 4.546.404,03 kWh/tahun. Rasio listrik terhadap POME yang diperoleh adalah 38,61 kWh/m³ POME. Rasio ini cukup kecil dibandingkan pengolahan biogas dari *covered lagoon* pada penelitian terdahulu, yang mana mencapai 71,02 kWh/m³ POME (Sodri dan Septriana, 2022), 59,9 kWh/m³ POME (Gozan *et al.*, 2018), 56,6 kWh/m³ POME (Chin *et al.*, 2013).

Alasan rasio listrik terhadap POME pada penelitian ini kecil adalah rata-rata kadar COD yang rendah, yaitu 39.727 mg/L. Angka ini lebih rendah dibandingkan penelitian terdahulu, di antaranya 57.673 mg/L (Sodri dan Septriana, 2022) dan 51.000 mg/L (Chin *et al.*, 2013). Jika kadar COD tinggi, maka mikroorganisme anaerobik di *covered lagoon* memiliki banyak bahan organik untuk diurai menjadi biogas. Jika kadar COD rendah, maka jumlah biogas yang dihasilkan sedikit.

Kapasitas *gas engine* yang ditentukan adalah 1.025 kW. Kapasitas ini disesuaikan dengan penelitian Febijanto (2018), yang menyatakan *gas engine* untuk biogas memiliki kapasitas 1025 kW dan waktu operasional 6.000 jam/tahun. *Gas engine* beroperasi antara 75-80% kapasitas desainnya (Firdaus *et al.*, 2017). Ini berarti potensi produksi listrik dari *gas engine* adalah 4.612.500 kWh/tahun, sehingga semua potensi listrik dapat dimanfaatkan. Berdasarkan model *excess power* (Nugroho *et al.*, 2025),

listrik dari pemanfaatan biogas harus memenuhi kebutuhan internal pabrik terlebih dahulu. Untuk menghemat biaya, listrik dari sistem *methane capture* akan sepenuhnya menggantikan listrik dari genset. Hal ini dapat menghemat solar sebanyak 423.426,84 liter per tahun. Penghematan solar ini dihitung sebagai pendapatan tambahan.

4. Analisis Kelayakan Usaha Aspek Lingkungan

Tabel 5. Reduksi Emisi

Komponen	Nilai (ton CO ₂ e)
Emisi <i>Baseline (Open Pond)</i>	16.786,48
Emisi Project (<i>Methane Capture</i>)	
Emisi Kolam Anaerobik Terbuka	3.807,01
Emisi <i>Fugitive</i>	1.901,84
Emisi <i>Flaring</i>	0,00
Total Emisi <i>Project</i>	5.708,85
Reduksi Emisi	11.077,63
Persentase Penurunan	65,99%

Sumber: Hasil pengolahan data

Kelayakan usaha sistem *methane capture* aspek lingkungan dapat ditentukan dari total reduksi emisi CH₄. Implementasi *methane capture* di SKS Mill dapat menurunkan emisi sebanyak 11.077,63 ton CO₂e atau 65,99%.

5. Analisis Kelayakan Usaha Aspek Ekonomi

Tabel 6. Biaya Investasi

Komponen	Satuan	Biaya
Sistem <i>ponding</i>	Rp	3.979.680.000
<i>Covered lagoon</i>	Rp	14.426.340.000
Jaringan pipa	Rp	3.482.220.000
<i>Biogas upgrading</i> dan pembangkit listrik	Rp	18.903.480.000
Mesin dan pompa	Rp	198.984.000
Transmisi ke gardu listrik	Rp	9.285.920.000
Total Biaya Investasi	Rp	50.276.624.000

Sumber: Sharvini *et al.* (2022), diolah kembali oleh penulis

Berdasarkan Sharvini *et al.* (2022), biaya investasi proyek *covered lagoon* adalah sebesar US\$3,03 juta (Rp50,2 miliar) dan biaya perawatannya adalah US\$200 ribu/tahun (Rp3,3 miliar). Biaya investasi tersebut mendekati biaya investasi pada penelitian Febijanto *et al.* (2024). Besar nominal investasi sistem biogas di 5 pabrik kelapa sawit berada di kisaran US\$2,64-3,1 juta. Biaya perawatan US\$200 ribu/tahun juga mendekati biaya yang dinyatakan pada penelitian Sukardi dan Brata (2021), bahwa biaya perawatan dan *overhead* untuk *covered lagoon* adalah sebesar US\$187 ribu/tahun. Biaya ini terdiri atas perawatan untuk *biogas plant* itu sendiri (59%), *biogas upgrading* (22%), dan mesin *compression* (18%).

Pemanfaatan biogas dapat diimplementasikan dengan 3 model. Pertama, digunakan untuk kebutuhan internal pabrik kelapa sawit, biasa disebut *captive use* atau *in-house consumption*. Kedua adalah model *independent power producer* (IPP), yang mana seluruh listrik dijual ke PT Perusahaan Listrik Negara (PLN) dan menjadi peluang pendapatan untuk perusahaan. Ketiga adalah *excess power*, yang mengombinasikan kedua model sebelumnya. Setelah memenuhi kebutuhan energi sendiri, kelebihan listrik atau *excess power* akan dijual ke PT PLN (Nugroho *et al.*, 2025).

Untuk analisis kelayakan yang utama, model yang digunakan adalah *excess power*. Listrik dari biogas digunakan terlebih dahulu untuk internal pabrik. Sedangkan kelebihan listrik (*excess power*) dijual oleh SKS Mill ke PT Perusahaan Listrik Negara (PT PLN). Harga jual listrik yang digunakan pada simulasi perhitungan adalah Rp1.365,00/kWh. Ini didasarkan pada Pasal 4 ayat 3 Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 27 tahun 2014, mengenai Pembelian Tenaga Listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa dan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas oleh PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) (Pemerintah Indonesia, 2014).

Tabel 7. Biaya Operasional dan Pendapatan Sistem *Methane Capture*

Komponen	Satuan	Biaya
Biaya Operasional		
Biaya <i>Maintenance</i>	Rp/tahun	3.316.400.000 ^a
Biaya Tenaga Kerja	Rp/tahun	390.000.000
Total Biaya Operasional	Rp/tahun	3.706.400.000
Pendapatan		
<i>Excess Power</i>	kWh/tahun	2.979.724,73
Harga Jual Listrik dari PLTBg	Rp/kWh	1.050,00
Faktor Insentif F Pulau Kalimantan	-	1,3
Harga Jual Listrik	Rp/kWh	1.365
Penjualan Listrik	Rp/tahun	4.067.324.255,55
Reduksi emisi	ton CO ₂ e	11.077,63
Harga Kredit Karbon	Rp/ton CO ₂ e	96.000,00
Perdagangan Kredit Karbon	Rp/tahun	1.063.452.920,03
Jumlah Solar yang Dihemat	liter/tahun	423.426,84
Harga Solar Industri	Rp/liter	Rp19.100,00
Penghematan Bahan Bakar	Rp/tahun	Rp8.087.452.630,62

Sumber: ^a Sharvini *et al.* (2022) ^b Permen ESDM No. 27 Tahun 2014

Harga jual listrik dari pembangkit listrik tenaga biogas (PLTBg) adalah $\text{Rp}1.050,00/\text{kWh} \times F$ jika terkoneksi pada jaringan tegangan menengah, atau $\text{Rp}1.400,00/\text{kWh} \times F$ jika terkoneksi pada jaringan tegangan rendah. Faktor F yang dimaksud adalah faktor insentif yang berbeda sesuai lokasi. Untuk Pulau Kalimantan, $F = 1,3$. Pendapatan kedua proyek ini berasal dari kredit karbon. Berdasarkan Putra (2025), harga kredit karbon Indonesia ditawarkan seharga Rp96-144 ribu per ton. Harga tersebut dikalikan dengan jumlah reduksi emisi CO₂ yang dicapai (Febijanto *et al.*, 2024).

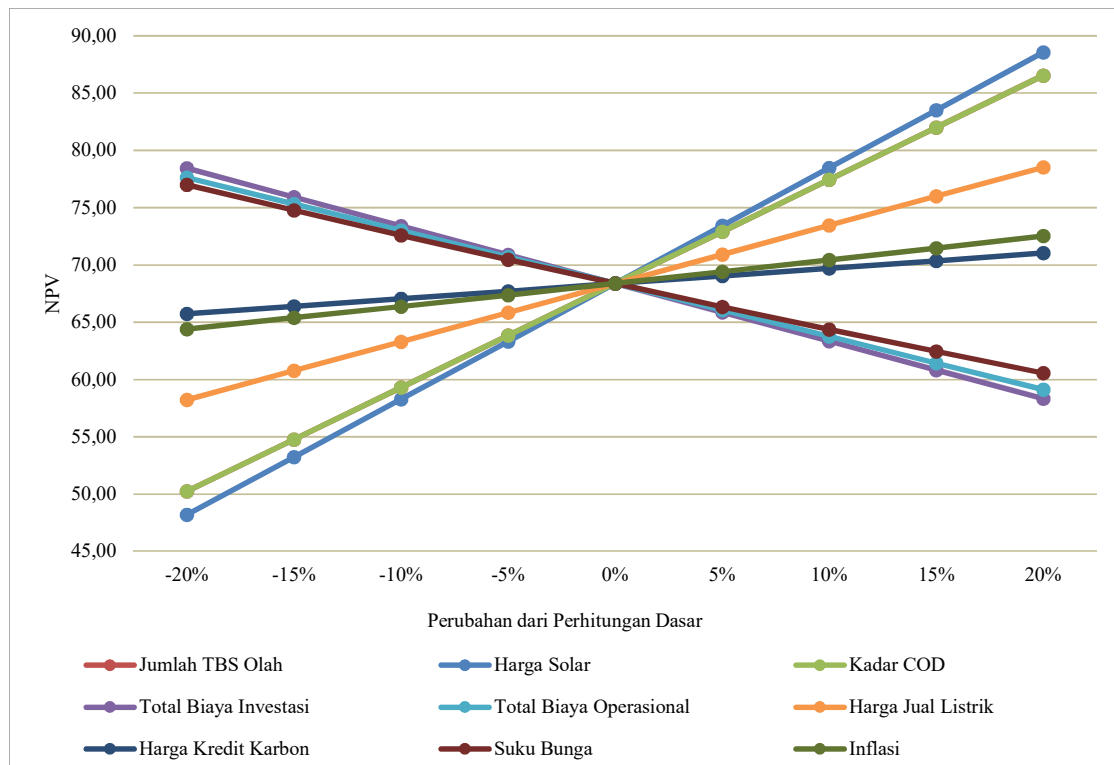
Tabel 8. Analisis Kelayakan Model *Excess Power*

Komponen	Nilai	Kelayakan
<i>Interest Rate</i>	4,75%	
NPV	Rp68.381.330.269,06	Layak
IRR	19,68%	Layak
<i>Net B/C</i>	2,36	Layak
<i>Gross B/C</i>	1,71	Layak
ROI	342,98%	
PP	5,012 tahun	
<i>Discounted PP</i>	5,012 tahun	

Sumber: Hasil pengolahan data

Pendapatan ketiga adalah penghematan solar industri yang diproyeksikan sebanyak 423.426,84 liter/tahun. Komponen ini adalah pendapatan terbesar karena harga solar industri sangat mahal yaitu Rp19.100,00/liter. Jika efisiensi genset 37% (Musyaffa *et al.*, 2024) dan kandungan energi solar 10 kWh/liter (Boretti, 2021), maka 1 liter solar menghasilkan 3,7 kWh listrik. Maka, SKS Mill mengeluarkan Rp5.162,16/kWh listrik dari genset. Untuk proyek biogas, SKS Mill tidak mengeluarkan biaya bahan baku, melainkan hanya biaya investasi dan operasional tahunan sebesar Rp1.552,47/kWh. Berdasarkan analisis *opportunity cost*, jika SKS Mill menjual seluruh listrik ke PLN, maka perusahaan menerima pendapatan Rp1.365/kWh. Namun, perusahaan kehilangan peluang penghematan solar yaitu Rp5.162,16/kWh. Maka, penghematan solar harus diprioritaskan.

Berdasarkan analisis kelayakan finansial, sistem *methane capture* dengan *covered lagoon* di SKS Mill dinyatakan **layak** dijalankan. Nilai NPV dan IRR yang diperoleh berturut-turut Rp68.381.330.269,06 dan 19,68%. Implementasi sistem *methane capture* di SKS Mill akan membawa keuntungan bagi perusahaan. Nilai IRR tersebut menunjukkan bahwa PT SKS akan memperoleh tingkat pengembalian sebesar 19,68% dari investasi Rp50,2 miliar ke proyek *methane capture*. Tingkat pengembalian ini lebih tinggi dibandingkan investasi perbankan seperti deposito, yang hanya sebesar 4,75% per tahun.



Gambar 5. Analisis Sensitivitas terhadap Nilai NPV

Sumber: Hasil pengolahan data

Namun, ada kemungkinan komponen-komponen dalam analisis kelayakan berbeda dengan kondisi aktualnya. Sebagai contoh, jumlah TBS yang diolah per tahun, kapasitas *gas engine*, kadar COD, total investasi awal, biaya operasional tahunan, dan harga jual listrik ke PT PLN bisa lebih tinggi atau rendah. Maka, penelitian ini dilengkapi dengan analisis sensitivitas, dengan menaikkan dan menurunkan nilai dari komponen yang telah disebutkan. Nilai yang digunakan berturut-turut adalah +20%, +15%, +10%, +5%, 0% (tidak ada perubahan), -5%, -10%, -15%, dan -20%.

Sebagai contoh, salah satu PLTBg di Kepulauan Bangka Belitung menjual listrik ke PLN dengan harga Rp975/kWh di tahun 2017 (DJEPTKE-KESDM, 2021). PLTBg lainnya di Sumatera Utara menjual listrik dengan harga Rp1.018/kWh. Meskipun keduanya beroperasi setelah Permen ESDM No. 27 Tahun 2014 dirilis, harga jual listriknya rendah. Jika disimulasikan pada penelitian ini, maka proyek masih layak dijalankan dengan nilai NPV dan IRR berturut-turut Rp53,8 miliar dan 16,89%.

Komponen lain yang perlu diperhatikan adalah jumlah TBS yang diolah dalam setahun, karena berhubungan langsung dengan jumlah POME, CH₄, dan listrik yang dihasilkan. Angka TBS olah per tahun dalam simulasi perhitungan lebih kecil dibandingkan proyek biogas di penelitian terdahulu yaitu 240.000 ton (Gozan *et al.*, 2018) dan 360.000 ton (Chin *et al.*, 2013).

Alasan lain rasio listrik terhadap POME pada penelitian ini kecil adalah rata-rata kadar COD yang rendah, yaitu 39.727 mg/L. Sodri dan Septriana (2022) menyatakan bahwa jumlah POME agar proyek biogas berjalan *sufficient* adalah minimal 15.000 m³/bulan atau 180.000 m³/tahun. SKS Mill perlu meningkatkan jumlah TBS olah dalam setahun, minimal 275.000 ton TBS. Angka ini mendekati jumlah TBS olah pada penelitian Febijanto (2018) yang menyatakan bahwa proyek biogas dari POME dinyatakan layak secara ekonomis untuk TBS olah sebanyak 279.602 ton/tahun.

Pada penelitian ini, komponen lain yang paling mempengaruhi kelayakan usaha adalah harga solar industri. Jika harga solar turun, maka *average cost* dari listrik genset menjadi lebih murah. Meskipun harga solar menurun 20% menjadi Rp15.820,00 per liter, sistem *methane capture* masih layak dijalankan dengan NPV dan IRR berturut-turut Rp48,2 miliar dan 15,77%.

Tabel 9. Analisis Kelayakan Model *In-House* dan IPP

Komponen	<i>In-House</i>		<i>Independent Power Producer</i>	
	Nilai	Kelayakan	Nilai	Kelayakan
<i>Interest Rate</i>	4,75%		4,75%	
NPV	Rp4,37 miliar	Layak	-Rp5,8 miliar	Tidak Layak
IRR	5,92%	Layak	3,10%	Tidak Layak
<i>Net B/C</i>	1,09	Layak	0,88	Tidak Layak
<i>Gross B/C</i>	1,05	Layak	0,94	Tidak Layak
ROI	157,97%		128,47%	
PP	10,150 tahun		12,145 tahun	
<i>Discounted PP</i>	10,157 tahun		12,152 tahun	

Sumber: Hasil pengolahan data

Model *in-house* merupakan model bisnis yang mana seluruh energi biogas digunakan untuk konsumsi listrik internal perusahaan. Hal ini berarti sebanyak 2,97 juta kWh *excess power* tidak dijual. Sedangkan 1.566.679 kWh listrik dari biogas menggantikan listrik dari genset, sehingga genset tidak terpakai dan penggunaan solar menjadi 0. Model ini pun layak untuk dijalankan secara ekonomis. Ini membuktikan bahwa substitusi bahan bakar fosil yang mahal dengan energi dari biogas dapat dilakukan sepenuhnya. Dalam kata lain, investasi sistem *methane capture* sebesar Rp50,2 miliar dapat meringankan pengeluaran PT SKS untuk bahan bakar solar industri yang mencapai Rp8 miliar/tahun. Namun, PT SKS akan kehilangan peluang pendapatan dari *excess power*.

Model *independent power producer* (IPP) adalah model ketika PT SKS menjual seluruh listrik ke PT PLN tanpa ada pemenuhan kebutuhan internal. Dengan harga jual listrik Rp1.365,00/kWh, proyek ini tidak layak dijalankan. Hal ini dikarenakan PT SKS tidak memperoleh nilai penghematan solar, dan penjualan listrik tidak mampu menutupi biaya investasi yang begitu besar. Harga jual listrik juga lebih rendah dibandingkan *opportunity cost* penghematan solar, yaitu Rp5.162,16/kWh listrik genset. Jika PT SKS menerapkan model IPP, maka jumlah TBS olah pada proyeksi perhitungan harus dinaikkan 10% menjadi 198.396,02 ton. Angka ini membuat model IPP layak dijalankan, dengan nilai NPV dan IRR berturut-turut Rp3,2 miliar dan 5,62%.

Tabel 10. Analisis Skenario

Komponen	Skenario		
	<i>Pessimistic</i>	<i>Business-as-Usual</i>	<i>Optimistic</i>
Parameter Input			
Jumlah TBS Olah	-20%	180.360,02 ton	+20%
Total Biaya Investasi	+20%	Rp50,2 miliar	-20%
Total Biaya Operasional	+20%	Rp3,7 miliar/tahun	-20%
Harga Solar	-20%	Rp19.100,00/L	+20%
Komponen Kelayakan			
Model <i>Excess Power</i>			
NPV	Rp10,76 miliar	Rp68,3 miliar	Rp126 miliar
IRR	7,09%	19,68%	35,25%
Model <i>In-House</i>			
NPV	-Rp35,1 miliar	Rp4,38 miliar	Rp43,8 miliar
IRR	-5,39%	5,92%	17,08%
Model <i>Independent Power Producer</i>			
NPV	-Rp43,2 miliar	-Rp5,8 miliar	Rp31,6 miliar
IRR	-9,08%	3,10%	13,99%

Sumber: Hasil pengolahan data

Analisis skenario dilakukan dengan mengubah 4 variabel yang paling besar pengaruhnya terhadap kelayakan usaha. Berdasarkan analisis sensitivitas, variabel pengaruhnya paling besar adalah jumlah TBS olah, total biaya investasi dan operasional, serta harga solar. Model *excess power* adalah model yang paling baik untuk diterapkan. Pada skenario *pessimistic*, proyek *methane capture* tetap layak dijalankan. Sedangkan pada skenario *optimistic*, NPV dan IRR model ini meningkat tajam, berturut-turut Rp126 miliar dan 35,25%. Maka, PT SKS perlu menerapkan *excess power*.

6. Analisis Kelayakan Usaha Aspek Sosial

Implementasi sistem *methane capture* membuktikan komitmen PT SKS terhadap keberlanjutan. *Methane capture* itu sendiri tercantum dalam Prinsip 10 Kriteria 7 RSPO, bahwasanya perusahaan harus mengurangi pencemaran dan emisi gas rumah kaca (GRK). Cara yang dapat dilakukan adalah mengelola limbah cair (POME) yang baik dan implementasi *methane capture*. Implementasi proyek ini dapat meningkatkan kesejahteraan masyarakat yang ada di sekitar perkebunan kelapa sawit dari aspek sosial dan ekonomi. Manfaat yang diberikan adalah pembukaan lapangan pekerjaan baru dan menstimulasi industri terkait, sehingga menggerakkan tenaga kerja dan meningkatkan taraf hidup. Listrik yang dihasilkan dari proyek *methane capture* ini dapat dimanfaatkan untuk perumahan staf dan karyawan yang ada di PT SKS dan PT BNS.

Pemanfaatan biogas dari POME dengan *covered lagoon* dapat mengurangi bau yang dihasilkan dari pengelolaan limbah. Berdasarkan penelitian Antoni *et al.* (2021), senyawa-senyawa yang menghasilkan bau tidak sedap seperti hidrogen sulfida (H_2S), metil merkaptan ($CH_3.SH$), metil sulfida ($(CH_3)_2S$), amonia (NH_3), dan styrene ($C_6H_5CHCH_3$) di sekitar *biogas plant* berada di bawah batas baku mutu yang ditetapkan dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No.56 tahun 1996 mengenai Baku Tingkat Kebauan.

7. Strategi Pengembangan

Sistem *methane capture* di SKS Mill dinyatakan layak untuk dijalankan. Proses implementasi *sistem methane capture* perlu mempertimbangkan aspek internal dan eksternal. Berikut adalah analisis SWOT untuk sistem ini:

Tabel 10. Identifikasi SWOT

SWOT	Analisis
<i>Strength</i> (S)	1. Kolam pengolahan efektif dalam menurunkan kadar COD POME. 2. <i>Covered lagoon</i> mampu memerangkap biogas yang dihasilkan, sedangkan POME yang sudah diolah dapat digunakan untuk <i>land application</i>. 3. Kolam pengolahan yang sudah ada dapat digunakan dengan modifikasi. 4. <i>Output</i> biogas adalah listrik yang sifatnya <i>readily-use</i> dan dapat menggantikan listrik dari genset, sehingga solar dapat dihemat. 5. Listrik yang dihasilkan dapat digunakan untuk konsumsi internal perusahaan. 6. Sistem ini menurunkan emisi gas rumah kaca. 7. Pengolahan POME dengan <i>ponding</i> sederhana. 8. Proyek ini dapat diimplementasikan dengan cepat. 9. Proyek ini sejalan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan (SDGs).
<i>Weakness</i> (W)	1. Jumlah TBS olah dan POME masih terlalu rendah dibandingkan proyek serupa. 2. Biaya investasi awal dan operasional tahunan besar. 3. <i>Ponding system</i> membutuhkan lahan yang luas dan HRT yang lama. 4. Jenis tanah berpasir, dan permukaan kolam lebih tinggi dibandingkan sekitarnya. 5. Mikroorganisme anaerobik sangat sensitif. 6. Rata-rata kadar COD yang rendah membuat jumlah listrik yang dihasilkan rendah.
<i>Opportunity</i> (O)	1. Sistem <i>methane capture</i> membuka peluang insentif dari lembaga sertifikasi internasional seperti International Sustainability and Carbon Certification (ISCC). 2. Penambahan jumlah TBS olah dari pemasok eksternal dapat meningkatkan kelayakan <i>methane capture</i>. 3. Perkembangan teknologi meningkatkan efisiensi sarana pengolahan biogas, bahkan dapat diversifikasi ke produk bernilai tambah lainnya seperti bio-CNG. 4. Sejalan dengan prinsip berkelanjutan yang tercantum dalam Prinsip dan Kriteria RSPO. 5. Reduksi emisi CH_4 membuat perusahaan dapat memperdagangkan kredit karbonnya. 6. Selisih yang besar antara biaya produksi listrik dari biogas dengan harga solar industri, sehingga penghematannya besar.
<i>Threats</i> (T)	1. Faktor cuaca yang dapat mempengaruhi pengelolaan dan operasional kolam, seperti hujan besar.

SWOT	Analisis
	2. Kemungkinan harga jual listrik ke PT PLN rendah, sehingga menurunkan pendapatan. 3. Fluktuasi harga solar. 4. Fluktuasi harga jual karbon kredit. 5. Persaingan dengan pembangkit listrik dari sumber terbarukan lainnya, seperti biogas dari kotoran hewan, tenaga surya, dan lain-lain.

SKS Mill direkomendasikan untuk menerapkan model *excess power*. Model ini terbukti memberikan pendapatan paling tinggi dan paling layak secara ekonomi. Hal ini dilakukan dengan memprioritaskan pemanfaatan energi dari biogas untuk penghematan energi internal. Listrik yang dihasilkan dari *gas engine* bersifat *readily-use* untuk didistribusikan, mulai dari operasional pabrik dan ke bangunan di dalam area perusahaan. Ini membuat genset dapat dimatikan (hanya dinyalakan ketika kondisi mendesak), sehingga solar bisa dihemat. Strategi pengembangan sistem *methane capture* di PT SKS adalah sebagai berikut:

Tabel 10. Strategi Pengembangan dengan Matriks SWOT

Matriks	<i>Strength</i>	<i>Weakness</i>
<i>Opportunity</i>	Strategi <i>Strength-Opportunity</i>: 1. Memanfaatkan status RSPO PT SKS dan sertifikasi ISCC IOI Group untuk memperoleh insentif reduksi emisi dari <i>methane capture</i>, sehingga meningkatkan profil PT SKS di tingkat global (S4, S6, O1, O4). 2. Mengoptimalkan kelebihan listrik (<i>excess power</i>) untuk dijual ke PT PLN, atau merencanakan diversifikasi ke Bio-CNG di masa depan (S5, O3).	Strategi <i>Weakness-Opportunity</i>: 1. Meningkatkan jumlah pasokan TBS eksternal (terutama dari petani swadaya), sehingga total massa COD, volume biogas, dan produksi listrik meningkat. Strategi ini dapat meningkatkan pendapatan dan menutupi biaya investasi yang besar (W1, W6, O2). 2. Mengajukan Sertifikasi Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca (SPE-GRK) ke Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (LHK) untuk menambah sumber pendapatan (W2, O5).
<i>Threats</i>	1. Memanfaatkan kemandirian energi melalui produksi listrik dari biogas, khususnya dalam mengantisipasi fluktuasi harga solar industri (S4, T3). 2. Menggunakan sistem <i>covered lagoon</i> yang tertutup, sehingga meminimalkan dampak cuaca buruk seperti hujan terhadap operasional kolam dapat diminimalkan (S2, T1).	1. Memfokuskan proyek pada model bisnis <i>excess power</i>. Penghematan biaya solar internal dapat membantu komponen pendapatan, khususnya jika harga jual listrik ke PLN dan harga kredit karbon rendah (W2, T2, T4). 2. Melakukan evaluasi dan pengawasan berkala terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi operasional <i>covered lagoon</i> (seperti pH dan suhu), mengingat mikroorganisme anaerob sangat sensitif terhadap perubahan (W5, T1).

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis kelayakan usaha, sistem *methane capture* di PT SKS layak untuk diimplementasikan dari aspek teknis, sosial, ekonomi, dan lingkungan. Secara teknis, sistem *covered lagoon* dan *gas engine* ini mampu memanfaatkan potensi biogas dari POME dalam menghasilkan listrik. Sistem ini membawa dampak sosial positif, salah satunya membuka lapangan pekerjaan baru di sekitar PT SKS. Secara ekonomi, model *excess power* adalah model yang paling layak untuk dijalankan dengan nilai NPV dan IRR berturut-turut Rp68,38 miliar dan 19,68%. Investasi sebesar Rp50,2 miliar sebanding dengan total benefit Rp13-19 miliar/tahun, dengan *payback period* 5 tahun. Pada aspek lingkungan, sistem ini dapat memerangkap emisi gas CH₄ dari POME dan menurunkan emisi sekitar 11 ribu ton CO₂e. Strategi pengembangan sistem *methane capture* di PT SKS adalah memprioritaskan penggunaan listrik biogas untuk substitusi bahan bakar solar industri. Selanjutnya,

kelebihan listrik (*excess power*) dapat dijual ke PT PLN, dan perusahaan perlu mengajukan sertifikasi kredit karbon untuk memperoleh pendapatan tambahan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aili Hamzah, A. F., Hamzah, M. H., Che Man, H., Jamali, N. S., Siajam, S. I., dan Ismail, M. H. (2023). Effect of organic loading on anaerobic digestion of cow dung: Methane production and kinetic study. *Heliyon*, 9(6), e16791. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16791>
- Amin, M. A., Shukor, H., Yin, L. S., Kasim, F. H., Shoparwe, N. F., Makhtar, M. M. Z., dan Yaser, A. Z. (2022). Methane Biogas Production in Malaysia: Challenge and Future Plan. *International Journal of Chemical Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2278211>
- Antoni, A., Siregar, Y. I., dan Suwondo, S. (2021). Strategi pemanfaatan Palm Oil Mill Effluent (POME) sebagai sumber energi berkelanjutan di pabrik kelapa sawit PT. Meridan Sejati Surya Plantation Kabupaten Siak. *Jurnal Zona*, 4(2), 50–59. <https://doi.org/10.52364/jz.v4i2.18>
- Ayompe, L. M., Schaafsma, M., dan Egoh, B. N. (2021). Towards sustainable palm oil production: The positive and negative impacts on ecosystem services and human wellbeing. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123914. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123914>
- Boretti, A. (2021). Injection rate shaping in diesel engines key of improved volumetric energy storage. *Energy Storage*, 3(6), 1–9. <https://doi.org/10.1002/est2.236>
- Cheau Chin, Y., Yi Jing, C., Soh Kheang, L., Christina Vimala, S., Aik Chin, S., Mei Fong, C., Chien Lye, C., dan Lian Keong, L. (2020). Comparison of different industrial scale palm oil mill effluent anaerobic systems in degradation of organic contaminants and kinetic performance. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121361. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121361>
- Chin, M. J., Poh, P. E., Tey, B. T., Chan, E. S., dan Chin, K. L. (2013). Biogas from palm oil mill effluent (POME): Opportunities and challenges from Malaysia's perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 717–726. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.008>
- Choong, Y. Y., Chou, K. W., dan Norli, I. (2018). Strategies for improving biogas production of palm oil mill effluent (POME) anaerobic digestion: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(January), 2993–3006. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.036>
- Climate Transparency. (2020). Indonesia Climate Transparency Report - Comparing G20 Climate Action and Responses to the COVID-19 Crisis. *Climate Transparency Report 2020*, 1–20.
- Creswell, J. W., dan Creswell, J. D. (2017). Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. Sage Publications.
- Costa, C., Wironen, M., Racette, K., dan Wollenberg, E. (2021). Global Warming Potential * (GWP *): Understanding the implications for mitigating methane emissions in agriculture. *Ccafs Info Note*, August, 7.
- Cozma, P., Wukovits, W., Mămăligă, I., Friedl, A., dan Gavrilă, M. (2015). Modeling and simulation of high pressure water scrubbing technology applied for biogas upgrading. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(2), 373–391. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0787-7>
- Deubelin, D., dan Steinhäuser, A. (2008). *Biorefineries – Industrial Biological Wastewater Artificial Photosynthesis Renewables - Based Beyond Oil and Gas*.
- Direktorat Jenderal Perkebunan. (2024). Statistik Perkebunan Jilid I 2022-(2024). Diakses pada 7 Juni 2024 melalui https://drive.google.com/file/d/1ZG4frZzyjyGOBgzp_jVuvH4a5A_xwfY1/view
- DJEPTKE-KESDM. (2021). Pedoman Investasi Pembangkit Listrik Tenaga Bioenergi. Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta.
- Febijanto, I. (2018). Optimization of methane gas use as energy resource in palm oil mill. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 19(01), 49–60.

- Febijanto, I., Hermawan, E., Ifanda, Adiarso, A., Siswanto, Mustafa, A., Kusrestuwardhani, Rahardjo, P., Agung Wijono, R., dan Sudjadi, U. (2024). Techno-enviro-economic assessment of bio-CNG derived from Palm Oil Mill Effluent (POME) for public transportation in Pekanbaru City. *Renewable Energy Focus*, 49(January), 100569. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100569>
- Galván-Arzola, U., Valencia-Vázquez, R., Gómez-González, R., Alcalá-Rodríguez, M. M., Loredomedrano, J. Á., García-Balandrán, E. E., dan Rivas-García, P. (2025). Low-performance diagnosis of covered anaerobic lagoons as a waste management strategy in the intensive dairy industry. *Environmental Technology*, 46(5), 772-784.
- Gozan, M., Aulawy, N., Rahman, S. F., dan Budiarto, R. (2018). Techno-Economic Analysis of Biogas Power Plant from POME (Palm Oil Mill Effluent). *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(8), 6151–6157. <http://www.ripublication.com>
- Hadi, N. A., Hawari, Y., Ngatiman, M., Jalani, N. F., Wahab, N. A. A., dan Halim, R. M. (2019). Assessment of the effluent polishing plant using a ultrafiltration membrane installed at a palm oil mill. *Environment Protection Engineering*, 45(1), 155–170. <https://doi.org/10.37190/epe190112>
- Hambali, E., dan Rivai, M. (2017). The Potential of Palm Oil Waste Biomass in Indonesia in 2020 and 2030. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 65(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/65/1/012050>
- Hamzah, N., Tokimatsu, K., dan Yoshikawa, K. (2019). Solid fuel from oil palm biomass residues and municipal solid waste by hydrothermal treatment for electrical power generation in Malaysia: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 11(4), 1–23. <https://doi.org/10.3390/su11041060>
- Hosseini, S. E., dan Wahid, M. A. (2015). Pollutant in palm oil production process. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 65(7), 773–781. <https://doi.org/10.1080/10962247.2013.873092>
- Hwang, T. K. (1978). Chemical composition of palm oil mill effluent. *Technical Article Planter, Kuala Lumpur.*, 54, 749-756.
- IOI Group. (2024). Building on Strategic Achievements: Annual Report (2024). Laman Daring Resmi IOI Group. Diakses pada 1 Juli 2025 melalui [https://www.ioigroup.com/integrated-report/2024/pdf/IOI_AR\(2024\).pdf](https://www.ioigroup.com/integrated-report/2024/pdf/IOI_AR(2024).pdf)
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. PP 2215-2256. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Islam, S., L.M, M., dan J.J, E. (2018). Methane Production Potential of Pome: a Review on Waste-To-Energy [Wte] Model. *Sci.Int.(Lahore)*, 30(5), 717–728.
- Jamaludin, N. F., Muis, Z. A., dan Hashim, H. (2019). An integrated carbon footprint accounting and sustainability index for palm oil mills. *Journal of Cleaner Production*, 225, 496–509. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.312>
- Jumadi, J., Kamari, A., dan Wong, S. T. S. (2020). Water quality assessment and a study of current palm oil mill effluent (POME) treatment by ponding system method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 980(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/980/1/012076>
- Kamyab, H., Chelliapan, S., Din, M. F. M., Rezania, S., Khademi, T., dan Kumar, A. (2018). Palm Oil Mill Effluent as an Environmental Pollutant. *Palm Oil*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75811>
- Kan, K. W., Chan, Y. J., Tiong, T. J., dan Lim, J. W. (2024). Maximizing biogas yield from palm oil mill effluent (POME) through advanced simulation and optimisation techniques on an industrial scale. *Chemical Engineering Science*, 285(December 2023), 119644. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119644>
- Lam, W. Y., Kulak, M., Sim, S., King, H., Huijbregts, M. A. J., dan Chaplin-Kramer, R. (2019). Greenhouse gas footprints of palm oil production in Indonesia over space and time. *Science of the Total Environment*, 688, 827–837. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.377>
- Lok, X., Chan, Y. J., dan Foo, D. C. Y. (2020). Simulation and optimisation of full-scale palm oil

- mill effluent (POME) treatment plant with biogas production. *Journal of Water Process Engineering*, 38(August). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101558>
- Lukman Hakim, D., dan Valentino Novio. (2019). Tekno Ekonomi Pemanfaatan Biogas Berbasis POME untuk Pembangkit Listrik, Bahan Bakar Boiler, dan BioCNG. *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 18(2), 73–81.
- Mohammad, S., Baidurah, S., Kobayashi, T., Ismail, N., dan Leh, C. P. (2021). Palm oil mill effluent treatment processes—A review. *Processes*, 9(5), 1–22. <https://doi.org/10.3390/pr9050739>
- Mohd Yusof, M. A. Bin, Chan, Y. J., dan Chong, C. H. (2023). Comparative analysis in the performances of four in-ground lagoon anaerobic digesters treating palm oil mill effluent (POME). *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 18(6), 1–24. <https://doi.org/10.1002/apj.2947>
- Musyaffa, M. F., Idris, M. D., dan Paryadi, P. (2024). Analisis Efisiensi Generator Set G8 di Unit Pembangkit dan Distribusi Listrik PPSDM Migas. *Majalah Ilmiah Suara Patra*, 14(2), 115–130. <https://doi.org/10.37525/sp/2024-2/713>
- Ng, K. H. (2021). Adoption of TiO₂-photocatalysis for palm oil mill effluent (POME) treatment: Strengths, weaknesses, opportunities, threats (SWOT) and its practicality against traditional treatment in Malaysia. *Chemosphere*, 270, 129378. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129378>
- Nugroho, A., Majid, Z. A. N. M., Sari, Y. W., Anggraini, E., Majiudu, M., Muzzayyanah, P. N., ... dan Suradireja, D. Y. (2025). Development of Biogas from Palm Oil Mill Effluent (POME): Unlocking Economic, Environmental, and Energy Value.
- Oosterveer, P. (2015). Promoting sustainable palm oil: Viewed from a global networks and flows perspective. *Journal of Cleaner Production*, 107, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.019>
- Owusu-Twum, M. Y., dan Sharara, M. A. (2020). Sludge management in anaerobic swine lagoons: A review. *Journal of Environmental Management*, 271(March), 110949. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110949>
- Pemerintah Indonesia. (2014). Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 27 Tahun 2014 tentang Pembelian Tenaga Listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Biomasa dan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas Oleh PT Perusahaan Listrik Negara. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Periyasamy, S., Temesgen, T., Karthik, V., Isabel, J. B., Kavitha, S., Banu, J. R., dan Sivashanmugam, P. (2021). Wastewater to biogas recovery. *Clean Energy and Resource Recovery: Wastewater Treatment Plants as Biorefineries, Volume 2*, 301–314. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90178-9.00029-9>
- PT Sukses Karya Sawit. (2025a). Produksi Estet 22-23. Dokumen internal perusahaan, data tidak dipublikasikan.
- PT Sukses Karya Sawit. (2025b). 01. Produksi Estet 23-24 Jan-juni. Dokumen internal perusahaan, data tidak dipublikasikan.
- PT Sukses Karya Sawit. (2025c). 01. Produksi Estet 24-25 Jan-juni. Dokumen internal perusahaan, data tidak dipublikasikan.
- PT Sukses Karya Sawit. (2025d). 05. Waste Watertreatment. Dokumen internal perusahaan, data tidak dipublikasikan.
- PT Sukses Karya Sawit. (2025e). Diagram Pengolahan Limbah Cair PT Sukses Karya Sawit. Dokumen internal perusahaan, data tidak dipublikasikan.
- Purnomo, H., Okarda, B., Dermawan, A., Ilham, Q. P., Pacheco, P., Nurfatriani, F., dan Suhendang, E. (2020). Reconciling oil palm economic development and environmental conservation in Indonesia: A value chain dynamic approach. *Forest Policy and Economics*, 111(January 2019), 102089. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102089>
- Rahayu, A. S., Yuwono, H., Rahardjo, S., Hokerman, S., Paramita, V., Trisnawati, I., dan Yuwono, H. (2015). Guidebook for Converting POME to Biogas: Project Development in Indonesia

- (Buku Panduan Konversi POME Menjadi Biogas: Pengembangan Proyek di Indonesia). *Winrock International*, 100. <https://www.winrock.org/wp-content/uploads/2016/05/CIRCLE-Handbook-INDO-compressed.pdf>
- RSPO. (2009). *Greenhouse Gas Emissions from Palm Oil Production Final Report*. Brinkmann Consultancy. October.
- Sharvini, S. R., Noor, Z. Z., Stringer, L. C., Afionis, S., dan Chong, C. S. (2022). Energy generation from palm oil mill effluent: A life cycle cost-benefit analysis and policy insights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156(December 2020), 111990. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111990>
- Sihlangu, E., Magama, P., Chiyanzu, I., Regnier, T., Luseba, D., dan Nephawe, K. A. (2024). Investigating the Influence of Organic Loading Rate, Temperature and Stirring Speed on Biogas Production Using Agricultural Waste in South Africa. *Agriculture (Switzerland)*, 14(11), 1–13. <https://doi.org/10.3390/agriculture14112091>
- Situmeang, R., Mazancová, J., dan Roubík, H. (2022). Technological, Economic, Social and Environmental Barriers to Adoption of Small-Scale Biogas Plants: Case of Indonesia. *Energies*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/en15145105>
- Sodri, A., dan Septriana, F. E. (2022). Biogas Power Generation from Palm Oil Mill Effluent (POME): Techno-Economic and Environmental Impact Evaluation. *Energies*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/en15197265>
- Suganda, F., Goembira, F., dan Mahdi, M. (2024). Analisis Nilai Manfaat Teknologi Methane Capture bagi Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(2), 551–564. <https://doi.org/10.14710/jil.22.2.551-564>
- Sukardi, R., dan Brata, W. A. (2021). *Biomethane Utilization from Palm Oil Mill Effluent*. September. www.giz.de
- Vögeli, Y., Riu, C., Gallardo, A., Diener, S., dan Zurbrügg, C. (2014). Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries. In *Sandec: Department of Water and Sanitation in Developing Countries*. <http://www.eawag.ch/forschung/sandec/publikationen/swm/dl/biowaste.pdf>
- Vozzola, E., Overcash, M., dan Griffing, E. (2020). An Environmental Analysis of Reusable and Disposable Surgical Gowns. *AORN Journal*, 111(3), 315–325. <https://doi.org/10.1002/aorn.12885>
- Yeo, J. Y. J., How, B. S., Teng, S. Y., Leong, W. D., Ng, W. P. Q., Lim, C. H., Ngan, S. L., Sunarso, J., dan Lam, H. L. (2020). Synthesis of sustainable circular economy in palm oil industry using graph-theoretic method. *Sustainability (Switzerland)*, 12(19), 1–29. <https://doi.org/10.3390/su12198081>
- Yong, G. T. X., Chan, Y. J., Lau, P. L., Ethiraj, B., Ghfar, A. A., Mohammed, A. A. A., Shahid, M. K., dan Lim, J. W. (2023). Optimization of the Performances of Palm Oil Mill Effluent (POME)-Based Biogas Plants Using Comparative Analysis and Response Surface Methodology. *Processes*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/pr11061603>
- Zainal, N. H., Jalani, N. F., Mamat, R., dan Astimar, A. A. (2017). A review on the development of palm oil mill effluent (POME) final discharge polishing treatments. *Journal of Oil Palm Research*, 29(4), 528–540. <https://doi.org/10.21894/jopr.2017.00012>