

**PENINGKATAN BIOGAS DAN PENURUNAN EMISI GAS RUMAH
KACA MELALUI PERENDAMAN TKKS (TANDAN KOSONG KELAPA
SAWIT) DALAM POME (PALM OIL MILL EFFLUENT)**

(Tesis)

Oleh

**AFID FITRO SETIAWAN
NPM 2324051002**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**PENINGKATAN BIOGAS DAN PENURUNAN EMISI GAS RUMAH
KACA MELALUI PERENDAMAN TKKS (TANDAN KOSONG KELAPA
SAWIT) DALAM POME (PALM OIL MILL EFFLUENT)**

Oleh

AFID FITRO SETIAWAN

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNOLOGI PERTANIAN

Pada

Program Pascasarjana Magister Teknologi Industri Pertanian
Fakultas Pertanian Universitas Lampung



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

PENINGKATAN BIOGAS DAN PENURUNAN EMISI GAS RUMAH KACA MELALUI PERENDAMAN TKKS (TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT) DALAM POME (PALM OIL MILL EFFLUENT)

Oleh

Afid Fitro Setiawan

Industri kelapa sawit menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar berupa Palm Oil Mill Effluent (POME) serta limbah padat berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS atau Empty Fruit Bunches, EFB). Kedua jenis limbah tersebut berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan dan merupakan sumber utama emisi gas rumah kaca (GRK), khususnya metana (CH_4) dari sistem pengolahan limbah cair terbuka. Salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah fermentasi anaerob melalui sistem co-digestion POME dan EFB, yang tidak hanya berfungsi sebagai teknologi pengolahan limbah, tetapi juga sebagai sumber energi terbarukan berupa biogas.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh perendaman EFB dalam POME sebagai tahap pra-perlakuan sebelum fermentasi anaerob, dengan mempertimbangkan bentuk fisik EFB (cabik/shredded dan giling/crushed) serta waktu perendaman (4 dan 8 jam). Evaluasi dilakukan untuk menilai kinerja reduksi parameter pencemar POME, stabilitas proses fermentasi, produksi dan kualitas biogas, serta potensi mitigasi emisi gas rumah kaca.

Percobaan dilakukan menggunakan reaktor anaerob sistem batch berkapasitas 1 L selama 40 hari fermentasi. Perlakuan substrat yang diuji meliputi POME tanpa penambahan EFB sebagai kontrol, serta kombinasi POME dengan EFB cabik (EFB) dan EFB giling (EFBC) yang direndam selama 4 dan 8 jam. Parameter yang diamati meliputi soluble chemical oxygen demand (S-COD), total solids (TS), volatile solids (VS), total volatile acid (TVA), pH, volume biogas harian dan kumulatif, komposisi gas (CH_4 , CO_2 , dan N_2), serta estimasi potensi penurunan emisi GRK. Analisis statistik dilakukan menggunakan uji ANOVA yang dilanjutkan dengan uji BNT (LSD) pada taraf kepercayaan 95%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh perlakuan co-digestion mampu meningkatkan efisiensi degradasi bahan organik dibandingkan dengan kontrol. Efisiensi reduksi S-COD berada pada kisaran 85–93%, yang mengindikasikan aktivitas mikroorganisme anaerob yang efektif selama proses fermentasi. Reduksi TS dan VS berkisar antara 13–39%, sementara nilai TVA menurun lebih dari 70% pada seluruh perlakuan, menunjukkan tidak terjadinya akumulasi asam yang

berpotensi menghambat proses metanogenesis. Nilai pH akhir fermentasi berada di atas 8, yang mencerminkan kondisi lingkungan reaktor yang stabil dan mendukung pembentukan metana.

Produksi biogas meningkat pada seluruh perlakuan co-digestion, dengan puncak produksi harian terjadi pada rentang hari ke-10 hingga ke-18. Kandungan metana dalam biogas mencapai 60–69%, yang menunjukkan kualitas biogas yang baik. Hasil penelitian ini juga mengungkapkan bahwa efisiensi reduksi substrat berbanding lurus dengan efisiensi konversi menjadi CH₄. Pada perlakuan kontrol, meskipun efisiensi reduksi S-COD relatif lebih rendah, efisiensi konversi CH₄ tetap tinggi, yang diduga disebabkan oleh dominasi senyawa organik sederhana dalam POME yang lebih mudah dikonversi langsung menjadi metana. Sebaliknya, pada sistem co-digestion POME–EFB, sebagian COD yang tereduksi diduga digunakan untuk pertumbuhan biomassa mikroba dan pembentukan senyawa antara, sehingga tidak seluruhnya terkonversi menjadi CH₄ dalam periode fermentasi yang diamati.

Berdasarkan indikator reduksi pencemar, stabilitas proses, produksi biogas kumulatif, fraksi metana, serta kemudahan penanganan substrat, perlakuan EFB cabik yang direndam selama 4 jam (EFB 4) ditetapkan sebagai perlakuan paling optimal. Perlakuan ini menghasilkan produksi biogas yang konsisten, mencegah akumulasi asam, serta memiliki tahapan pra-perlakuan yang relatif sederhana dan berpotensi diaplikasikan pada skala industri.

Dari sisi mitigasi emisi gas rumah kaca, sistem co-digestion POME–EFB menunjukkan potensi yang signifikan. Berdasarkan perhitungan emisi, sistem ini mampu menghasilkan reduksi emisi bersih sebesar sekitar 34,6 kg CO_{2e} setiap 1 m³ POME yang diolah. Ketika diekstrapolasi ke skala industri pengolahan kelapa sawit, potensi reduksi emisi mencapai sekitar 24,9 ton CO_{2e} per hari pada pabrik dengan kapasitas 60 ton TBS per jam, dengan asumsi waktu operasi 20 jam per hari. Selain itu, pemanfaatan biogas yang dihasilkan berpotensi menggantikan sebagian konsumsi bahan bakar fosil, sehingga memberikan manfaat tambahan berupa penghematan energi dan biaya operasional.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa integrasi sistem fermentasi anaerob berbasis co-digestion POME dan EFB merupakan strategi yang efektif dalam menurunkan beban pencemar limbah, meningkatkan produksi energi terbarukan, serta memberikan kontribusi nyata terhadap mitigasi emisi gas rumah kaca. Penerapan teknologi ini berpotensi mendukung pengelolaan limbah berkelanjutan dan percepatan transisi menuju industri kelapa sawit rendah karbon di Indonesia.

Kata kunci

Palm Oil Mill Effluent (POME); Tandan Kosong Kelapa Sawit (EFB); Co-digestion

ABSTRACT

ENHANCEMENT OF BIOGAS PRODUCTION AND REDUCTION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS THROUGH SOAKING OF EMPTY FRUIT BUNCHES (EFB) IN PALM OIL MILL EFFLUENT (POME)

By

Afid Fitro Setiawan

The palm oil industry generates substantial quantities of liquid waste in the form of Palm Oil Mill Effluent (POME) and solid waste such as Empty Fruit Bunches (EFB), both of which pose significant environmental risks and contribute to greenhouse gas (GHG) emissions. Anaerobic co-digestion of POME with EFB represents a promising waste-to-energy strategy that can enhance biogas production while mitigating GHG emissions. This study evaluated the effect of soaking shredded EFB (EFB) and ground EFB (EFBC) in POME for 4 and 8 hours prior to anaerobic fermentation.

Experiments were conducted using 1-L batch anaerobic digesters operated for 40 days. Parameters observed included soluble chemical oxygen demand (S-COD), total solids (TS), volatile solids (VS), total volatile acids (TVA), pH, biogas volume, CH₄–CO₂–N₂ composition, and estimated GHG emission reduction. POME without EFB addition served as the control. Statistical analyses were performed using ANOVA followed by LSD tests at a 95% confidence level.

The results showed that all co-digestion treatments enhanced organic matter degradation compared to the control. S-COD reduction ranged from 85 to 93%, indicating effective microbial activity during fermentation. TS and VS reductions ranged from 13 to 39%, while TVA decreased by more than 70%, suggesting the absence of acid accumulation. Final pH values above 8 indicated conditions favorable for methanogenesis. Biogas production increased in all co-digestion treatments, with peak daily production occurring between days 10 and 18. Methane content reached 60–69%, indicating good biogas quality.

Notably, high substrate removal efficiency was directly proportional to methane conversion efficiency to some extent. Although the control exhibited lower S-

COD reduction, it showed relatively high CH₄ conversion efficiency, likely due to the predominance of readily biodegradable organic compounds in POME. In contrast, part of the removed COD in co-digestion treatments was presumed to be utilized for microbial biomass growth and intermediate metabolites. Based on overall pollutant reduction, process stability, cumulative biogas production, methane concentration, and operational simplicity, the shredded EFB soaked for 4 hours (EFB 4) treatment was identified as the most optimal option.

GHG emission analysis indicated that the POME–EFB co-digestion system could achieve a net emission reduction of approximately 34.6 kg CO₂e per m³ of POME treated. When extrapolated to industrial scales, this corresponds to potential emission reductions of approximately 24.9 tons CO₂e per day for palm oil mills with processing capacities of 60 tons of fresh fruit bunches (FFB) per hour operated for 20 hours per day, respectively. These reductions are accompanied by substantial fossil fuel substitution potential through biogas utilization. Overall, anaerobic co-digestion of POME and EFB demonstrates strong potential for GHG mitigation, renewable energy generation, and supporting the transition toward sustainable and low-carbon palm oil production.

Keywords

Palm Oil Mill Effluent (POME); Empty Fruit Bunches (EFB); Greenhouse gas emissions

Judul Tesis : **PENINGKATAN BIOGAS DAN PENURUNAN
EMISI GAS RUMAH KACA MELALUI
PERENDAMAN TKKS (TANDAN KOSONG
KELAPA SAWIT) DALAM POME (PALM
OIL MILL EFFLUENT)**

Nama Mahasiswa : **Afid Fitro Setiawan**

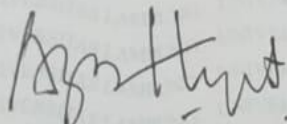
Nomor Pokok Mahasiswa : **2324051002**

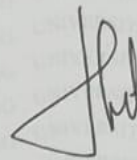
Program Studi : **MAGISTER TEKNOLOGI INDUSTRI
PERTANIAN**

Fakultas : **Pertanian**

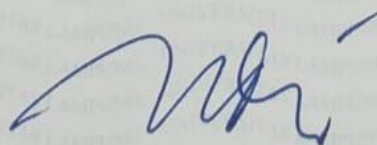


1. Komisi Pembimbing


Prof. Dr. Agus Haryanto, M.P.
NIP 196505271993031002


Prof. Dr. Sri Hidayati, S.TP., M.P.
NIP 197109301995122001

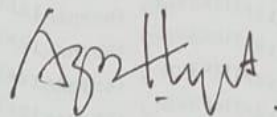
2. Ketua Program Studi Magister Teknologi Industri Pertanian


Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T.
NIP 196401061988031002

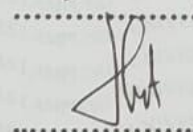
MENGESAHKAN

1. Tim Pembimbing

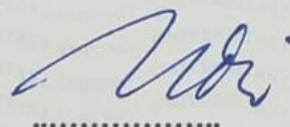
Ketua : Prof. Dr. Agus Haryanto, M.P.



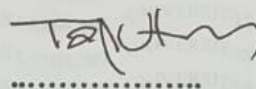
Sekretaris : Prof. Dr. Sri Hidayati, S.TP., M.P.



**Penguji 1
Bukan Pembimbing** : Prof. Dr.Ir. Udin Hasanudin, M.T



**Penguji 2
Bukan Pembimbing** : Dr Ir. Tanto Pratondo Utomo, M.Si.

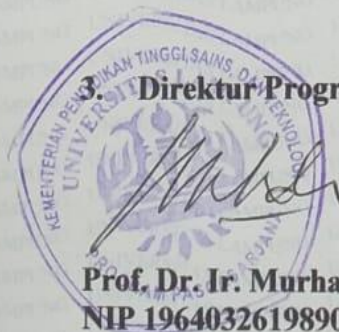


2. Dekan Fakultas Pertanian



Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.
NIP 196411181989021002

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis: 19 Januari 2026

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa:

1. Tesis dengan judul "PENINGKATAN BIOGAS DAN PENURUNAN EMISI GAS RUMAH KACA MELALUI PERENDAMAN TKKS (TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT) DALAM POME (*PALM OIL MILL EFFLUENT*)" adalah karya tulis saya dan merupakan bagian dari penelitian dosen yang didukung secara finansial dari hibah Penelitian Terapan UNILA dengan nomor kontrak 498/UN26.21/PN/2024 tanggal 24 April 2024 atas nama Prof. Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P. Semua hasil yang tertuang dalam tesis ini telah sesuai dengan norma etika akademik, bebas dari plagiarisme, dan telah mengikuti kaidah penulisan karya ilmiah Universitas Lampung.
2. Pembimbing penulis tesis ini berhak mempublikasikan Sebagian atau seluruh isi tesis ini pada jurnal ilmiah dengan mencantumkan nama saya sebagai salah satu penulis.
3. Hak intelektual atas karya ilmiah ini diserahkan kepada Universitas Lampung.

Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terbukti ada ketidak-benaran maka saya bersedia menerima sanksi yang diberikan kepada saya sesuai dengan ketentuan akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, Januari 2026



Afid Fitro Setiawan
NPM 2324051002

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Kota Rembang, Jawa Tengah, pada Tanggal 12 Maret 1995, sebagai anak pertama dari dua saudara, dari Bapak Prof. Dr. Ir. Sugeng Triyono, M.Sc. dan Ibu Sri Hartatik, S.Pd. Penulis menyelesaikan pendidikan di Sekolah Dasar Henderson Ward Stewart Elementary School, Starkville, Mississippi (USA), pada Tahun 2007. Setelah itu Penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Pertama (SMP) Al Kautsar Bandar Lampung dan lulus pada Tahun 2010. Penulis juga menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Atas (SMA) Al Kautsar Bandar Lampung pada Tahun 2013. Pada Tahun 2020, Penulis menyelesaikan pendidikan program sarjana di Jurusan Teknologi Hasil Pertanian Universitas Lampung.

Pada Tahun 2023 Penulis melanjutkan studi di Program Studi Magister Teknologi Pertanian, Pasca Sarjana, Universitas Lampung.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

**Dengan mengucap rasa syukur kepada Allah SWT
ku persembahkan karya tulis ini kepada**

Ayah dan Ibuku

Prof. Dr. Ir. Sugeng Triyono, M.Sc. dan Sri Hartatik, S.Pd.

serta Adiku

Vina Dwiayu Wardhani, S.P.

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, atas izin dan ridho Nya, penelitian dan penyusunan tesis yang berjudul “PENINGKATAN BIOGAS DAN PENURUNAN EMISI GAS RUMAH KACA MELALUI PERENDAMAN TKKS (TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT) DALAM POME (*PALM OIL MILL EFFLUENT*)” dapat penulis selesaikan. Banyak bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak, penulis dapatkan dalam menyelesaikan penelitian dan karya tulis ini. Untuk itu melalui kesempatan ini penulis menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya dan ucapan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM., selaku Rektor Universitas Lampung,
2. Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P., selaku Dekan Fakultas Pertanian Universitas Lampung,
3. Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si., selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung,
4. Prof. Dr.Ir. Udin Hasanudin, M.T., selaku Ketua Program Studi Magister Teknologi Industri Pertanian dan sebagai pembimbing akademik, serta sebagai dosen pembahas pertama yang telah memberikan bimbingan dan arahan positif,
5. Prof. Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P., selaku pembimbing pertama, yang telah memberikan bimbingan dan pendampingan penelitian,
6. Prof. Dr. Sri Hidayati, S.TP., M.P., selaku pembimbing kedua, yang telah memberikan arahan dan bimbingan,
7. Dr Ir. Tanto Pratondo Utomo, M.Si., selaku pembahas kedua, yang telah memberikan arahan dan koreksi positif,

8. Bapak Joko Sugiyono yang telah memberikan bantuan, fasilitas, dan dukungan selama penelitian,
9. PTPN VII Unit Usaha Bekri yang telah memberikan ijin memberikan tempat dan menyediakan bahan penelitian,
10. Seluruh dosen Program Studi Magister Teknologi Industri Pertanian, yang telah memberikan pendidikan dan pengajaran yang sangat penting,
11. Sahabat-sahabatku Teguh, Vico, dan Jannah atas bantuan dan kebersamaan selama penelitian,
12. Semua teman-teman di Program Studi Magister Teknologi Industri Pertanian Universitas Lampung, atas kebersamaannya,
13. Kedua orang tuaku, Bapak Prof. Dr. Ir. Sugeng Triyono, M.Sc. dan Ibu Sri Hartatik, S.Pd., serta adikku Vina Dwiayu Wardhani, S.P., yang memberikan kasih sayang sepanjang masa,
14. Seluruh almamater tercinta Universitas Lampung, yang membanggakan.

Penulis menyadari bahwa karya tesis ini masih belum sempurna, karena itu kritik dan saran yang bersifat positif dan membangun, sangat penulis harapkan.

Bandar Lampung, Januari 2026
Penulis,

Afid Fitro Setiawan

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan.....	3
1.3 Kerangka Pemikiran.....	3
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Proses Pengolahan Kelapa Sawit	6
2.2 Karakteristik TKKS	8
2.3 Karakteristik POME.....	9
2.4 Produksi Biogas	11
2.5 Produksi Biogas dari POME	14
2.5 Co-Digestion POME-TKKS	17
2.7 Emisi GRK.....	19
BAB III. METODE PENELITIAN	22
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	22
3.2 Alat dan Bahan.....	22
3.3 Rancangan Penelitian.....	23
3.4 Prosedur Penelitian.....	24

	Halaman
3.5 Tahapan Pelaksanaan Penelitian	26
3.6 Pengamatan dan Pengukuran	27
3.7 Analisis Data	32
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Analisis Substrat.....	33
4.1.1 Analisis Soluble Chemical Oxygen Demand (S-COD)	33
4.1.2 Analisis Total Solid (TS)	38
4.1.3 Analisis Volatil Solid (VS)	44
4.1.4 Analisis Nilai Total Volatile Acid (TVA).....	47
4.1.5 Analisis Nilai pH.....	52
4.2 Analisis Biogas.....	55
4.2.1 Pengukuran Volume Biogas.....	55
4.2.2 Kandungan Gas CH ₄	59
4.2.3 Kandungan Gas CO ₂	62
4.2.4 Kandungan Gas N ₂	63
4.3 Produksi Gas Metana (CH ₄)	67
4.4 Efisiensi Konversi CH ₄	71
4.5 Hasil CH ₄ Spesifik (<i>Specific methane yield, SMY</i>)	73
4.6 Potensi Reduksi Emisi GRK	76
4.6.1 Emisi GRK (CO _{2e}) dari Produksi CH ₄	76
4.6.2 Pemanfaatan dan Potensi Reduksi Emisi CH ₄	78
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	81
5.1 Kesimpulan	81
5.2 Saran.....	82
DAFTAR PUSTAKA	84
LAMPIRAN.....	96

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komponen Kimia Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS).....	8
2. Karakteristik Air Limbah dari Setiap Tahap Proses Pengolahan CPO...	10
3. Komposisi POME Sebelum Diolah di IPAL	10
4. Komposisi Biogas.....	12
5. Nilai Global Warming Potential	20
6. Perlakuan Substrat Digester Biogas.....	23
7. Hasil Analisis Ragam (ANOVA) Pengaruh Perlakuan Substrat Terhadap Efisiensi Reduksi S-COD Selama Fermentasi 40 hari	36
8. Hasil Uji BNT Pengaruh Perlakuan Substrat Terhadap Efisiensi Reduksi S-COD Selama Fermentasi 40 Hari.....	37
9. Hasil Analisis Ragam (ANOVA) Pengaruh Co-Substrat POME-TKKS Terhadap Reduksi TS Selama Fermentasi	42
10. Uji BNT Pengaruh Co-Substrat POME-TKKS Terhadap Efisiensi Reduksi TS.	42
11. Hasil Analisis Ragam (ANOVA) Pengaruh Co-Substrat POME-TKKS Terhadap Efisiensi Reduksi VS (%).....	46
12. Hasil Analisis BNT Pengaruh Co-Substrat POME-TKKS Terhadap Efisiensi Reduksi VS	46
13. Analisis Ragam (ANOVA) Pengaruh Perlakuan Co-Substrat POME-TKKS Terhadap Penurunan TVA (%) Selama 40 Hari Fermentasi	50
14. Analisis BNT Pengaruh Co-Substrat POME-TKKS Terhadap Penurunan TVA Setelah 40 Hari Fermentasi	51
15. Nilai pH Substrat, Substrat+Sludge, dan Digestat 40 Hari Fermentasi ..	53
16. Analisis Ragam Pengaruh Perlakuan Substrat Terhadap Total Produksi Biogas Setelah Fermentasi 40 Hari.....	58
17. Analisis BNT Pengaruh Perlakuan Substrat Terhadap Total Produksi Biogas Setelah Fermentasi 40 Hari.....	58
18. Kandungan CH ₄ (%) pada Hari ke 5, 7, 10, 15, 20, 40 Fermentasi	60

Tabel	Halaman
19. Kandungan CO ₂ (%) pada Hari ke 5, 7, 10, 15, 20, 40 Fermentasi.....	62
20. Kandungan N ₂ (%) pada Beberapa Hari Fermentasi.	64
21. Analisis BNT Produksi Gas CH ₄ (mL) Kumulatif pada Hari ke 5, 7, 10, 15, 20, 40	70
22. Hasil Analisis Ragam (Anova) Efisiensi Konversi CH ₄	71
23. Rata-rata Efisiensi Konversi CH ₄	72
24. Hasil Analisis BNT Produktivitas L CH ₄ per kg S-COD Terdegradasi pada Taraf 5%.....	75
25. Neraca Pemanfaatan dan Potensi Reduksi Neto Emisi CH ₄ pada Sistem Kontinyu, Konversi dari Perlakuan EFB 4	79
26. Ekstrapolasi ke Skala Industri Pengolahan Kelapa Sawit	80
27. Data Pengukuran S-COD.....	97
28. Data Pengukuran pH.....	98
29. Data Pengukuran TS dan VS Co-Substrat (POME-TKKS)	99
30. Data Pengukuran TS dan VS Co-Substrat (POME-TKKS) + Sludge	100
31. Data Pengukuran TS dan VS Setelah Fermentasi 40 hari	101
32. Data Pengukuran TVA	102
33. Data Pengukuran Produksi Biogas Hari (mL)	103
34. Data Pengukuran Kandungan CH ₄ dalam Biogas (%).....	105
35. Data Pengukuran Kandungan CO ₂ dalam Biogas (%)	106
36. Data Pengukuran Kandungan N ₂ dalam Biogas (%)	107
37. Data Emisi GRK (kg CO _{2e} /m ³ POME-hari).....	108

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Diagram Alir Kerangka Pemikiran	4
2. Diagram dan Neraca Masa Pengolahan Kelapa Sawit.....	7
3. Proses Pembentukan Gas Metana	15
4. TKKS Dalam Bentuk (a) Cabik dan (b) Giling.	23
5. Digester Anaerobik dan Pengukuran Produksi Biogas.	25
6. Susunan Digester Biogas Sistem Batch	26
7. Diagram Alir Penelitian.	27
8. Kandungan S-COD POME+TKKS Sebelum Ditambahkan Sludge.....	33
9. Kandungan S-COD Substrat POME-TKKS Setelah Ditambah Sludge/Inokulum.....	34
10. Kandungan S-COD Sesudah Fermentasi 40 Hari.	35
11. Efisiensi Reduksi S-COD Selama Fermentasi 40 Hari.	35
12. Kandungan TS Substrat POME-TKKS Sebelum Ditambah Sludge/Inokulum.....	39
13. Kandungan TS Substrat POME-TKKS dan Setelah Ditambah Sludge/Inokulum.....	40
14. Kandungan TS Sesudah Fermentasi 40 Hari.	41
15. Efisiensi Reduksi TS Selama Fermentasi 40 Hari	41
16. Kandungan VS Substrat Hari ke-0 Fermentasi	44
17. Kandungan VS Substrat pada Hari ke-40 Fermentasi	45
18. Efisiensi Reduksi VS Selama Fermentasi 40 Hari.....	45
19. Kandungan TVA Substrat Sebelum Ditambah Sludge	47
20. Kandungan TVA Substrat Setelah Ditambah Sludge dan Sebelum Fermentasi.....	48
21. Kandungan TVA Substrat Sesudah Fermentasi 40 Hari.....	49
22. Penurunan TVA Selama Fermentasi 40 Hari.....	50
23. Produktivitas Biogas Harian Selama 40 Hari Fermentasi.....	55
24. Produksi Biogas Kumulatif.....	57
25. Hasil Interpolasi Linear Kandungan CH ₄ (%) Harian.....	68

Gambar	Halaman
26. Produksi Harian Gas CH ₄ (mL).....	69
27. Produksi Kumulatif Gas CH ₄ (mL).....	69
28. Emisi gas rumah kaca (CO ₂ e) harian pada digester sistem kontinyu hasil simulasi dari data fermentasi sistem batch pada berbagai skenario waktu tinggal hidraulik (HRT).	77
29. Pengambilan POME.....	110
30. Pencabikan TKKS.....	110
31. Pengambilan TKKS	110
32. Penggilingan TKKS	110
33. Perendaman TKKS	111
34. Analisis COD	111
35. Pengisian Digester	111
36. Analisis Gas	111

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri kelapa sawit di Indonesia masih terus berkembang dan memainkan peran penting dalam perekonomian nasional. Dalam beberapa dekade terakhir, sektor ini telah menjadi salah satu yang utama, dengan luas perkebunan mencapai hampir 15 juta hektar pada tahun 2023 dan produksi *Crude Palm Oil* (CPO) sebesar 45,58 juta ton. Meskipun volume ekspor minyak sawit menurun dari 29,54 juta ton pada 2019 menjadi 27,49 juta ton pada 2023, nilai ekspornya justru meningkat signifikan, dari 15,57 miliar USD menjadi 23,97 miliar USD (BPS, 2024). Sebagai sektor strategis, industri kelapa sawit memberikan kontribusi besar terhadap Produk Domestik Bruto (PDB) negara.

Industri pengolahan kelapa sawit (PKS) menghasilkan limbah organik dalam jumlah besar. Limbah dalam bentuk padat maupun cair dapat berdampak negatif terhadap lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Salah satu limbah padat utama adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS), yang merupakan sisa terbesar dari proses pengolahan. Menurut (Kresnawaty et al., 2017) TKKS dapat mencapai sekitar 23% dari total tandan buah segar (TBS) yang diproses oleh pabrik kelapa sawit. Biasanya, limbah ini dikembalikan ke tanah sebagai mulsa atau kompos. Namun, bagi pabrik yang tidak memiliki perkebunan sendiri, TKKS tidak dapat dikembalikan ke lahan dan cenderung mengalami pembusukan yang berpotensi meningkatkan emisi gas rumah kaca (GRK). Oleh karena itu, diperlukan solusi efektif untuk mengelola limbah TKKS yang belum dimanfaatkan.

Selain limbah padat, industri PKS juga menghasilkan limbah cair seperti *Palm Oil Mill Effluent* (POME), dengan volume sekitar 0,6-1 m³ per ton TBS (Saragih and Hadrah, 2018). POME yang baru dihasilkan memiliki suhu sekitar 70-

80°C, tingkat keasaman (pH) antara 4,56-4,98, serta kandungan *Chemical Oxygen Demand* (COD) sebesar 57.000-60.400 mg/liter dan Total Suspended Solid (TSS) sekitar 0,23-5,44 g/L (Shintawati dkk., 2017). Kandungan COD yang tinggi dapat mencemari lingkungan perairan dan mengganggu ekosistem jika dibuang tanpa pengolahan. Namun, POME memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai substrat dalam produksi biogas, yang dapat menjadi solusi dalam pengelolaan limbah sekaligus sumber energi terbarukan.

Produksi biogas merupakan metode pengolahan limbah yang efektif dalam mengurangi emisi GRK. Selain menangkap gas yang dihasilkan dari pembusukan limbah, metode ini juga membantu menurunkan emisi GRK yang berasal dari penggunaan bahan bakar fosil pada mesin pengolahan. Limbah cair POME mengandung karbon dan nitrogen yang berperan penting dalam proses fermentasi, dimana karbon berfungsi sebagai sumber nutrisi utama bagi mikroba, sementara nitrogen berkontribusi dalam produksi enzim. Namun, kandungan nutrisi dalam POME masih relatif rendah, yang dapat membatasi efisiensi produksi biogas. Adapun limbah TKKS yang memiliki kandungan organik yang cukup tinggi, berpotensi menjadi sumber tambahan untuk POME dalam proses *co-digestion*. POME sendiri mengandung senyawa organik dalam jumlah besar, termasuk lignin, selulosa, dan hemiselulosa, dengan komposisi zat organik mencapai 20-25%, kandungan minyak dan lemak sekitar 0,5-2%, serta kandungan air yang dominan, yaitu sekitar 95-96% (Liew et.al., 2021).

Produksi biogas dari POME dapat ditingkatkan melalui proses *co-digestion* dengan TKKS. Efektivitas proses fermentasi ditunjukkan melalui pengurangan kandungan COD, dimana semakin tinggi nilai COD yang terdegradasi, semakin besar volume biogas yang dihasilkan. Namun, serat TKKS memiliki struktur yang keras dan sulit terdegradasi, sehingga dapat menghambat proses fermentasi. Salah satu solusi untuk mengatasi kendala tersebut adalah dengan merendam TKKS dalam POME. Proses perendaman ini dapat membantu melunakkan dinding sel dalam TKKS dengan penyerapan cairan sehingga memudahkan ekstraksi minyak dan bahan organik pada proses pengepresan.

Salah satu masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah bagaimana perendaman TKKS dilakukan untuk mendapatkan hasil terbaik.

1.2 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh perendaman tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dalam *palm oil mill effluent* (POME) terhadap kinerja proses *anaerobic digestion*. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk:

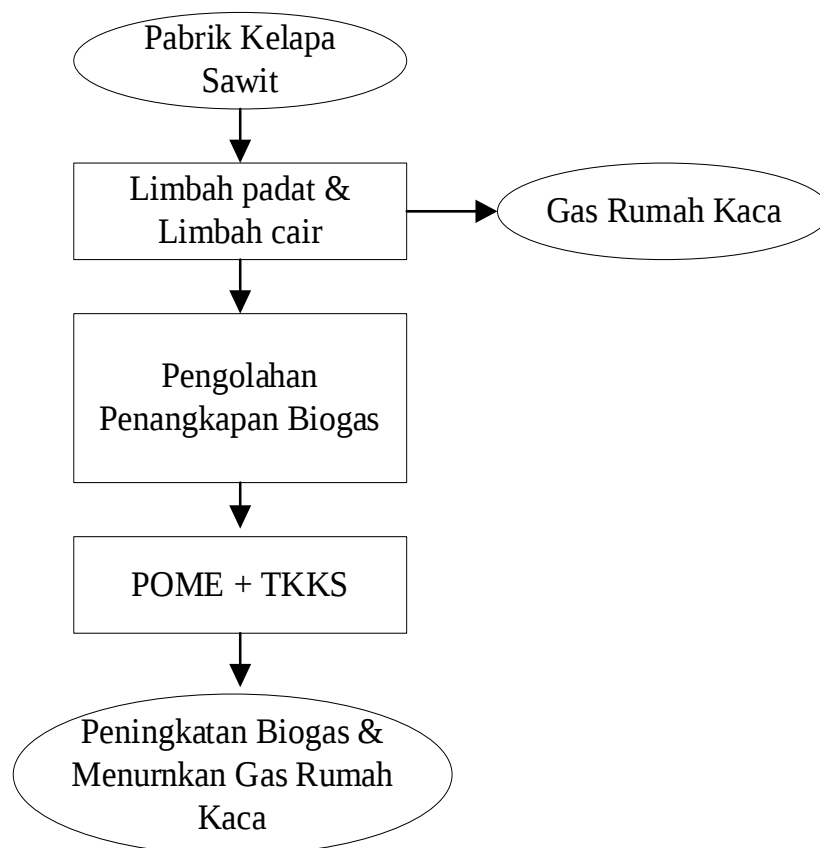
1. Menganalisis pengaruh variasi bentuk fisik dan waktu perendaman TKKS dalam POME terhadap efisiensi reduksi parameter kualitas POME.
2. Mengevaluasi pengaruh perlakuan *co-digestion* POME–TKKS terhadap produksi biogas, efisiensi konversi gas metana, hasil metana spesifik.
3. Mengidentifikasi perlakuan *co-digestion* POME–TKKS yang paling efisien pada sistem *anaerobic digestion* berbasis POME.
4. Menganalisis potensi reduksi emisi gas rumah kaca dan pemanfaatan energi biogas berdasarkan produksi metana yang dihasilkan.

1.3 Kerangka Pemikiran

Limbah merupakan hasil sampingan dari aktivitas industri, termasuk dalam proses pengolahan kelapa sawit. Limbah padat yang dihasilkan dari pabrik kelapa sawit meliputi serat, cangkang, residu padat, serta TKKS (Rahmawati, 2017). Di antara jenis limbah tersebut, TKKS menjadi komponen terbesar dalam kategori limbah padat. Saat ini, TKKS umumnya dimanfaatkan sebagai mulsa di lahan perkebunan. Namun, proses dekomposisinya berlangsung lambat, sehingga unsur hara yang terkandung di dalamnya berisiko hilang sebelum dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Jika tidak dikelola dengan baik, TKKS juga berpotensi meningkatkan emisi GRK, yang dapat berdampak negatif terhadap lingkungan.

Selain menghasilkan limbah padat, industri kelapa sawit juga memproduksi limbah cair dalam jumlah besar. Pengelolaan limbah cair secara konvensional yang umumnya menggunakan kolam anaerobik, dapat menghasilkan emisi metana (CH₄) yang memiliki potensi pemanasan global hingga 27 kali lebih besar

dibandingkan karbon dioksida (CO₂). Menurut Harsono et al. (2015), limbah cair kelapa sawit atau POME berkontribusi terhadap 74,22% dari total emisi GRK yang dihasilkan oleh pabrik kelapa sawit. Untuk mengurangi dampak lingkungan, pemanfaatan biogas yang diekstraksi dari POME dapat menjadi solusi efektif. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pemulihan dan penggunaan biogas sebagai sumber energi dapat secara signifikan menekan emisi GRK di industri kelapa sawit. Studi yang dilakukan di pabrik kelapa sawit SMART Hanau, Kalimantan Tengah, menemukan bahwa pemanfaatan biogas mampu mengurangi emisi GRK secara signifikan (De Rosa et al., 2022). Biogas yang dihasilkan kemudian digunakan sebagai bahan bakar untuk boiler pabrik dan mesin pembangkit listrik, yang berkontribusi pada penurunan emisi bersih hingga 60% dan 59%. Studi lain juga menunjukkan bahwa pemanfaatan biogas dapat mengurangi emisi GRK di pabrik kelapa sawit sebesar 70,59% hingga 84,71% (Sari et al., 2019).



Gambar 1. Diagram Alir Kerangka Pemikiran

Pemanfaatan biogas dari limbah cair dianggap sebagai alternatif pengolahan limbah yang efektif. Produksi dan pemanfaatan biogas berpotensi mengurangi emisi GRK di pabrik kelapa sawit. Salah satu strategi untuk meningkatkan produksi biogas adalah dengan menambahkan limbah padat ke dalam limbah cair yang difermentasi. Dalam hal ini, perendaman TKKS dalam POME diharapkan dapat meningkatkan kandungan bahan organik dalam POME sekaligus mengurangi emisi GRK yang dihasilkan dari limbah tersebut. Untuk menentukan metode terbaik dalam meningkatkan produksi biogas, perendaman TKKS dilakukan dalam berbagai kondisi. Diagram alir kerangka pemikiran terkait dapat dilihat pada Gambar 1.

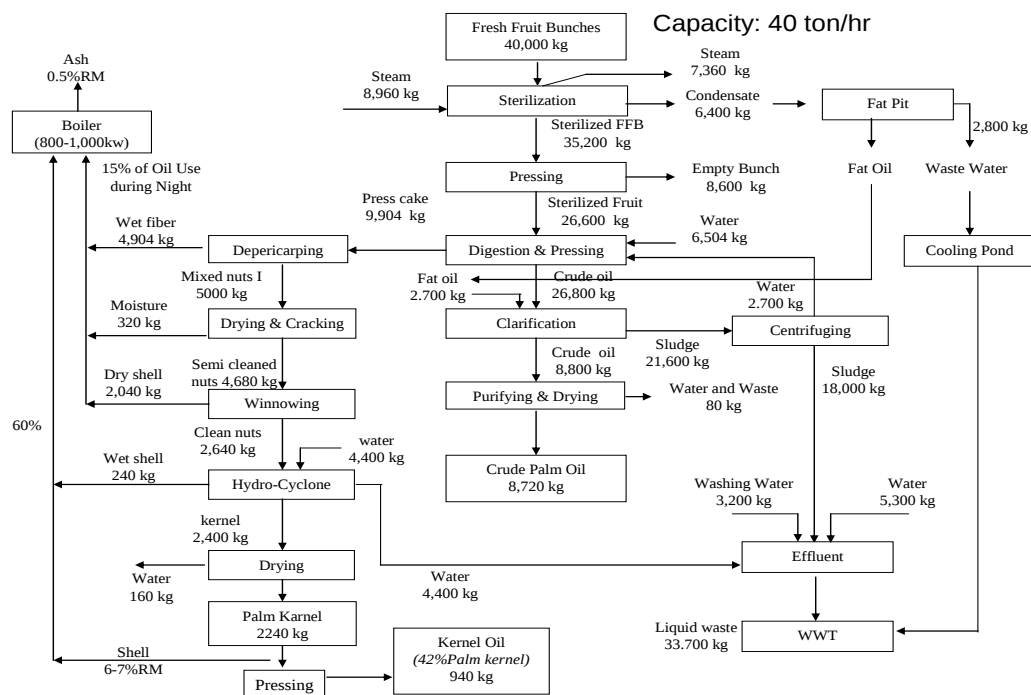
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Pengolahan Kelapa Sawit

Minyak kelapa sawit mentah atau yang lebih dikenal dengan istilah *Crude Palm Oil* (CPO) diekstraksi dari tandan buah segar (TBS) melalui serangkaian tahapan (Pahan, 2011). Tahapan-tahapan utama dalam proses ini meliputi:

- 1) Pertama adalah pengadaan bahan baku, yaitu penerimaan dan penyimpanan TBS di pabrik (loading ramp).
- 2) Kedua dilanjutkan dengan proses sterilisasi, dimana TBS dikukus dengan uap panas pada suhu 135-150°C dan tekanan 2,5-3 atm selama 75-90 menit. Proses ini bertujuan untuk menghentikan aktivitas enzim yang dapat merusak minyak membentuk asam lemak bebas (ALB) serta mempermudah perontokan buah dari tandannya.
- 3) Tahap ketiga penebahan (stripping), yaitu pemisahan buah sawit dari tandannya menggunakan alat pemisah drum berputar (rotating drum thresher), yang bekerja dengan mengangkat dan menjatuhkan TBS berulang kali hingga buah terlepas.
- 4) Kemudian tahap keempat yaitu pelumatan (digestion), dilakukan di dalam digester dengan menyuntikkan uap panas bersuhu 85-95°C ke buah sawit yang telah terpisah. Proses ini membantu memisahkan mesokarp dari biji serta menghancurkan sel-sel yang mengandung minyak.
- 5) Kelima selanjutnya adalah proses engepresan, yaitu ekstraksi minyak dari mesokarp menggunakan twin screw extractor pada tekanan 50 kg/cm² selama 6-10 menit. Air panas bersuhu 85-90°C ditambahkan untuk membantu proses pengeluaran minyak dari sel mesokarp.

6) Terakhir tahap keenam merupakan proses klarifikasi, yaitu pemisahan CPO dari air, serat, dan padatan lainnya dalam tangki klarifikasi pada suhu 90°C. Minyak yang telah dipisahkan kemudian melewati proses sentrifugasi dan pengeringan vakum sebelum disimpan. CPO yang dihasilkan memiliki kandungan air dan kotoran kurang dari 0,1%. Setiap tahapan ini berperan penting dalam memastikan kualitas minyak sawit yang dihasilkan serta efisiensi proses pengolahan.



Sumber: Faisal and Taleb, 2013

Gambar 2. Diagram dan Neraca Masa Pengolahan Kelapa Sawit

Gambar 2 menggambarkan diagram alir dan neraca massa dalam proses ekstraksi CPO pada industri pengolahan kelapa sawit (PKS) dengan kapasitas produksi 40 ton per jam. Berdasarkan perhitungan dalam diagram tersebut, hanya sekitar 21,8% dari total berat TBS yang diolah menjadi CPO sebagai produk utama. Selain CPO, industri kelapa sawit juga menghasilkan berbagai jenis limbah padat, seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS), sabut, cangkang, dan abu boiler. Di antara limbah tersebut, TKKS merupakan yang paling dominan, dengan jumlah sekitar 22% dari total berat TBS yang diolah. Selain itu, pabrik kelapa sawit juga

menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar, yakni sekitar 60-100% dari berat awal TBS yang diproses.

2.2 Karakteristik TKKS

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah padat yang dihasilkan dari proses penebahan (*stripping*), di mana tandan buah segar (TBS) dipisahkan menjadi brondolan. TKKS menjadi limbah padat terbesar dalam pengolahan minyak sawit mentah (CPO), dengan jumlah sekitar 22-23% dari total TBS yang diolah (Kresnawaty dkk., 2017). Secara nasional, potensi biomassa TKKS di Indonesia setara dengan produksi CPO, yaitu sekitar 45 juta ton per tahun. Jika tidak dikelola dengan baik, volume limbah yang besar ini dapat menimbulkan permasalahan lingkungan. Secara komposisi, TKKS mengandung berbagai unsur organik dan mineral, seperti 42,8% C, 2,90% K₂O, 0,80% N, 0,22% P₂O₅, 0,30% MgO, serta unsur mikro lainnya, termasuk 10 ppm B, 23 ppm Cu dan 51 ppm Zn. Mineral esensial seperti kalium (1,12%) dan kalsium (0,16%) juga terdapat dalam TKKS (Lim et al., 2015). Komponen utama TKKS dapat dilihat pada Tabel 1. Hingga saat ini, TKKS umumnya dimanfaatkan sebagai mulsa di lahan perkebunan dengan dosis sekitar 37,5 ton/ha/tahun. Penggunaan mulsa TKKS dapat memberikan berbagai manfaat, seperti meningkatkan pertumbuhan vegetatif, memperbaiki penyerapan nutrisi oleh akar, serta meningkatkan produktivitas tanaman kelapa sawit. Selain itu, mulsa TKKS juga berperan dalam mengurangi erosi, mencegah kehilangan unsur hara, menurunkan suhu permukaan tanah, serta menyediakan suplai nutrisi secara perlahan dalam jangka waktu yang panjang.

Tabel 1. Komponen Kimia Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

No.	Parameter	Kandungan (%)
1	Selulosa	45,95
2	Hemiselulosa	22,84
3	Lignin	16,49
4	Lemak	5,35
5	Protein	4,45

Sumber: Bariyanto dkk., 2015

Limbah padat TKKS dimanfaatkan sebagai kompos untuk menggantikan pupuk kimia di beberapa perkebunan kelapa sawit. Penggunaan kompos TKKS menawarkan berbagai keunggulan yang signifikan. Pertama, kompos ini mampu memperbaiki struktur tanah, menjadikannya lebih gembur dan mendukung pertumbuhan tanaman. Selain itu, kompos TKKS juga berperan dalam meningkatkan kelarutan unsur hara esensial yang dibutuhkan tanaman. Keunggulan lainnya adalah sifatnya yang homogen, sehingga mudah diaplikasikan ke lahan pertanian. Selain itu, penggunaan kompos TKKS juga dapat mengurangi risiko sebagai media pembawa hama, sehingga berkontribusi pada peningkatan kualitas pertanian secara keseluruhan (Hasibuan dkk., 2023). Proses pengomposan TKKS lebih efektif dilakukan dalam kondisi aerobik, tetapi metode ini memerlukan peralatan khusus seperti mesin pengaduk serta tenaga kerja yang cukup besar (Kananam et al., 2011). Hingga saat ini, sebagian besar pabrik kelapa sawit (PKS) masih mengandalkan metode tradisional, seperti pembakaran atau langsung diaplikasikan ke lahan sebagai mulsa (Chiew and Shimada, 2013).

Produksi biogas dengan memanfaatkan TKKS sebagai substrat melalui proses anaerobik kering (*dry anaerobic*) telah diteliti sebelumnya (Haryanto, Sugianti, et al., 2018). Namun, serat TKKS yang bersifat keras membuatnya sulit terdegradasi secara biologis. Untuk mengatasi kendala ini dan meningkatkan kandungan bahan organik dalam POME, senyawa organik yang mudah larut, seperti minyak yang menempel pada TKKS, dapat diekstraksi dan dicampurkan dengan POME. Dengan metode ini, produksi biogas dari POME yang telah diperkaya dengan komponen TKKS yang lebih mudah terurai berpotensi meningkat secara signifikan.

2.3 Karakteristik POME

Proses pengolahan minyak kelapa sawit menjadi CPO membutuhkan air dalam jumlah besar, yang mengakibatkan tingginya produksi limbah cair. Secara umum, setiap 1 ton TBS yang diolah menghasilkan sekitar 0,5 - 1,0 ton limbah cair. Limbah ini berasal dari berbagai tahap pengolahan, antara lain sterilisasi TBS yang menghasilkan air kondensat sekitar 36%, proses klarifikasi dan pemurnian

CPO yang menyumbang sekitar 60% air limbah, serta proses hydro-cyclone yang menyumbang sekitar 4%. Karakteristik limbah cair yang dihasilkan pada setiap tahapan pengolahan kelapa sawit dapat dilihat dalam Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Air Limbah dari Setiap Tahap Proses Pengolahan CPO

Parameter ^{*)}	Sterilisasi TBS	Klarifikasi and Pemurnian CPO	Proses Hydro- cyclone
pH	5,0	4,5	--
Minyak dan Lemak	4.000	7.000	300
<i>BOD</i> (3 hari, 30°C)	23.000	29.000	5.000
<i>COD</i>	47.000	64.000	15.000
Padatan Terendapkan (<i>SS</i>)	5.000	23.000	7.000
Padatan Terlarut (<i>DS</i>)	34.000	22.000	100
Nitrogen Amonia (<i>AN</i>)	20	40	--
Nitrogen Total (<i>TN</i>)	500	1.200	100

^{*)} Catatan: Semua satuan dalam mg/L, kecuali pH, Sumber: Thani et al., 1999

Sementara itu, sebelum melalui Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL), limbah cair industri kelapa sawit umumnya berbentuk cairan pekat berwarna coklat tua dengan suhu sekitar 80-90°C, sebagaimana tercantum dalam Tabel 3.

Tabel 3. Komposisi POME Sebelum Diolah di IPAL

Parameter Umum ^{*)}	Rataan	Kisaran	Logam/ Unsur lain	Rataan
pH	4,3	4,4-5,2	P	180,0
Minyak dan lemak	6.000	150-18.000	K	2.270,0
<i>BOD</i> (3 hari, 30°C)	25.000	10.000-44.000	Mg	615,0
<i>COD</i>	50.000	16.000-100.000	Ca	440,0
Total Padatan (<i>TS</i>)	40.500	11.500-79.000	Bo	7,6
<i>Total Volatile Solid (TVS)</i>	34.000	9.000-72.000	Fe	47,0
Padatan Terlarut (<i>SS</i>)	18.000	5.000-54.000	Mn	2,0
Nitrogen Amonia (<i>AN</i>)	35	4-80	Cu	0,9
Nitrogen Total (<i>TN</i>)	750	80-1.400	Zn	2,3

^{*)} Catatan: Semua satuan dalam mg/L, kecuali pH, Sumber: Thani et al., 1999

Sistem *pond* untuk pengolahan air limbah telah diterapkan di industri kelapa sawit sejak tahun 1990. Dengan sistem ini, air limbah yang dibuang dapat memenuhi standar baku mutu lingkungan dan tidak mencemari ekosistem sekitar. Proses pengolahan umumnya dilakukan secara bertahap, dimulai dengan sistem biologis anaerobik, kemudian dilanjutkan dengan proses biologis fakultatif dan aerobik. Setelah melalui kolam anaerobik, limbah cair industri kelapa sawit tetap mengandung unsur hara yang bermanfaat bagi tanaman. Karena bersifat organik dan tidak mengandung bahan berbahaya serta beracun (B3), limbah ini dapat dimanfaatkan untuk mendukung perkebunan kelapa sawit. Mengingat kandungan nutrisinya yang tinggi dan tantangan dalam memastikan sistem IPAL memenuhi standar mutu, limbah yang telah diolah sering dimanfaatkan untuk irigasi tanaman kelapa sawit melalui metode *Land Application*. Namun, sistem pengolahan limbah dengan metode *pond* juga memiliki beberapa kelemahan. Sistem ini memerlukan lahan yang luas untuk kolam penampungan, perawatan rutin, serta pengelolaan lumpur yang terbentuk di dalamnya. Selain itu terdapat juga masalah seperti pendangkalan kolam, kehilangan sebagian nutrisi, potensi pencemaran sungai, serta pelepasan gas metana yang berkontribusi terhadap efek rumah kaca (Muhaemin, 2018).

2.4 Produksi Biogas

Biogas merupakan salah satu gas alami yang berasal dari proses fermentasi material organik dengan bantuan bakteri yang dapat hidup dengan kondisi anaerob dan bersifat mudah terbakar (*flammable*). Campuran gas dikatakan bersifat mudah terbakar jika kandungan metan mencapai lebih dari 50 %. Komposisi biogas yang dihasilkan tergantung pada jenis bahan baku yang akan digunakan. Secara umum, komposisi biogas terdiri atas 50-70% gas metan, 24-45% gas karbondioksida serta 10% gas-gas lain (sulfur, nitrogen, hidrogen, uap air dan amoniak) (Novita dkk.,2018). Secara lebih rinci komposisi biogas disajikan pada Tabel 4.

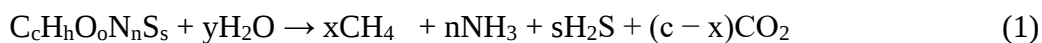
Tabel 4. Komposisi Biogas

No	Komposisi	Nilai	Satuan
1	Metana (CH ₄)	50 – 79	%
2	Karbon dioksida (CO ₂)	24 – 45	%
3	Oksigen (O ₂)	0,1-0,3	%
4	Karbon monooksida (CO)	70	Ppm
5	Hidrogen sulfida (H ₂ S)	-	Ppm

Sumber: Novita et al., 2018; Mardawati et al., 2024

Biogas adalah sumber energi terbarukan yang berpotensi memenuhi kebutuhan bahan bakar secara berkelanjutan. Dengan densitas energi sekitar 20-25 MJ/m³, biogas dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, termasuk pembangkit listrik dan bahan bakar alternatif. Komponen utama dalam biogas yang dapat digunakan sebagai bahan bakar adalah metana (CH₄). Jika kandungan metana dalam biogas melebihi 40%, biogas menjadi lebih mudah terbakar dan tergolong sebagai bahan bakar berkualitas tinggi karena nilai kalorinya yang tinggi (Damayanti dkk., 2021). Secara umum, semakin tinggi konsentrasi metana dalam biogas, semakin besar pula energi yang dapat dihasilkan.

Produksi biogas dari substrat organik berlangsung melalui reaksi redoks internal, di mana molekul organik diuraikan menjadi metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂). Proses ini melibatkan aktivitas mikroorganisme anaerobik yang mencerna bahan organik dan menghasilkan gas sebagai produk akhirnya. Perkiraan produksi metana dapat dihitung menggunakan Persamaan (1) dari Buswell (Deublein and Steinhauser, 2010):



Dimana $x = 1/8(4c + h - 2o - 3n - 2s)$

$y = 1/4(4c - h - 2o + 3n + 2s)$

Komposisi substrat dan kemampuannya untuk terdegradasi secara biologis mempengaruhi perbandingan metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan dalam proses produksi biogas. Dalam kondisi sederhana, karbohidrat

seperti glukosa ($C_6H_{12}O_6$) serta pati atau selulosa ($C_nH_{n-2}O_{n-1}$) akan terurai menghasilkan CH_4 dan CO_2 dalam rasio seimbang, yaitu 50:50. Untuk substrat berbasis protein, rasio CH_4/CO_2 yang dihasilkan adalah sekitar 5,5:4,5, sedangkan untuk substrat yang mengandung lemak dan minyak, perbandingan tersebut lebih tinggi, yaitu 70:30. Dalam persamaan stoikiometri (Persamaan 1), jumlah CH_4 yang dihasilkan merupakan nilai maksimum secara teoritis. Proses ini tidak berfokus pada pembentukan biomassa bakteri, melainkan pada konversi bahan organik menjadi gas. Dengan mengetahui komposisi kimia dari limbah cair yang digunakan sebagai substrat, jumlah CH_4 yang dihasilkan serta tingkat degradasi bahan organik dapat dihitung secara lebih akurat.

Cara lain untuk menghitung produksi metana adalah dengan memperkirakan degradasi *Chemical Oxygen Demand* (COD) dalam reaktor anaerobik (digester). Hubungan ini dapat dijelaskan melalui reaksi berikut:



Selain itu, degradasi anaerobik bahan organik sederhana, seperti asam asetat (CH_3COOH), juga menghasilkan metana dan karbon dioksida melalui reaksi berikut:



Berdasarkan persamaan reaksi sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa setiap satu mol bahan organik yang terdegradasi dalam kondisi anaerobik akan menghasilkan satu mol metana (CH_4). Sementara itu, satu mol metana membutuhkan dua mol oksigen untuk teroksidasi sepenuhnya menjadi karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O). Sehingga, untuk setiap 16 g CH_4 yang dihasilkan dan hilang ke atmosfer akan berarti pengurangan (*removal*) 64 g COD dari limbah. Artinya, setiap gram COD yang terdekomposisi memiliki potensi menghasilkan 0,25 g CH_4 atau 15,625 mmol CH_4 . Ketika kondisi suhu dan tekanan normal, hal ini berarti sebesar 350 mL CH_4 untuk setiap gram COD yang terdegradasi (atau 350 L = 0,35 m³

untuk setiap kg COD terdegradasi). Rumus umum untuk menentukan produksi teoritis metana per gram degradasi COD dari limbah yaitu:

$$V_{CH_4} = 0,35 \times \frac{COD_r}{K(t)} \times K_{(t)} \quad (4)$$

Dimana V_{CH_4} adalah volume metana yang dihasilkan (L), COD_r adalah beban COD yang terdegradasi dan dikonversi menjadi metana (gCOD), dan $K(t)$ adalah factor koreksi untuk suhu kerja reaktor (digester) (gCOD/L), dicari dari:

$$K(t) = \frac{P \times K}{R \times (273 + T)} \quad (5)$$

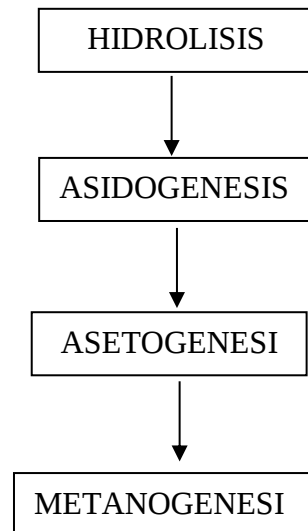
Dimana P adalah tekanan atmosfer (1 atm), K adalah COD yang setara dengan satu mol CH_4 (64 gCOD/mol), R adalah konstanta universal gas (0,0826 atm. L/mol.K), dan T adalah suhu kerja reaktor ($^{\circ}C$).

2.5 Produksi Biogas dari POME

Biogas merupakan hasil dari fermentasi mikrobiologis material organik yang terjadi dalam kondisi anaerob dengan bantuan bakteri. Secara umum, biogas terdiri dari sekitar 60% metana (CH_4) dan 40% karbon dioksida (CO_2) (M. Y. M. Ali et al., 2015). Material organik yang digunakan dalam proses ini dapat terurai secara alami di tanah dan mengandung berbagai unsur seperti karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O), serta unsur tambahan seperti nitrogen (N), sulfur (S), dan fosfor (P). Salah satu limbah cair yang dihasilkan oleh industri kelapa sawit, yaitu Palm Oil Mill Effluent (POME), memiliki potensi besar sebagai substrat dalam proses fermentasi biogas. Pemanfaatan POME sebagai bahan baku biogas tidak hanya membantu mengurangi pencemaran lingkungan tetapi juga menghasilkan energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan kembali.

Tahapan fermentasi POME dibagi menjadi tiga tahap, yaitu: (1) Tahap hidrolisa; (2) Tahap pembentukan asam (asidogenesis dan acetogenesis); dan (3) Tahap pembentukan metana (metanogenesis) (Soeprijanto, 2017). Proses-proses yang

terjadi dalam fermentasi bahan organik menjadi biogas terdiri dari empat proses seperti pada Gambar 3:



Gambar 3. Proses Pembentukan Gas Metana

1. Hidrolisis

Mikroorganisme hidrolitik berperan dalam menguraikan senyawa organik kompleks menjadi molekul-molekul sederhana melalui proses hidrolisis, di mana air digunakan untuk memutus ikatan kimia dalam bahan organik. Proses ini memungkinkan pemecahan senyawa makromolekul seperti karbohidrat, protein, dan lemak menjadi bentuk yang lebih sederhana dan mudah dikonsumsi oleh bakteri fermentatif. Hasil dari reaksi hidrolitik ini meliputi molekul-molekul rantai pendek seperti glukosa, asam amino, asam lemak, etanol, dan karbon dioksida (CO_2). Selain itu, proses ini juga menghasilkan energi yang digunakan oleh bakteri fermentatif untuk mendukung pertumbuhan dan aktivitas metaboliknya.

2. Asidogenesis

Senyawa hasil hidrolisis yang telah terurai menjadi bentuk sederhana kemudian dimetabolisme oleh bakteri asidogenik, baik yang bersifat hidrolitik maupun non-hidrolitik. Produk utama yang dihasilkan dalam

tahap ini meliputi asetat, propionat, butirat, hidrogen (H_2), dan karbon dioksida (CO_2). Selain itu, bakteri fermentatif juga menghasilkan berbagai produk sampingan, seperti formiat, laktat, valerat, metanol, etanol, butandiol, dan aseton.

3. Asetogenesis

Proses asetogenesis terjadi pada produk-produk hasil fermentasi dari tahap asidogenesis, seperti asam propionat, asam butirat, dan senyawa organik lainnya, dikonversi menjadi asam asetat (CH_3COOH), karbon dioksida (CO_2), dan hidrogen (H_2). Proses ini dilakukan oleh bakteri asetogenik, yang mampu menguraikan molekul-molekul sederhana menjadi senyawa yang dapat digunakan oleh bakteri metanogen dalam tahap selanjutnya.

4. Metanogenesis

Proses metanogenesis merupakan tahap akhir dalam proses fermentasi anaerobik, di mana gas metana (CH_4) terbentuk. Proses ini dilakukan oleh bakteri metanogen dari senyawa asetat atau hidrogen (H_2) dan karbon dioksida (CO_2).

Ke-empat proses ini berlangsung dalam lingkungan anaerobik, menghasilkan biogas yang sebagian besar terdiri dari metana, yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan.

Fermentasi biogas yang memanfaatkan POME sebagai substrat telah banyak dilakukan penelitiannya. Studi yang dilakukan oleh Suryani dkk., (2018) menunjukkan bahwa konsentrasi biogas tertinggi, yaitu 195,41 ppm, diperoleh pada kondisi pH 8,5 dengan waktu fermentasi selama 13 hari menggunakan digester berpengaduk. Penelitian lain oleh Aznury dkk., (2018) mengevaluasi produksi biogas dengan rasio POME dan starter 50:50. Pada sistem fed batch, rendemen biogas tertinggi terjadi pada hari ke-16 dengan pengadukan 100 rpm, menghasilkan metana sebesar 9,67%. Sementara itu, pada sistem batch, rendemen biogas tertinggi juga tercapai pada hari ke-16 dengan pengadukan yang sama, menghasilkan metana sebesar 7,927%.

Berdasarkan penelitian Kurniati dkk., (2021), terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi fermentasi biogas, yaitu:

1. Waktu fermentasi, dimana semakin lama proses fermentasi, semakin besar produksi biogas yang dihasilkan. Namun, pada titik tertentu, penambahan waktu fermentasi tidak lagi meningkatkan volume biogas karena kandungan bahan organik dalam substrat telah habis.
2. Nilai pH fermentasi mempengaruhi produksi biogas. Fermentasi akan berlangsung lebih optimal ketika pH fermentasi mendekati netral (sekitar pH 7). Kondisi ini memungkinkan proses fermentasi berlangsung secara efisien dan menghasilkan biogas dalam jumlah yang lebih besar.
3. Pengadukan dalam proses fermentasi membantu meningkatkan produksi biogas. Semakin baik pengadukan, semakin optimal proses fermentasi yang terjadi. Selain itu, durasi pengadukan yang lebih lama juga dapat berkontribusi pada peningkatan produksi biogas.
4. Peningkatan konsentrasi inokulum juga berbanding lurus dengan peningkatan produksi biogas. Namun, jika kandungan inokulum terlalu tinggi, produksi biogas justru dapat menurun. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya persaingan antar mikroorganisme, yang dapat menghambat proses penguraian bahan organik secara optimal.

2.5 Co-Digestion POME-TKKS

Produksi biogas merupakan hasil dari proses degradasi anaerobik menjadi senyawa sederhana berbentuk gas oleh bakteri-bakteri anaerobik. Efisiensi fermentasi biogas sangat bergantung pada komposisi kimia substrat yang digunakan, terutama nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang mengalami degradasi selama fermentasi. Pada umumnya biogas terdiri atas gas yang mudah terbakar yaitu metana (CH_4) sekitar 50 -70 %. Winanti dkk., (2019) mengkaji metode pengolahan biogas secara anaerobik menggunakan reaktor tipe *Fixed Bed*, yang dapat meningkatkan efisiensi produksi biogas. Dalam penelitian ini, waktu tinggal dalam reaktor (*Hydraulic Retention Time* atau HRT) dapat dikurangi

menjadi 20 hari dengan pemasukan *Palm Oil Mill Effluent* (POME) optimal sebesar 150 liter/hari. Hasilnya menunjukkan bahwa kandungan metana dalam biogas mencapai 66%, dengan produksi metana sebesar 0,52 liter per gram COD yang terdegradasi. Secara teori, setiap 1 gram COD yang terurai dapat menghasilkan sekitar 0,35-liter gas metana (Castrillón et al., 2013).

Karena POME dan TKKS memiliki kandungan bahan organik yang tinggi, keduanya dapat dimanfaatkan sebagai substrat dalam produksi biogas melalui proses dekomposisi anaerobik. POME telah banyak digunakan sebagai substrat biogas hingga ke tahap aplikasi praktis, karena bentuknya yang cair memudahkan pengolahan dalam sistem fermentasi anaerobik. Meskipun TKKS juga kaya akan bahan organik, pemanfaatannya sebagai substrat biogas masih jarang dilakukan. Hal ini disebabkan oleh struktur seratnya yang keras dan sulit terdekomposisi dalam kondisi anaerobik, sehingga memerlukan perlakuan khusus sebelum dapat dimanfaatkan secara optimal dalam produksi biogas.

Salah satu cara memanfaatkan TKKS dalam produksi biogas adalah melalui proses co-digestion. Mengingat TKKS terdiri dari serat yang sulit terdegradasi, salah satu strategi yang dapat diterapkan adalah melunakan sel-sel dinding melalui proses perendaman dengan POME. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan kandungan COD dalam substrat, yang pada akhirnya akan meningkatkan produksi biogas. Pendekatan ini serupa dengan penambahan limbah padat onggok ke dalam limbah cair tapioka, yang terbukti dapat meningkatkan kandungan COD serta produksi biogas dari limbah cair industri tapioka (Hasanudin et al., 2023). Karena produksi metana bergantung pada jumlah COD yang mengalami degradasi, semakin tinggi kandungan COD dalam substrat, semakin besar peluang dekomposisi bahan organik, yang pada akhirnya menghasilkan lebih banyak metana atau biogas. Nilai COD sendiri merupakan salah satu parameter utama dalam menentukan kualitas air dan air limbah. Nilai COD mengacu pada jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi bahan organik dalam air secara kimiawi hingga menjadi produk akhir anorganik. Dengan meningkatkan kandungan COD dalam substrat, efisiensi produksi biogas dapat lebih dioptimalkan.

2.7 Emisi GRK

Gas rumah kaca (GRK) adalah gas di atmosfer yang mampu menyerap dan memancarkan radiasi inframerah dari sinar matahari. GRK dapat terbentuk secara alami maupun dihasilkan dari aktivitas manusia (*anthropogenic*). Radiasi inframerah yang terperangkap dalam GRK menyebabkan peningkatan suhu permukaan bumi, yang selanjutnya berkontribusi terhadap perubahan iklim (Wahyudi, 2019). Keberadaan GRK sebenarnya diperlukan untuk menjaga kestabilan suhu bumi. Namun, peningkatan konsentrasinya menyebabkan atmosfer semakin menebal, sehingga lebih banyak panas yang terperangkap, yang pada akhirnya meningkatkan suhu bumi atau dikenal sebagai pemanasan global (Budiarso, 2019). Sejak era pra-industri, aktivitas manusia telah secara signifikan meningkatkan emisi GRK ke atmosfer. Akumulasi gas ini berkontribusi terhadap meningkatnya konsentrasi GRK, yang memperburuk dampak pemanasan global serta perubahan iklim, menjadi isu lingkungan yang semakin mendesak untuk ditangani.

Badan Antarpemerintah *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) dalam kajian dan laporannya berfokus pada empat jenis utama GRK, yaitu karbon dioksida (CO_2), dinitrogen oksida (N_2O), metana (CH_4), serta gas-gas terflorinasi seperti hidrofluorokarbon (HFCs), perfluorokarbon (PFCs), dan sulfur heksafluorida (SF_6) (IPCC, 2006). IPCC merupakan organisasi antarpemerintah di bawah Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) yang bertugas membahas isu-isu perubahan iklim. Salah satu metode untuk mengukur dampak gas rumah kaca adalah dengan menggunakan Potensi Pemanasan Global (*Global Warming Potential* atau GWP). Nilai GWP merupakan ukuran yang digunakan untuk mengonversi emisi gas non- CO_2 menjadi setara dengan gas CO_2 guna mendapatkan total emisi yang lebih representatif. GWP-100 menunjukkan potensi sebuah GRK untuk memanaskan atmosfer selama periode 100 tahun. Perhitungan emisi setara CO_2 dilakukan dengan mengalikan jumlah total masing-masing GRK dengan nilai GWP-nya. Nilai GWP untuk beberapa gas rumah kaca utama dapat dilihat di Tabel 5:

Tabel 5. Nilai Global Warming Potential

Parameter	Nilai Global Warming Potential (GWP)		
	GWP-20	GWP-100	GWP-500
CO ₂	1	1	1
CH ₄ Fossil	82.5 ± 25.8	29.8 ± 11	11 10.0 ± 3.8
CH ₄ Non-Fossil	79.7 ± 25.8	27.0 ± 11	7.2 ± 3.8
N ₂ O	273 ± 118	273 ± 130	130 ± 64
HFC-32	2693 ± 842	771 ± 292	220 ± 87
CFC-11	8321 ± 2419	6226 ± 2297	2093 ± 865

Sumber: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2023).

Pemanasan global merupakan fenomena peningkatan suhu rata-rata bumi dari tahun ke tahun akibat efek rumah kaca (*greenhouse effect*). Efek ini terjadi ketika emisi gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dinitrogen oksida (N₂O), dan klorofluorokarbon (CFC) meningkat, sehingga energi matahari terperangkap dalam atmosfer bumi dan menyebabkan peningkatan suhu global. Menurut IPCC, sumber emisi gas rumah kaca dikategorikan ke dalam enam sektor utama. Sektor energi termasuk pembakaran bahan bakar fosil untuk listrik, transportasi, dan industri. Sektor industri mencakup produksi semen, baja, dan bahan kimia yang menghasilkan emisi non-energi. Sektor penggunaan zat pelarut dan produk lainnya termasuk emisi dari penggunaan bahan kimia industri. Sektor pertanian yang menghasilkan emisi dari produksi makanan, fermentasi enterik, dan pengelolaan pupuk. Sektor tata guna lahan dan kehutanan mencakup perubahan penggunaan lahan dan deforestasi yang mengurangi kapasitas penyerapan karbon. Sektor limbah dari pengelolaan sampah dan air limbah. Untuk mengurangi efek rumah kaca, berbagai solusi dapat diterapkan, seperti pengurangan emisi gas rumah kaca melalui kebijakan energi bersih, pengembangan teknologi ramah lingkungan, serta peningkatan kesadaran masyarakat dalam menggunakan sumber daya yang lebih berkelanjutan (Irma, 2024).

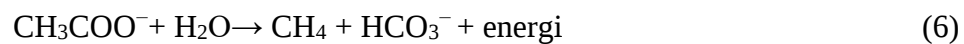
Gas metana (CH₄) merupakan salah satu gas rumah kaca yang berasal dari sumber alami maupun antropogenik (aktivitas manusia). Sumber alami, terutama lahan

basah tropis, sawah, serta dalam sistem pencernaan hewan ruminansia. Sumber-sumber antropogenik dari pertanian (ruminansia, pupuk kandang, dan padi), pengelolaan limbah (tempat pembuangan akhir dan pengolahan limbah), produksi dan penggunaan bahan bakar fosil (batu bara, minyak, dan gas alam), dan pembakaran biomassa (termasuk *biofuel*). Metana memiliki efek pemanasan global sekitar 30 kali lebih besar dibandingkan karbon dioksida (CO₂) karena kemampuannya yang lebih efektif dalam memantulkan radiasi inframerah (Basu et al., 2022). Salah satu cara untuk memanfaatkan gas metana adalah melalui produksi biogas, yang dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan.

Gas metana diproduksi dalam fermentasi biogas melalui proses yang disebut metanogenesis. Metanogenesis terjadi melalui dua jalur utama (Soeprijanto, 2017), yaitu:

1. Metanogenesis Asetoklastik (Asetotropik),

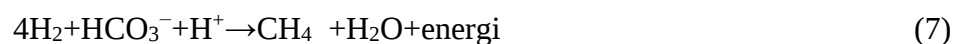
Konversi asam asetat menjadi metana oleh bakteri acetoclastic methanogens:



Pada jalur ini, bakteri memecah asam asetat menjadi metana (CH₄) dan ion bikarbonat (HCO₃⁻).

2. Metanogenesis Hidrogenotrofik (Hidrogenotropik)

Konversi hidrogen menjadi metana dengan memanfaatkan karbon dioksida oleh hydrogen-utilizing methanogens:



Dalam jalur ini, bakteri metanogen obligat menggunakan hidrogen sebagai sumber energi dan karbon dioksida sebagai sumber karbon untuk menghasilkan metana dan air.

BAB III. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Pengolahan Limbah, Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Universitas Lampung pada bulan Mei - Oktober 2024. Lokasi dipilih karena alasan representasi dan relevansi dengan materi penelitian. Analisis laboratorium dilaksanakan di laboratorium yang sama, untuk semua parameter yang diamati (kualitas limbah, produksi biogas, dan beberapa gas GRK).

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Reaktor anaerobik atau digester, timbangan analitik, pH meter, DO meter, timbangan analitik, reaktor DRB 200, spektrofotometer HACH DR4000, dan gas kromatografi (GC).
2. Peralatan pendukung seperti gelas ukur, pipet, oven, desikator, kuvet cawan petri, bak air 60 L, Erlenmeyer 1000 mL, gelas ukur 1000 mL, *crusher hammer mill*, dongrak, mesin press, sentrifuse, lemari pendingin, magnetic stirrer, gelas ukur, rubber stopper,

Bahan penelitian mencakup:

1. Air limbah industri sawit/POME dan TKKS yang diperoleh dari mitra, yaitu PTPN VII Unit Usaha Bekri, Lampung Tengah.
2. *Sludge* digunakan sebagai bibit bakteri diambil dari sumber biakan dari Laboratorium Pengolahan Limbah, Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Universitas Lampung.
3. Bahan kimia meliputi reagen COD ($K_2Cr_2O_7$), H_2SO_4 0,1 N, NaOH 0,1 N, indikator PP.

3.3 Rancangan Penelitian

Penelitian dirancang menggunakan metode eksperimental yang terdiri dari 1 faktor perlakuan substrat dengan taraf variasi co-digestion POME-TKKS. Taraf 1 (Kontrol) yaitu POME tanpa rendaman TKKS. Taraf 2 (EFB 4) adalah POME 4 jam rendaman TKKS tercabik. Taraf 3 (EFB 8) adalah POME 8 jam rendaman TKKS tercabik. Taraf 4 (EFBC 4) adalah POME rendaman 4 jam TKKS giling. Taraf 4 (EFBC 8) adalah POME rendaman 8 jam TKKS giling. Bentuk TKKS dapat dilihat pada Gambar 4. Secara ringkas rancangan perlakuan penelitian ditampilkan pada Tabel 6.



Gambar 4. TKKS Dalam Bentuk (a) Cabik dan (b) Giling.

Tabel 6. Perlakuan Substrat Digester Biogas

Kode	Perlakuan
Kontrol	Kontrol (hanya POME, tanpa TKKS)
EFB 4	POME + perasan TKKS cabik yang direndam 4 jam.
EFB 8	POME + perasan TKKS cabik yang direndam 8 jam.
EFBC 4	POME + perasan TKKS giling mekanis dan direndam 4 jam.
EFBC 8	POME + perasan TKKS giling mekanis dan direndam 8 jam.

Rancangan percobaan yang digunakan adalah **Rancangan Acak Lengkap (RAL)** dengan jumlah perlakuan sebanyak 5 taraf perlakuan tunggal dan 3 ulangan.

Dengan demikian, jumlah unit percobaan adalah 15. Unit percobaan adalah reaktor/digester biogas sistem batch skala laboratorium volume 1 liter dengan substrat yang telah disiapkan dengan variasi perlakuan tersebut.

Tujuan rancangan ini adalah untuk mengetahui pengaruh perlakuan co-digestion POME-TKKS terhadap parameter kualitas limbah, produksi biogas, komposisi biogas, dan beberapa gas GRK selama fermentasi 40 hari.

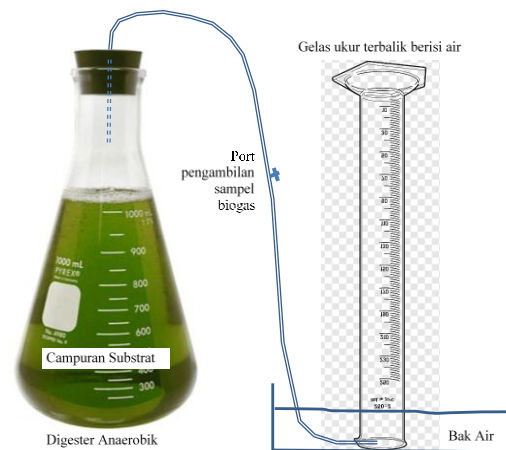
3.4 Prosedur Penelitian

1. Persiapan Substrat

Bahan air limbah dan TKKS diambil dari PTPN VII Unit Usaha Bekri, Lampung Tengah. Air limbah diambil dari jalur aliran influent Kolam Anaerobik 1 (setelah *cooling pond*) dengan kontainer air limbah. Sementara, TKKS diambil dari luaran thresher dengan wadah karung. Setelah di Laboratorium, TKKS segera di berikan perlakuan yaitu sebagian disayat-sayat atau dicabik-cabik, dan sebagian lainnya digiling menjadi. Tahap berikutnya adalah bahwa TKKS yang sudah tercabik dan tergiling direndam dalam POME selama 4 jam dan 8 jam. TKKS seberat 300 g yang sudah tercabik dan tergiling direndam dalam POME sebanyak 2000 mL (TKKS 15%). TKKS diangkat dari rendaman, kemudian diperas. POME rendaman dan perasan TKKS (co-digestion POME-TKKS), kemudian di tambahkan inokulum atau bibit dengan perbandingan 800 mL inokulum dan 200 mL POME, yang kemudian digunakan sebagai substrat reaktor anaerobik. Inokulum yang digunakan berupa sludge dari digester POME, yang mengandung campuran mikroba aktif, mikroba mati, dan bahan inert, sehingga mencerminkan kondisi komunitas alami sistem anaerob. Penggunaan inokulum dengan proporsi atau *innoculant substrate ratio* (ISR) yang tinggi (4:1) bertujuan untuk menjaga stabilitas, menghindari asidifikasi, dan mengurangi resiko kegagalan selama fermentasi (Hülsemann et al., 2020). Sesuai perlakuannya, substrat air limbah siap untuk dituangkan ke dalam reaktor/digester anaerobik sistem batch skala laboratorium dari gelas Erlenmeyer 1000 mL.

2. Persiapan Unit Digester

Unit reaktor/digester anaerob skala laboratorium dibuat dengan menggunakan labu Erlenmeyer volume 1000 mL. Reaktor anaerobik dilengkapi dengan selang pengeluaran biogas, septum untuk pengambilan sample biogas, dan pengukur produksi biogas (Gambar 5).



Gambar 5. Digester Anaerobik dan Pengukuran Produksi Biogas.

3. Pelaksanaan Percobaan

Setelah semua siap, substrat 1000 mL dituangkan ke dalam digester Erlenmeyer, ditutup rapat dengan stopper karet, selang dan penampung biogas (Tabung terbalik) di pasang (Gambar 6). Proses fermentasi sistem batch dijalankan selama 40 hari. Parameter yang diamati diukur secara periodik.



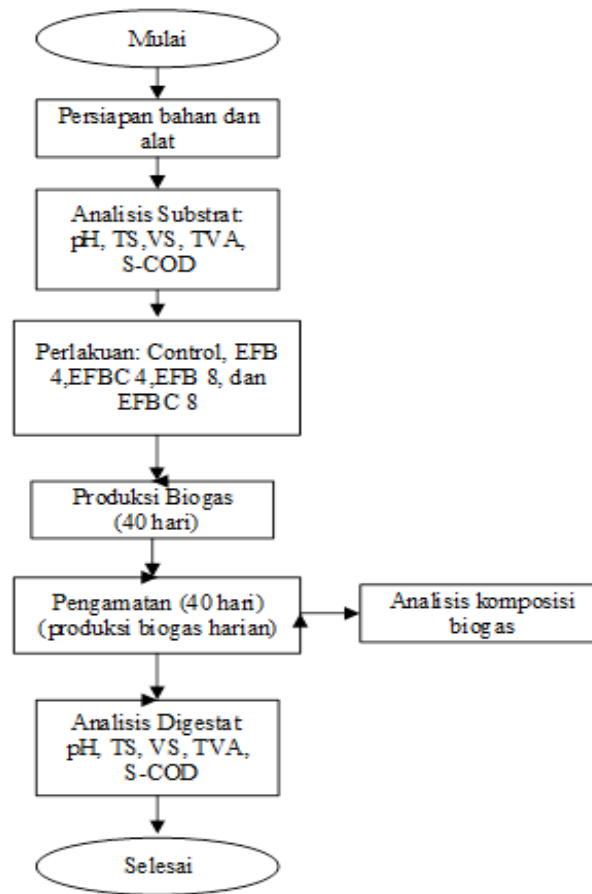
Gambar 6. Susunan Digester Biogas Sistem Batch

4. Parameter yang Diamati

Produksi gas diamati setiap hari, komposisi gas diamati pada hari ke 5, 7, 10, 15, dan 20. Analisis kualitas air limbah meliputi pengukuran pH, *Total Volatile Acid* (TVA), *Total Solid* (TS), *Volatil Solid* (VS), dan *Soluble Chemical Oxygen Demand* (S-COD) pada hari ke 0 (sebelum mulai) dan hari ke 40 (setelah selesai percobaan).

3.5 Tahapan Pelaksanaan Penelitian

Secara ringkas penelitian dilaksanakan melalui tahapan-tahapan seperti yang dipaparkan pada Gambar 7 berikut:



Gambar 7. Diagram Alir Penelitian.

3.6 Pengamatan dan Pengukuran

Pengamatan yang dilakukan adalah pengukuran nilai *Soluble Chemical Oxygen Demand* (S-COD), *Total Solid* (TS), *Volatil Solid* (VS), *Total Volatile Acid* (TVA), dan pH. Selain itu, pengukuran volume biogas, produksi dan komposisi biogas, perhitungan produksi metana, dan perhitungan reduksi emisi GRK juga dilakukan.

Soluble Chemycal Oxygen Demand (S-COD)

Pengukuran total S-COD dilakukan sebelum dan setelah pretreatment.

Pengukuran S-COD dimulai dengan memasukkan 50 mL sampel ke dalam sentrifuge. Sampel disentrifuge pada kecepatan 3000 rpm selama 15 menit. Supernatan diambil sebanyak 0,2 mL (200 μ L) menggunakan mikropipet dan dimasukkan ke dalam vial yang berisi reagen COD ($K_2Cr_2O_7$), lalu dipanaskan

dalam reaktor DRB 200 pada suhu 150 °C selama 2 jam. Sampel didinginkan sampai suhu ruang dan S-COD diukur menggunakan spektrofotometer HACH DR4000.

Total Solid (TS)

Total solids merupakan parameter penting dalam proses anaerobik. Perubahan TS POME selama fermentasi karena konversi fraksi organik padat menjadi senyawa terlarut dan gas (CH₄ dan CO₂), sehingga nilai TS (juga VS) substrat menurun selama fermentasi—fenomena yang terdokumentasi luas pada studi skala laboratorium hingga pilot dan skala industri (Prasanna Kumar et al., 2024). Total solid dihitung berdasarkan selisih berat padatan yang tertinggal tiap liter larutan. Perhitungan total solid dilakukan dengan memanaskan dan menimbang cawan sebagai berat A. Sampel air limbah ditaruh dalam cawan dengan volume tertentu. Cawan yang berisi sampel dipanaskan hingga suhu 103-105 °C selama 24 jam. Cawan didinginkan dalam desikator selama 15 menit. Setelah dingin, cawan ditimbang sebagai berat B. Hasil perhitungan jumlah TS dihitung dengan rumus sebagai berikut (SNI, 2005):

$$TS = \frac{(B-A)}{(\text{Berat Sampel})} \quad (8)$$

Volatile Solid (VS)

Analisis VS merupakan kelanjutan dari proses analisis TS dengan menghitung jumlah material yang menguap, mengikuti Standar Nasional Indonesia (SNI, 2005). Pada analisis VS, cawan berisi sampel yang telah dioven dan ditimbang, dimasukkan ke dalam tungku selama 1 jam pada suhu 550°C. Setelah itu, sampel ditunggu hingga suhu dalam tungku turun menjadi 30-33°C untuk mengangkat cawan dan memasukkannya ke dalam desikator selama 15 menit. Cawan kemudian ditimbang hingga diperoleh berat yang konstan dan dilakukan perhitungan VS dengan rumus sebagai berikut:

$$VS = TS - \frac{\text{Berat Sampel Setelah Pembakaran}}{\text{Berat Samel Awal}} \quad (9)$$

Total Volatile Acid (TVA)

Analisis total volatil asam (TVA) dilakukan untuk mengetahui jumlah total asam yang menguap dalam material. Proses analisis TVA diawali dengan menyiapkan bahan asam dan basa. Bahan asam yang digunakan adalah H_2SO_4 0,1 N. Untuk membuat H_2SO_4 0,1 N, diambil H_2SO_4 sebanyak 2,77 mL menggunakan pipet volume dan dimasukkan ke dalam labu ukur 1000 mL. Larutan tersebut kemudian diencerkan dengan menambahkan air suling hingga tanda kalibrasi. Untuk membuat NaOH 0,1 N, diambil NaOH sebanyak 40 gram dan dimasukkan ke dalam labu ukur 1000 mL. Kemudian diencerkan dengan menambahkan air suling hingga tanda kalibrasi. Proses analisis TVA dilakukan dengan memasukkan sampel sebanyak 50 mL ke dalam labu Erlenmeyer 250 mL. Selanjutnya, pH sampel diatur menjadi pH 4 dengan menambahkan H_2SO_4 0,1 N. Kemudian larutan sampel dipanaskan hingga mendidih selama ± 3 menit dengan menggunakan hotplate Fisher Scientific dan magnetic stirrer, lalu diinginkan hingga mencapai suhu kamar. Larutan sampel lalu ditambahkan 5 tetes indikator PP 1% dan kemudian dititrasi dengan NaOH 0,1 N hingga menunjukkan perubahan warna (biasanya merah muda). Volume titran dicatat di lembar pengamatan. Perhitungan TVA adalah sebagai berikut:

$$TVA = \frac{\sum \text{titar NaOH } 0,1 \text{ N} \times 0,1 \times 60}{50} \times 1000 \text{ (mg/L)} \quad (10)$$

Pengukuran pH

Pengukuran pH dilakukan dengan memasukkan sampel ke dalam erlenmeyer. pH meter (DKK-TOA Corporation, 2017) dicelupkan ke dalam sampel dan diaduk hingga muncul angka yang konstan pada layar.

Pengukuran volume biogas

Pengukuran volume biogas dilakukan setiap hari sejak hari pertama pengisian *Sludge* ke dalam campuran POME selama 40 hari pengamatan. Produksi gas harian diukur dengan mengalirkan biogas menggunakan selang yang dihubungkan ke gelas ukur yang berisi air. Gas yang keluar dari reaktor akan mendorong air

sehingga volume air dalam gelas ukur akan berkurang. Selisih penurunan volume air tersebut merupakan volume gas. Volume biogas yang diamati merupakan volume biogas harian kumulatif.

Produksi dan Komposisi Biogas

Pengukuran volume produksi biogas dilakukan menggunakan metode pemindahan air. Sedangkan analisis komposisi biogas dilakukan menggunakan gas kromatografi (GC).

Perhitungan Produksi Metana Teoritis

Perhitungan produksi metana dilakukan menggunakan hasil pengukuran S-COD. Rumus umum untuk menentukan produksi teoritis metana per gram degradasi COD dari limbah yaitu:

$$V_{CH_4} = 0.35 \times COD_r \times Kt \quad (11)$$

Keterangan:

V_{CH_4} : volume metana yang dihasilkan (L)

0,35 : factor konversi 1 g COD_r menjadi 0,35 L CH_4 berdasarkan stokiometri (Ayala-Parra et al., 2017)

COD_r : COD yang terdegradasi gCOD

$K(t)$: factor koreksi untuk suhu kerja reaktor (digester) (gCOD/L), dicari dari:

$$K(t) = \frac{273}{273 + T} \quad (12)$$

Keterangan:

T = suhu kerja reaktor ($^{\circ}C$).

Produksi metana teoritis dihitung menggunakan faktor koreksi suhu ($K(t)$) dengan asumsi tekanan atmosfer konstan, karena volume biogas diukur pada kondisi tekanan ambien. Penggunaan koreksi tekanan mungkin relevan untuk sistem pengumpulan gas bertekanan atau tertutup (Harikumar et al., 2017). Namun, dalam penelitian ini, biogas diukur dalam kondisi tekanan ambien, oleh karena itu koreksi suhu saja dianggap cukup.

Perhitungan Produksi Metana Aktual

Jumlah potensial gas metana dihitung dengan perkalian antara volume biogas dengan perentase komposisi biogas. Kandungan gas metan (CH_4) pada biogas dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{CH}_4 = \text{Biogas} \times \% \text{ metana} \quad (13)$$

Keterangan :

Biogas : Jumlah potensi biogas (m^3/hari)
 CH_4 : Jumlah potensi gas metana (m^3/hari)
 % metana : konsentrasi gas metana dalam biogas

Perhitungan Reduksi Emisi GRK

Potensial reduksi emisi CO_2e dari gas CH_4 merupakan estimasi potensi pemanasan global dari gas CH_4 setelah disetarakan dengan gas CO_2 . Global Warming Potential selama 100 tahun (GWP-100) untuk gas metana diasumsikan 27 kali lebih besar dibandingkan CO_2 (IPCC, 2021). Perhitungan Potensi Reduksi Emisi dapat dilakukan sebagai berikut (Zain et al., 2024):

$$\text{Potensi Reduksi Emisi} = \text{CH}_4 \times \text{GWP}_{\text{CH}_4} \quad (14)$$

Keterangan :

Potensi Reduksi Emisi : Potensi reduksi emisi CO_2e dari CH_4 ($\text{gCO}_2\text{e}/\text{hari}$)
 CH_4 : Total metana dari biogas (g/hari)
 Masa jenis CH_4 : $0,656 \text{ kg}/\text{m}^3$ pada temperature 25°C dan tekanan 1 atm
 GWP_{CH_4} = 27 (IPCC, 2023).

Setelah itu, data dari sistem batch dikonversi ke sistem kontinyu dengan beberapa penyesuaian. *Hydraulic Loading Rate* (HLR) sesuai volume digester batch, *Hydraulic Retention Time* (HRT) disesuaikan dengan hari terjadinya puncak produktivitas CH_4 , Volume digester $V = \text{HLR} \times \text{HRT}$, *Organic Loading Rate* (OLR) = $\text{HLR} \times \text{konsentrasi S-COD POME setelah perlakuan plus sludge}$, dibagi V volume digester. Data emisi CO_2e dari CH_4 ($\text{kg CO}_2\text{e}/\text{m}^3 \text{ POME-hari}$) dan pada akhirnya data emisi dinyatakan dalam $\text{kg CO}_2\text{e}/\text{ton TBS-hari}$. Data emisi ini kemudian diekstrapolasi ke skala industri kelapa sawit, kemudian dihitung besarnya potensi reduksi emisi, pemanfaatan substitusi BBM diesel dengan CH_4 ,

penghematan biaya BBM diesel, dan perhitungan pengurangan emisi bersih.

3.7 Analisis Data

Data disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Pengaruh perlakuan substrat selama fermentasi terhadap parameter kualitas air limbah, produksi biogas, komposisi metana, dan reduksi GRK dilakukan dengan analisis sidik ragam atau *Analysis of Variance* (ANOVA) pada $\alpha = 0,05$ satu arah. Jika perlakuan menunjukkan perbedaan yang nyata, maka dilakukan uji Beda Nyata Terkecil (BNT) atau *least significant difference* (LSD) dengan $\alpha = 0,05$. Analisis dilakukan dengan memanfaatkan software open AI on-line. LSD dihitung dengan rumus berikut,

$$LSD_{\alpha} = t_{\alpha/2, df_{error}} \sqrt{\frac{2 MSE}{r}} \quad (15)$$

dimana:

- $t_{\alpha/2, df_{error}}$ = t-kritis dua sisi ($\alpha=0.05$, atau 0.025 tiap sisi) dengan derajat bebas error.
- MSE = Mean Square Error = SS_{error}/df_{error} .
- r = jumlah ulangan tiap perlakuan ($r=3$)

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Perlakuan EFB cabik dengan perendaman dalam POME selama 4 jam (EFB 4) menunjukkan kinerja paling optimal secara keseluruhan, ditinjau dari efisiensi reduksi parameter kualitas POME, produksi dan kualitas biogas, serta kesederhanaan tahapan pra-perlakuan POME–TKKS. Efisiensi reduksi S-COD pada perlakuan ini mencapai 92,65% dan berbeda nyata dibandingkan Kontrol, menunjukkan bahwa penambahan EFB cabik secara signifikan meningkatkan degradasi bahan organik terlarut. Sementara itu, efisiensi reduksi TS dan VS relatif tinggi namun tidak berbeda nyata dengan Kontrol, yang diduga berkaitan dengan keberadaan fraksi inert dan akumulasi biomassa mikroba pada akhir fermentasi.

Dari sisi konversi energi, perlakuan EFB 4 menghasilkan produktivitas dan konversi CH₄ per COD removal tertinggi, mengindikasikan bahwa fraksi COD yang terdegradasi lebih efektif diarahkan menuju jalur metanogenesis. Hal ini menunjukkan bahwa perendaman EFB selama 4 jam mampu meningkatkan ketersediaan substrat yang masih dapat dimanfaatkan secara efisien oleh mikroorganisme metanogen. Sebaliknya, pada perlakuan Kontrol, meskipun efisiensi reduksi S-COD lebih rendah, efisiensi konversi CH₄ terhadap COD tereduksi tetap tinggi, yang mengindikasikan dominasi senyawa organik sederhana dalam POME yang mudah dikonversi menjadi metana.

Produksi gas harian maksimum pada perlakuan EFB terjadi pada hari ke-16 hingga ke-18, sedikit lebih lambat dibandingkan perlakuan EFBC yang mencapai puncak lebih awal. Namun demikian, dari sisi produksi biogas kumulatif dan fraksi metana, perlakuan EFB 4 menghasilkan kandungan CH₄ tertinggi sebesar

69,15%, menunjukkan bahwa proses konversi bahan organik menuju metana berlangsung paling stabil dan efisien pada perlakuan ini.

Dalam konteks mitigasi emisi gas rumah kaca, perlakuan EFB 4 juga menunjukkan kinerja terbaik. Produksi CH_4 pada hari ke-20 setara dengan potensi emisi sebesar 34,93 kg CO_2e per m^3 POME. Pada skenario sistem kontinyu dengan HLR 1 m^3/hari , HRT 20 hari, dan OLR 5,80 kg S-COD/hari, perlakuan ini berpotensi menghasilkan reduksi emisi bersih sebesar 34,56 kg CO_2e per hari. Pemanfaatan metana yang dihasilkan setara dengan substitusi energi sebesar 1,72 L solar per hari, dengan potensi penghematan biaya sebesar Rp 20.688,9 per hari pada skala reaktor penelitian, meskipun nilai ini masih bersifat teoritis dan memerlukan penyesuaian desain pada implementasi aktual.

Ekstrapolasi ke skala industri menunjukkan potensi mitigasi emisi yang jauh lebih signifikan. Pada industri pengolahan kelapa sawit skala kecil (60 ton TBS/jam) potensi reduksi emisi dapat mencapai sekitar 24.880 kg CO_2e per hari. Nilai ini setara dengan substitusi bahan bakar diesel sekitar 1.238 L per hari, atau penghematan biaya sekitar Rp 14,86 juta per hari.

Secara keseluruhan, sistem *anaerobic digestion* berbasis POME dengan penambahan co-substrat EFB terbukti efektif dalam menurunkan beban polutan, meningkatkan produksi dan kualitas metana, serta memberikan kontribusi nyata terhadap mitigasi emisi gas rumah kaca. Pemanfaatan metana dalam sistem tertutup berpotensi meningkatkan efisiensi energi industri dan memperkuat peran sektor kelapa sawit dalam mendukung transisi menuju industri rendah karbon di Indonesia.

5.2 Saran

Meskipun perlakuan EFB cabik menunjukkan kinerja paling optimal, penelitian lanjutan perlu difokuskan pada optimasi karakteristik fisik dan operasional sistem. Evaluasi ukuran partikel EFB cabik yang paling efisien, rasio inokulum–substrat,

serta waktu perendaman optimum perlu dilakukan untuk memaksimalkan keseimbangan antara efisiensi reduksi substrat dan efisiensi konversi CH_4 . Selain itu, studi lanjutan pada sistem kontinu skala pilot dengan waktu operasi jangka panjang diperlukan untuk mengkaji stabilitas proses dan potensi akumulasi senyawa antara.

Pemanfaatan energi CH_4 hasil produksi juga perlu diuji lebih lanjut pada aplikasi nyata, seperti substitusi parsial bahan bakar boiler atau genset pabrik, guna memvalidasi potensi ekonomi, efisiensi energi, serta dampak lingkungan yang dihasilkan. Pendekatan ini diharapkan dapat memperkuat kelayakan teknis dan ekonomi penerapan sistem biogas POME–EFB sebagai bagian dari strategi pengelolaan limbah dan mitigasi emisi gas rumah kaca di industri kelapa sawit.

DAFTAR PUSTAKA

- Adekunle, K. F., Okolie, J. A., Adekunle, K. F., and Okolie, J. A. 2015. A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 6(3), 205–212. <https://doi.org/10.4236/ABB.2015.63020>
- Ali, M., and Aziz, A. 2017. Biogas Production from Goat and Chicken Manure in Malaysia. https://doi.org/10.15666/aeer/1503_529535
- Ali, M. Y. M., Hanafiah, M. M., Wen, Y. H., Idris, M., Aziz, N. I. H. A., Halim, A. A., and Lee, K. E. 2015. Biogas Production from Different Substrates Under Anaerobic Conditions. *3rd International Conference on Agricultural and Medical Sciences*, 54–56.
- Amelia, J. R., Indraningtyas, L., Aguzaen, A. A., and Hasanudin, U. 2024. Study on Co-digestion of Palm Oil Mill Effluent and Empty Fruit Bunches to Improve Biogas Production in Palm Oil Mill. *Journal of Ecological Engineering*, 25(6), 334–349. <https://doi.org/10.12911/22998993/187786>
- AMF. (n.d.). *Fuel properties*. Retrieved January 22, 2026. from https://iea-amf.org/content/fuel_information/diesel_gasoline/fuel_properties?utm_source=chatgpt.com
- Angelidaki, I., and Ahring, B. 1993. Thermophilic Anaerobic Digestion of Livestock Waste: The Effect of Ammonia. https://www.academia.edu/14616186/Thermophilic_anaerobic_digestion_of_livestock_waste_the_effect_of_ammonia
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., and Van Lier, J. B. 2009. Defining The Biomethane Potential (BMP) of Solid Organic Wastes and Energy Crops: A Proposed Protocol for Batch Assays. *Water Science and Technology : A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 59(5), 927–934. <https://doi.org/10.2166/WST.2009.040>
- Angelidaki, I., and Sanders, W. 2004. Assessment of The Anaerobic Biodegradability of Macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 3(2), 117–129. <https://doi.org/10.1007/S11157-004-2502-3/METRICS>
- Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J., and Dewil, R. 2008. Principles and Potential of The Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge. *Progress in Energy*

- and Combustion Science*, 34(6), 755–781.
<https://doi.org/10.1016/J.PECS.2008.06.002>
- Arce, C., and Kratky, L. 2022. Mechanical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass Toward Enzymatic/Fermentative Valorization. *IScience*, 25(7), 104610. <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2022.104610>
- Ayala-Parra, P., Liu, Y., Field, J. A., and Sierra-Alvarez, R. 2017. Nutrient Recovery and Biogas Generation from The Anaerobic Digestion of Waste Biomass From Algal Biofuel Production. *Renewable Energy*, 108, 410–416. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.02.085>
- Azizah, N., Al-bAARI, A., dan Mulyani, S. 2012. Pengaruh Lama Fermentasi Terhadap Kadar Alkohol, pH, dan Produksi Gas pada Proses Fermentasi Bioetanol dari Whey dengan Substitusi Kulit Nanas. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*, 1(2).
- Aznury, M., Purnamasari, I., Anggraini, S., Khusnul Fatimah, Y., dan Srijaya Negara Bukit Besar Palembang, J. 2018. Produksi Biogas dari Air Limbah Industri Minyak Kelapa Sawit Menggunakan Digester Anaerobik Modifikasi Dengan Penambahan Pengadukan. *Jurnal Kinetika*, 9(03).
- Banu, J. R., Sugitha, S., Kavitha, S., Kannah, R. Y., Merrylin, J., and Kumar, G. 2021. Lignocellulosic Biomass Pretreatment for Enhanced Bioenergy Recovery: Effect of Lignocelluloses Recalcitrance and Enhancement Strategies. *Frontiers in Energy Research*, 9, 646057. <https://doi.org/10.3389/FENRG.2021.646057/FULL>
- Barakat, A., Mayer-Laigle, C., Solhy, A., Arancon, R. A. D., De Vries, H., and Luque, R. 2014. Mechanical Pretreatments of Lignocellulosic Biomass: Towards Facile and Environmentally Sound Technologies for Biofuels Production. *RSC Advances*, 4(89), 48109–48127. <https://doi.org/10.1039/C4RA07568D>
- Bariyanto, Nelvia, dan Wardati. 2015. Pengaruh Pemberian Kompos Tandan Kosong Kelapa Sawit(TKKS) pada Pertumbuhan Bibit Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) di Main Nursery Pada Medium Subsoil Ultisol. *JOM Faperta*, 2(1).
- Basu, S., Lan, X., Dlugokencky, E., Michel, S., Schwietzke, S., Miller, J. B., Bruhwiler, L., Oh, Y., Tans, P. P., Apadula, F., Gatti, L. V., Jordan, A., Necki, J., Sasakawa, M., Morimoto, S., Di Iorio, T., Lee, H., Arduini, J., and Manca, G. 2022. Estimating Emissions of Methane Consistent with Atmospheric Measurements of Methane and $\delta^{13}\text{C}$ of Methane. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(23), 15351–15377. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15351-2022>
- Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T., Siegrist, H., and Vavilin, V. A. 2002. The IWA

- Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology*, 45(10), 65–73. <https://doi.org/10.2166/WST.2002.0292>
- BPS. 2024. *Statistical Yearbook of Indonesia 2024*. Badan Pusat Statistik.
- Budiarso, A. 2019. *Kebijakan Pembiayaan Perubahan Iklim: Suatu Pengantar* (Budiarso, Adi). PT Penerbit IPB Press.
- Budiman, A., Yaacob, B., Teknologi, U., Bandar, P., Iskandar, S., Perak, T., and Ridzuan, D. 2010. *Production of Biogas using Palm Oil Mill Effluent (POME) in Anaerobic Digester*. https://utpedia.utp.edu.my/id/eprint/1201/1/Ahmad_Budiman_Bin_Yaacob.pdf
- Castrillón, L., Fernández-Nava, Y., Ormaechea, P., and Marañón, E. 2013. Methane Production from Cattle Manure Supplemented with Crude Glycerin from The Biodiesel Industry in CSTR and IBR. *Bioresource Technology*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.080>
- Chiew, Y. L., and Shimada, S. 2013. Current State and Environmental Impact Assessment for Utilizing Oil Palm Empty Fruit Bunches for Fuel, Fiber and Fertilizer - A Case Study of Malaysia. *Biomass and Bioenergy*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.012>
- Chin, M. J., Poh, P. E., Tey, B. T., Chan, E. S., and 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>
- Damayanti, A. A., Fuadina, Z. N., Azizah, N. N., Karinta, Y., dan Mahardika, I. K. 2021. Pemanfaatan Sampah Organik dalam Pembuatan Biogas Sebagai Sumber Energi Kebutuhan Hidup Sehari-Hari. *Eksergi*, 17(3), 182. <https://doi.org/10.32497/eksergi.v17i03.2803>
- De Rosa, M., Schmidt, J., and Pasang, H. 2022. Industry-Driven Mitigation Measures Can Reduce GHG Emissions of Palm Oil. *Journal of Cleaner Production*, 365. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132565>
- Dechrugsa, S., Kantachote, D., and Chaiprapat, S. 2013. Effects of Inoculum to Substrate Ratio, Substrate Mix Ratio and Inoculum Source on Batch Co-Digestion of Grass and Pig Manure. *Bioresource Technology*, 146, 101–108. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2013.07.051>
- Defra. 2012. *2012 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting*. <http://www.defra.gov.uk/environment/economy/business-efficiency/reporting>
- DelaVega-Quintero, J. C., Nuñez-Pérez, J., Lara-Fiallos, M., Barba, P., Burbano-García, J. L., and Espín-Valladares, R. 2025. Advances and Challenges in

Anaerobic Digestion for Biogas Production: Policy, Technological, and Microbial Perspectives. *Processes* 2025, Vol. 13, 13(11).
<https://doi.org/10.3390/PR13113648>

- Demirel, B., and Scherer, P. 2008. The Roles of Acetotrophic and Hydrogenotrophic Methanogens During Anaerobic Conversion of Biomass to Methane: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 2008 7:2, 7(2), 173–190. <https://doi.org/10.1007/S11157-008-9131-1>
- Detman, A., Bucha, M., Treu, L., Chojnacka, A., Pleśniak, Ł., Salamon, A., Łupikasza, E., Gromadka, R., Gawor, J., Gromadka, A., Drzewicki, W., Jakubiak, M., Janiga, M., Matyasik, I., Błaszczuk, M. K., Jędrysek, M. O., Campanaro, S., and Sikora, A. 2021. Evaluation of Acidogenesis Products' Effect on Biogas Production Performed With Metagenomics and Isotopic Approaches. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), 1–25.
<https://doi.org/10.1186/S13068-021-01968-0/FIGURES/10>
- Deublein, D., and Steinhauser, A. 2010. Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction, Second Edition. *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction, Second Edition*.
<https://doi.org/10.1002/9783527632794>
- Dixon, P. J., Ergas, S. J., Mihelcic, J. R., and Hobbs, S. R. 2019. Effect of Substrate to Inoculum Ratio on Bioenergy Recovery From Food Waste, Yard Waste, and Biosolids By High Solids Anaerobic Digestion. *Https://Home.Liebertpub.Com/Ees*, 36(12), 1459–1465.
<https://doi.org/10.1089/EES.2019.0078>
- Elsayed, A., Laqa Kakar, F., Mustafa Abdelrahman, A., Ahmed, N., AlSayed, A., Sherif Zagloul, M., Muller, C., Bell, K. Y., Santoro, D., Norton, J., Marcus, A., and Elbeshbishy, E. 2024. Enhancing Anaerobic Digestion Efficiency: A Comprehensive Review on Innovative Intensification Technologies. *Energy Conversion and Management*, 320, 118979.
<https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2024.118979>
- Faisal, M., and Taleb, M. A. 2013. Biomass Residue from Palm Oil Mills in Aceh Province: A Potential Usage for Sustainable Energy. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 3(3), 222.
<https://doi.org/10.18517/ijaseit.3.3.324>
- Filer, J., Ding, H. H., and Chang, S. 2019. Biochemical Methane Potential (BMP) Assay Method for Anaerobic Digestion Research. *Water* 2019, Vol. 11, Page 921, 11(5), 921. <https://doi.org/10.3390/W11050921>
- Gemini, I. 2017. *Analisa Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBG) Skala Rumah Tangga Dari Sampah Organik Perumahan Sebagai Sumber Energi Listrik (Studi Kasus : Masjid Perumahan Diamond Residence Pekanbaru)*. Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim.

- Gerardi, M. H. 2003. *The microbiology of anaerobic digesters. The Microbiology of Anaerobic Digesters*, 1–177. <https://doi.org/10.1002/0471468967>
- Ghyselbrecht, K., Monballiu, A., Somers, M. H., Sigurnjak, I., Meers, E., Appels, L., and Meesschaert, B. 2019. The Fate of Nitrite and Nitrate During Anaerobic Digestion. *Environmental Technology*, 40(8), 1013–1026. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1415380>
- Güngören Madenoğlu, T., Jalilnejad Falizi, N., Kabay, N., Güneş, A., Kumar, R., Pek, T., and Yüksel, M. 2019. Kinetic Analysis of Methane Production From Anaerobic Digestion of Water Lettuce (*Pistia Stratiotes* L.) With Waste Sludge. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 94(6), 1893–1903. <https://doi.org/10.1002/JCTB.5968>
- Hafiz, M., Purwanto, H., Rahimah, dan Giyanto. 2024. Analisa Hubungan Nilai Perubahan Chemical Oxygen Demand (COD) dan pH Pada Palm Oil Mill Effluent (POME) Dalam Proses Pembuatan Biogas. *Jurnal Agro Fabrica*, 6(1), 23–36. <https://doi.org/10.47199/jaf.v6i1.240>
- Hamzah, A. F. A. 2023. Evaluating The Effect of Low and High Temperature Mode of Subcritical Water Pre-Treated Empty Fruit Bunches on Co-Digestion Performance and Kinetic Study for Methane Production. *Journal of Oil Palm Research*. <https://doi.org/10.21894/JOPR.2024.0030>
- Harikumar, P. S., Aravind, A., Vasudevan, S., Harikumar, P. S., Aravind, A., and Vasudevan, S. 2017. Assessment of Water Quality Status of Guruvayur Municipality. *Journal of Environmental Protection*, 8(2), 159–170. <https://doi.org/10.4236/JEP.2017.82013>
- Harsono, S. S., Grundmann, P., and Siahaan, D. 2015. Role of Biogas and Biochar Palm Oil Residues for Reduction of Greenhouse Gas Emissions in the Biodiesel Production. *Energy Procedia*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.063>
- Haryanto, A., Hasanudin, U., Afrian, C., and Zulkarnaen, I. 2018. Biogas Production From Anaerobic Codigestion of Cowdung and Elephant Grass (*Pennisetum Purpureum*) Using Batch Digester. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 141(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/141/1/012011>
- Haryanto, A., Sugianti, C., Triyono, S., dan Apri, N. E. 2018. Biogas Production from Oil Palm Empty Fruit Bunches Through Dry Fermentation Process: A Preliminary Results. 87–89.
- Hasanudin, U., Safira, N. D., Nurainy, F., Utomo, T. P., and Haryanto, A. 2023. Improving Biogas Production in Tapioca Industry by Using Onggok as Co-substrate. *International Journal of Renewable Energy Research*, 13(2). <https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i2.13814.g8748>

- Hasibuan, A. R., Nasution, Q. F. N., Lubis, A. M. P., dan Harahap, A. A. 2023. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit (Tandan Kosong Kelapa Sawit) Sebagai Pilihan Organik Tamaman Yang Ramah Lingkungan Di Kabupaten Labuhan Batu Utara. *Zahra: Journal of Health and Medical Research* , 3(2), 183–190.
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., De Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J. C., De Lacroix, H. F., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., ... Wierinck, I. 2016. Towards a Standardization of Biomethane Potential Tests. *Water Science and Technology : A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 74(11), 2515–2522. <https://doi.org/10.2166/WST.2016.336>
- Hülsemann, B., Zhou, L., Merkle, W., Hassa, J., Müller, J., and Oechsner, H. 2020. Biomethane Potential Test: Influence of Inoculum and The Digestion System. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 2589, 10(7), 2589. <https://doi.org/10.3390/APP10072589>
- IPCC. 2006. *Guidelines for national greenhouse gas inventories*, vol. 4: *Agriculture, forestry and other land use*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- IPCC. 2021. *Climate change 2021: The physical science basis*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- IPCC. 2023. *Climate change 2021 – The physical science basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Irma, M. F. 2024. Tingginya Kenaikan Suhu Akibat Peningkatan Emisi Gas Rumah Kaca di Indonesia. *JSSIT: Jurnal Sains dan Sains Terapan*, 2(1). <https://doi.org/10.30631/jssit.v2i1.49>
- Ivanovici, M., Dumitrel, G. A., Gherman, V. D., Todinca, T., Pana, A. M., and Ordodi, V. L. 2025. Anaerobic Digestion of Food Waste and Granular Inoculum: Study on Temperature Effect and Substrate-to-Inoculum Ratio on Biogas Production. *Fermentation*, 11(6), 348. <https://doi.org/10.3390/FERMENTATION11060348/S1>
- Jodhani, S., Sebastian, J., Lee, J., Venkiteshwaran, K., Lee, H. S., Singh, V., Ormeci, B., and Hussain, A. 2024. Acidogenic Fermentation of Food Waste for The Production of Short-Chain Fatty Acids: The Impact of Inoculum Type and Inoculum Heat Pretreatment. *Fermentation* 2024, Vol. 10, Page 162, 10(3), 162. <https://doi.org/10.3390/FERMENTATION10030162>
- Kafle, G. K., and Chen, L. 2016. Comparison on Batch Anaerobic Digestion of Five Different Livestock Manures and Prediction of Biochemical Methane Potential (BMP) Using Different Statistical Models. *Waste Management*, 48, 492–502. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2015.10.021>

- Kananam, W., Suksaroj, T. T., and Suksaroj, C. 2011. Biochemical Changes During Oil Palm (*Elaeis Guineensis*) Empty Fruit Bunches Composting With Decanter Sludge and Chicken Manure. *ScienceAsia*, 37(1). <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2011.37.017>
- Khadaroo, S. N. B. A., Grassia, P., Gouwanda, D., and Poh, P. E. 2020. The Influence of Different Solid-Liquid Ratios on The Thermophilic Anaerobic Digestion Performance of Palm Oil Mill Effluent (POME). *Journal of Environmental Management*, 257.
- Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., and Dawson, L. 2011. The Anaerobic Digestion of Solid Organic Waste. *Waste Management*, 31(8), 1737–1744. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>
- Kim, S. H., Choi, S. M., Ju, H. J., and Jung, J. Y. 2013. Mesophilic Co-Digestion of Palm Oil Mill Effluent and Empty Fruit Bunches. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 34(13–14), 2163–2170. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.826253>
- KLH. 2012. *Pedoman Inventarisasi GRK Sektor Energi*. https://studylib.net/doc/28029266/290411400-pedoman-buku-ii-volume-1-energi?utm_source=chatgpt.com
- Kresnawaty, I., Mismana Putra, S., Budiani, A., dan Darmono, T. 2017. Konversi Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Menjadi Arang Hayati dan Asap CaiR. *Jurnal Penelitian Pascapanen Pertanian*, 14(3), 171–179.
- Kurniati, Y., Rahmat, A., Malianto, B. I., Nandayani, D., dan Pratiwi, W. S. W. 2021. Review Analisa Kondisi Optimum Dalam Proses Pembuatan Biogas. *Rekayasa*, 14(2), 272–281. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v14i2.11305>
- Li, X., and Shimizu, N. 2023. Biochar-Promoted Methane Production and Mitigation of Acidification During Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste With Crude Glycerol: Comparison With Re-Inoculation. *Sustainable Environment Research*, 33(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/S42834-023-00167-W/FIGURES/7>
- Li, Y., Park, S. Y., and Zhu, J. 2011. Solid-State Anaerobic Digestion for Methane Production From Organic Waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 821–826. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.07.042>
- Liew, Z. K., Chan, Y. J., Ho, Z. T., Yip, Y. H., Teng, M. C., Ameer Abbas bin, A. I. T., Chong, S., Show, P. L., and Chew, C. L. 2021. Biogas Production Enhancement By Co-Digestion of Empty Fruit Bunch (EFB) With Palm Oil Mill Effluent (POME): Performance and Kinetic Evaluation. *Renewable Energy*, 179, 766–777. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.073>
- Lim, P. N., Wu, T. Y., Clarke, C., and Nik Daud, N. N. 2015. A Potential Bioconversion of Empty Fruit Bunches Into Organic Fertilizer Using

- Eudrilus Eugeniae. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(8). <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0648-2>
- Luo, L., Qu, Y., Gong, W., Qin, L., Li, W., and Sun, Y. 2021. Effect of Particle Size on The Aerobic and Anaerobic Digestion Characteristics of Whole Rice Straw. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 3960, 14(13), 3960. <https://doi.org/10.3390/EN14133960>
- Mardawati, E., Faruqy, M. Z. Al, dan Wiyatna, M. F. 2024. Produksi Biogas Co-digestion dari Kotoran Sapi, Limbah Buah Sayuran, dan Serasah Daun di Universitas Padjadjaran. *Biomass, Biorefinery, and Bioeconomy*, 22, 151–160.
- Metcalf, W., and Eddy, C. 2014. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, Fifth Edition. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, Fifth Edition*, 1–2018.
- Muhaemin, A. A. 2018. *Studi Pemilihan Kinetika Reaksi Produksi Biogas dari Air Limbah Pabrik Kelapa Sawit untuk Scale Up Completely Stirred Tank Bioreactor. (Tesis)*. Universitas Lampung. Bandar Lampung, 65 p.
- Novita, E., Wahyuningsih, S., and Pradana, H. A. 2018. Variasi Komposisi Input Proses Anaerobik Untuk Produksi Biogas Pada Penanganan Limbah Cair Kopi. *JURNAL AGROTEKNOLOGI*, 12(01). <https://doi.org/10.19184/j-agt.v12i1.7887>
- Nugroho, W. A., Izza, N., Hj Hassan, U. H., Alsaigh, A. A., and Wibisono, Y. 2025. Exploring The Mechanisms of Supplemented CO₂ In Enhancing Methane Production In Anaerobic Digestion Process, A Review. *Bioengineered*, 16(1). <https://doi.org/10.1080/21655979.2025.2531667>
- Nwaneri, C. B., Akujobi, C. O., Okorundu, S. I., Umeh, S. I., and Oporum, C. C. 2022. Batch Mode Biomethane Production from Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent (POME) with Cassava Peels and Cabbage Waste. *Microbiology Research Journal International*, 23–31. <https://doi.org/10.9734/MRJI/2022/V32I530387>
- Octiva, C. S., Irvan, Sarah, M., Trisakti, B., and Daimon, H. 2018. Production of Biogas From Co-Digestion of Empty Fruit Bunches (EFB) With Palm Oil Mill Effluent (POME): Effect of Mixing Ratio. *Rasayan Journal of Chemistry*, 11(2), 791–797. <https://doi.org/10.31788/RJC.2018.1123022>
- Olatunji, K. O., Olugbemide, A. D., Akerejola, R. F., and Madyira, D. M. 2025. Kinetic Modelling of The Biomethane Production Potential of Acidic Pretreated Groundnut Shells. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(11), 17139–17153. <https://doi.org/10.1007/S13399-025-06549-X/FIGURES/5>
- Pahan, I. 2011. *Panduan Lengkap Kelapa Sawit: Manajemen Agribisnis dari Hulu hingga Hilir (XI)*. Panebar Swadaya.

- Permadi, D. M. I., Ahmad, A., dan Elystia, S. 2015. Efisiensi Penyisihan COD dan Pembentukan Biogas Dalam Pengolahan Sludge IPAL Industri Pulp and Paper Dengan Menggunakan Bioreaktor Hibrid Anaerobik. *Jom FTEKNIK*, 2(1), 1–5.
- Poddar, B. J., Nakhate, S. P., Gupta, R. K., Chavan, A. R., Singh, A. K., Khardenavis, A. A., and Purohit, H. J. 2022. A Comprehensive Review on The Pretreatment of Lignocellulosic Wastes for Improved Biogas Production By Anaerobic Digestion. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(4), 3429–3456. <https://doi.org/10.1007/S13762-021-03248-8>
- Prasanna Kumar, D. J., Mishra, R. K., Chinnam, S., Binnal, P., and Dwivedi, N. 2024. A Comprehensive Study on Anaerobic Digestion of Organic Solid Waste: A Review on Configurations, Operating Parameters, Techno-Economic Analysis and Current Trends. *Biotechnology Notes*, 5, 33. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTNO.2024.02.001>
- Rabii, A., Aldin, S., Dahman, Y., and Elbeshbishy, E. 2019. A Review on Anaerobic Co-Digestion With A Focus on The Microbial Populations and The Effect of Multi-Stage Digester Configuration. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 1106, 12(6), 1106. <https://doi.org/10.3390/EN12061106>
- Rahmawati, L. 2017. Kandungan Unsur Hara Kompos Berbahan Dasartandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). *Agrisains Jurnal Budidaya Tanaman Perkebunan Politeknik Hasnur*, 3(2), 38–41.
- Rosas-Mendoza, E. S., Alvarado-Vallejo, A., Vallejo-Cantú, N. A., Snell-Castro, R., Martínez-Hernández, S., and Alvarado-Lassman, A. 2021. Batch and Semi-Continuous Anaerobic Digestion of Industrial Solid Citrus Waste for the Production of Bioenergy. *Processes* 2021, Vol. 9, 9(4). <https://doi.org/10.3390/PR9040648>
- Saelor, S., Kongjan, P., and O-Thong, S. 2017. Biogas Production From Anaerobic Co-Digestion of Palm Oil Mill Effluent and Empty Fruit Bunches. *Energy Procedia*, 138, 717–722. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.10.206>
- Saelor, S., Kongjan, P., Prasertsan, P., Mamimin, C., and O-Thong, S. 2025. Enhancing The Efficiency of High Solid Anaerobic Digestion of Empty Fruit Bunches Under Thermophilic Conditions By Particle Size Reduction and Co-Digestion With Palm Oil Mill Effluent. *Carbon Resources Conversion*, 8(2), 100262. <https://doi.org/10.1016/J.CRCON.2024.100262>
- Sant’Ana Júnior, D. B., Kelbert, M., Hermes de Araújo, P. H., and de Andrade, C. J. 2025. Physical Pretreatments of Lignocellulosic Biomass for Fermentable Sugar Production. *Sustainable Chemistry* 2025, Vol. 6, Page 13, 6(2), 13. <https://doi.org/10.3390/SUSCHEM6020013>

- Saputra, M. T. A. 2023. *Peningkatan Produksi Biogas dari Air Limbah Industri Tapioka Menggunakan Onggok*. Universitas Lampung.
- Saragih, G. M., dan Hadrah, H. 2018. Estimasi Potensi Biogas dari Palm Oil Mill Effluent (POME) Pabrik Kelapa Sawit Di Provinsi Jambi. *Jurnal Civronlit Unbari*, 2(2), 17. <https://doi.org/10.33087/civronlit.v2i2.18>
- Sari, D. A. P., Mutaqin, P. A. Z., Pawenary, and Majlan, E. H. 2019. Methane Capture Installation for Greenhouse Gasses Emission Reduction In Palm Oil Mill. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 11(7).
- Scheutz, C., and Fredenslund, A. M. 2019. Total Methane Emission Rates and Losses from 23 Biogas Plants. *Waste Management*, 97, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.029>
- Shintawati, Hasanudin, U., dan Haryanto, A. 2017. *Karakteristik Pengolahan Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit Dalam Bioreaktor Cigar Semi Kontinu*. Teknik Pertanian Lampung, 6(2).
- Sihlangu, E., Luseba, D., Regnier, T., Magama, P., Chiyanzu, I., and Nephawe, K. A. 2024. Investigating Methane, Carbon Dioxide, Ammonia, and Hydrogen Sulphide Content In Agricultural Waste During Biogas Production. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 5145, 16(12), 5145. <https://doi.org/10.3390/SU16125145>
- SNI. 2005. *SNI Nomor 06-6989.26: 2005 Air dan limbah bagian 26: Uji adar padatan total secara gravimetri*.
- Sodri, A., and 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>
- Soeprijanto, S. 2017. Pembuatan Biogas dari Kotoran Sapi Menggunakan Biodigester di Desa Jumptut Kabupaten Bojonegoro. *SEWAGATI*, 1(1). <https://doi.org/10.12962/j26139960.v1i1.2984>
- Suryani, F. S., Homsah, O. F., dan Basuki, M. 2018. Analisis pH dan Pengadukan Terhadap Produksi Biogas dari Limbah Cair Kelapa Sawit. *JRST (Jurnal Riset Sains dan Teknologi)*, 2(1). <https://doi.org/10.30595/jrst.v2i1.1855>
- Taherzadeh, M. J., and Karimi, K. 2007. Enzyme-Based Hydrolysis Processes for Ethanol From Lignocellulosic Materials: A review. *BioResources*, 2(4), 707–738. <https://doi.org/10.15376/BIORES.2.4.707-738>
- Thani, M. I., Hussin, R., Ramlah, W., Bt., W. I., and Sulaiman, M. S. 1999. *Industrial Processes and The Environment (Handbook No. 3): Crude Palm Oil Industry*. Department of Environment, Ministry of Science, Technology and the Environment.

- The Engineering ToolBox. (n.d.). *Methane (CH₄): Thermophysical Properties and Phase Diagram*. Retrieved January 22, 2026, from https://www.engineeringtoolbox.com/methane-d_1420.html
- Wahyudi, J. 2019. Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari Pembakaran Terbuka Sampah Rumah Tangga Menggunakan Model IPCC. *Jurnal Litbang: Media Informasi Penelitian, Pengembangan dan IPTEK*, 15(1). <https://doi.org/10.33658/jl.v15i1.132>
- Wang, B., Strömberg, S., Li, C., Nges, I. A., Nistor, M., Deng, L., and Liu, J. 2015. Effects of Substrate Concentration on Methane Potential and Degradation Kinetics In Batch Anaerobic Digestion. *Bioresource Technology*, 194, 240–246. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2015.07.034>
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., and Jones, D. L. 2008. Optimisation of The Anaerobic Digestion of Agricultural Resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928–7940. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2008.02.044>
- Werkneh, A. A. 2022. Biogas Impurities: Environmental and Health Implications, Removal Technologies and Future Perspectives. *Heliyon*, 8(10), e10929. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2022.E10929>
- Winanti, W. S., Prasetyadi, P., dan Wiharja, W. 2019. Pengolahan Palm Oil Mill Effluent (POME) menjadi Biogas dengan Sistem Anaerobik Tipe Fixed Bed tanpa Proses Netralisasi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 20(1). <https://doi.org/10.29122/jtl.v20i1.3248>
- Woźniak, A., Kuligowski, K., Świerczek, L., and Cenian, A. 2025. Review of Lignocellulosic Biomass Pretreatment Using Physical, Thermal and Chemical Methods for Higher Yields In Bioethanol Production. *Sustainability* 2025, Vol. 17, Page 287, 17(1), 287. <https://doi.org/10.3390/SU17010287>
- Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, T. R., Kohli, S., and Rana, V. 2004. Enhancement of Biogas Production From Solid Substrates Using Different Techniques—a review. *Bioresource Technology*, 95(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2004.02.010>
- Yan, Y.-J. ;, Li, X. ;, Lu, C.-S. ;, Kobayashi, T. ;, Zhen, G.-Y. ;, Hu, Y. A., Yan, Y.-J., Li, X., Lu, C.-S., Kobayashi, T., Zhen, G.-Y., and Hu, Y. 2023. A Review on Start-Up Phase Optimization of Kitchen Waste Anaerobic Digestion. *Fermentation* 2023, Vol. 9, Page 603, 9(7), 603. <https://doi.org/10.3390/FERMENTATION9070603>
- Yang, Q., Liu, H., Liu, L., Yan, Z., Chui, C., Yang, N., Wang, C., Shen, G., and Chen, Q. 2025. Enhancing Methane Production in Anaerobic Digestion of Food Waste Using Co-Pyrolysis Biochar Derived from Digestate and Rice

Straw. *Molecules*, 30(8), 1766.
<https://doi.org/10.3390/MOLECULES30081766/S1>

- Yanti, F. M., DwiHasuti, Z., Murti, S. D. S., Valentino, N., Juwita, A. R., dan Sholihah, A. 2018. Pengembangan Teknologi Desulfurisasi Melalui Metode Chemical Absorber Pada Produksi Biogas Yang Berasal dari Limbah Palm Oil Mill Effluent (POME). *Jurnal Sains dan Teknologi*, Oktober.
- Yoon, Y. M., Kim, S. H., Shin, K. S., and Kim, C. H. 2014. Effects of Substrate to Inoculum Ratio on The Biochemical Methane Potential of Piggery Slaughterhouse Wastes. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 27(4), 600. <https://doi.org/10.5713/AJAS.2013.13537>
- Zain, A. S., Novembrianto, R., dan Harmoko, D. F. 2024. Dampak Emisi Gas Rumah Kaca dari Pengangkutan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun Pada Perusahaan Transmisi Listrik Menggunakan Metode International Panel on Climate Change (IPCC). *Jurnal Review Pendidikan dan Pengajaran*, 7(2), 5105–5114.
<https://doi.org/https://doi.org/10.31004/jrpp.v7i2.27257>
- Zhang, W., Wang, X., Xing, W., Li, R., and Yang, T. 2021. Responses of Anaerobic Digestion of Food Waste to Coupling Effects of Inoculum Origins, Organic Loads and pH Control Under High Load: Process Performance and Microbial Characteristics. *Journal of Environmental Management*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111772>