

**EVALUASI FAKTOR EMISI METANA (CH₄) DAN REDUKSI EMISI GAS
RUMAH KACA PADA PROSES PRODUKSI BIOGAS DARI AIR
LIMBAH INDUSTRI TAPIOKA**

(Tesis)

Oleh

**EVA MARTHA PRATIWI
NPM 2320011008**



**PROGRAM PENDIDIKAN STRATA 2
PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

EVALUASI FAKTOR EMISI METANA (CH₄) DAN REDUKSI EMISI GAS RUMAH KACA PADA PROSES PRODUKSI BIOGAS DARI AIR LIMBAH INDUSTRI TAPIOKA

Oleh

EVA MARTHA PRATIWI

Peningkatan emisi metana (CH₄) menjadikan pengolahan limbah sebagai sektor kunci mitigasi, terutama pada industri tapioka yang menghasilkan limbah berkadar COD tinggi dan berpotensi besar membentuk CH₄ secara anaerobik. Sistem tertutup seperti *Anaerobic Covered Lagoon Digester* memungkinkan penangkapan metana untuk dimanfaatkan sebagai biogas, sehingga menurunkan emisi. Inventarisasi GRK juga memerlukan faktor emisi berbasis data aktual karena nilai *default* IPCC tidak selalu merefleksikan kondisi operasional di lapangan. Penelitian ini bertujuan memperoleh faktor emisi metana aktual, menjelaskan perbedaannya dengan nilai *default* IPCC, serta menghitung reduksi emisi GRK dari pemanfaatan biogas limbah tapioka di PT Gree Energy Hampanan. Penelitian dilakukan selama 22 bulan pengamatan melalui studi literatur dan survei lapangan, meliputi pengumpulan data volume limbah, COD *inlet-outlet*, produksi biogas, dan fraksi CH₄, serta perhitungan emisi menggunakan pendekatan Tier-3 IPCC dan metodologi AMS-III.H. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi penghilangan COD mencapai 95–99% dengan rata-rata produksi biogas sebesar 16.560 m³/hari dan kandungan CH₄ sebesar 60,8%. Faktor emisi metana aktual berada pada kisaran 0,20–0,57 kg CH₄/kg CODrem dengan rata-rata 0,30 kg CH₄/kg CODrem, dipengaruhi oleh akumulasi bahan organik yang masih dapat terdegradasi, variabilitas beban organik influen, kondisi suhu mesofilik tropis, dan dinamika OLR. Pemanfaatan biogas terbukti efektif menurunkan emisi GRK, dengan total reduksi mencapai 74.989 tCO_{2e} selama periode 22 bulan, sehingga penggunaan faktor emisi lokal direkomendasikan untuk estimasi GRK yang lebih akurat dan pengembangan strategi mitigasi emisi pada industri berbasis limbah organik.

Kata kunci : biogas, limbah tapioka, faktor emisi metana, reduksi emisi, gas rumah kaca.

ABSTRACT

EVALUATION OF METHANE (CH₄) EMISSION FACTORS AND GREENHOUSE GAS REDUCTION PERFORMANCE IN BIOGAS PRODUCTION FROM TAPIOCA WASTEWATER

By

EVA MARTHA PRATIWI

Elevated methane (CH₄) emissions highlight wastewater treatment as a key mitigation sector, particularly in tapioca industries where high-COD effluents possess substantial anaerobic CH₄ generation potential. Closed treatment systems such as Anaerobic Covered Lagoon Digesters enable methane capture for biogas utilization, thereby reducing emissions. Accurate GHG inventories also require locally derived emission factors, as IPCC default values do not always reflect actual operational conditions. This study aims to determine the site-specific methane emission factor, explain its deviation from IPCC default values, and quantify GHG emission reductions from biogas utilization at PT Gree Energy Hamparan. The research was conducted over a 22-month monitoring period through literature review and field surveys, involving data collection on wastewater volume, COD inlet–outlet, biogas production, and CH₄ fraction, with emissions calculated using the IPCC Tier-3 approach and AMS-III.H methodology. Results indicate that COD removal efficiency reached 95–99%, with an average biogas production of 16,560 m³/day and an average CH₄ content of 60.8%. The actual methane emission factor ranged from 0.20 to 0.57 kg CH₄/kg COD removed, averaging 0.30 kg CH₄/kg COD removed, influenced by degradable sludge accumulation, variability in influent organic load, tropical mesophilic temperatures, and fluctuations in the Organic Loading Rate (OLR). Biogas utilization proved effective in reducing GHG emissions, achieving a total reduction of 74,989 tCO₂e over the 22-month period. These findings underscore the importance of adopting locally derived emission factors for more accurate GHG inventories and for strengthening mitigation strategies in organic-waste-based industries.

Keywords : biogas, tapioca wastewater, methane emission factor, emission reduction, greenhouse gases.

**EVALUASI FAKTOR EMISI METANA (CH₄) DAN REDUKSI EMISI GAS
RUMAH KACA PADA PROSES PRODUKSI BIOGAS DARI AIR
LIMBAH INDUSTRI TAPIOKA**

Oleh

EVA MARTHA PRATIWI

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER LINGKUNGAN**

Pada

**Program Studi Ilmu Lingkungan
Program Pascasarjana Multidisiplin Universitas Lampung**



**PROGRAM PENDIDIKAN STRATA 2
PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

Judul Tesis : **EVALUASI FAKTOR EMISI METANA (CH₄) DAN REDUKSI EMISI GAS RUMAH KACA PADA PROSES PRODUKSI BIOGAS DARI AIR LIMBAH INDUSTRI TAPIOKA**

Nama Mahasiswa : **Eva Martha Pratiwi**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2320011008

Program Studi : Magister Ilmu Lingkungan

Fakultas : Program Pascasarjana Multidisiplin



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

.....

Dr. Eng. Dewi Agustina Iryani, S.T., M.T.
NIP. 197208252000032001

.....

Prof. Dr. Rahmat Safe'i, S.Hut., M.Si.
NIP. 197601232006041001

.....

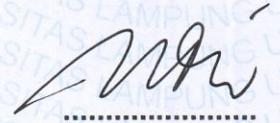
2. Ketua Program Studi Magister Ilmu Lingkungan
Universitas Lampung

Hari Kaskoyo, S.Hut., M.P., Ph.D.
NIP. 196906011998021002

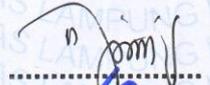
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

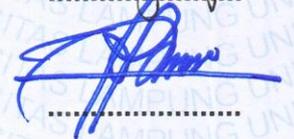
Ketua : **Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T.**



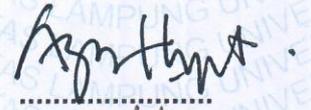
Sekretaris : **Dr. Eng. Dewi Agustina Iryani, S.T., M.T.**



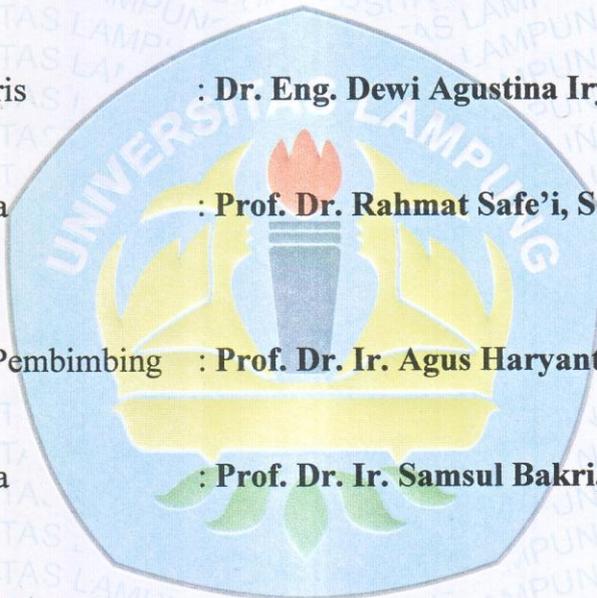
Anggota : **Prof. Dr. Rahmat Safe'i, S.Hut., M.Si.**



Penguji
Bukan Pembimbing : **Prof. Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.**



Anggota : **Prof. Dr. Ir. Samsul Bakri, M.Si.**



2. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung

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



Tanggal Lulus Ujian Tesis : **23 Desember 2025**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa:

1. Tesis dengan judul: **“EVALUASI FAKTOR EMISI METANA (CH₄) DAN REDUKSI EMISI GAS RUMAH KACA PADA PROSES PRODUKSI BIOGAS DARI AIR LIMBAH INDUSTRI TAPIOKA”** adalah karya saya sendiri dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan atas karya penulis lain dengan cara yang tidak sesuai etika ilmiah yang berlaku dalam masyarakat akademik atau yang disebut *plagiarisme*,
2. Hak intelektual atas karya saya ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

Atas pernyataan ini, apabila dikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang diberikan kepada saya, saya bersedia dan sanggup dituntut sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung,
at pernyataan,



Eva Martha Pratiwi
2320011008

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Mutar alam, Kecamatan Way tenong, Kabupaten Lampung Barat, Lampung pada tanggal 13 Agustus 1997, sebagai putri pertama dari dua bersaudara, dari pasangan Bapak Budi Harjo dan Ibu Susilawati. Penulis memiliki seorang adik perempuan yang bernama Revi Dwi Amanda.

Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar Negeri 2 Sukarame 2009, Sekolah Menengah Pertama Negeri 24 Bandar Lampung 2012, dan Sekolah Menengah Atas Negeri 2 Bandar Lampung pada tahun 2015.

Pada tahun 2015, penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN). Kemudian pada tahun 2023 Penulis melanjutkan pendidikan di Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Fakultas Pascasarjana Multidisiplin, Universitas Lampung.

PERSEMBAHAN

Dengan segenap hati kupersembahkan tesis ini kepada:

Allah SWT,

Atas berkat rahmat dan karunianya lah saya dapat menyelesaikan Tesis Ini dengan baik dan lancar.

Kedua Orang tua saya Bapak Budi Harjo dan Ibu Susilawati sebagai motivasi terbesar saya, terima kasih atas doa, semangat dan pengorbanannya sehingga saya sampai ke tahap ini tanpa kalian saya bukan siapa siapa

Adik Revi Dwi Amanda terima kasih atas support yang sering diberikan sehingga penulis sampai ke tahap ini mendapatkan gelar Magister Lingkungan

Untuk dosen-dosen dan guru-guru yang saya hormati,
terima kasih atas segala ilmu yang telah diberikan.

Kepada Almamater tercinta,

semoga ilmu yang saya peroleh di Universitas Lampung ini mampu berguna di kemudian hari.

Aamiin...

MOTTO

“... Dan aku belum pernah kecewa dalam berdoa kepada-Mu, wahai Tuhanku”-QS. Maryam: 4-

“Ikatlah nikmat-nikmat Allah dengan bersyukur kepada-Nya”-Umar bin Abdul Aziz-

“Success is an achievement. Whereas, struggling could be a should”

“Even after the darkest and longest night, morning will come”

SANWACANA

Assalamu'alaikum wr. wb.

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Tesis ini berjudul **“Evaluasi Faktor Emisi Metana (CH₄) dan Reduksi Emisi Gas Rumah Kaca pada Proses Produksi Biogas dari Air Limbah Industri Tapioka”**. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi faktor emisi spesifik berbasis data lokal sangat penting untuk meningkatkan akurasi perhitungan emisi GRK.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari berbagai pihak untuk perbaikan di masa mendatang. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si., sebagai Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung.
3. Bapak Hari Kaskoyo, S. Hut., M.P., Ph. D., selaku Ketua Program Studi Pascasarjana Ilmu Lingkungan.
4. Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T., selaku Dosen pembimbing I atas kesediaannya untuk memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam proses penyelesaian tesis ini.
5. Dr. Eng. Dewi Agustina Iryani, S.T., M.T., selaku Dosen pembimbing II atas kesediaannya untuk memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam proses penyelesaian tesis ini.
6. Prof. Dr. Rahmat Safe'i, S.Hut., M.Si. selaku Dosen pembimbing III atas kesediaannya untuk memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam proses penyelesaian tesis ini.
7. Prof. Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P. selaku Dosen Penguji I yang telah memberikan masukan, koreksi, serta saran sehingga penyusunan tesis ini

menjadi lebih baik.

8. Prof. Dr. Ir. Samsul Bakri, M.Si. selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan masukan, koreksi, serta saran sehingga penyusunan tesis ini menjadi lebih baik.
9. Seluruh dosen Program Studi Magister Ilmu Lingkungan Pascasarjana Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan pengalaman selama penulis menjadi mahasiswa, serta staf/karyawan yang memberikan bantuan dan kerjasamanya selama ini.
10. Terima kasih kepada PT Gree Energy Hamparan yang telah memberikan dukungan, kerjasama, serta informasi yang diperlukan dalam penyusunan penelitian ini.
11. Kedua orang tuaku tercinta bapak Budi Harjo dan Ibu Susilawati yang selalu memberikan motivasi, dukungan, doa restu, kasih sayang, perhatian yang tak pernah putus kepada penulis dalam setiap langkah perjalanan hidup dan penyusunan tesis ini.
12. Adikku tersayang, Revi Dwi Amanda yang selalu menemani dan menyemangati serta doa keluarga besar atas semua limpahan kasih sayang, doa, nasehat, semangat, kebahagiaan, dan perhatian yang tak pernah putus kepada penulis selama ini.
13. Teman-teman seperjuangan Angkatan 2023 di Magister Ilmu Lingkungan Pascasarjana Universitas Lampung atas semangat berjuang dan bantuan yang diberikan kepada penulis selama ini.
14. Semua pihak yang telah memberikan dukungan dan membantu penulis hingga terselesaikan tesis ini.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Bandar Lampung, 2026
Penulis,

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR.....	iii
DAFTAR TABEL	iv
I. PENDAHULUAN.....	2
1.1 Latar Belakang.....	2
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Kerangka Pemikiran Penelitian	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Limbah Industri Tapioka	7
2.2 Biogas	9
2.3 <i>Anaerobic Disgestion</i>	10
2.4 Pengolahan Air Limbah Tapioka Secara Anaerobik Menjadi Biogas	11
2.5 Kondisi Proses yang Mempengaruhi Produksi Biogas.....	13
2.6 Potensi Pemanfaatan biogas sebagai energi alternatif	17
2.7 Gas Rumah Kaca	18
2.8 Faktor Emisi Metana.....	20
2.9 Metode Perhitungan Faktor Emisi Metana	22
III.METODE PENELITIAN	24
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	24
3.2 Metode Penelitian	24
3.3 Tahapan Penelitian.....	27
IV.HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1 Sistem Produksi biogas pada IPP PLTBg 2x1,5 MW PT Gree Energy Hampan	29
4.2 Karakteristik Limbah Tapioka.....	32

4.3	Produksi Biogas dan Metana	35
4.4	Total Produksi Emisi CH ₄ dari Pengolahan Limbah Tapioka	39
4.5	Pengaruh <i>Organic Loading Rate</i> Terhadap Produksi Biogas dan Metana	42
4.6	Evaluasi Faktor Emisi Metana (CH ₄) Berbasis Data Lapangan Selama Periode Pengamatan.....	50
4.8	Reduksi Emisi Gas Rumah Kaca dari Pemanfaatan Air Limbah Tapioka sebagai Biogas	58
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	62
5.1	Kesimpulan.....	62
5.2	Saran	63
5.3	Rekomendasi.....	63
	DAFTAR PUSTAKA	64
	LAMPIRAN.....	71

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Kerangka Pemikiran Penelitian	6
Gambar 2. Diagram Tahapan Pembentukan Biogas	11
Gambar 3. Tahapan proses fermentasi pembentukan metana.....	12
Gambar 4. Emisi baseline, Emisi proyek dan Emisi reduksi	21
Gambar 5. Diagram alir tahapan penelitian.	28
Gambar 6. Diagram alir produksi biogas pada tahapan proses biologis	30
Gambar 7. Grafik produksi biogas 2023-2024.....	35
Gambar 8. Grafik Konsentrasi metana dan total produksi Biogas.....	36
Gambar 9. Grafik hubungan antara total bahan organik dan emisi gas metana....	37
Gambar 10. Grafik volume air limbah dan emisi gas metana.....	40
Gambar 11. Grafik hubungan volume air limbah dan produksi metana	41
Gambar 12. Grafik hubungan antara OLR dan produksi biogas.....	43
Gambar 13. Grafik hubungan antara OLR dan produksi metana.....	46
Gambar 14. Hubungan antara <i>Organic Loading Rate</i> (OLR) dan konsentrasi metana (%CH ₄).....	48
Gambar 15. Hubungan antara laju produksi metana dengan total COD yang tereduksi	53
Gambar 16. Data curah hujan dan temperatur udara.....	56
Gambar 17. Perbandingan <i>Baseline</i> , <i>Project</i> , dan Reduksi Emisi pada PT Gree Energy Hampanan (2023–2024)	60

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Baku Mutu Limbah Cair Industri Tapioka	8
Tabel 2. Komposisi Kimia Onggok	8
Tabel 3. Konversi energi biogas	18
Tabel 4. Indeks potensi pemanasan global GRK terhadap gas karbon dioksida.	19
Tabel 5. Jenis data yang digunakan	24
Tabel 6. Data total laju alir limbah, rata-rata COD _{in} dan rata-rata COD _{rem} pada tahun 2023 dan 2024	33
Tabel 7. Hasil Uji F Pengaruh Laju Pembebanan Bahan Organik terhadap	38
Tabel 8. Koefisien regresi linier pengaruh laju pembebanan bahan organik terhadap produksi metana (CH ₄)	38
Tabel 9. Hasil Uji F pengaruh volume air limbah terhadap produksi metana.....	41
Tabel 10. Koefisien regresi linier pengaruh volume air limbah terhadap produksi gas metana	41
Tabel 11. Hasil Uji F pengaruh <i>organic loading rate</i> (OLR) terhadap produksi biogas.....	43
Tabel 12. Koefisien regresi linier pengaruh <i>organic loading rate</i> (OLR) terhadap produksi biogas	44
Tabel 13. Hasil Uji F pengaruh <i>Organic Loading Rate</i> (OLR) terhadap produksi metana.....	46
Tabel 14. Koefisien regresi linier pengaruh <i>organic loading rate</i> (OLR) terhadap produksi metana.....	47
Tabel 15. Hasil Uji F pengaruh <i>organic loading rate</i> (OLR) terhadap konsentrasi metana (CH ₄).....	48

Tabel 16. Koefisien regresi linier pengaruh <i>organic loading rate</i> (OLR) terhadap konsentrasi metana (CH ₄)	49
Tabel 17. Hasil perhitungan faktor emisi CH ₄	51
Tabel 18. Hasil Uji F pengaruh COD <i>removal</i> (CODr) terhadap produksi metana (CH ₄)	53
Tabel 19. Koefisien regresi linier pengaruh COD <i>removal</i> (CODr) terhadap produksi metana (CH ₄)	54
Tabel 20. Hasil perhitungan reduksi emisi GRK selama periode pemantauan tahun 2023–2024	59

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri tapioka merupakan salah satu agroindustri berbasis singkong yang menghasilkan limbah dalam jumlah besar, terutama limbah cair dengan kandungan bahan organik tinggi. Proses pengolahan singkong menjadi pati menghasilkan air limbah, onggok, kulit singkong, serta residu lainnya. Pingmuanglek *et al.* (2017) melaporkan bahwa pengolahan sekitar 4,3 ton singkong dengan kebutuhan air ± 25 m³ dapat menghasilkan 1 ton tapioka, sekitar 1,3 ton onggok, serta $\pm 26,4$ m³ air limbah. Air limbah industri tapioka umumnya memiliki nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang tinggi, berkisar antara 18.000–25.000 mg/L (Kamahara *et al.*, 2010), sehingga berpotensi besar mengalami degradasi anaerobik dan menghasilkan metana (CH₄) apabila tidak dikelola secara memadai.

Metana merupakan salah satu gas rumah kaca (GRK) utama yang berkontribusi signifikan terhadap pemanasan global. Gas ini memiliki potensi pemanasan global sekitar 27 kali lebih besar dibandingkan karbon dioksida (CO₂) dalam horizon waktu 100 tahun serta menunjukkan tren peningkatan konsentrasi di atmosfer sebesar 1–2% per tahun (Skytt *et al.*, 2020; Nashier & Lakra, 2020). Secara global, sektor limbah tercatat sebagai sumber antropogenik kelima terbesar emisi metana, dengan kontribusi dominan berasal dari sub sektor pengolahan air limbah. Negara-negara seperti India, Tiongkok, Amerika Serikat, dan Indonesia menyumbang sekitar 49% dari total emisi metana global pada sub sektor tersebut (Moonkawin *et al.*, 2023). Kondisi ini menunjukkan bahwa limbah cair industri, termasuk limbah dari industri tapioka, memiliki peran strategis dalam dinamika emisi metana global.

Di tingkat nasional, menurut data *Enhanced Nationally Determined Contribution*, sektor limbah menyumbang sekitar 6,52% dari total emisi gas rumah kaca (GRK) Indonesia (NDC, 2022). Namun demikian, pengelolaan limbah cair industri tapioka di Indonesia hingga saat ini masih banyak dilakukan secara konvensional melalui kolam penampungan terbuka. Sistem ini memungkinkan terjadinya degradasi anaerobik tanpa pengendalian, sehingga metana yang terbentuk dilepaskan langsung ke atmosfer tanpa pemanfaatan energi (Anggari & Prayitno, 2020). Kondisi tersebut tidak hanya meningkatkan beban pencemaran lingkungan, tetapi juga memperbesar potensi emisi GRK dari sektor limbah.

Sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan, teknologi pengolahan limbah cair berbasis digester anaerobik tertutup telah dikembangkan untuk menangkap dan memanfaatkan metana sebagai biogas. Teknologi ini terbukti mampu menurunkan emisi metana sekaligus menghasilkan energi terbarukan yang dapat dikonversi menjadi listrik (Haryanto *et al*, 2017). Salah satu penerapan teknologi tersebut dilakukan oleh PT Gree Energy Hamparan, yang memanfaatkan limbah cair, elot, dan onggok dari industri tapioka melalui sistem *Anaerobic Cover Lagoon Digester* yang terintegrasi dengan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) berkapasitas $2 \times 1,5$ MW. Pemanfaatan limbah menjadi energi terbarukan ini sejalan dengan pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan, khususnya Tujuan 7 (Energi Bersih dan Terjangkau) dan Tujuan 13 (Penanganan Perubahan Iklim), karena mampu mengurangi emisi GRK sekaligus menyediakan sumber energi alternatif yang lebih bersih.

Dalam konteks inventarisasi emisi GRK, metode yang direkomendasikan oleh *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) umumnya menggunakan pendekatan berbasis faktor emisi dan data aktivitas. Namun, faktor emisi *default* yang tersedia seringkali belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi aktual di lapangan, terutama pada sistem pengolahan limbah industri dengan karakteristik limbah, teknologi, dan kondisi operasional yang spesifik. Penggunaan faktor emisi *default* berpotensi menghasilkan estimasi emisi yang kurang akurat serta meningkatkan ketidakpastian dalam perhitungan emisi GRK (Nuraeni & Ashuri, 2018). Oleh karena itu, evaluasi dan penentuan faktor emisi metana spesifik

berbasis data empiris lokal menjadi penting untuk meningkatkan kualitas dan akurasi inventarisasi emisi GRK.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan pada evaluasi faktor emisi metana (CH_4) berdasarkan data aktual dari sistem produksi biogas di PT Gree Energy Hampan. Penentuan faktor emisi yang representatif diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai emisi metana dari pengolahan limbah cair industri tapioka, sekaligus mendukung penilaian potensi reduksi emisi GRK yang dihasilkan melalui penerapan teknologi biogas.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dilaksanakannya penelitian ini yaitu :

1. Mengevaluasi faktor emisi metana (CH_4) aktual yang dihasilkan dari sistem pengolahan limbah cair industri tapioka berbasis *Anaerobic Cover Lagoon Digester* di PT Gree Energy Hampan berdasarkan data operasional lapangan.
2. Mengidentifikasi faktor-faktor operasional dan lingkungan yang memengaruhi variasi pembentukan metana dalam sistem produksi biogas pada pengolahan limbah cair industri tapioka.
3. Mengevaluasi reduksi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari proses produksi biogas limbah tapioka berdasarkan metodologi IPCC.

1.3 Kerangka Pemikiran Penelitian

Inventarisasi emisi gas rumah kaca sektor limbah pada umumnya masih mengandalkan penggunaan faktor emisi default yang direkomendasikan oleh *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), baik yang bersifat umum maupun spesifik. Faktor emisi default tersebut disusun untuk merepresentasikan kondisi rata-rata dan memudahkan estimasi emisi pada berbagai sektor. Namun, pendekatan ini memiliki keterbatasan karena belum sepenuhnya mencerminkan variasi karakteristik limbah, teknologi pengolahan, serta kondisi operasional aktual di lapangan. Akibatnya, nilai faktor emisi default berpotensi berbeda

dengan faktor emisi aktual yang terbentuk pada sistem pengolahan limbah tertentu, sehingga menimbulkan ketidakpastian dalam estimasi emisi metana.

Perbedaan antara faktor emisi default IPCC dan faktor emisi aktual menjadi semakin relevan pada industri tapioka yang menghasilkan limbah cair dengan beban organik sangat tinggi. Limbah cair industri tapioka umumnya memiliki nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) berkisar antara 7.000 – 30.000 mg/L, yang menunjukkan potensi besar terjadinya degradasi bahan organik secara anaerobik dan pembentukan gas metana (CH₄). Dalam sistem pengolahan anaerobik, bahan organik tersebut dimanfaatkan oleh mikroorganisme melalui tahapan hidrolisis, asidogenesis, asetonogenesis, dan metanogenesis hingga menghasilkan biogas yang kaya metana. Secara konseptual, jumlah metana yang terbentuk berkorelasi dengan besarnya bahan organik yang terdegradasi, sehingga COD *removal* digunakan sebagai parameter kuantitatif dalam memperkirakan pembentukan metana.

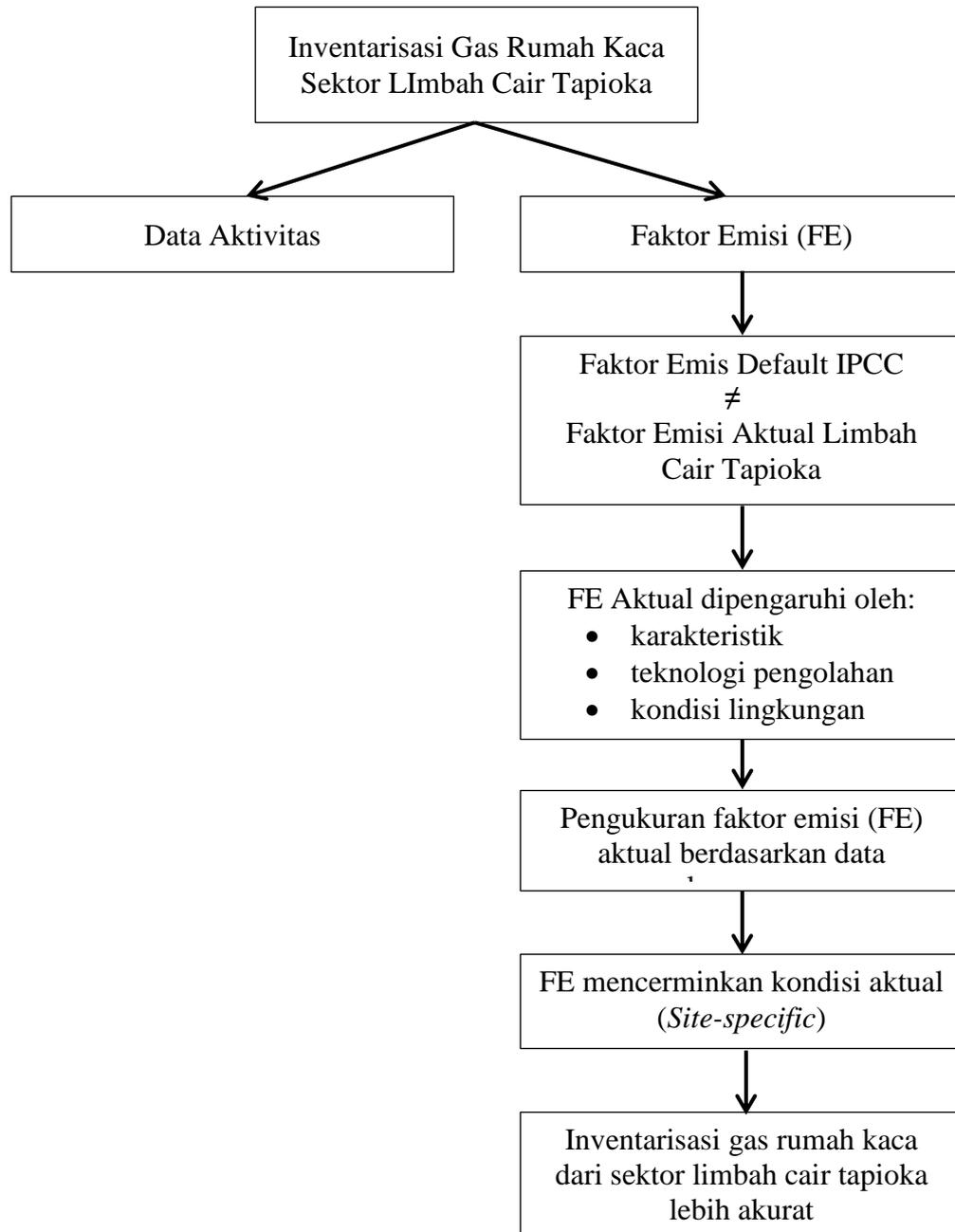
Pengolahan limbah cair industri tapioka pada umumnya dilakukan menggunakan sistem anaerobik, seperti *anaerobic lagoon* atau *anaerobic covered lagoon*, yang memanfaatkan bahan organik sebagai substrat bagi mikroorganisme anaerob. Dalam sistem tersebut, bahan organik mengalami tahapan hidrolisis, asidogenesis, asetonogenesis, dan metanogenesis hingga menghasilkan biogas yang didominasi oleh metana dan karbon dioksida (Anggari & Prayitno, 2020). Secara teoritis, jumlah metana yang terbentuk berkorelasi dengan besarnya bahan organik yang terdegradasi, sehingga parameter COD *removal* digunakan sebagai dasar kuantitatif dalam memperkirakan pembentukan metana pada sistem pengolahan limbah cair berbasis anaerobik.

Meskipun demikian, pembentukan metana tidak hanya ditentukan oleh besarnya beban organik yang masuk ke dalam sistem, tetapi juga dipengaruhi oleh karakteristik limbah dan kondisi operasional pengolahan. Faktor-faktor seperti komposisi substrat, temperatur, pH, kestabilan proses, waktu tinggal, serta jenis dan konfigurasi teknologi pengolahan berpengaruh terhadap aktivitas mikroorganisme anaerob dan efisiensi pembentukan metana. Sejumlah penelitian

menunjukkan bahwa variasi kondisi operasional dan karakteristik substrat dapat menghasilkan perbedaan produksi biogas dan metana yang signifikan, meskipun berasal dari jenis limbah yang serupa (Tanata *et al.*, 2013); Wintolo & Isdiyanto, 2011; Hafsah *et al.* 2023). Hal ini menegaskan bahwa pembentukan metana bersifat spesifik terhadap sistem dan kondisi lapangan (*site-specific*).

Dalam konteks mitigasi perubahan iklim, ketergantungan pada faktor emisi default yang bersifat umum berpotensi menyebabkan estimasi emisi metana yang kurang akurat, khususnya pada sistem pengolahan limbah yang telah menerapkan teknologi penangkapan dan pemanfaatan biogas. Oleh karena itu, pengembangan faktor emisi metana berbasis data operasional aktual menjadi penting untuk meningkatkan representativitas estimasi emisi serta menilai kinerja mitigasi secara lebih tepat.

Berdasarkan kerangka pemikiran tersebut, penelitian ini difokuskan pada penentuan faktor emisi metana (CH₄) berbasis data operasional aktual dari sistem produksi biogas pada pengolahan limbah cair industri tapioka di PT Gree Energy Hampanan. Dengan menganalisis hubungan antara COD yang terdegradasi dan metana yang dihasilkan, serta membandingkan faktor emisi yang diperoleh dengan faktor emisi default IPCC, penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan faktor emisi yang lebih representatif terhadap kondisi nyata di lapangan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan akurasi inventarisasi emisi gas rumah kaca sektor limbah industri serta mendukung evaluasi potensi reduksi emisi melalui penerapan teknologi biogas berbasis bukti empiris. Diagram alir kerangka pemikiran disajikan pada Gambar 1 sebagai berikut



Gambar 1. Kerangka Pemikiran Penelitian

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah Industri Tapioka

Limbah industri adalah buangan yang berasal dari industri sebagai akibat dari produksi. Pengusaha industri yang akan membuang limbah diwajibkan mengolah terlebih dahulu untuk mencegah pencemaran lingkungan hidup di sekitarnya dengan metode pengolahan limbah yang dapat dilakukan secara fisik, kimia, biologi atau kombinasi untuk mengatasi pencemaran (Rachman *et al.*, 2024). Suroso (2011) mengatakan bahwa air limbah yang berasal dari industri sangat bervariasi, serta tergantung dari jenis dan besar kecilnya industri, pengawasan pada proses industri, derajat penggunaan air, dan derajat pengolahan. Limbah dari industri tapioka bisa dibedakan menjadi 3 macam yaitu limbah padat, cair dan gas.

2.2.1 Limbah Cair Industri Tapioka

Industri tapioka menghasilkan limbah cair dari proses pengolahan singkong menjadi tapioka. Proses yang menghasilkan limbah cair pada industri tapioka yaitu pada pencucian singkong, dan ekstraksi singkong. Menurut Fatoni *et al.* (2019), bahwa air limbah yang dihasilkan memiliki jumlah besar yaitu $\pm 20 \text{ m}^3/\text{ton}$ tapioka atau $\pm 5 \text{ m}^3/\text{ton}$ singkong. Kandungan bahan organik pada limbah cair industri tapioka sangat tinggi. Kandungan bahan organik diketahui dari nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) limbah cair.

Limbah cair industri tapioka memiliki *Chemical Oxygen Demand* (COD) yaitu sekitar 7.000 – 30.000 mg/L (Prayitno, 2008). BOD limbah cair tapioka memiliki nilai setengah dari COD. Menurut Setyawaty *et al.* (2011), limbah cair tapioka dengan memiliki nilai BOD sebesar 3.000 – 7.500 mg/L. Nilai COD dan BOD

tinggi dapat mencemari lingkungan baik lingkungan air maupun darat, namun berpotensi dimanfaatkan untuk produksi biogas sebagai sumber energi pada industri tapioka. Limbah cair industri tapioka harus memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan sebelum dibuang ke lingkungan. Kualitas limbah cair diukur dari COD, BOD, pH, dan total padatan tersuspensi (TSS). Baku mutu limbah cair industri tapioka telah ditetapkan dan harus dipenuhi sebelum dibuang ke lingkungan. Baku mutu limbah cair tapioka terdapat pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup (PermenLHK) RI Nomor 5 Tahun 2014. Baku mutu limbah cair industri tapioka dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Baku Mutu Limbah Cair Industri Tapioka

Parameter	Parameter Kadar Maksimum
COD	300 mg/L
BOD ₅	150 mg/L
TSS	100 mg/L
Sianida	0,3 mg/L
pH	6,0 – 9,0
Debit Limbah Maksimum	30 m ³ per ton tapioca

Sumber : Peraturan Menteri Lingkungan Hidup (PermenLHK) RI Nomor 5 Tahun 2014.

2.2.2 Limbah Padat Industri Tapioka

Limbah padat yang dihasilkan oleh industri tapioka biasa berupa kulit dan onggok yang dihasilkan dari proses pengupasan, ekstraksi, dan pemisahan pati (Saputra, 2023). Pada industri tapioka, pengolahan singkong menjadi tapioka menghasilkan 145,8 kg onggok/ton singkong. Komposisi kimia onggok dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Komposisi Kimia Onggok

Komposisi Kimia	Jumlah persentase (%)
Air	-
Protein	3,1
Lemak	0,2

Komposisi Kimia	Jumlah persentase (%)
Abu	5,7
Serat kasar	13,1
Pati	65,5

Onggok memiliki kandungan utama pati dan serat kasar. Kandungan tertinggi onggok merupakan pati dengan bentuk granula-granula. Pati pada onggok terdiri dari amilosa dan amilopektin. Pati mengandung amilosa berkisar 15% - 30% amilopektin berkisar antara 70% - 85%. Serat kasar onggok terdiri dari selulosa dan hemiselulosa (Arnata, 2009).

2.2 Biogas

Diantara semua sumber energi berkelanjutan dan terbarukan, biogas secara signifikan mendapat perhatian sebagai bahan bakar nabati yang menjanjikan (Qyyum *et al.*, 2019). Pemanfaatannya dalam pembangkit energi membawa beberapa keuntungan ekonomi, lingkungan, dan iklim (Gaballah *et al.*, 2020). Tergantung pada sumber bahan organik yang digunakan, biogas terutama terdiri dari metana (50 - 75%), karbon dioksida (25 - 50%), dan sisa-sisa gas lainnya, seperti amonia, hidrogen, dan hidrogen sulfida. Hal ini dapat diterapkan untuk produksi pemanas/listrik atau ditingkatkan menjadi biometana dan digunakan sebagai bahan bakar kendaraan atau dipompa ke jaringan gas alam. Hal yang menjadi tantangan dari proses produksi biogas yaitu, proses dimana harus meminimalkan konsentrasi CO₂ dalam biogas dan gas pengotor lainnya sehingga diharapkan dapat meningkatkan kandungan metana dan nilai panasnya (Gustafsson *et al.*, 2020).

Metana dalam biogas adalah gas yang tidak berbau, tidak berwarna, dan mudah terbakar, serta banyak dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan panas dan listrik. Selain itu, metana juga digunakan dalam produksi berbagai bahan kimia organik. Gas ini dihasilkan dari proses pembusukan bahan organik secara alami dan umum ditemukan di tempat pembuangan sampah, rawa-rawa, sistem septik, dan saluran pembuangan. Air limbah dari industri tapioka biasanya

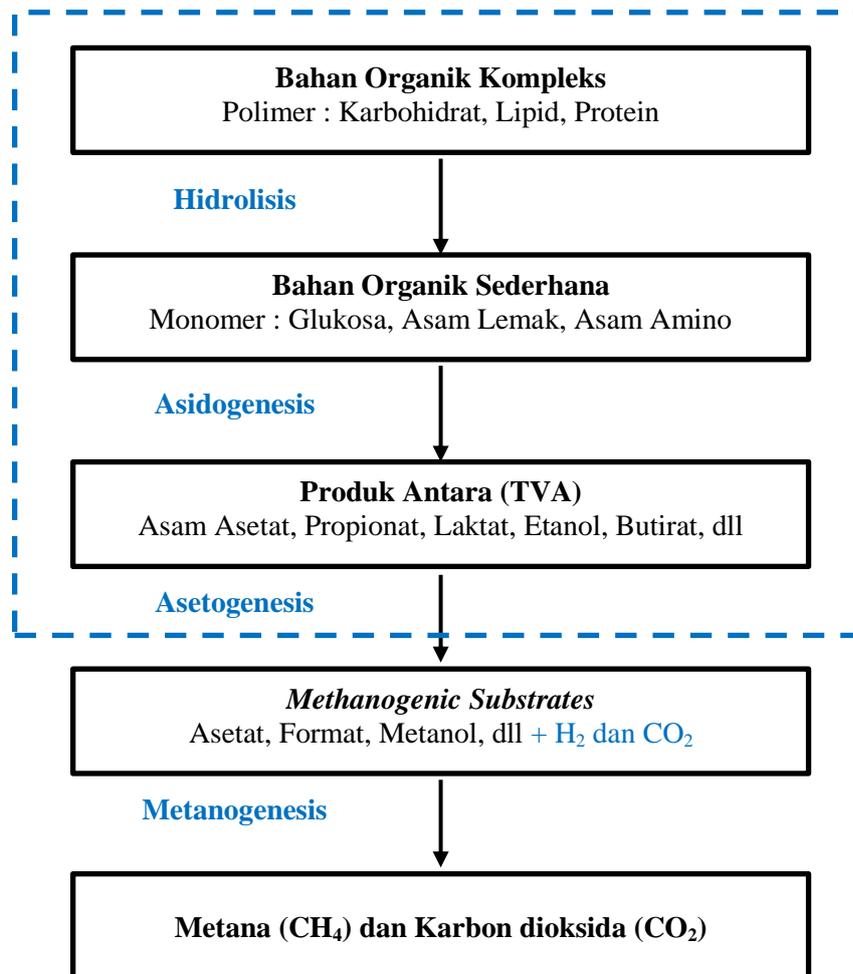
diolah melalui serangkaian *lagoon* anaerobik terbuka untuk mengurangi kandungan COD yang berpotensi mencemari lingkungan. Proses ini menghasilkan gas metana, yang kemudian dapat ditangkap dan dimanfaatkan sebagai sumber energi pada pembangkit listrik biogas, menggantikan generator diesel yang sebelumnya digunakan. Energi listrik yang dihasilkan dari proses ini akan digunakan kembali oleh industri tapioka, sehingga mendukung sistem energi yang lebih berkelanjutan (Setyawaty et al., 2011).

2.3 Anaerobic Digestion

Penguraian secara anaerobik adalah proses pengolahan limbah menjadi energi (*Waste-to-Energy*) yang terbukti banyak digunakan untuk mengolah limbah organik seperti limbah makanan (Panigrahi et al., 2020), kotoran ternak, dan aliran air limbah di antaranya dapat berupa air limbah tapioka (Jiraprasertwong et al., 2019), Proses ini dapat mengubah sejumlah besar COD (> 50%) menjadi biogas yang dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk efisiensi energi. *Anaerobic Digestion* dapat dianggap sebagai proses biokimia yang cukup rumit, dan dikelompokkan menjadi empat tahap kunci (hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, metanogenesis), dimana sejumlah mikroorganisme mendegradasi bahan organik tanpa adanya oksigen untuk memperoleh biogas yang kaya akan metana (Kapoor et al., 2020).

Hidrolisis umumnya merupakan tahap dimana bahan organik kompleks akan dicerna menjadi bahan yang lebih sederhana, yang mudah larut atau *soluble monomers*. Proses hidrolisis ini dikatalis oleh bakteri amilolitik atau proteolitik dengan menggunakan ekstrak enzim dari bakteri yaitu selulase, protease dan lipase. Pada tahap asidogenesis, produk yang dilepaskan diubah menjadi asam lemak rantai pendek, alkohol, dan produk samping berupa gas (H_2 , NH_3 , dan H_2S) oleh bakteri asidogen (Mirmohamadsadeghi et al., 2019). Dalam dua tahap pertama ini, oksigen yang tidak diinginkan dapat dikonsumsi oleh mikroba anaerob fakultatif. Senyawa yang terbentuk pada fase sebelumnya diubah oleh bakteri asidogenik menjadi asam asetat, hidrogen, dan karbon dioksida (CO_2) pada tahap ketiga atau biasa disebut dengan asidifikasi (Leung & Wang, 2016).

Akhirnya, bakteri metanogen dapat menghasilkan metana dari produk pengasaman melalui proses metanogenesis (seperti asam asetat, asam format, CO_2/H_2 , dan lain sebagainya). Tiga tahapan awal disebut sebagai fermentasi asam sedangkan tahap keempat disebut fermentasi methanogenesis. Skema tahap proses pembentukan biogas dapat dilihat pada Gambar 2.



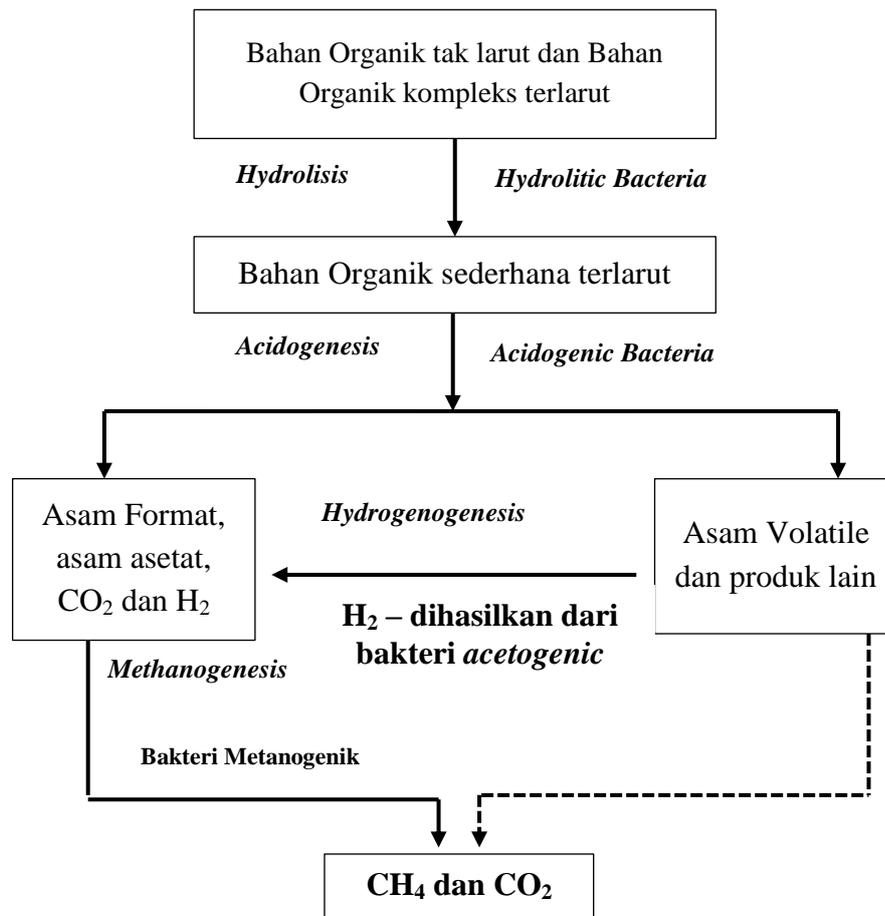
Gambar 2. Diagram Tahapan Pembentukan Biogas

2.4 Pengolahan Air Limbah Tapioka Secara Anaerobik Menjadi Biogas

Proses pengolahan anaerobik adalah penguraian senyawa organik dalam air limbah oleh mikroorganisme menjadi gas metana (CH_4), karbon dioksida (CO_2), dan biogas sebagai produk akhir tanpa oksigen. Sistem fermentasi anaerobik cocok untuk air limbah dengan konsentrasi bahan organik tinggi. Menurut Putra *et*

al. (2021), komposisi biogas terdiri atas metana (CH_4) sebesar 55 – 75 %, karbon dioksida (CO_2) berkisar 25 – 45%, nitrogen (N_2) berkisar 0 – 0,3%, dan hidrogen sulfida (H_2S) berkisar 0 – 3,5%, dan oksigen (O_2) berkisar 0,1 – 0,5%.

Pembentukan gas metana melalui metabolisme anaerobik merupakan proses bertahap dengan tiga tahap utama yaitu hidrolisis, asidogenesis, dan metanogenesis. Tahapan proses fermentasi pembentukan metana dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Tahapan proses fermentasi pembentukan metana.
Sumber : Sawyerr *et al.*, 2019

Tahap awal fermentasi pembentukan gas metan akan terjadi perombakan senyawa organik kompleks berupa polimer seperti lipida, polisakarida dan protein menjadi senyawa yang lebih sederhana berupa monomernya yaitu asam lemak, gliserin, mono dan disakarida serta asam amino yang akan dihidrolisis oleh bakteri hidrolitik di dalam air limbah dengan melibatkan enzim ekstra seluler seperti selulase, protease, dan lipase (Sawyerr *et al.*, 2019).

Tahap kedua melibatkan bakteri asidogenik untuk mendegradasi komponen yang telah dihasilkan pada tahap pertama menjadi hasil antara seperti asam lemak volatil, alkohol, asam laktat, senyawa mineral seperti karbondioksida (CO_2), hidrogen (H_2), amoniak (NH_3) dan hidrogen sulfida (H_2S) (Sawyerr *et al.*, 2019). Tahap ketiga merupakan methanogenesis yang melibatkan bakteri perombak hasil antara menjadi produk akhir berupa metana dan karbondioksida. Bakteri metanogenik pada dasarnya tidak dapat merombak alkohol selain *methanol* dan asam organik (Sawyerr *et al.*, 2019).

Bahan organik tak larut dan bahan organik kompleks terlarut akan diuraikan menjadi bahan organik sederhana terlarut, asam volatil, dan produk lainnya. Proses ini menghasilkan asam format, asam asetat, CO_2 , dan H_2 . Metana (CH_4) terbentuk dari asetat atau melalui reduksi CO_2 oleh bakteri asetotropik dan hidrogenotropik dengan bantuan hidrogen. Bakteri asidogenik berperan dalam memproduksi hidrogen, membentuk metanol dan asam asetat dari alkohol serta asam organik lainnya. Keberhasilan pembentukan gas metana dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti laju pembebanan air limbah, konsentrasi mikroorganisme dalam bioreaktor, efektivitas kontak antara mikroorganisme dan bahan organik, serta kondisi fermentasi, termasuk pH dan temperatur. Suhu optimal untuk proses ini berkisar antara 30–35 °C, dengan pH 6,8–7,5, rasio karbon terhadap nitrogen (C/N) 20–30, kadar padatan 7–9 %, dan waktu tinggal hidraulik 20–40 hari.

2.5 Kondisi Proses yang Mempengaruhi Produksi Biogas

Selama proses penguraian anaerobik, sejumlah reaksi kimia dan biokimia berlangsung secara berurutan dengan melibatkan berbagai mikroorganisme dan enzim. Namun, kondisi lingkungan dapat memengaruhi perilaku mikroorganisme. Oleh karena itu, pemantauan dan pengendalian kondisi lingkungan selama proses ini penting untuk meningkatkan efisiensi dan memastikan pembentukan metana yang stabil (Cruz *et al.*, 2021). Oleh karena itu, beberapa kondisi operasional kritis, yang diharapkan dapat meningkatkan efisiensi produksi biogas, dapat terus dipertahankan dalam kisaran optimal.

2.5.1. pH

Perubahan pH (derajat keasaman) secara langsung memengaruhi aktivitas mikroorganisme. Pemahaman mengenai pH optimal sangat penting, misalnya proses hidrolisis dan asidogenesis berlangsung optimal pada pH 5,5–6,0, sedangkan asetogenesis dan metanogenesis memerlukan pH 6,5–7,5 (Pramanik *et al.*, 2019). Stabilitas pH juga menjadi faktor kunci dalam mengendalikan efek penghambatan oleh *Volatile Fatty Acid* (VFA) dan amonia (NH_3) (Issah *et al.*, 2020).

Pada substrat yang bersifat asam, seperti air limbah singkong, pH awal perlu diatur sebelum proses anaerobik dimulai. Selain itu, untuk limbah yang mudah terurai dengan cepat menghasilkan asam (misalnya, air limbah singkong, *whey* keju, atau *vinasse* tebu), penyesuaian alkalinitas selama proses fermentasi sering diterapkan guna mencegah dampak negatif dari akumulasi VFA pada aktivitas metanogen (Palma *et al.*, 2016).

2.5.2. Temperatur

Suhu berperan penting dalam produksi metana karena memengaruhi kinerja bakteri. Proses anaerobik dapat dioperasikan pada kondisi psikrofilik (10–20 °C), mesofilik (30–40 °C), atau termofilik (50–60 °C) (Ryue *et al.*, 2020). Pada suhu psikrofilik, pertumbuhan mikroba terbatas, dan laju reaksi berlangsung lambat (Tassew *et al.*, 2020). Sebaliknya, suhu termofilik mempercepat reaksi, meningkatkan produksi gas, dan menghilangkan patogen lebih efektif.

Penelitian Chavadej *et al.* (2019) menunjukkan bahwa produksi H_2 dan CH_4 secara terpisah dari air limbah tapioka berjalan baik pada suhu termofilik (55 °C). Namun, digester termofilik cenderung lebih boros energi dan kurang stabil dibandingkan sistem mesofilik. Menurut Amorim *et al.* (2019), produksi metana dan penghilangan bahan organik pada air limbah ubi kayu optimal pada suhu 32 °C dan 39 °C. Pemilihan rentang suhu yang tepat harus disertai kontrol suhu yang

baik. Fluktuasi suhu lebih dari 5 °C dalam waktu singkat dapat menurunkan hasil total biogas secara signifikan.

2.5.3. Rasio *Total Volatile Acid* (TVA)/Total Alkalinitas

TVA (*Total Volatile Acids*), terutama asam asetat, propionat, dan butirat, merupakan produk antara dalam pencernaan anaerobik, dihasilkan dari dua tahap awal, yaitu hidrolisis dan asidogenesis. Stabilitas proses dapat dipantau dengan mengukur pH, alkalinitas, dan TVA (dinyatakan sebagai CH₃COOH), yang berfungsi sebagai indikator umum kondisi proses. TVA sangat penting sebagai penanda karena merupakan produk antara utama sebelum produksi metana, dan akumulasinya menandakan ketidakseimbangan proses yang dapat menurunkan pH. Dalam kondisi tersebut, alkalinitas berperan sebagai buffer untuk menjaga keseimbangan asam-basa (Ceconet *et al.*, 2022).

Selain laju produksi biogas, stabilitas proses anaerobik juga dinilai melalui rasio TVA/alkalinitas, yang sering dianggap lebih sensitif daripada pengukuran pH. Selama kondisi mesofilik, rasio TVA/alkalinitas sebesar 0,23 – 0,3 menunjukkan proses yang stabil, sedangkan rasio < 0,23 mengindikasikan kekurangan substrat. Sebaliknya, nilai > 0,3 menunjukkan proses berlebih dan menurunnya stabilitas (Issah & Kabera, 2021). Rasio TVA/alkalinitas lebih akurat dalam mendeteksi perubahan dibandingkan pH karena alkalinitas berfungsi sebagai penyangga. pH akan tetap konstan selama buffer belum habis, sedangkan rasio TVA/alkalinitas memberikan peringatan lebih dini terhadap ketidakseimbangan dalam reaktor.

2.5.4. Rasio C/N

Rasio C/N merupakan perbandingan antara karbon dan nitrogen, yang dibutuhkan mikroba sebagai sumber energi dalam proses penguraian. Rasio ideal berkisar antara 20 – 30 dan optimal pada 25 – 30. Rasio C/N terlalu tinggi menghambat kinerja mikroba dan menurunkan produksi metana, sementara rasio terlalu rendah menyebabkan akumulasi amonia (NH₄⁺), meningkatkan pH, dan menghasilkan biogas dengan CH₄ tinggi, namun H₂ dan N₂ juga tinggi (Zulkarnaen *et al.*, 2018).

Rasio yang terlalu tinggi menghasilkan CH_4 rendah dan H_2 tinggi, sedangkan rasio seimbang menghasilkan CH_4 tinggi dan CO_2 sedang. Rasio optimal mendukung stabilitas proses pencernaan dan keseimbangan nutrisi untuk pertumbuhan mikroba. Bila nitrogen terlalu sedikit, penguraian berlangsung lambat dan produksi metana berkurang, sementara kelebihan nitrogen dapat menghambat mikroba karena amonia (Khalid *et al.*, 2011).

2.5.5. Waktu Tinggal Hidraulik (WTH)

Keberhasilan WTH juga tergantung pada komposisi substrat. Waktu tinggal hidraulik limbah adalah faktor penting yang sangat menentukan keberhasilan produksi biogas, karena mempengaruhi laju pembebanan, konsentrasi air limbah, dan akhirnya mempengaruhi dari pH air limbah di dalam digester anaerobik. Kondisi optimum dalam pembentukan biogas dapat dicapai pada waktu tinggal hidraulik 20 – 40 hari. Waktu tinggal hidraulik menyatakan jumlah waktu yang dibutuhkan substrat untuk tinggal di dalam reaktor. Dengan adanya WTH yang sesuai, akan memungkinkan terjadinya reaksi yang lengkap dalam proses anaerobik digester dan ini sangat bergantung pada temperatur proses, jenis teknologi dan komposisi substrat (Ricci & Confalonieri, 2016).

2.5.6. Pengadukan

Pengadukan dalam pembuatan biogas perlu dilakukan, hal ini bertujuan untuk menghomogenkan bahan baku agar mempercepat kontak substrat dengan mikroorganisme pada pembuatan biogas. Pada saat pencampuran dilakukan, bahan-bahan tersebut tidak tercampur dengan baik dan merata. Pengadukan dapat dilakukan sebelum dimasukkan ke dalam digester atau ketika bahan sudah berada di dalam digester (Haryanto *et al.*, 2017). Proses pengadukan dapat menggeser waktu produksi biogas menjadi satu sampai dua hari lebih awal dibanding jika reaktor tidak dilakukan pengadukan. Pengadukan menghasilkan kontak yang cukup antara substrat dengan populasi bakteri dan juga menghasilkan kondisi homogen dari limbah. Walaupun demikian, volume akumulatif dari biogas, tidak dipengaruhi dengan pengadukan (Mohamad *et al.*, 2016).

2.5.7. Konsentrasi Mikroba Aktif

Gas metana (CH_4) terbentuk pada fase metanogenesis, dimana bakteri metanogenik memanfaatkan asam lemak untuk metabolisme metana. Bakteri ini tumbuh dalam kondisi anaerob (tanpa O_2). Pengamatan mikroba anaerobik diperlukan untuk mengetahui konsentrasi mikroorganisme aktif dalam limbah atau lumpur aktif yang digunakan sebagai starter pembentukan biogas. Mikroba metanogenik merupakan kunci dalam proses metanogenesis. Perhitungan jumlah bakteri anaerobik bertujuan untuk mengetahui populasi bakteri dalam lumpur aktif, termasuk bakteri asetonotrof, metilotrof, dan hidrogenotrof yang berperan dalam pembentukan metana. Konsentrasi mikroorganisme metanogen aktif dipengaruhi oleh beberapa faktor, terutama nilai bahan organik dan rasio C/N (Putri, 2019).

2.6 Potensi Pemanfaatan biogas sebagai energi alternatif

Biogas yang dihasilkan melalui fermentasi anaerobik dengan bantuan mikroba dari bahan organik seperti limbah rumah tangga, limbah industri, dan kotoran hewan memiliki potensi besar sebagai energi terbarukan. Biogas ini tidak berwarna, tidak berbau, dan mudah terbakar. Gas ini 20% lebih ringan dari udara, dengan suhu pembakaran 650°C – 750°C , menghasilkan nyala api biru seperti LPG. Nilai Kalor gas metana adalah 20 MJ/m^3 dengan efisiensi pembakaran 60% pada konvensional kompor biogas (Febijianto, 2010).

Biogas dapat dimanfaatkan sebagai bahan pembangkit listrik, pemanas ruangan, memasak, dan pemanas air. Jika dikompresi, biogas dapat menggantikan gas alam terkompresi yang digunakan sebagai bahan bakar pada kendaraan bermotor. Konversi energi biogas dan penggunaannya dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Konversi energi biogas

Penggunaan Energi	Energi 1 m ³ biogas
Penerangan	Sebanding dengan lampu 60-100 W selama 6 jam
Listrik	Sebanding dengan 1,25 KWH listrik
Pengganti bahan bakar minyak tanah	0,62 liter
Pengganti bahan bakar solar	0,52 liter

Sumber: Aji & Bambang, 2019

Gas metana merupakan gas yang mengandung satu atom C dan empat atom H serta memiliki sifat mudah terbakar. Gas metana yang dihasilkan dapat dibakar sebagai energi panas. Satu mol metana memerlukan dua mol oksigen untuk dapat dioksidasi menjadi CO₂ dan air. Hal tersebut mengakibatkan setiap produksi 16 gram metana dapat menurunkan COD air limbah sebanyak 64 gram, stabilisasi 1 pound COD dapat menghasilkan 5,62 ft³/lb metana atau 0,35 m³ metana/kg COD pada suhu dan tekanan standar (Grady & Lim, 1980).

2.7 Gas Rumah Kaca

Pemanasan global terjadi akibat akumulasi gas rumah kaca berlebih yang dapat merusak lapisan ozon bumi. Gas rumah kaca di atmosfer mampu menyerap radiasi matahari yang dipantulkan bumi, sehingga meningkatkan suhu permukaan bumi. Efek rumah kaca adalah fenomena alami penting bagi atmosfer karena tanpa itu suhu rata-rata bumi akan mencapai -18 °C (Volokin & Rellez, 2014). Radiasi matahari terutama diserap oleh permukaan bumi, dan pemanasan global merupakan salah satu indikasi perubahan iklim.

Perubahan iklim mengacu pada perubahan signifikan dalam pola iklim bumi dalam jangka waktu tertentu, sementara pemanasan global lebih spesifik pada peningkatan suhu rata-rata atmosfer bumi. Indikasi perubahan iklim meliputi pergeseran musim, perubahan curah hujan, dan fluktuasi suhu (Safe'i, 2021). Simulasi ilmiah menunjukkan bahwa efek rumah kaca dapat menaikkan suhu rata-

rata bumi sebesar 1–5 °C. Jika peningkatan gas rumah kaca berlanjut, pemanasan global diprediksi meningkat 1,5–4,5 °C pada 2030.

Aktivitas manusia memperbesar konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer, memperkuat efek pemanasan. *Intergovernmental Panel on Climate Change* menyimpulkan bahwa peningkatan suhu rata-rata global sejak pertengahan abad ke-20 terutama disebabkan oleh peningkatan gas rumah kaca dari aktivitas manusia. Berdasarkan UNFCCC, terdapat enam jenis gas rumah kaca utama: karbondioksida (CO₂), dinitrooksida (N₂O), metana (CH₄), sulfurheksaflorida (SF₆), perflorokarbon (PFCs), dan hidroflorokarbon (HFCs) (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2013). Gas yang digolongkan sebagai GRK memiliki nilai indeks potensi pemanasan global yang berbeda-beda yang dapat memberikan dampak negatif terhadap pemanasan global. Nilai indeks potensi pemanasan global dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Indeks potensi pemanasan global GRK terhadap gas karbon dioksida.

Jenis Gas	Indeks Potensi Pemanasan Global
CO ₂	1
CH ₄	28
N ₂ O	273
NF ₃	17400
SF ₆	24300

Sumber : Greenhouse Gas Protocol, 2024

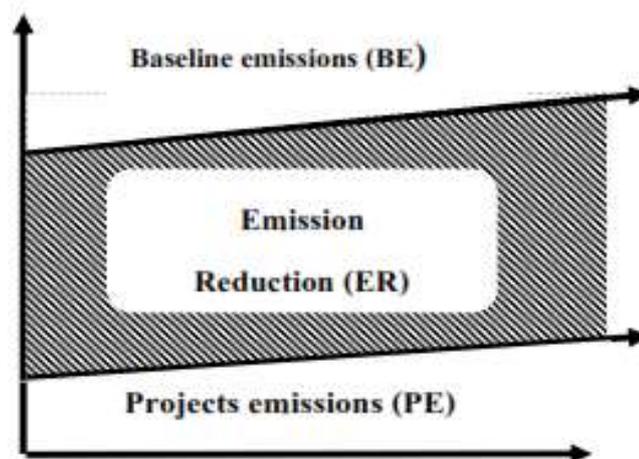
Sifat gas rumah kaca yaitu meningkatkan temperatur bumi dengan cara menangkap radiasi gelombang pendek dari matahari dan memantulkannya ke bumi. Gas rumah kaca juga memantulkan radiasi gelombang panjang ke bumi. Dampak dari gas rumah kaca adalah pemanasan global dan efek rumah kaca, dampak turunan dari pemanasan global salah satunya adalah perubahan iklim yang tak menentu dan cuaca ekstrim. Pemanasan global mendapatkan radiasi matahari tambahan lagi karena terdapatnya lubang ozon. Penipisan ozon mengakibatkan radiasi sinar ultraviolet dari matahari yang masuk ke bumi semakin besar intensitasnya (Widowati & Sutoyo, 2009).

Menurut Mustikaningrum *et al.* (2021), terdapat empat sektor sumber gas rumah kaca berasal yaitu sektor energi, sektor kehutanan, sektor pertanian dan sektor peternakan. Sektor energi, pemanfaatan bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara dan gas secara berlebihan dalam berbagai keperluan merupakan penyebab utama dilepaskannya emisi gas rumah kaca ke atmosfer. Sektor kehutanan, kegiatan pembukaan lahan, penebangan liar, perubahan kawasan hutan menjadi industri dan kegiatan lainnya yang bersifat merusak hutan, menyebabkan lepasnya beberapa jumlah emisi gas rumah kaca yang sebelumnya disimpan di dalam pohon tersebut. Sektor pertanian, emisi gas rumah kaca terutama berasal dari metana (CH_4) yang dihasilkan dari sawah yang tergenang, penggunaan pupuk, pembakaran padang sabana, dan pembusukan sisa-sisa pertanian, serta limbah-limbah yang tak dimanfaatkan secara optimal, seperti limbah agroindustri pertanian. Sektor peternakan, emisi gas rumah kaca berupa gas metana (CH_4) dilepaskan dari kotoran ternak yang membusuk dan tak dimanfaatkan. Menurut *Intergovernmental Panel On Climate Change* (IPCC) menyatakan jika laju emisi gas rumah kaca dibiarkan terus menerus tanpa adanya tindakan pencegahan untuk mengurunginya, maka suhu global rata-rata akan meningkat dengan laju $0,3\text{ }^\circ\text{C}$ setiap 10 tahun.

2.8 Faktor Emisi Metana

Faktor emisi adalah nilai representatif yang menghubungkan kuantitas polutan yang dilepaskan ke atmosfer dengan satuan unit sumber emisi. Faktor ini dinyatakan sebagai rasio antara berat polutan dan unit aktivitas, seperti berat, volume, jarak, atau durasi (misalnya: kilogram partikulat per megagram batu bara yang dibakar). Faktor emisi digunakan untuk memperkirakan jumlah emisi dari suatu sumber polusi udara dan dihitung berdasarkan rata-rata data yang tersedia, menggambarkan kualitas udara dalam jangka waktu panjang untuk berbagai kategori sumber (IPCC, 2006). Protokol Kyoto adalah perjanjian internasional di bawah UNFCCC yang menetapkan target pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) bagi 37 negara industri dan Uni Eropa. GRK terdiri dari enam gas utama, masing-masing dengan Potensi Pemanasan Global (GWP) yang berbeda.

Metana adalah salah satu gas penyebab pemanasan global, bersama karbon dioksida, nitrogen oksida dan hidrofluorokarbon. Karbon dioksida menyumbang emisi terbesar, yaitu 68% dari total GRK, diikuti metana sebesar 27%. Evaluasi emisi metana dilakukan menggunakan model matematika, seperti *Methane Recovery in Wastewater Treatment* (AMS III.H versi 16), yang dikembangkan oleh UNFCCC untuk pemulihan metana dalam pengolahan air limbah. Kegiatan proyek *Clean Development Mechanism* (CDM) dikelompokkan berdasarkan jumlah gas yang ditangani dan skala proyek. Terdapat jenis CDM skala kecil dan CDM skala besar. Emisi baseline, emisi proyek, dan emisi reduksi dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Emisi baseline, Emisi proyek dan Emisi reduksi
Sumber: Rahayu *et al.*, 2015

Pengurangan emisi dapat dihitung berdasarkan emisi, yang merupakan emisi gas rumah kaca sesuai kondisi sekarang tanpa proyek, dan emisi proyek, yang merupakan emisi gas rumah kaca saat fasilitas penangkapan metana telah dibangun dan listrik telah dijual ke jaringan. Pengurangan emisi diperoleh melalui rumus di bawah ini:

$$\text{Pengurangan Emisi (ER)} = \text{Emisi baseline (BE)} - \text{Emisi Proyek (PE)}$$

Sumber: Rahayu *et al.*, 2015

2.9 Metode Perhitungan Faktor Emisi Metana

Berdasarkan keputusan para pihak di COP 8, negara berkembang (non Annex I) seperti Indonesia menggunakan pedoman *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* untuk menyusun inventarisasi GRK (KLH, 2012)

Berdasarkan Pedoman IPCC 2006, ketelitian penghitungan tingkat emisi GRK dalam kegiatan inventarisasi dikelompokkan dalam 3 tingkat ketelitian. Tingkat ketelitian perhitungan ini dikenal sebagai 'Tier'. Tingkat ketelitian perhitungan terkait dengan data dan metode perhitungan yang digunakan sebagaimana dijelaskan berikut ini:

a. Tier 1

Estimasi berdasarkan data aktivitas dan faktor emisi *default*. Pada Tier 1, estimasi tingkat emisi GRK menggunakan sebagian besar data aktivitas dan parameter *default* berdasarkan Pedoman IPCC 2006.

b. Tier 2

Estimasi berdasarkan data aktivitas yang lebih akurat dan faktor emisi *default* IPCC atau faktor emisi spesifik suatu negara atau suatu pabrik (*country specific/plant specific*). Pada Tier 2, estimasi tingkat emisi GRK menggunakan beberapa parameter *default*, tetapi membutuhkan data aktivitas dan parameter terkait (faktor emisi, karakteristik limbah, dan lain-lain).

c. Tier 3

Estimasi berdasarkan metoda spesifik suatu negara dengan data aktivitas yang lebih akurat (pengukuran langsung) dan faktor emisi spesifik suatu negara atau suatu pabrik (*country specific/plant specific*). Pada Tier 3, estimasi tingkat emisi GRK didasarkan pada data aktivitas spesifik suatu negara (lihat Tier 2) dan menggunakan salah satu metoda dengan parameter kunci yang dikembangkan secara nasional atau pengukuran yang diturunkan dari parameter-parameter spesifik suatu negara. Inventarisasi tingkat emisi GRK kegiatan pengelolaan dapat menggunakan metoda spesifik-negara yang setara atau yang berkualitas lebih tinggi.

Penentuan Tier dalam inventarisasi GRK sangat ditentukan oleh ketersediaan data dan tingkat kemajuan suatu negara atau pabrik dalam hal penelitian untuk menyusun metodologi atau menentukan faktor emisi yang spesifik dan berlaku bagi negara/pabrik tersebut. Di Indonesia dan negara-negara non-Annex 1, sumber emisi sektor/kegiatan kunci pada inventarisasi GRK menggunakan Tier-1, yaitu berdasarkan data aktivitas dan faktor emisi *default* IPCC. Tingkat ketelitian Tier 1 adalah metodologi perhitungan emisi CH₄ yang paling sederhana dimana perhitungan didasarkan atas data aktivitas dan faktor emisi. Persamaan umum yang digunakan untuk perhitungan emisi CH₄ adalah sebagai berikut :

$$\text{Emisi CH}_4 = \text{Data Aktivitas} \times \text{Faktor Emisi}$$

Sumber: KLH, 2012.

Data aktivitas yang dimaksud merupakan data aktivitas yang terkait dengan seberapa banyaknya aktivitas yang dilakukan sehingga menghasilkan emisi CH₄. data aktivitas yang terkait dengan emisi CO₄ dari penggunaan bahan bakar berupa berapa banyak bahan bakar yang dipergunakan untuk keperluan bahan rumah tangga ataupun keperluan lainnya. Perhitungan emisi Tier 1 menggunakan data aktivitas yang sederhana. Sedangkan Tier 2 dan Tier 3 menggunakan data aktivitas yang lebih akurat dan lebih rinci.

Pada metode Tier-3, faktor emisi yang digunakan adalah data hasil pengukuran langsung pada saat produksi biogas. Pada produksi biogas, jumlah limbah tertentu akan menghasilkan CH₄ dengan jumlah tertentu juga. Data inilah yang akan digunakan sebagai basis data penentuan faktor emisi di Tier-3.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Oktober 2024 – Februari 2025. Penelitian dilaksanakan di PT Gree Energy Hampan yang berlokasi di Terbanggi Ilir, Kecamatan Bandar Mataram, Kabupaten Lampung Tengah, Lampung 34169.

3.2 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah kegiatan studi literatur dan survei lapang di PT Gree Energy Hampan untuk mengetahui dan melakukan pengambilan data produksi biogas di PT Gree Energy Hampan. Berikut ini adalah tahapan yang dilakukan untuk menyelesaikan penelitian :

3.2.1 Tahapan Pengumpulan Data

Jenis data yang digunakan meliputi data sekunder yang diperoleh dari PT Gree Energy Hampan dalam dua tahun terakhir. Uraian jenis dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Jenis data yang digunakan

Jenis Data	Keterangan
Volume limbah tapioka (m^3 /hari)	Dua Tahun
Kadar COD_{inlet} dan COD_{outlet} limbah tapioka (kg/m^3)	Dua Tahun
Produksi biogas (Nm^3 /hari)	Dua Tahun
Konsentrasi metana dalam biogas (% CH_4)	Dua Tahun

Data-data tersebut akan digunakan untuk mengukur faktor emisi CH₄ dari biogas limbah tapioka yang selanjutnya akan dibandingkan dengan faktor emisi yang digunakan pada pedoman IPCC 2006 dan metodologi CDM AMS.III-H Versi 17 ‘*Methane Recovery in Wastewater Treatment*’ yaitu 0,25 kg CH₄/kg CODrem.

3.2.2 Tahapan Pengukuran Faktor Emisi CH₄

Emisi CH₄ dari pengolahan air limbah industri umumnya dihitung sebagai berikut mengikuti persamaan 6.4 pada Pedoman IPCC 2006 (Volume 5: *Waste*, Bab 6 – *Wastewater Treatment and Discharge*) (Ma *et al.*, 2015) :

$$COD_{removal} = \left\{ COD_{in} \left(\frac{mg}{l} \right) - COD_{out} \left(\frac{mg}{l} \right) \right\} \times Q \left(\frac{m^3}{hari} \right)$$

$$CH_4_{Generated} = Volume\ Biogas\ (Nm^3) \times \%CH_4 \times \rho \left(\frac{kg}{Nm^3} \right)$$

$$Faktor\ Emisi = \frac{CH_4_{Generated}\ (kg)}{COD_{rem}\ (kg)}$$

Keterangan :

- CODremoval = Rata-rata bahan organik yang terdekomposisi setiap hari (kg COD/hari);
- CODin = Rata-rata bahan organik inlet yang terkandung pada air limbah industri (mg/l);
- CODout = Rata-rata bahan organik outlet yang terkandung pada air limbah industri (mg/l);
- Q = Rata-rata Volume Air Limbah setiap bulan (m³/hari)
- CH₄ Generated = Rata-rata Gas metana yang terbentuk dalam biogas (kg CH₄/hari)
- ρ = Densitas metana (kg/Nm³)
- η_{COD} = Efisiensi COD removal dari sistem pengolahan.

3.2.3 Tahapan Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK)

Pengurangan emisi dapat dihitung berdasarkan emisi yang merupakan emisi gas rumah kaca sesuai kondisi sekarang tanpa proyek dan emisi proyek. Pengurangan emisi diperoleh melalui rumus di bawah ini:

$$\text{Pengurangan Emisi (ER)} = \text{Emisi baseline (BE)} - \text{Emisi Proyek (PE)}$$

Perkiraan potensi pengurangan emisi untuk proyek penangkapan metana dihitung dengan metodologi CDM AMS.III-H Versi 17 '*Methane Recovery in Wastewater Treatment*'.

Estimasi emisi baseline ditetapkan sebagai berikut:

$$BE_y = \sum_i (Q_{ww,i,y} * COD_{inflow,i,y} * \eta_{COD,BL,i} * MCF_{ww,treatment,BL,i}) * B_{o,ww} * UF_{BL} * GWP_{CH_4}$$

Keterangan :

i	= Indeks untuk sistem pengolahan air limbah baseline
$Q_{ww,i,y}$	= Volume air limbah yang diolah dalam sistem pengolahan air limbah.
$COD_{inflow,i,y}$	= COD dari aliran air limbah yang masuk ke sistem pengolahan.
$\eta_{COD,BL,i}$	= efisiensi COD removal dari sistem pengolahan.
$MCF_{ww,treatment,BL,i}$	= Faktor koreksi metana untuk sistem pengolahan air limbah sesuai tabel III.H.1 dari AMS.III.H
$B_{o,ww}$	= Kapasitas limbah dalam menghasilkan metana (0,25 kg CH ₄ /kg COD sesuai nilai IPCC).
UF_{BL}	= Faktor koreksi model untuk memperhitungkan ketidakpastian model (0,89 sesuai nilai IPCC).
GWP_{CH_4}	= Global warming potential untuk metana (sesuai nilai IPCC).

Emisi proyek ditetapkan menggunakan rumus berikut:

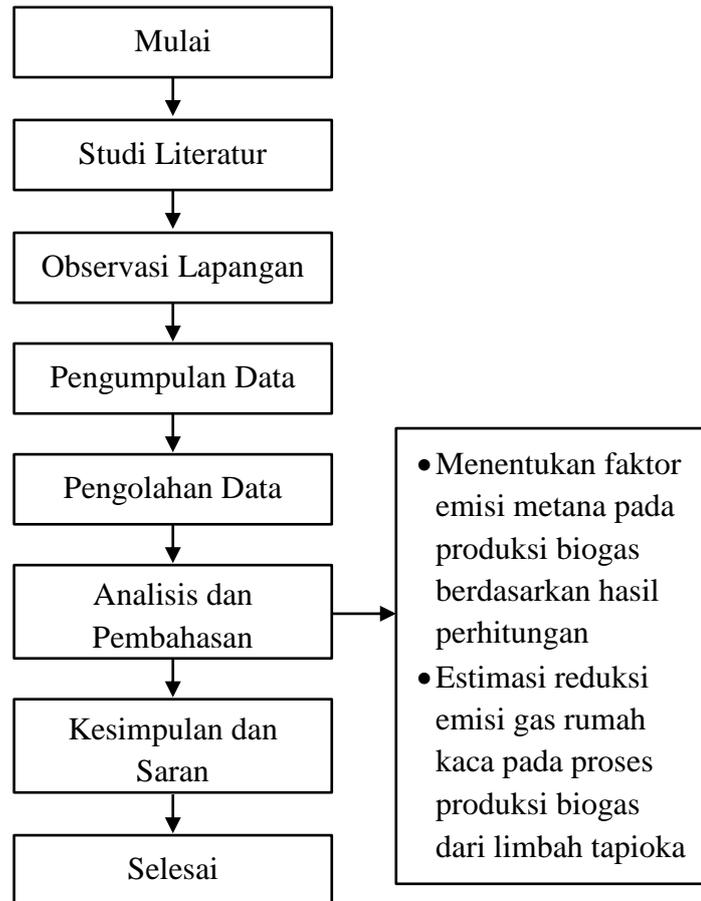
$$PE_y = \{ PE_{power,y} + PE_{ww,treatment,y} + PE_{s,treatment,y} + PE_{ww,discharge,y} + PE_{s,final,y} + PE_{fugitive} + PE_{biomassa,y} + PE_{flaring,y} \}$$

Keterangan :

- $PE_{power,y}$ = Emisi CO₂ dari listrik dan bahan bakar yang digunakan oleh fasilitas proyek.
- $PE_{ww,treatment,y}$ = Emisi metana dari sistem pengolahan air limbah yang dipengaruhi oleh kegiatan proyek, dan tidak dilengkapi dengan pemulihan biogas dalam skenario proyek.
- $PE_{s,treatment,y}$ = Emisi metana dari sistem pengolahan lumpur yang dipengaruhi oleh kegiatan proyek, dan tidak dilengkapi dengan pemulihan biogas dalam skenario proyek.
- $PE_{ww,discharge,y}$ = Emisi metana yang dihasilkan dari sistem pengolahan air limbah kegiatan proyek yang tidak efisien dan munculnya karbon organik terdegradasi dalam air limbah yang diolah.
- $PE_{s,final,y}$ = Emisi metana dari pembusukan lumpur akhir yang dihasilkan oleh sistem pengolahan kegiatan proyek.
- $PE_{fugitive,y}$ = Emisi metana lepas akibat sistem penangkapan yang tidak efisien
- $PE_{flaring,y}$ = Emisi metana akibat pembakaran tidak sempurna
- $PE_{biomassa,y}$ = Emisi metana dari biomassa yang disimpan dalam kondisi anaerob yang tidak akan terjadi dalam situasi baseline

3.3 Tahapan Penelitian

Diagram alir tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram alir tahapan penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Simpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Faktor emisi metana (CH_4) aktual pada proses produksi biogas limbah tapioka di PT Gree Energy Hampan berada pada rentang 0,20–0,57 kg CH_4 /kg COD removal dengan nilai rata-rata sekitar 0,30 kg CH_4 /kg COD removal, yang setara dengan faktor emisi sebesar 3,67 kg CH_4 /ton singkong dan 0,85 kg CH_4 /ton tapioka. Nilai faktor emisi berbasis data lapangan ini lebih mencerminkan kondisi operasional spesifik sistem *covered anaerobic lagoon* dibandingkan penggunaan faktor emisi *default* IPCC yang bersifat umum.
2. Perbedaan antara faktor emisi metana aktual dan nilai faktor emisi *default* IPCC dipengaruhi oleh desain reaktor *covered lagoon* dengan waktu tinggal hidrolis yang panjang, akumulasi lumpur organik yang masih terdegradasi, variabilitas karakteristik influen akibat fluktuasi pasokan singkong, kondisi suhu mesofilik tropis, serta variasi *Organic Loading Rate* (OLR) yang memengaruhi intensitas proses metanogenesis di dalam sistem.
3. Pemanfaatan biogas limbah tapioka pada sistem pembangkit listrik tenaga biogas menghasilkan reduksi emisi gas rumah kaca kumulatif sebesar 74.989 tCO₂e selama periode pemantauan, dengan rata-rata reduksi sekitar 37.494 tCO₂e per tahun, sehingga menunjukkan bahwa pemanfaatan biogas merupakan strategi mitigasi emisi yang efektif pada pengolahan limbah cair industri tapioka.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Diperlukan alat ukur yang mampu merepresentasikan COD yang benar-benar terdegradasi di dalam *anaerobic lagoon digester*, karena tidak seluruh COD influen langsung terdegradasi dan tercatat, sehingga dapat memengaruhi akurasi perhitungan faktor emisi metana (CH₄).
2. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi pengaruh parameter lingkungan dan karakteristik substrat, seperti suhu, pH, konsentrasi *volatile fatty acids* (VFA), dan komposisi biogas, terhadap kestabilan proses anaerobik dan pembentukan metana pada sistem *covered anaerobic lagoon*.

5.3 Rekomendasi

Penggunaan faktor emisi metana berbasis data lokal direkomendasikan dalam penyusunan inventarisasi gas rumah kaca pada sektor industri tapioka, karena lebih sesuai dengan kondisi operasional aktual sistem pengolahan limbah berbasis *covered anaerobic lagoon* dibandingkan penggunaan faktor emisi *default IPCC* yang bersifat umum.

DAFTAR PUSTAKA

- Aji, K. P., & Bambang, A. N. (2019). Konversi Energi Biogas Menjadi Energi Listrik Sebagai Alternati Energi Terbarukan dan Ramah Lingkungan di Desa Langse, Kecamatan Margorejo Kabupaten Pati. *Sentikuin*, 2, 1–7.
- Amorim, M. C. C. de, Silva, P. T. de S., Barbosa, P. S., & Montefusco, N. E. (2019). Anaerobic Biodegradation of Cassava Wastewater Under Different Temperatures and Inoculums. *Comunicata Scientiae*, 10(1), 65–76.
- Anggari, V. S., & Prayitno. (2020). Studi Literatur Limbah Tapioka Untuk Produksi Biogas : Metode Pengolahan dan Peranan Starter Substrat. *Jurnal Teknologi Separasi*, 6(2), 176–187.
- Arnata, I. W. (2009). *Pengembangan Alternatif Teknologi Bioproses Pembuatan Bioetanol Dari Ubi Kayu Menggunakan Trichoderma Viride, Aspergillus Niger dan Saccharomyces Cerevisiae*. (Skripsi). Teknologi Industri Pertanian. Universitas Lampung.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2025). *Direktorat data dan komputasi BMKG*. <https://dataonline.bmkg.go.id/data-harian>
- Ceconet, D., Callegari, A., & Capodaglio, A. G. (2022). UASB Performance and Perspectives in Urban Wastewater Treatment at Sub-Mesophilic Operating Temperature. *Water*, 14(1).
- Cenergi. (2024). *Company Profile PT Gree Energy Hampanan*. <https://www.pefc.org/about-pefc/who-we-are>
- Chavadej, S., Wangmor, T., Maitriwong, K., Chaichirawiwat, P., Rangsunvigit, P., & Intanoo, P. (2019). Separate Production of Hydrogen and Methane from Cassava Wastewater with Added Cassava Residue Under A Thermophilic Temperature in Relation to Digestibility. *Journal of Biotechnology*, 291, 61–71.
- Cruz, I. A., Santos Andrade, L. R., Bharagava, R. N., Nadda, A. K., Bilal, M., Figueiredo, R. T., & Romanholo Ferreira, L. F. (2021). Valorization of Cassava Residues for Biogas Production in Brazil Based on The Circular Economy: an Updated and Comprehensive Review. *Cleaner Engineering and Technology*, 4(July), 100196.
- Dewi, M. N., & Visca, R. (2020). Potensi Limbah Cair Organik Sebagai Bahan Baku Biogas Menggunakan Sistem Fermentasi Dua Tahap. *Jurnal Migasian*, 4(2), 2580–5258.
- Enhanced Nationally Determined Contribution Republic of Indonesia*. (2022).

- Fatoni, D. Al, Rudijanto, H., & Wardono, I. (2019). Studi Pengolahan Air Limbah Tapioka di Pabrik Aci. *Buletin Keslingmas*, 38(3), 35–42.
- Febijianto, I. (2010). Pemanfaatan Potensi Gas Metana di Pabrik Kelapa Sawit Sei Silau PTPN 3 Sumatera Utara. *Teknik Lingkungan*, 11(3), 459–474.
- Gaballah, E. S., Abdelkader, T. K., Luo, S., Yuan, Q., & Abomohra, A. E. (2020). Enhancement of Biogas Production by Integrated Solar Heating System: A Pilot Study Using Tubular Digester. *Energy*, 116758.
- Greenhouse Gas Protocol. (2024). *IPCC Global Warming Potential Values* (Issue 2).
- Gustafsson, M., Cruz, I., Svensson, N., & Karlsson, M. (2020). Scenarios for Upgrading and Distribution of Compressed and Liquefied Biogas : Energy , Environmental, and Economic Analysis. *Journal of Cleaner Production*.
- Hafsah, D. S., Z., D. A. F., & Prayitno, P. (2023). Pengaruh Rasio Starter Terhadap Substrat dalam Produksi Biogas. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 5(2), 29–34.
- Harirchi, S., Wainaina, S., Sar, T., Nojoumi, S. A., Parchami, M., Parchami, M., Varjani, S., Khanal, S. K., Wong, J., Awasthi, M. K., & Taherzadeh, M. J. (2022). Microbiological Insights Into Anaerobic Digestion for Biogas, Hydrogen or Volatile Fatty Acids (Vfas): A Review. *Bioengineered*, 13(3), 6521–6557.
- Haryanto, A., Cahyani, D., Triyono, S., Murdapa, F., & Haryono, D. (2017). Economic Benefit and Greenhouse Gas Emission Reduction Potential of A Family-Scale Cowdung Anaerobic Biogas Digester. *Int. Journal of Renewable Energy Development*, 6(1), 29–36.
- Haryanto, A., Marotin, F., Triyono, S., & Hasanudin, U. (2017). Developing A Family-Size Biogas-Fueled Electricity Generating System. *Int. Journal of Renewable Energy Development*, 6(2), 111–118.
- Haryanto, A., Triyono, S., & Wicaksono, N. H. (2018). Effect of Hydraulic Retention Time on Biogas Production from Cow Dung in A Semi Continuous Anaerobic Digester. *Int. Journal of Renewable Energy Development*, 7(2), 93–100.
- Hasanudin, U., Safira, N. D., Nurainy, F., Utomo, T. P., & Haryanto, A. (2023). Improving Biogas Production in Tapioca Industry by Using Onggok as Co-substrate. *International Journal of Renewable Energy Research*, 13(2).
- Husaeni, A. N., Sari, G. L., Ratnawati, K., & Darmawan, M. A. O. (2025). Study on Biogas Production from Organic Waste of Food Leftovers and Garden Waste Using Green Phoskko 7 in a Fixed Dome Biodigester at PT Asmin

Bara Bronang. *Media Ilmiah Teknik Lingkungan*, 10(2), 75–82.

Issah, A. A., & Kabera, T. (2021). Impact Of Volatile Fatty Acids to Alkalinity Ratio and Volatile Solids on Biogas Production Under Thermophilic Conditions. *Waste Management and Research*, 39(6), 871–878.

Issah, A. A., Kabera, T., & Kemausuor, F. (2020). Biogas Optimisation Processes and Effluent Quality: A Review. *Biomass and Bioenergy*, 133(June 2019), 105449.

Jiraprasertwong, A., Maitriwong, K., & Chavadej, S. (2019). Production of Biogas from Cassava Wastewater Using A Three-Stage Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor. *Renewable Energy*, 130, 191–205.

Kamahara, H., Hasanudin, U., Atsuta, Y., Widiyanto, A., Tachibana, R., Goto, N., Daimon, H., & Fujie, K. (2010). Methane Emission From Anaerobic Pond of Tapioca Starch Extraction Wastewater in Indonesia. *Journal of Ecotechnology Research*, 15(2), 79–83.

Kapoor, R., Ghosh, P., Tyagi, B., & Kumar, V. (2020). Advances in Biogas Valorization and Utilization Systems : A Comprehensive Review. *Journal of Cleaner Production*, 273, 123052.

Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2013). *Kajian Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Energi*. Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral.

Kementrian Lingkungan Hidup. (2012). *Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional - Pengelolaan Limbah* (Vol. 4).

Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The Anaerobic Digestion of Solid Organic Waste. *Waste Management*, 31(8), 1737–1744.

Konaté, Y., Maiga, A. H., Casellas, C., & Picot, B. (2013). Biogas Production From An Anaerobic Pond Treating Domestic Wastewater in Burkina Faso. *Desalination and Water Treatment*, 51(10–12), 2445–2452.

Leung, D. Y. C., & Wang, J. (2016). An Overview on Biogas Generation From Anaerobic Digestion Of Food Waste. *International Journal of Green Energy*, 5075(February).

Ma, Z. Y., Feng, P., Gao, Q. X., Lu, Y. N., Liu, J. R., & Li, W. T. (2015). CH₄ Emissions and Reduction Potential in Wastewater Treatment in China. *Advances in Climate Change Research*, 6(3–4), 216–224.

Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2019). Biogas Production From Food Wastes : A Review on Recent Developments

and Future Perspectives. *Bioresource Technology Reports*, 7(March), 100202.

- Mohamad, R., Soeroso, Pradana, Ak., Sudarno, & Wardhana, I. W. (2016). Biogas pada Anaerobic Digestion dengan Menggunakan Ekstrak Rumen Sapi sebagai Starter dan Limbah Dapur. *Presipitasi*, 12(2), 88–93.
- Moonkawin, J., Huynh, L. T., Schneider, M. Y., Fujii, S., Echigo, S., Nguyen, L. P. H., Hoang, T. H. T., Huynh, H. T., & Harada, H. (2023). Challenges to Accurate Estimation of Methane Emission from Septic Tanks with Long Emptying Intervals. *Environmental Science and Technology*, 57(43), 16575–16584.
- Mustikaningrum, D., Kristiawan, K., & Suprayitno, S. (2021). Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Pertanian di Kabupaten Tuban : Inventarisasi dan Potensi Aksi Mitigasi. *Jurnal Wilayah Dan Lingkungan*, 9, 155–171.
- Nashier, I., & Lakra, P. (2020). Global Climate Change and Its Effects. *Integrated Journal of Social Sciences Integr. J. Soc. Sci*, 2020(1), 14–23. <http://pubs.iscience.in/ijss>
- Nuraeni, R., & Ashuri, A. (2018). Nilai Faktor Emisi Spesifik Air Limbah pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Komunal. *Widyariset*, 4(1).
- Oktiana, T. D., Santoso, J., & Kawaroe, M. (2015). Alga Hijau (*Ulva Sp.*) sebagai Bahan Baku Produksi Biogas Green Algae *Ulva Sp.* as Raw Material For Biogas Production. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 7(1), 191–203. http://itk.fpik.ipb.ac.id/ej_itkt71
- Palma, D., Fuess, L. T., Lima-Model, A. N. de, Zanella da Conceição, K., Cereda, M. P., Ferreira Tavares, M. H., & Gomes, S. D. (2016). Using Dolomitic Limestone to Replace Conventional Alkalinization In The Biodigestion of Rapid Acidification Cassava Processing Wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2942–2953.
- Panigrahi, S., Sharma, H. B., & Dubey, B. K. (2020). Anaerobic Co-Digestion of Food Waste With Pretreated Yard Waste : A Comparative Study of Methane Production, Kinetic Modeling and Energy Balance. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118480.
- Paredes, M. G., Güereca, L. P., Molina, L. T., & Noyola, A. (2019). Methane Emissions from Anaerobic Sludge Digesters In Mexico: On-Site Determination VS. IPCC Tier 1 Method. *Science of the Total Environment*, 656, 468–474.
- Pingmuanglek, P., Jakrawatana, N., & Gheewala, S. H. (2017). Supply Chain Analysis for Cassava Starch Production: Cleaner Production Opportunities and Benefits. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1075–1084.

- Pramanik, S. K., Suja, F. B., Zain, S. M., & Pramanik, B. K. (2019). The Anaerobic Digestion Process of Biogas Production From Food Waste: Prospects and Constraints. *Bioresource Technology Reports*, 8(August), 100310.
- Prayitno, H. T. (2008). *Pemisahan Padatan Tersuspensi Limbah Cair Tapioka Dengan Teknologi Membran Sebagai Upaya Pemanfaatan dan Pengendalian Pencemaran Lingkungan*. (Tesis). Program Magister Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana Universitas Diponegoro.
- Puthumana, A. B., & Kaparaju, P. (2024). Impact of Organic Load on Methane Yields and Kinetics during Anaerobic Digestion of Sugarcane Bagasse: Optimal Feed-to-Inoculum Ratio and Total Solids of Reactor. *Energies*, 17, 5083.
- Putra, I. K. A., Kusuma, W., & Adnyana, I. W. B. (2021). Pembuatan Biogas dari Kotoran Gajah. *Teknik Desain Mekanika*, 10(3), 1462–1468.
- Putri, A. (2019). *Emisi Gas Metana (CH₄) dari Sedimen dan Tanaman Rhizophora mucronata Pada Zona Alami dan Zona Wisata di Kawasan Mangrove Pulau Pari*. (Skripsi). Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Qyyum, M. A., Haider, J., Qadeer, K., Valentina, V., Khan, A., Yasin, M., Aslam, M., Guido, G. De, Pellegrini, L. A., & Lee, M. (2019). Biogas to Liquefied Biomethane: Assessment of 3p's—Production, Processing, and Prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, November, 109561.
- Rachman, R. M., Betaubun, R. J., Serang, R., Sriyani, R., Putri, T. S., Rantererung, C. L., Sya'ban, A. R., Lorens, D., Apalem, D. R., & Fitriah. (2024). *Pencemaran Air* (S. Gusty & Zulharnah (Eds.); 1st ed.). CV. Tohar Media.
- Rahayu, A. S., Karsiwulan, D., Yuwono, H., Trisnawati, I., Mulyasari, S., Rahardjo, S., Hokernin, S., & Paramita, V. (2015). Buku Panduan Konversi POME Menjadi Biogas Pengembangan Proyek di Indonesia. *Winrock International*, 100. <https://www.winrock.org/wp-content/uploads/2016/05/CIRCLE-Handbook-INDO-compressed.pdf>
- Rezeki, S., Ivontianti, W. D., & Khairullah, A. (2021). Optimasi Temperatur Pada Produksi Biogas dari Limbah Rumah Makan di Kota Pontianak. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, Dan Material*, 5(1), 32–38.
- Ryue, J., Lin, L., Kakar, F. L., Elbeshbishy, E., Al-Mamun, A., & Dhar, B. R. (2020). A Critical Review of Conventional and Emerging Methods for Improving Process Stability in Thermophilic Anaerobic Digestion. *Energy for Sustainable Development*, 54, 72–84.

- Safe'i, R. (2021). Tingkat Kesehatan Hutan Mangrove dalam Hubungannya dengan Perubahan Iklim (Studi Kasus Mangrove Pesisir Timur Kabupaten Lampung Timur). *Jurnal Hutan Tropis*, 9(3), 325.
- Safley, L. M., & Westerman, P. W. (1988). Biogas Production from Anaerobic Lagoons. *Biological Wastes*, 23(3), 181–193.
- Saputra, M. T. A. (2023). *Peningkatan Produksi Biogas dari Air Limbah Industri Tapioka Menggunakan Onggok*. (Tesis). Teknologi Industri Pertanian. Universitas Lampung.
- Sawyerr, N., Trois, C., Workneh, T., & Okudoh, V. (2019). An Overview of Biogas Production: Fundamentals, Applications and Future Research. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(2), 105–116.
- Schmidt, A. M. (2013). Sludge Management for Anaerobic Lagoons and Runoff Holding Ponds. *Waste Management*, June, 1–4.
- Setyawaty, R., Katayama-Hirayama, K., Kaneko, H., & Hirayama, K. (2011). Review of Current Tapioca Starch Wastewater (TSW) Management in Indonesia. *World Applied Sciences Journal*, 14(5), 658–665.
- Skytt, T., Nielsen, S. N., & Jonsson, B. G. (2020). Global Warming Potential and Absolute Global Temperature Change Potential From Carbon Dioxide and Methane Fluxes as Indicators of Regional Sustainability – A Case Study of Jämtland, Sweden. *Ecological Indicators*, 110(October 2019), 105831.
- Sulistyo, S., & Yanti, Y. (2024). Perbandingan Penambahan Air pada Proses Pembuatan Biogas dari Kotoran Sapi pada Praktikum Pengolahan Limbah Peternakan. *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*, 6(1), 34–40.
- Suroso, E. (2011). *Model Proses Produksi Industri Tapioka Ramah Lingkungan Berbasis Produksi Bersih (Studi Kasus di Provinsi Lampung)*. (Tesis). Institut Pertanian Bogor.
- Tanata, S., Gunawan, M. R., & Pandia, S. (2013). Pengaruh Komposisi Campuran Limbah Padat dan Cair Industri Tapioka Terhadap Persentase Penyisihan Total Suspended Solid (TSS) dengan Starter Kotoran Sapi. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 2(3), 8–11.
- Tassew, F. A., Bergland, W. H., Dinamarca, C., & Bakke, R. (2020). Influences of Temperature and Substrate Particle Content on Granular Sludge Bed Anaerobic Digestion. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(1).
- Tran, T., Da, G., Moreno-santander, M. A., Vélez-hernández, G. A., Giraldo-toro, A., Piyachomkwan, K., Sriroth, K. S., & Dufoura, D. (2015). A Comparison of Energy Use, Water Use and Carbon Footprint of Cassava Starch

Production in Thailand, Vietnam and Colombia. *Resources, Conservation & Recycling*, 100, 31–40.

Volokin, D., & Rellez, L. (2014). On The Average Temperature of Airless Spherical Bodies and The Magnitude of Earth's Atmospheric Thermal Effect. *SpringerPlus*, 3(1), 723.

Widowati, & Sutoyo. (2009). Upaya Mengurangi Penipisan Lapisan Ozon. *Buana Sains*, 9(2), 141–146.

Wintolo, M., & Isdiyanto, R. (2011). Prospek Pemanfaatan Biogas dari Pengolahan Air Limbah Industri Tapioka. *Ketenagalistrikan Dan Energi Terbaru*, 10(2), 103–112.

Yacob, S., Ali Hassan, M., Shirai, Y., Wakisaka, M., & Subash, S. (2006). Baseline Study of Methane Emission from Anaerobic Ponds of Palm Oil Mill Effluent Treatment. *Science of the Total Environment*, 366(1), 187–196.

Zulkarnaen, I. R., Tira, S., H., & Padang, Y. A. (2018). Pengaruh Rasio Karbon dan Nitrogen (C/N Ratio) pada Kotoran Sapi Terhadap Produksi Biogas dari Proses Anaerob. *Dinamika Teknik Mesin*, 1–16.