

**PENENTUAN KONSTANTA KINETIKA DAN ANALISIS DAMPAK
LINGKUNGAN PADA PROSES PRODUKSI BIOGAS
DARI SAMPAH ORGANIK RUMAH TANGGA**

(Tesis)

Oleh

**WANDA GUSTINA UTAMI
NPM 2020011019**



**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU LINGKUNGAN
PASCASARJANA UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

**PENENTUAN KONSTANTA KINETIKA DAN ANALISIS DAMPAK
LINGKUNGAN PADA PROSES PRODUKSI BIOGAS
DARI SAMPAH ORGANIK RUMAH TANGGA**

Oleh

WANDA GUSTINA UTAMI

Tesis

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

Pada

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



**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU LINGKUNGAN
PASCASARJANA UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

ABSTRAK

PENENTUAN KONSTANTA KINETIKA DAN ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN PADA PROSES PRODUKSI BIOGAS DARI SAMPAH ORGANIK RUMAH TANGGA

Oleh

WANDA GUSTINA UTAMI

Pengelolaan sampah organik rumah tangga menjadi biogas sangat diperlukan untuk menghindari pencemaran serta mengurangi volume sampah yang masuk ke Tempat Pembuangan Akhir. Agar produksi biogas dapat diaplikasikan dalam skala industri, maka diperlukan konstanta dari model kinetika yang tepat untuk memahami mekanisme reaksi yang terjadi di dalam reaktor. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Pengelolaan Limbah Agroindustri Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, pada bulan Januari–Februari 2022. Penelitian dilakukan dengan 6 tahapan yaitu: tahap pengumpulan bahan baku, tahap pembuatan *slurry* bahan baku, tahap aklimatisasi mikroba, tahap *anaerobic digestion*, tahap perhitungan kinetika reaksi, tahap perhitungan analisis dampak lingkungan yaitu pengurangan sampah, bangkitan energi, pengurangan gas rumah kaca dan nilai ekonomi. Variabel penelitian terdiri atas perbedaan kadar TS yaitu sebesar 1% (V1), 1,5% (V2), 2% (V3) dan 2,5% (V4). Hasil penelitian menunjukkan bahwa Model Kinetika yang paling cocok untuk tahap hidrolisis ditunjukkan oleh Model Kinetika *First Order* terhadap penguraian TS dengan variasi V2. Nilai R^2 yang diperoleh sebesar 0,9962 sedangkan nilai k sebesar 0,0633 dan laju reaksi rata-rata sebesar 1091,78 mg hari⁻¹. Pengolahan sampah organik rumah tangga menjadi biogas akan mengurangi beban TPA sebesar 24,80%, membangkitkan energi sebesar 57,22 TJ tahun⁻¹, menurunkan emisi gas rumah kaca sebesar 19,43% dan meningkatkan pendapatan masyarakat sebesar 2,77 juta rupiah per orang per tahun.

Kata Kunci: *anaerobic digestion*, biogas, dampak lingkungan, konstanta kinetika, sampah organik rumah tangga.

ABSTRACT

DETERMINATION OF KINETIC CONSTANTS AND ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL IMPACTS ON THE PROCESS OF BIOGAS PRODUCTION FROM HOUSEHOLD ORGANIC WASTE

By

WANDA GUSTINA UTAMI

The management of household organic waste into biogas is very necessary to avoid pollution and reduce the volume of waste that goes to the landfill. In order to biogas production to be applied on an industrial scale, it is necessary to have constants from an appropriate kinetic model to understand the reaction mechanism that occurs in the reactor. This research was conducted at the Agroindustrial Waste Management Laboratory, Agricultural Product Technology Department, Faculty of Agriculture, University of Lampung, from January to February 2022. The research was carried out in 6 stages, namely: the raw material collection stage, the raw material slurry making stage, the microbial acclimatization stage, and the anaerobic digestion stage, reaction kinetics calculation stage and environmental impact analysis calculation stage, namely waste reduction, energy generation, reduction of greenhouse gases and economic value. The research variables consisted of differences in the levels of TS, namely 1% (V1), 1.5% (V2), 2% (V3) and 2.5% (V4). The results showed that the most suitable kinetic model for the hydrolysis step was shown by the First Order Kinetics Model for the decomposition of TS with variation of V2. The value of R^2 obtained is 0.9962 while the value of k is 0.0633 and the average reaction rate is $1091.78 \text{ mg day}^{-1}$. Processing household organic waste into biogas will reduce the burden of the landfill by 24.80%, generate energy by 57.22 TJ/year, reduce greenhouse gas emissions by 19.43% and increase people's income by 2.77 million rupiah per person per year.

Keywords: anaerobic digestion, biogas, environmental impact, household organic waste, kinetic constants.

Judul Tesis

: **PENENTUAN KONSTANTA KINETIKA DAN
ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN
PADA PROSES PRODUKSI BIOGAS
DARI SAMPAH ORGANIK RUMAH TANGGA**

Nama Mahasiswa

: *Wanda Gustina Utami*

Nomor Pokok Mahasiswa : 2020011019

Program Studi

: Magister Ilmu Lingkungan

Fakultas

: Pascasarjana Multidisiplin



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

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

Dr. Ir. Samsul Bakri, M.Si.
NIP 196105051987031002

2. Ketua Program Studi Magister Ilmu Lingkungan
Universitas Lampung

Dr. Ir. Samsul Bakri, M.Si.
NIP 196105051987031002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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



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



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

**Penguji
Bukan Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Dermiyati, M.Agr.Sc.**

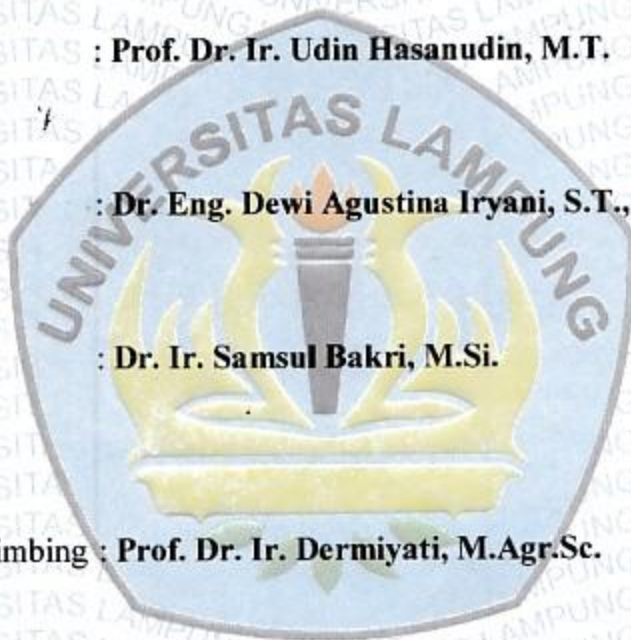


Anggota : Dr. Rahmat Safe'i, S.Hut., M.Si.

2. Direktur Pascasarjana Universitas Lampung

Prof. Dr. Ir. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T.
NIP 197104151998031005

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 8 Agustus 2022



PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa:

1. Tesis dengan judul: **“PENENTUAN KONSTANTA KINETIKA DAN ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN PADA PROSES PRODUKSI BIOGAS DARI SAMPAH ORGANIK RUMAH TANGGA”** adalah karya saya sendiri dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan atas karya penulis lain dengan cara yang tidak sesuai dengan etika ilmiah yang berlaku dalam masyarakat akademik atau yang disebut plagiarisme.
2. Hak intelektual atas karya ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

Atas pernyataan ini, apabila di kemudian 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, 10 Agustus 2022

Yang membuat pernyataan,



WANDA GUSTINA UTAMI

NPM 2020011019

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Sidomukti, pada tanggal 31 Agustus 1995, sebagai putri pertama dari dua bersaudara. Penulis lahir dari pasangan Bapak Slamet dan Ibu Tugiatmi.

Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 2 Sidomulyo pada tahun 2007, Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Pulau Pangung pada tahun 2010 dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Talang Padang pada tahun 2013.

Pada tahun 2013, penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) Tahun 2013 sebagai penerima Beasiswa Bidikmisi. Kemudian pada tahun 2020 Penulis melanjutkan pendidikan di Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Fakultas Pascasarjana Multidisiplin, Universitas Lampung, sebagai penerima Beasiswa *Research and Teaching Assistant* Program Magister.

Saat ini, Penulis bekerja sebagai pegawai di PT. SUCOFINDO (Persero) sebagai Konsultan Lingkungan.

Dengan mengucap Alhamdulillah, syukur kepada Allah SWT

Dengan bangga ku persembahkan karyaku ini:

Untuk kedua orang tuaku tersayang, Bapak Slamet dan Ibu Tugiatmi
yang terus mendukung setiap langkahku.

Terima kasih atas limpahan kasih sayang yang tidak pernah putus untukku.
Terima kasih telah menghadirkan namaku di setiap sujud dan do'amu Pak, Bu.

Untuk dosen-dosen dan guru-guru yang ku hormati.
Terima kasih telah mengajarkan ilmu pengetahuan dan menanamkan akhlak
agar aku siap menghadapi dunia.

Untuk almamater tercinta, Universitas Lampung.
Terima kasih sudah menjadi tempat bagiku untuk berakar, tumbuh dan mekar.

Semoga karya kecil ini dapat bermanfaat bagi orang banyak.

Aamiin.

MOTTO

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

-QS. Maryam: 4-

“Ikatlah ilmu dengan tulisan”

-Ali bin Abi Thalib-

“Ikatlah nikmat-nikmat Allah dengan bersyukur kepada-Nya”

-Umar bin Abdul Aziz-

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan hidayah-Nya tesis ini dapat diselesaikan.

Tesis Dengan Judul “**Penentuan Konstanta Kinetika dan Analisis Dampak Lingkungan Pada Proses Produksi Biogas dari Sampah Organik Rumah Tangga**” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Lingkungan di Universitas Lampung.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Karomani, M.Si., selaku Rektor Universitas Lampung;
2. Prof. Dr. Ir. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T., selaku Direktur Pascasarjana Universitas Lampung;
3. Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T., selaku pembimbing utama atas kesediannya untuk memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam proses penyelesaian tesis ini;
4. Dr. Eng. Dewi Agustina Iryani, S.T., M.T., selaku pembimbing kedua atas kesediannya untuk memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam proses penyelesaian tesis ini;
5. Dr. Ir. Samsul Bakri, M.Si., selaku Ketua Program Studi Magister Ilmu Lingkungan Universitas Lampung, sekaligus selaku pembimbing ketiga. Terima kasih untuk masukan dan saran-saran yang telah diberikan;
6. Prof. Dr. Ir. Dermiyati, M.Agr.Sc., selaku pembahas utama atas kesediannya memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam proses penyelesaian tesis ini;

7. Dr. Rahmat Safe'i, S.Hut.,M.Si., selaku pembahas kedua atas kesediannya memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam proses penyelesaian tesis ini;
8. Seluruh Dosen Program Studi Magister Ilmu Lingkungan Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu yang sangat bermanfaat untuk penulis;
9. Bapak dan Ibu Staf Program Studi Magister Ilmu Lingkungan Universitas Lampung.
10. Bapak, Ibu dan teman-teman angkatan 2020 Program Magister Ilmu Lingkungan yang telah memberikan motivasi dan inspirasi selama proses kuliah sampai dengan penyelesaian tesis ini.
11. Bapak, Ibu dan teman-teman pegawai PT. SUCOFINDO (Persero) yang telah memberikan motivasi dan inspirasi selama proses kuliah sampai dengan penyelesaian tesis ini.
12. Rekan-rekan penelitian, Annisa Nur Fadhilah, S.T.P., Radya Yoga Utami, S.T.P., Andara Aulia, S.T.P., Nita Pita Sari, S.T., dan Lydia Mawar Ningsih, S.P., M.Si, yang telah memberikan motivasi dan inspirasi selama penelitian.
13. Sahabat seperjuangan, Della Tiara Monik, S.Hut., M.Ling., Ferli Hartati S.Hut., M.Ling., dan Virginia Br. Sitorus S.Hut., M.Ling., terima kasih atas persahabatan dan kerjasama yang baik hingga akhir.

Bandar Lampung, Agustus 2022

Wanda Gustina Utami

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang dan Masalah	1
1.2 Ruang Lingkup	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Kegunaan Penelitian	4
1.5 Kerangka Pemikiran	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Sampah Organik Rumah Tangga.....	6
2.2. <i>Anaerobic Digestion</i>	9
2.2.1. Tahapan Proses <i>Anaerobic Digestion</i>	9
2.2.2. Produk <i>Anaerobic Digestion</i>	13
2.2.3. Faktor yang Mempengaruhi <i>Anaerobic Digestion</i>	13
2.3. Model Kinetika Reaksi	16
2.3.1. Model Kinetika <i>First Order</i>	17
2.3.2. Model Kinetika Michaelis-Menten.....	17
2.4. Energi	18
2.5. Gas Rumah Kaca	19
BAB III METODE PENELITIAN	26
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	26
3.2. Alat dan Bahan	26
3.3. Metode Penelitian	27
3.3.1. Variabel Penelitian	27

3.3.2.	Kondisi Operasi Penelitian	28
3.4.	Prosedur Penelitian	28
3.4.1.	Tahap Pengumpulan Bahan Baku	28
3.4.2.	Tahap Pembuatan <i>Slurry</i> Bahan Baku.....	30
3.4.3.	Tahap Aklimatisasi Mikroba	35
3.4.4.	Tahap <i>Anaerobic Digestion</i>	36
3.4.5.	Tahap Perhitungan Kinetika Reaksi Produksi Biogas.....	38
3.4.6.	Tahap Analisis Dampak Bagi Lingkungan.....	43
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	47
4.1.	Pengumpulan Bahan Baku	47
4.1.1.	Laju Timbulan Sampah Organik Rumah Tangga.....	47
4.1.2.	Komposisi Sampah Organik Rumah Tangga	48
4.1.3.	Karakterisasi Sampah Organik Rumah Tangga	49
4.2.	<i>Slurry</i> Bahan Baku	49
4.3.	Aklimatisasi Mikroba	51
4.4.	<i>Anaerobic Digestion</i>	53
4.4.1.	Fasa Cair	53
4.4.2.	Fasa Gas.....	58
4.5.	Kinetika Reaksi Produksi Biogas	61
4.5.1.	<i>Plotting</i> dan Uji Regresi Linier Data TS Terhadap Model Kinetika.....	61
4.5.2.	<i>Plotting</i> dan Uji Regresi Linier Data TSS Terhadap Model Kinetika	76
4.5.3.	<i>Plotting</i> dan Uji Regresi Linier Data VS Terhadap Model Kinetika.....	89
4.5.4.	<i>Plotting</i> dan Uji Regresi Linier Data COD Terhadap Model Kinetika	102
4.5.5.	Evaluasi dan Pemilihan Model Kinetika	115
4.6.	Analisis Dampak Bagi Lingkungan.....	118
4.6.1.	Pengurangan Sampah	118
4.6.2.	Bangkitan Energi	120
4.6.3.	Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca.....	121

4.6.4. Nilai Ekonomi	123
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	125
5.1. Kesimpulan.....	125
5.2. Saran	126

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Faktor Penyebab FLW	7
2. Komposisi Biogas	13
3. Kebijakan dan Regulasi Terkait Aksi Mitigasi Sektor Limbah	22
4. Aksi Mitigasi Pada Pengelolaan Sampah Domestik	23
5. Jumlah Sampah organik rumah tangga dan air yang ditambahkan ke digester dalam satu HRT	32
6. Jadwal Pelaksanaan Penelitian dalam Satu HRT	37
7. Hasil Karakterisasi Kadar TS Sampah Organik Rumah Tangga	49
8. Karakteristik Substrat Input Digester	50
9. Karakteristik Output Digester Setelah Aklimatisasi	51
10. Data TS Hasil Percobaan V1	62
11. Data TS hasil percobaan V2	65
12. Data TS hasil percobaan V3	68
13. Data TS hasil percobaan V4	71
14. Konstanta Kinetika Terhadap Data TS	75
15. Data TSS hasil percobaan V1	76
16. Data TSS hasil percobaan V2	79
17. Data TSS hasil percobaan V3	82
18. Data TSS Hasil Percobaan V4	85
19. Konstanta Kinetika Terhadap Data TSS	88
20. Data VS hasil percobaan V1	89
21. Data VS hasil percobaan V2	92
22. Data VS Hasil Percobaan V3	95
23. Data VS Hasil Percobaan V1	98
24. Konstanta Kinetika Terhadap Data VS	101
25. Data COD Hasil Percobaan V1	102

26. Data COD Hasil Percobaan V2.....	105
27. Data COD Hasil Percobaan V3.....	108
28. Data COD Hasil Percobaan V4.....	111
29. Konstanta Kinetika Terhadap Data COD.....	114
30. Konstanta Kinetika.....	116

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Diagram Alir Kerangka Pemikiran.	5
2. Tahapan Proses <i>Anaerobic Digestion</i>	10
3. Reaksi Hidrolisis.	11
4. Reaksi Asidogenesis.	11
5. Reaksi Asetogenesis.	12
6. Reaksi Metanogenesis.	12
7. Persentase Penggunaan Energi Dari Berbagai Sektor Kegiatan.	18
8. Emisi CO ₂ Dari Berbagai Sektor Kegiatan.	19
9. Sumber-sumber utama emisi GRK sektor limbah.	21
10. Peta Lokasi Pengumpulan Sampah Organik Rumah Tangga.	29
11. Komponen Digester.	35
12. Instalasi Produksi Biogas yang Digunakan.	37
13. Reaktor <i>Continue Stirred Tank Reactor</i>	38
14. Diagram Alir Penelitian.	46
15. Jumlah Timbulan Sampah Organik Rumah Tangga.	47
16. Komposisi Sampah Organik Rumah Tangga.	48
17. Suhu <i>Sludge</i> Digestat.	53
18. pH <i>Sludge</i> Digestat.	55
19. <i>Total Solids Sludge</i> Digestat.	55
20. <i>Total Suspended Solids Sludge</i> Digestat.	56
21. <i>Volatile Solids Sludge</i> Digestat.	56
22. COD <i>Sludge</i> Digestat.	56
23. <i>Dead End Area</i> pada Digester.	58
24. Produksi Biogas Kumulatif.	59
25. Konsentrasi Metana.	60

26. Hasil <i>Plotting</i> Data TS V1 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	62
27. Hasil Uji F Pada Data TS V1 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	63
28. Hasil <i>Plotting</i> Data TS V1 Terhadap Model Kinetika Michaelis- Menten.....	63
29. Hasil Uji F Pada Data TS V1 Terhadap Model Kinetika Michaelis- Menten.....	64
30. Hasil <i>Plotting</i> Data TS V2 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	65
31. Hasil Uji F Pada Data TS V2 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	66
32. Hasil <i>Plotting</i> Data TS V2 Terhadap Model Kinetika Michaelis- Menten.....	66
33. Hasil Uji F Pada Data TS V2 Terhadap Model Kinetika Michaelis- Menten.....	67
34. Hasil <i>Plotting</i> Data TS V3 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	68
35. Hasil Uji F Pada Data TS V3 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	69
36. Hasil <i>Plotting</i> Data TS V3 Terhadap Model Kinetika Michaelis- Menten.....	69
37. Hasil Uji F Pada Data TS V3 Terhadap Model Kinetika Michaelis- Menten.....	70
38. Hasil <i>Plotting</i> Data TS V4 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	71
39. Hasil Uji F Pada Data TS V4 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	72
40. Hasil <i>Plotting</i> Data TS V4 Terhadap Model Kinetika Michaelis- Menten.....	73
41. Hasil Uji F Pada Data TS V4 Terhadap Model Kinetika Michaelis- Menten.....	73
42. Hasil <i>Plotting</i> Data TSS V1 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	76
43. Hasil Uji F Pada Data TSS V1 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	77
44. Hasil <i>Plotting</i> Data TSS V1 Terhadap Model Kinetika Michaelis- Menten.....	78
45. Hasil Uji F Pada Data TSS V1 Terhadap Model Kinetika Michaelis- Menten.....	78
46. Hasil <i>Plotting</i> Data TSS V2 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	79
47. Hasil Uji F Pada Data TSS V2 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	80

48. Hasil <i>Plotting</i> Data TSS V2 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	81
49. Hasil Uji F Pada Data TSS V2 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	81
50. Hasil <i>Plotting</i> Data TSS V3 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	82
51. Hasil Uji F Pada Data TSS V3 Terhadap Model Kinetika First Order.....	83
52. Hasil <i>Plotting</i> Data TSS V3 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	83
53. Hasil Uji F Pada Data TSS V3 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	84
54. Hasil <i>Plotting</i> Data TSS V4 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	85
55. Hasil Uji F Pada Data TSS V4 Terhadap Model Kinetika First Order.....	86
56. Hasil <i>Plotting</i> Data TSS Pada V4 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	86
57. Hasil Uji F Pada Data TSS V4 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	87
58. Hasil <i>Plotting</i> Data VS V1 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	89
59. Hasil Uji F Pada Data VS V1 Terhadap Model Kinetika First Order.....	90
60. Hasil <i>Plotting</i> Data VS V1 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	90
61. Hasil Uji F Pada Data VS V1 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	91
62. Hasil <i>Plotting</i> Data VS V2 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	92
63. Hasil Uji F Pada Data VS V2 Terhadap Model Kinetika First Order.....	93
64. Hasil <i>Plotting</i> Data VS Pada V2 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	93
65. Hasil Uji F Pada Data VS V2 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	94
66. Hasil <i>Plotting</i> Data VS V3 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	95
67. Hasil Uji F Pada Data VS V3 Terhadap Model Kinetika First Order.....	96
G8. Hasil <i>Plotting</i> Data VS Pada V3 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	96

69. Hasil Uji F Pada Data VS V3 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	97
70. Hasil <i>Plotting</i> Data VS V4 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	98
71. Hasil Uji F Pada Data VS V4 Terhadap Model Kinetika First Order.....	99
72. Hasil <i>Plotting</i> Data VS V4 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	99
73. Hasil Uji F Pada Data VS V4 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	100
74. Hasil <i>Plotting</i> Data COD V1 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	102
75. Hasil Uji F Pada Data COD V1 Terhadap Model Kinetika First Order.....	103
76. Hasil <i>Plotting</i> Data COD V1 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	104
77. Hasil Uji F Pada Data COD V1 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	104
78. Hasil <i>Plotting</i> Data COD V2 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	106
79. Hasil Uji F Pada Data COD V2 Terhadap Model Kinetika First Order.....	106
80. Hasil <i>Plotting</i> Data COD V2 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	107
81. Hasil Uji F Pada Data COD V2 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	107
82. Hasil <i>Plotting</i> Data COD V3 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	108
83. Hasil Uji F Pada Data COD V3 Terhadap Model Kinetika First Order.....	109
84. Hasil <i>Plotting</i> Data COD V3 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	110
85. Hasil Uji F Pada Data COD V3 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	110
86. Hasil <i>Plotting</i> Data COD V4 Terhadap Model Kinetika <i>First Order</i>	111
87. Hasil Uji F Pada Data COD V4 Terhadap Model Kinetika First Order.....	112

88. Hasil <i>Plotting</i> Data COD V4 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	112
89. Hasil Uji F Pada Data COD V4 Terhadap Model Kinetika Michaelis-Menten.....	113
90. Dampak Lingkungan pada Proses Produksi Biogas dari Sampah Organik Rumah Tangga.	124

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang dan Masalah

Jumlah timbulan sampah Indonesia pada tahun 2016 mencapai 65,20 juta ton per tahun dan diperkirakan akan bertambah menjadi 71,13 ton per tahun pada 2025 (BPS, 2018). Dalam hal ini, pemerintah Indonesia telah menargetkan pengurangan sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga sebesar 30% dan penanganannya sebesar 70% pada tahun 2025 yang dituangkan dalam Peraturan Presiden No. 97 tahun 2017. Target ini bertujuan agar Indonesia ikut berperan dalam target *Sustainable Development Goals* (SDGs), dimana pada tahun 2030 setiap negara wajib mengurangi produksi sampah dengan cara pencegahan, pengurangan, proses daur ulang atau penggunaan kembali.

Sampah organik rumah tangga dihasilkan karena adanya penanganan, penyimpanan, penjualan, pemasakan, dan penyajian makanan (Somasekar *et al.*, 2014). Sampah organik rumah tangga biasanya langsung dibuang ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA) tanpa pemilahan dan pengolahan sehingga menimbulkan masalah lingkungan baik di tanah, air dan udara serta pada kesehatan masyarakat. Pada ekosistem udara akan meningkatkan emisi gas rumah kaca berupa gas metana yang dapat memicu ledakan (Iryani dkk., 2019) dan pemanasan global (Aberilla *et al.*, 2019). Selain itu, telah dilaporkan bahwa sampah dapat meningkatkan insiden penyakit menular dan infeksi, alergi, masalah pernapasan serta kanker (Shibata, *et al.*, 2015).

Sampah organik dalam sampah kota di negara berkembang memiliki fraksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan negara maju (De Clercq *et al.*, 2016) misalnya Indonesia sebesar 65,71% (Iryani dkk., 2019), China sebesar 52,6% (De Clercq, *et*

al., 2016) dan Bangladesh sebesar 75% (Hossain *et al.*, 2014). Hal ini karena sebagian negara maju telah mengubah sampah menjadi energi (Hossain *et al.*, 2014). Sumber daya biomassa, termasuk sampah organik, dianggap sebagai sumber daya terbarukan (Aberilla *et al.*, 2019). Sampah organik dapat dikonversi menjadi biogas dan produk turunan lainnya yang berguna bagi kehidupan manusia (Awasthi *et al.*, 2021; Babu *et al.*, 2021).

Biogas merupakan salah satu metode pemulihan energi yang paling banyak digunakan untuk sampah organik (Awasthi *et al.*, 2021; Bedoic *et al.*, 2020; Behrooznia *et al.*, 2020; Blasius *et al.*, 2020). Biogas dapat digunakan sebagai bahan bakar memasak pada skala rumah tangga serta sebagai pembangkit listrik pada skala industri (Silaen *et al.*, 2019). Produk utama dari produksi biogas adalah metana (50-75%) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar (Senol, 2019; Babu *et al.*, 2021). Sedangkan produk turunan berupa *sludge* digestat yang dapat digunakan sebagai pupuk organik yang kaya nutrisi (Babu *et al.*, 2021). Dengan memanfaatkan sampah organik rumah tangga menjadi biogas akan mendukung keberlanjutan pengelolaan sampah, mengatasi kesulitan energi, memperbaiki kualitas lingkungan dan meningkatkan pendapatan masyarakat.

Penelitian mengenai pengolahan sampah organik rumah tangga menjadi biogas sudah banyak dilakukan pada skala laboratorium (Abimbola *and* Olumide, 2014; Kader *et al.*, 2015; Eriksson *et al.*, 2016; Oh *et al.*, 2018; Bedoic, *et al.*, 2020; Muratcobanoglu *et al.*, 2020; Nasiruddin, *et al.*, 2020). Agar produksi biogas dapat diaplikasikan dalam skala industri, maka diperlukan konstanta dari model kinetika yang tepat untuk memahami mekanisme reaksi yang terjadi di dalam reaktor. Oleh sebab itu, penelitian ini akan menganalisis dan menentukan konstanta kinetika pada produksi biogas dari sampah organik rumah tangga. Selain itu, penelitian ini juga akan menganalisis potensi dampak-dampak lingkungan yang ditimbulkan diantaranya: pengurangan sampah, bangkitan energi, penurunan gas rumah kaca dan nilai ekonomi untuk meningkatkan pendapatan masyarakat.

Maka dari itu, rumusan masalah pada penelitian ini diuraikan sebagai berikut:

1. Bagaimana mekanisme reaksi *anaerobic digestion* pada produksi biogas dari sampah organik rumah tangga?
2. Bagaimana konstanta dan model kinetika yang tepat untuk produksi biogas dari sampah organik rumah tangga?
3. Bagaimana dampak lingkungan yang akan ditimbulkan oleh produksi biogas dari sampah organik rumah tangga?

1.2 Ruang Lingkup

1. Definisi sampah organik rumah tangga adalah residu yang berasal dari kegiatan konsumsi bahan makanan dalam rumah tangga.
2. Produksi biogas dimulai dari pengumpulan bahan baku hingga pembentukan gas metana.
3. Model kinetika yang digunakan merupakan model kinetika tahap hidrolisis yang mengacu pada penelitian-penelitian sebelumnya.
4. Dampak lingkungan yang dianalisis berfokus pada cakupan wilayah Kota Bandar Lampung.

1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui mekanisme reaksi *anaerobic digestion* pada produksi biogas dari sampah organik rumah tangga.
2. Untuk menentukan konstanta dan model kinetika yang tepat untuk produksi biogas dari sampah organik rumah tangga.
3. Untuk mengetahui dampak lingkungan yang akan ditimbulkan oleh produksi biogas dari sampah organik rumah tangga.

1.4 Kegunaan Penelitian

1. Bagi mahasiswa

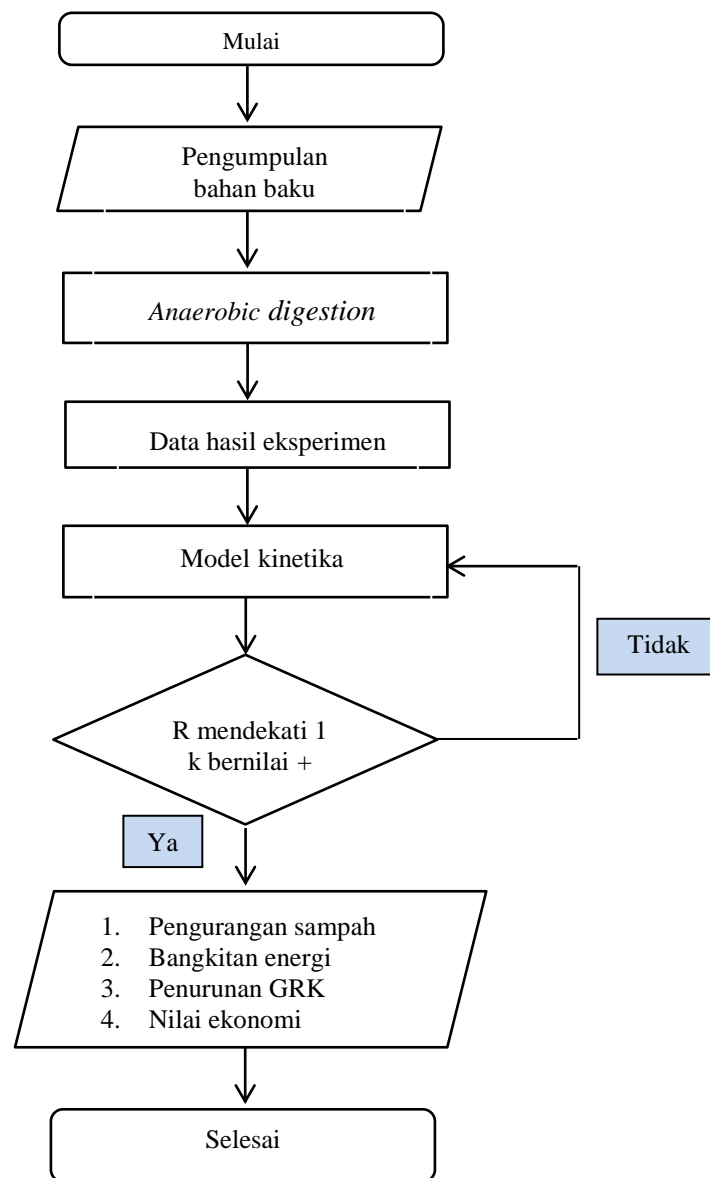
Sebagai cerminan dari Tri Dharma Perguruan Tinggi khususnya pada penelitian. Selain itu juga mahasiswa akan menambah wawasan mengenai proses produksi biogas, menentukan konstanta dan model kinetika reaksi serta dapat menganalisis dampak lingkungan pada produksi biogas dari sampah organik rumah tangga.

2. Bagi masyarakat

Meningkatkan pengetahuan masyarakat mengenai teknologi biogas dan potensi dampak yang ditimbulkan sehingga masyarakat akan tertarik untuk mengolah sampah organik rumah tangga menjadi biogas.

1.5 Kerangka Pemikiran

Pengelolaan sampah organik rumah tangga dari sumber penghasilnya sangat diperlukan untuk mengurangi volume sampah yang masuk ke Tempat Pembuangan Akhir. Hal ini diharapkan akan mengurangi dampak negatif yang ditimbulkan antara lain sebagai sumber penyakit bagi masyarakat dan pelepasan gas rumah kaca ke atmosfer. Proses penguraian sampah organik rumah tangga dengan metode *anaerobic digestion* akan menghasilkan energi yang disebut biogas. Agar konsep ini dapat diterapkan dalam skala besar, maka diperlukan konstanta dan model kinetika reaksi yang tepat untuk menggambarkan mekanisme reaksi di dalam reaktor. Konstanta dan model kinetika reaksi yang dihasilkan pada penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar perhitungan *scale up* reaktor. Selain itu, penelitian ini juga dapat digunakan untuk memprediksi dampak lingkungan yang ditimbulkan sehingga dapat menjadi acuan bagi masyarakat dan *stake holder* dalam pengelolaan sampah organik rumah tangga. Diagram alir kerangka pemikiran disajikan pada Gambar 1 sebagai berikut



Gambar 1. Diagram Alir Kerangka Pemikiran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sampah Organik Rumah Tangga

Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga, sampah rumah tangga adalah sampah yang berasal dari kegiatan sehari-hari dalam rumah tangga yang tidak termasuk tinja dan sampah spesifik. Sedangkan sampah organik rumah tangga adalah bahan makanan baik mentah atau matang dan merupakan residu organik yang dihasilkan karena adanya penanganan, penyimpanan, penjualan, pemasakan, dan penyajian makanan (Somashekar *et al.*, 2014). Kehilangan sejumlah makanan ini disebut sebagai *Food Loss and Waste* (FLW). Menurut (KPPN/BAPPENAS, 2021), timbulan FLW Indonesia pada tahun 2000-2019 berkisar 115-184 kg kapita⁻¹ tahun⁻¹. Jumlah tersebut dapat memberi makan 61-125 juta orang serta setara dengan emisi GRK sebesar 1.702,9 Mt CO₂eq.

Sumber utama sampah organik rumah tangga adalah aktivitas rumah tangga, hotel, restoran, kantin dan lainnya (Patil *et al.*, 2019). Menurut (KPPN/BAPPENAS, 2021), faktor penyebab FLW di Indonesia dibedakan menjadi faktor penyebab langsung dan tidak langsung. Penyebab langsung adalah kegiatan aktor di rantai pasok yang secara langsung menyebabkan FLW, sedangkan penyebab tidak langsung adalah kondisi ekonomi, budaya dan politik yang mempengaruhi timbulan FLW. Faktor penyebab FLW disajikan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Faktor Penyebab FLW

No	Penyebab Langsung	Penyebab Tidak Langsung
1.	Kurangnya implementasi <i>Good Handling Practice</i> (GHP)	Standar kualitas pasar dan preferensi konsumen
2.	Kualitas ruang penyimpanan yang kurang optimal	Kurangnya informasi/edukasi pekerja pangan dan konsumen
3.	Kelebihan porsi dan perilaku konsumen	Persaingan pasar dan keterbatasan daya beli konsumen
4.	Keterbatasan teknologi	Keterbatasan infrastruktur
5.	Teknik dan waktu panen yang kurang baik	Harga pasar
6.	Kualitas kemasan yang buruk	Rantai pasok yang kurang efisien
7.	Misinterpretasi waktu kadaluarsa dan baik sebelum	Kurangnya regulasi mengenai sampah makanan
8.	Produksi berlebihan	Keterbatasan akses terhadap modal

Sumber: (KPPN/BAPPENAS, 2021)

Pengelolaan sampah organik rumah tangga skala individu atau kelompok sangat diperlukan untuk mengurangi volume sampah yang masuk ke Tempat Pembuangan Akhir. Sampah organik rumah tangga sebagian besar dibuang dan berakhir membusuk di tempat pembuangan sampah, sehingga melepaskan gas rumah kaca ke atmosfer dan dapat menyebabkan penyakit seperti Kolera, Malaria, Tifus (Singh *et al.*, 2018). Sampah organik rumah tangga sulit di bakar, diolah atau didaur ulang karena mengandung kadar air yang tinggi (Somashekar *et al.*, 2014). Selain itu, sampah organik rumah tangga yang terdekomposisi secara anaerobik juga dapat melepaskan gas hidrogen sulfida yang dapat menimbulkan gangguan pernafasan pada manusia.

Selain dibuang ke TPA, sampah organik rumah tangga juga dapat diolah dengan pengolahan limbah, namun membutuhkan energi yang besar untuk aerasi limbah. Opsi pengolahan sampah organik rumah tangga lainnya adalah dengan pengomposan dan pembakaran. Pada proses pengomposan akan mempertahankan nutrisi namun menghilangkan potensi energi yang ada di sampah organik rumah tangga. Sebaliknya, proses pembakaran akan mempertahankan energi namun menghilangkan nutrisi yang ada di sampah organik rumah tangga.

Berikut ini adalah beberapa cara pengelolaan sampah organik rumah tangga yang dapat diterapkan (KPPN/BAPPENAS, 2021):

1. Kajian dan pendataan
Perlu adanya pendataan dan kajian timbulan sampah organik rumah tangga yang terintegrasi agar mudah diakses oleh masyarakat dan pemangku kebijakan.
2. Perubahan perilaku
Untuk mencegah terjadinya penumpukan sampah organik rumah tangga adalah dengan melakukan kampanye kepada masyarakat agar tidak berlebihan dalam berbelanja makanan. Belanja makanan yang berlebihan akan menyebabkan banyak makanan tidak dikonsumsi dan terbuang.
3. Pembenahan penunjang sistem pangan
Menyediakan infrastruktur dan sarana prasarana yang mendukung efisiensi proses produksi pangan.
4. Penguatan regulasi dan optimalisasi pendanaan
Mengembangkan regulasi FLW di tingkat nasional dan daerah, serta mengoptimalkan pendanaan tepat guna untuk menguatkan infrastruktur dan lembaga terkait pangan.
5. Pemanfaatan
Produk yang tidak memenuhi standar estetika namun masih memiliki nutrisi yang baik di sebut *ugly food*. *Ugly food* dapat diolah menjadi makanan lain atau disumbangkan kepada orang lain. Sedangkan produk yang sudah tidak

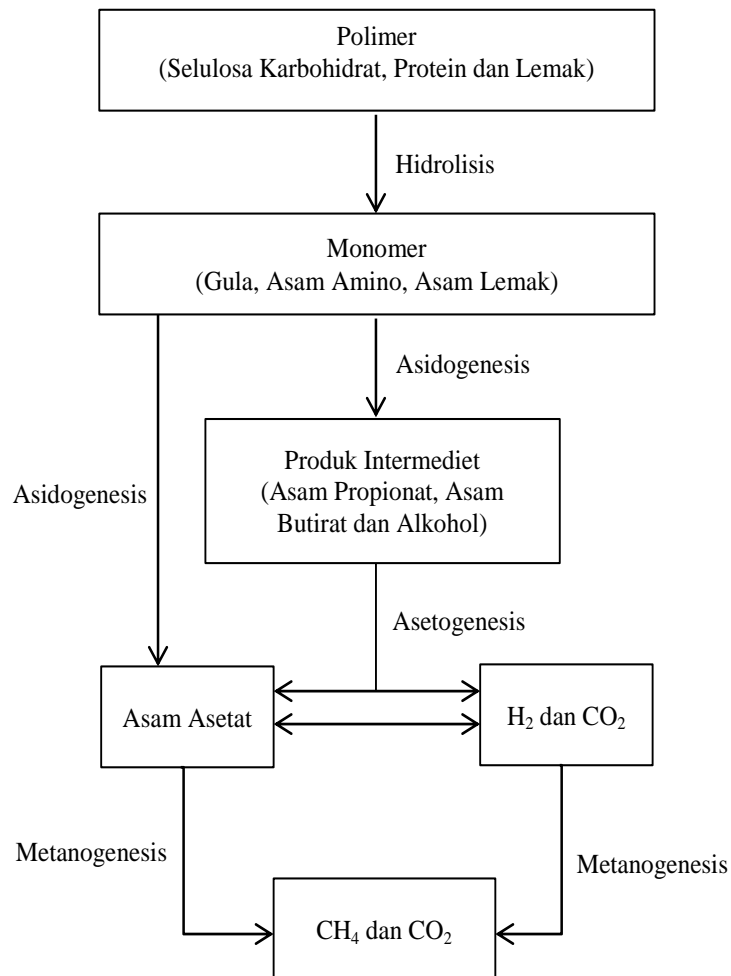
layak makan bagi manusia dapat dikomposkan dan dijadikan sebagai pupuk alami bagi tanaman serta menjadi pakan bagi hewan misalnya kucing, ayam, sapi, kambing dan maggot. Teknologi pengolahan sampah organik rumah tangga lainnya adalah biogas. Gas metana yang dihasilkan dapat menjadi bahan bakar dan listrik.

2.2. Anaerobic Digestion

2.2.1. Tahapan Proses Anaerobic Digestion

Pengolahan sampah organik rumah tangga secara *anaerobic digestion* merupakan proses untuk mengurai senyawa organik pada sampah organik rumah tangga dengan memanfaatkan mikroba tanpa kehadiran oksigen (Hamzah *et al.*, 2019). Pengolahan ini dilakukan di dalam reaktor biogas (digester), yaitu sebuah tangki tertutup yang dirancang agar kedap udara (anaerobik). Secara umum, digester terdiri dari beberapa komponen diantaranya saluran masuk *slurry* bahan baku, ruang digestion, saluran keluar *sludge* residu dan tabung penyimpanan biogas.

Anaerobic digestion melewati beberapa tahapan yaitu hidrolisis, acidogenesis, acetogenesis dan metanogenesis (Kangle *et al.*, 2012). Tahapan proses ini diuraikan pada Gambar 2 sebagai berikut:



Gambar 2. Tahapan Proses *Anaerobic Digestion*.

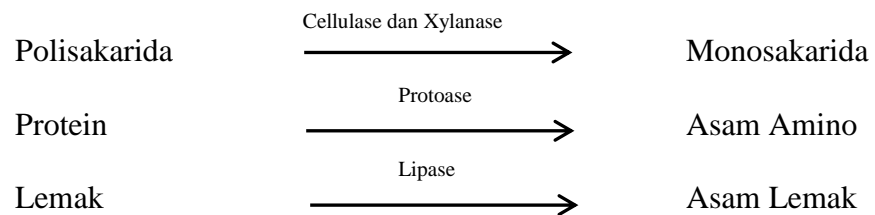
Sumber: Sawyer *et al.* (2019).

1. Hidrolisis

Pada tahap ini, senyawa organik tidak larut seperti selulosa, karbohidrat, protein dan lemak dipecah menjadi senyawa yang lebih sederhana yaitu monomer larut oleh mikroba-mikroba hidrolitik. Mikroba yang terlibat

sangat beragam yang umumnya terdiri dari filum *Bacteroidetes* dan *Firmicutes* (Ometto *et al.*, 2019). Selama proses hidrolisis, hanya 50% dari senyawa organik yang terdekomposisi akibat kurangnya mikroba dekomposer. Variabel yang mempengaruhi tingkat dekomposisi pada tahap hidrolisis adalah ukuran partikel, pH dan produksi enzim.

Reaksi yang terjadi:



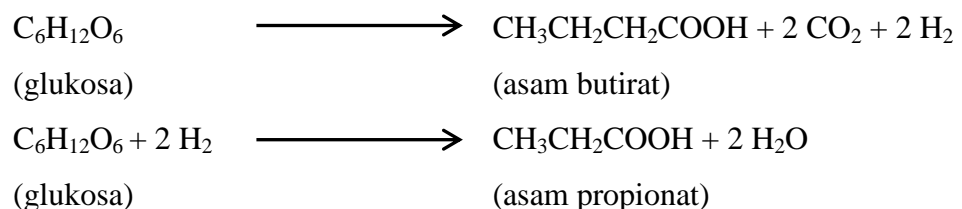
Gambar 3. Reaksi Hidrolisis.

Sumber: Hamzah dkk (2019).

2. Asidogenesis

Pada tahap ini, bakteri fermentasi (*acidogens*) mengubah monosakarida, asam amino dan asam lemak menjadi asam lemak volatil, asam asetat, alkohol, asam laktat, amoniak, hidrogen, karbondioksida, dan gas hidrogen sulfida. Mikroba yang berperan pada tahap asidogenesis yaitu filum *Bacteroidetes*, *Firmicutes*, *Chloroflexi* dan *Proteobacteria* (Ometto *et al.*, 2019).

Reaksi yang terjadi:



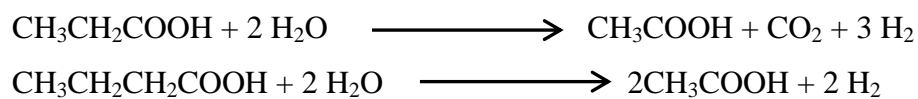
Gambar 4. Reaksi Asidogenesis.

Sumber: Azargoshasb *et al.* (2015).

3. Asetogenesis

Asetogenesis merupakan tahap penguraian senyawa hasil fermentasi seperti VFA yang memiliki lebih dari dua atom karbon, alkohol, asam lemak aromatik, menjadi asam organik sederhana, CO₂, asam asetat dan hidrogen. Asam asetat yang dihasilkan pada tahap ini menjadi kunci utama dalam pembentukan metana. Bakteri yang terlibat pada tahap ini antara lain genera *Pelotomaculum*, *Smithlleya* dan *Syntrophobacter* (Ometto *et al.*, 2019).

Reaksi yang terjadi:



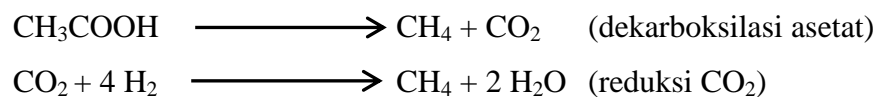
Gambar 5. Reaksi Asetogenesis.

Sumber: Azargoshasb *et al.* (2015).

4. Metanogenesis

Metanogenesis dibagi dalam 2 (dua) kelompok bakteri yaitu bakteri yang memanfaatkan asetat dan bakteri yang mengkonsumsi H₂ dan CO₂. Asetat hasil reaksi asetogenesis dikonversi menjadi metana dan karbondioksida (Ometto *et al.*, 2019). Proses dekarboksilasi asetat menyumbang sekitar 66% jumlah metana dan sekitar 34% sisanya dihasilkan oleh reduksi karbon dioksida melalui aktivasi bakteri hidrogenofilik (Ohimain *and* Izah, 2017).

Reaksi yang terjadi:



Gambar 6. Reaksi Metanogenesis.

Sumber: Garritano *et al.* (2018).

2.2.2. Produk *Anaerobic Digestion*

2.2.2.1. Biogas

Produk gas dari proses *anaerobic digestion* disebut biogas. Biogas dapat digunakan sebagai salah satu energi alternatif yang dapat menggantikan bahan bakar fosil diantaranya untuk memasak, pemanas, bahkan untuk menghasilkan listrik. Komposisi biogas disajikan pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Komposisi Biogas

No	Komponen	Rumus Kimia	Konsentrasi (%)
1.	Metana	CH ₄	55-60
2.	Karbon dioksida	CO ₂	35-40
3.	Hidrogen	H ₂	2-7
4.	Hidrogen sulfida	H ₂ S	2
5.	Amoniak	NH ₃	0-0,05
6.	Nitrogen	N	0-2

Sumber: (Ometto *et al.*, 2019)

2.2.2.2. *Sludge Digestat*

Selain menghasilkan biogas, *anaerobic digestion* juga menghasilkan produk lain yaitu *sludge digestat*. Digestat memiliki kandungan nutrisi yang tinggi sehingga dapat menyuburkan tanah (Chen, et al., 2020). Digestat diketahui menyerupai pupuk mineral karena memiliki kandungan Nitrogen, Fosfor dan Kalium (NPK) (Koszel and Lorencowicz, 2015). Kandungan NPK dalam *sludge digestat* adalah 1,3% (Singgih and Yusmiati, 2018).

2.2.3. Faktor yang Mempengaruhi *Anaerobic Digestion*

Pada proses *anaerobic digestion*, terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi stabilitas proses dan jumlah produk yang dihasilkan. Jumlah biogas yang

dihasilkan dipengaruhi oleh beberapa variabel antara lain suhu, pH, laju pembebanan bahan organik, konsentrasi umpan, waktu tinggal dan tipe digester (Vaez *and* Zilouei, 2020). Faktor-faktor yang mempengaruhi produksi biogas dijelaskan sebagai berikut:

2.2.3.1. Suhu

Secara teori, laju reaksi akan meningkat sebanding dengan kenaikan suhu. Pada suhu rendah, laju reaksi anaerobik menjadi lambat sehingga akan membutuhkan volume digester yang lebih besar. Dalam produksi biogas, laju reaksi salah satunya dapat dinyatakan dengan laju pertumbuhan mikroba. Proses fermentasi anaerobik merupakan reaksi yang dibantu oleh mikroba pembentuk gas metana sehingga suhu sangat berpengaruh terhadap kelangsungan hidup mikroba. Fluktuasi suhu dapat menguntungkan salah satu kelompok mikroorganisme, namun merugikan kelompok mikroorganisme yang lain. Perubahan aktivitas mikroorganisme akan mempengaruhi produksi biogas sehingga rentang suhu yang optimum sangat penting untuk diamati. Suhu optimum untuk fermentasi anaerobik yaitu pada suhu 30-38°C untuk tipe reaksi *mesophilic* dan suhu 49-57°C untuk tipe reaksi *thermophilic* (Metcalf *and* Eddy, 2003).

2.2.3.2. pH

Menurut (Zhao, *et al.*, 2017), pH yang optimal untuk proses *anaerobic digestion* adalah pada rentang 6,5-7,5. Hal ini disebabkan karena mikroba pembentuk biogas hanya hidup pada pH 6,7 – 7,5. Sehingga menurut (Monnet, 2003), pH *slurry* harus berada pada rentang 6,4 – 7,2. Jika pH turun atau naik hingga keluar dari rentang tersebut, maka proses fermentasi akan terhenti. Perubahan pH yang ekstrem dapat berasal dari akumulasi VFA sehingga mempengaruhi sistem buffer pada digester.

2.2.3.3. Laju Pembebanan Bahan Organik

Laju pembebanan bahan organik (*loading rate*) merupakan jumlah bahan organik dalam satuan volume yang diumpankan pada digester. Semakin banyak bahan organik yang terkandung dalam substrat, maka semakin banyak juga biogas yang dihasilkan. Namun *loading rate* yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan mikroba terbawa aliran keluar dari digester. Laju pembebanan bahan organik dapat dinyatakan dalam kadar *Total Solids* (TS), *Total Suspended Solids* (TSS), *Volatile Solids* (VS) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD). Variabel-variabel ini merupakan kandungan bahan organik yang berpotensi untuk dikonversi menjadi biogas.

2.2.3.4. Konsentrasi Umpan

Menurut Shamurad dkk (2020), konsentrasi *Total Solids* (TS), *Total Suspended Solids* (TSS), *Volatile Solids* (VS) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD) merupakan variabel utama dalam proses anaerobik. TS adalah jumlah padatan kering yang terkandung dalam *slurry*. TS merupakan variabel yang menunjukkan jumlah biomassa aktif yang dapat dikonversi menjadi biogas (Sandoval-Cobo, *et al.*, 2020). Yi *et al.* (2014) melaporkan bahwa pada kondisi mesofilik produksi biogas dan gas CH₄ meningkat seiring dengan meningkatnya kadar TS substrat. Namun nilai TS yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penurunan produksi biogas. hal ini disebabkan karena adanya penurunan jumlah air sehingga akan menurunkan aktivitas mikroba (Tsunatu, *et al.*, 2017).

Sedangkan *Volatile Solid* (VS) adalah variabel untuk mengetahui kandungan bahan organik yang dapat diuraikan secara sempurna oleh proses biologi. Semakin tinggi konsentrasi VS maka akan semakin tinggi pula pembebanan proses. TSS menunjukkan jumlah bahan organik seperti fitoplankton, zooplankton, bakteri, fungi serta bahan anorganik seperti pasir, lumpur, dan tanah liat yang terkandung dalam substrat. COD adalah jumlah oksigen yang

dibutuhkan untuk proses dekomposisi bahan organik di dalam umpan. Penurunan kadar COD menunjukkan adanya penguraian umpan menjadi biogas (Utami *et al.*, 2015). COD adalah variabel kualitas air yang dapat menentukan jumlah bahan organik di dalam air. Pada proses *anaerobic digestion*, kadar COD akan berkurang seiring dengan berkurangnya bahan organik pada substrat karena telah terkonversi menjadi biogas.

2.2.3.5. Waktu Tinggal

Waktu tinggal hidraulik atau *Hdraulic Retention Time* (HRT) adalah waktu umpan tinggal di dalam digester. Menurut Kangle (Kangle *et al.*, 2012), waktu tinggal pada kondisi mesofilik adalah 10 sampai 40 hari, sedangkan pada kondisi termofilik adalah 14 hari. HRT yang pendek akan mengurangi volume digester yang dibutuhkan.

2.3. Model Kinetika Reaksi

Pemodelan adalah representasi dari sebuah sistem dalam bentuk persamaan matematika yang dapat digunakan untuk menggambarkan karakteristik suatu sistem. Pada proses produksi biogas, reaksi yang terjadi adalah reaksi biokimia karena dipengaruhi oleh mikroba dalam sistem anaerobik. Sistem anaerobik cenderung tidak stabil sehingga perlu dibuat model untuk membantu memahami dan menjelaskan proses degradasi bahan organik di dalam digester. Pemodelan ini juga dapat digunakan sebagai dasar untuk meningkatkan desain dan sistem operasi digester.

Pemodelan kinetika reaksi proses anaerob memerlukan persamaan dan parameter yang kompleks dan rumit. Pemodelan harus disederhanakan dan menggunakan beberapa asumsi diantaranya: tidak ada mikroba di dalam umpan, laju kematian mikroba lebih kecil daripada laju pertumbuhannya sehingga dapat diabaikan dan proses berlangsung dalam kondisi homogen (Rambe, 2015). Beberapa persamaan

matematika untuk pemodelan kinetika reaksi produksi biogas diuraikan pada sub-bab berikut.

2.3.1. Model Kinetika *First Order*

Pertumbuhan mikroba pada fase eksponensial pada umumnya dinyatakan dengan model kinetika first order dimana tingkat pertumbuhan sebanding dengan massa mikroba dalam sistem. Model ini juga dapat digunakan untuk menggambarkan laju hidrolisis pada proses anaerobik. Model kinetika *first order* model didasarkan pada hipotesis bahwa hidrolisis mengontrol seluruh proses dan ketersediaan substrat sebagai faktor pembatas (Pramanik *et al.*, 2019). Secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A \quad (\text{Coker, 2001})$$

Dimana:

$$-\frac{dC_A}{dt} = \text{Laju penguraian bahan organik}$$

$$k = \text{Laju pertumbuhan spesifik mikroba}$$

$$C_A = \text{Konsentrasi substrat}$$

Jika tidak ada perubahan komposisi substrat dan jumlahnya berlebih, maka reaksi biokimia akan berlangsung dengan baik. Namun jika substrat dalam jumlah terbatas, maka saat substrat habis pertumbuhan mikroba akan berhenti.

2.3.2. Model Kinetika Michaelis-Menten

Model kinetika ini merupakan persamaan kinetika reaksi biokimia sederhana yang menjelaskan persamaan enzimatik antara substrat dan produk yang dihasilkan (Zainol dan Ismail, 2019). Persamaan ini menjelaskan tingkat pemanfaatan substrat. Model kinetika Michaelis-Menten dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$-\frac{dC_A}{dt} = \frac{V_{max} \times C_A}{k_m + C_A} \quad (\text{Coker, 2001})$$

Dimana:

$-\frac{dC_A}{dt}$ = Laju reaksi penggunaan substrat

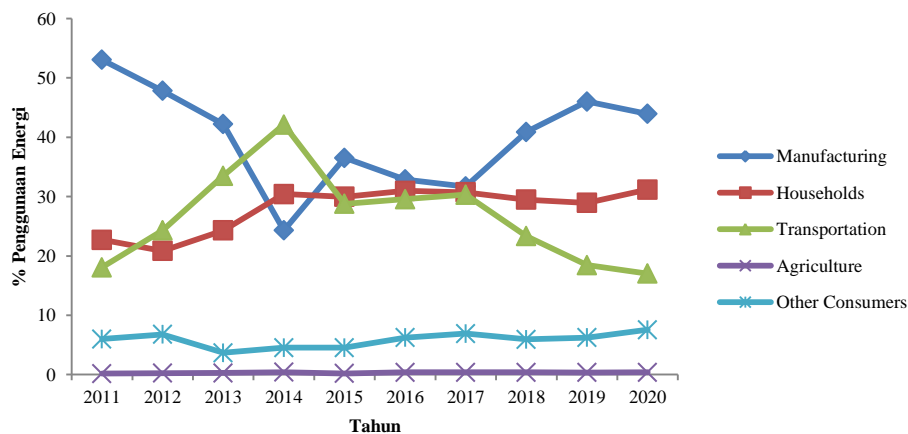
V_{\max} = Laju penggunaan substrat maksimum

C_A = Konsentrasi substrat

k_m = Konstanta Michaelis-Menten

2.4. Energi

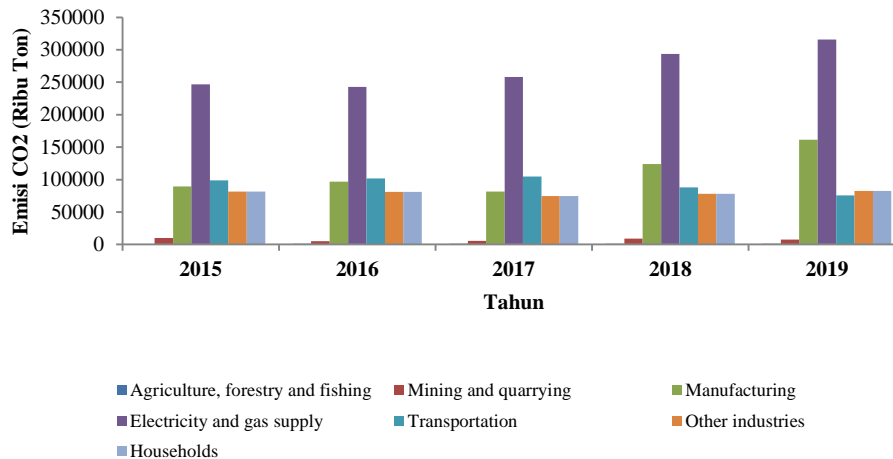
Selama tahun 2011-2020, konsumsi energi Indonesia masih didominasi oleh sumber daya tidak terbarukan (BPS, 2016; BPS, 2021). Sumber daya tidak terbarukan yang digunakan antara lain olahan minyak bumi (37%), batu bara (31%) dan gas alam (19%), sedangkan sisanya berupa energi terbarukan (13%) seperti energi panas bumi dan energi air (Hartono dkk., 2021). Gambar 7 di bawah ini menunjukkan bahwa konsumen energi terbesar di Indonesia adalah sektor industri manufaktur dan rumah tangga. Rumah tangga banyak menggunakan listrik, LPG serta bahan bakar biomassa yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari.



Gambar 7. Persentase Penggunaan Energi Dari Berbagai Sektor Kegiatan.

Sumber: BPS (2016) dan BPS (2021).

Dominasi konsumsi energi dari bahan bakar fosil bertanggung jawab atas peningkatan emisi gas rumah kaca (GRK) dan pemanasan global (Yaqoob *et al.*, 2021). Emisi gas rumah kaca dari sektor energi rumah tangga menempati urutan ke empat penyumbang emisi gas rumah kaca terbesar di Indonesia seperti yang disajikan pada Gambar 8 sebagai berikut:



Gambar 8. Emisi CO₂ Dari Berbagai Sektor Kegiatan.

Sumber: BPS (2021).

Agar aktivitas di semua sektor pengguna energi berjalan dengan baik, maka pemenuhan kebutuhan energi harus diimbangi dengan ketersediaan energi secara tepat, berkesinambungan dan berwawasan lingkungan. Keunggulan biogas sebagai energi alternatif selain ramah lingkungan adalah dapat menghasilkan panas yang hampir setara dengan LPG (Rahmani dkk., 2013).

2.5. Gas Rumah Kaca

KLHK (2020) melaporkan bahwa pada tahun 2017 wilayah Indonesia mengalami peningkatan suhu sebesar 1,1°C dibandingkan dengan era pra-industri. Peningkatan suhu ini diprediksi sebagai akibat dari efek rumah kaca. Efek rumah kaca adalah naiknya suhu bumi yang disebabkan oleh terperangkapnya sinar

matahari oleh gas rumah kaca seperti metana, karbon dioksida, dan dinitro oksida (Suryati dkk., 2007). Peristiwa ini yang menyebabkan bumi menjadi hangat dan layak untuk ditempati manusia. Jika tidak ada efek rumah kaca maka suhu bumi akan turun menjadai -30°C (Pratama, 2019). Namun jika gas-gas ini berlebih, pemanasan bumi akan semakin berlanjut dan menyebabkan pemanasan global.

Pemanasan global akan mengakibatkan perubahan iklim yang ekstrim sehingga mengganggu ekosistem. Menurut (Pratama, 2019), dampak pemanasan global antara lain:

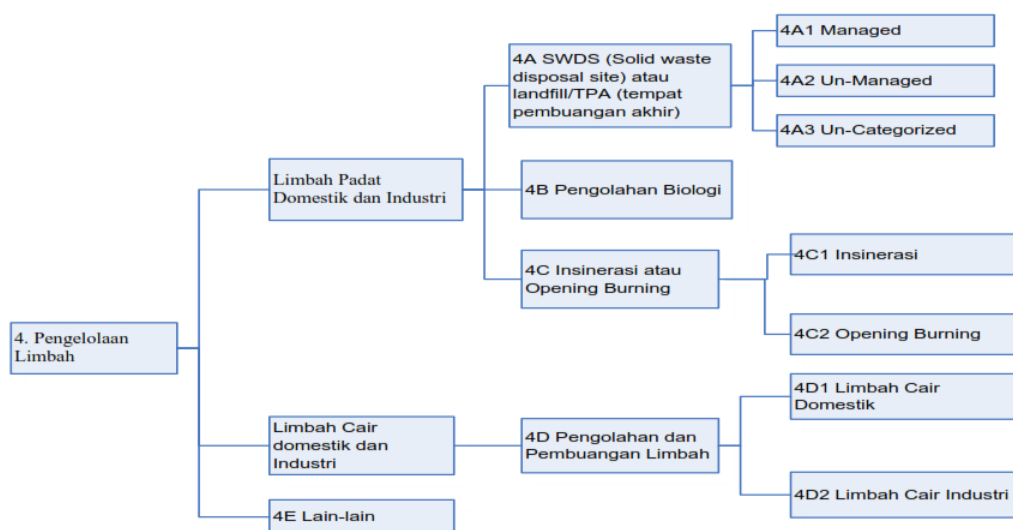
1. Gunung-gunung es di kutub akan mencair yang menyebabkan volume air laut bertambah dan daratan sekitar pantai akan tenggelam.
2. Beberapa spesies hewan akan mati karena habitatnya menjadi terlalu hangat.
3. Penyakit tropis dapat menyebar dengan cepat.
4. Udara yang lebih hangat dapat memperbanyak polutan dan menyebabkan penyakit pernafasan.
5. Perubahan iklim ekstrim

Pada konferensi perubahan iklim 2015 (COP 21) yang diselenggarakan di Paris, anggota *United Nations Framework on Climate Change Conference* (UNFCCC) membuat Perjanjian Paris dengan tujuan menjaga ambang batas kenaikan suhu bumi di bawah 2°C dan berupaya menahan kenaikan suhu global di bawah $1,5^{\circ}\text{C}$. Komitmen Indonesia sebagai salah satu anggota UNFCCC dinyatakan dalam UU No. 16 tahun 2016 yang menyatakan bahwa Indonesia berkomitmen untuk menurunkan emisi sebesar 29% dengan upaya sendiri, dan 41% dengan dukungan internasional sampai dengan tahun 2030, serta tetap mempertahankan target 7% pertumbuhan ekonomi.

Komitmen ini mencerminkan kepedulian Indonesia terhadap isu pemanasan global dan perubahan iklim yang mengancam keberlangsungan kehidupan manusia. Sebagai langkah awal untuk mencapai komitmen tersebut, Kementerian

Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) telah menyusun dokumen *Road Map Nationally Determined Contribution* (NDC) bidang mitigasi dan adaptasi. Menurut NDC, target penurunan emisi GRK dilakukan pada 5 sektor yaitu sektor kehutanan, energi, limbah, proses industri dan penggunaan produk dan pertanian.

Emisi GRK dari kegiatan penanganan limbah antara lain gas metana (CH_4), dinitro oksida (N_2O) dan karbon dioksida (CO_2). Pada proses biologi, emisi ini berasal dari penguraian anaerobik limbah organik baik padat maupun cair. Menurut *Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines* Tahun 2006 (IPCC 2006), CO_2 yang dihasilkan dari pengolahan biologi dikategorikan sebagai *biogenic origin* sehingga tidak termasuk sebagai golongan emisi GRK. Menurut KLH (2012), sumber utama emisi GRK dari sektor limbah ditampilkan pada Gambar 9. sebagai berikut:



Gambar 9. Sumber-sumber utama emisi GRK sektor limbah.

Sumber: KLH (2012).

Menurut (KLHK, 2019), target penurunan emisi GRK sektor limbah di tahun 2030 adalah sebesar 11 juta ton CO_2e . Untuk mencapai target tersebut, maka

diperlukan upaya kebijakan dan regulasi terkait aksi mitigasi dalam rangka penurunan emisi GRK. Upaya aksi mitigasi di sektor limbah disajikan pada Tabel 3 berikut:

Tabel 3. Kebijakan dan Regulasi Terkait Aksi Mitigasi Sektor Limbah

No	Aksi Mitigasi	Instrumen Kebijakan	Deskripsi
1.	Implementasi 3R (<i>Reduce, Reuse, Recycle</i>), <i>composting</i> dan pengolahan akhir yang baik dan berwawasan lingkungan	Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah	Mengatur pengelolaan sampah secara baik dan berwawasan lingkungan di tingkat pusat dan daerah serta kemitraan dengan badan usaha pengelolaan sampah
2.	Kebijakan pengelolaan sampah di tingkat nasional	Peraturan Presiden Nomor 97/2017 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional (JAKSTRANAS) Pengelolaan Sampah Rumah Tangga Dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga	Pedoman pengembangan energi bersih dari sampah melalui pengolahan sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga JAKSTRANAS meliputi strategi, program, dan target pengurangan sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga di tingkat nasional
3.	Kebijakan pengelolaan sampah di tingkat sub-nasional	Peraturan Menteri LHK Nomor P.10/MENLHK/SETJEN/PLB.0/4/2018 tentang Pedoman Penyusunan Kebijakan dan Strategi Daerah Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga	JAKSTRADA merupakan arahan kebijakan dan strategi pengurangan sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga di tingkat provinsi dan kabupaten/kota
4.	Konversi limbah ke energi	Peraturan Presiden Nomor 35/2018 tentang Percepatan Pembangunan Instalasi Pengolah Sampah Menjadi Energi Listrik Berbasis Teknologi Ramah Lingkungan	Ketentuan mengenai percepatan pembangunan teknologi bersih pada pembangkit listrik berbasis sampah di tingkat provinsi dan kabupaten/kota

Sumber: (KLHK, 2019)

Khusus pada NDC subsektor limbah padat domestik atau sampah, upaya penurunan emisi GRK berfokus pada kegiatan pengurangan jumlah sampah yang

ditimbun di TPA dengan menerapkan sistem pemanfaatan sampah seperti disajikan pada Tabel 4 berikut:

Tabel 4. Aksi Mitigasi Pada Pengelolaan Sampah Domestik

Sebelum Masuk TPA	Setelah Masuk TPA
1. Pemanfaatan sampah organik menjadi kompos	1. Rehabilitasi TPA <i>open dumping</i> menjadi TPA <i>sanitary landfill</i>
2. 3R sampah kertas, logam dan sampah bernilai lainnya melalui kegiatan bank sampah	yang dilengkapi dengan pengelolaan gas metana
3. Pemanfaatan sampah menjadi energi	

Sumber: (KLHK, 2019)

Inventarisasi Gas Rumah Kaca merupakan perhitungan jumlah GRK yang dihasilkan dari berbagai kegiatan di suatu wilayah. Inventarisasi Gas Rumah Kaca bertujuan untuk memberikan informasi tentang pencapaian target dari komitmen NDC, juga sebagai kontrol terhadap progress capaian NDC, serta sebagai pelaksanaan Peraturan Presiden No 71 Tahun 2011 tentang Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional (GRK). Salah satu metode inventarisasi GRK adalah metode *Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines* Tahun 2006 (IPCC 2006). IPCC 2006 adalah metode untuk memperkirakan emisi antropogenik GRK suatu negara atau daerah dari sumber hingga penyerapannya untuk berbagai sektor (Chaerul *et al.*, 2020).

Proyeksi emisi GRK skenario *business by usual* (BAU) dibuat dengan asumsi bahwa laju emisi GRK berbanding lurus dengan jumlah limbah yang diproses, dengan *driver* dari peningkatan jumlah limbah yang diolah adalah jumlah penduduk, *waste generation* per kapita dan kandungan DOC (*degradable organic component*) untuk limbah domestik dan kapasitas produksi industri, *waste generation* per produk atau per output ekonomi (*Gross Domestic Product/GDP*),

dan kandungan DOC (*degradable organic component*) untuk limbah industri (KLHK, 2019).

Dalam melakukan inventarisasi GRK, Indonesia dan negara-negara non-Annex 1 menggunakan ketelitian perhitungan Tier-1 (KLH, 2012). Berdasarkan IPCC 2006, ketelitian perhitungan inventarisasi GRK dibagi menjadi 3 tingkat ketelitian atau Tier sebagai berikut:

1. Tier-1: estimasi emisi GRK berdasarkan pada data aktivitas dan faktor emisi yang sudah ada di *default IPCC 2006*.
2. Tier-2: estimasi emisi GRK berdasarkan pada data aktivitas yang lebih akurat dan faktor emisi *default IPCC 2006* atau faktor emisi spesifik suatu negara atau suatu pabrik.
3. Tier-3: estimasi GRK berdasarkan pada data paling akurat berupa pengukuran langsung data aktivitas suatu negara dan faktor spesifik suatu negara atau suatu pabrik.

Pengolahan limbah padat secara biologi adalah kegiatan pengolahan limbah yang melibatkan mikroba sebagai agen pengurai bahan organik. Pengolahan ini memiliki beberapa keuntungan yaitu:

1. Mengurangi jumlah limbah organik
2. Menghancurkan bakteri patogen di dalam limbah
3. Menghasilkan sumber energi terbarukan yaitu biogas
4. Menghasilkan pupuk organik sebagai pengganti pupuk kimia

Sumber emisi GRK pada pengolahan limbah secara biologi adalah kegiatan pengomposan dan penguraian anaerobik. Menurut (KLH, 2012), pada kegiatan pengomposan, limbah organik akan terkonversi menjadi CO₂, CH₄ dan N₂O. Sedangkan pada kegiatan *anaerobic digestion* emisi GRK hampir mendekati 0 karena CH₄ yang dihasilkan digunakan sebagai bahan bakar.

Langkah perhitungan emisi GRK pada pengolahan limbah organik rumah tangga menjadi biogas adalah sebagai berikut (KLH, 2012):

1. Pengumpulan data

Data yang digunakan dapat berupa kompilasi data jumlah sampah organik rumah tangga baik dalam basis berat basah maupun dalam basis berat kering.

2. Perhitungan tingkat emisi CH₄

Perhitungann emisi CH₄ pada produksi biogas dari sampah organik rumah tangga menggunakan persamaan sesuai dengan jenis aktivitas

3. Menentukan faktor emisi yang akan digunakan

Menurut (KLH, 2012), penentuan faktor emisi GRK pada pengolahan sampah organik rumah tangga secara biologi dapat menggunakan Tier-1, Tier-2 atau Tier-3. Faktor emisi CH₄ dan N₂O pada pengolahan limbah secara biologi pada Tier-1 dapat menggunakan format perhitungan IPCC. Pada Tier-2, faktor emisi dapat menggunakan hasil dari pengukuran representatif yang diaplikasikan di suatu wilayah. Sedangkan pada Tier-3 faktor emisi merupakan hasil pengukuran secara langsung di suatu site spesifik.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Pengelolaan Limbah Agroindustri Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, pada bulan Januari–Februari 2022.

3.2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah reaktor biogas tipe semi kontinyu, *gas flow meter*, *crusher*, pH meter, *gas sampler bag*, termometer, neraca analitik, *furnace*, oven, *spektrofotometer*, *gas chromatography*, cawan porselen, gelas ukur, erlenmeyer, labu ukur, desikator, pipet volume, spatula, dan peralatan gelas lainnya. Sedangkan bahan umpan produksi biogas adalah sampah organik rumah tangga yang diambil dari rumah tangga di Kelurahan Kali Balau Kencana, Kecamatan Kedamaian, Kota Bandar Lampung, serta *sludge* digestat dari digester biogas limbah tapioka yang didapatkan dari CV. Tapioka Bangun Makmur, Dusun Sriwaluyo II, Desa Buyut Ilir, Kecamatan Gunung Sugih, Lampung Tengah. Selain itu juga dibutuhkan bahan-bahan untuk pembuatan reagen yaitu kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) merek Merck, asam sulfat (H_2SO_4) merek Merck, merkuri sulfat ($HgSO_4$) merek Merck, silver sulfat ($AgSO_4$) merek Merck dan akuades.

3.3. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dengan melakukan eksperimen di laboratorium. Penelitian dilakukan dengan 6 tahapan yaitu: tahap pengumpulan bahan baku, tahap pembuatan *slurry* bahan baku, tahap aklimatisasi mikroba, tahap *anaerobic digestion*, tahap perhitungan kinetika reaksi, tahap perhitungan analisis dampak lingkungan yaitu pengurangan sampah, bangkitan energi, pengurangan gas rumah kaca dan nilai ekonomi. Perubahan yang diamati selama proses penelitian antara lain:

1. pH inlet dan outlet
2. Temperatur inlet dan outlet
3. Kadar *Chemical Oxygen Demand* (COD) inlet dan outlet
4. Kadar *Total Suspended Solid* (TSS) inlet dan outlet
5. Kadar *Volatile Suspended Solid* (VSS) inlet dan outlet
6. Volume biogas yang dihasilkan
7. Komposisi biogas yang dihasilkan

Data pengamatan kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik dan di analisa secara deskriptif berdasarkan kondisi operasi penelitian. Konstanta kinetika diperoleh menggunakan persamaan kinetika yang telah ditentukan yang diaplikasikan ke dalam neraca massa substrat. Setelah itu, data jumlah metana dan digestat yang di hasilkan diolah untuk menentukan pengurangan sampah, bangkitan energi, penurunan GRK dan nilai ekonomi biogas dan digestat yang dihasilkan.

3.3.1. Variabel Penelitian

Variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini adalah konsentrasi substrat yang dinyatakan pada kadar *total solids* (TS). Kadar TS yang digunakan adalah 1% (V1), 1,5% (V2), 2% (V3) dan 2,5% (V4). Sedangkan variabel kontrol yang digunakan pada penelitian ini adalah kondisi operasi.

3.3.2. Kondisi Operasi Penelitian

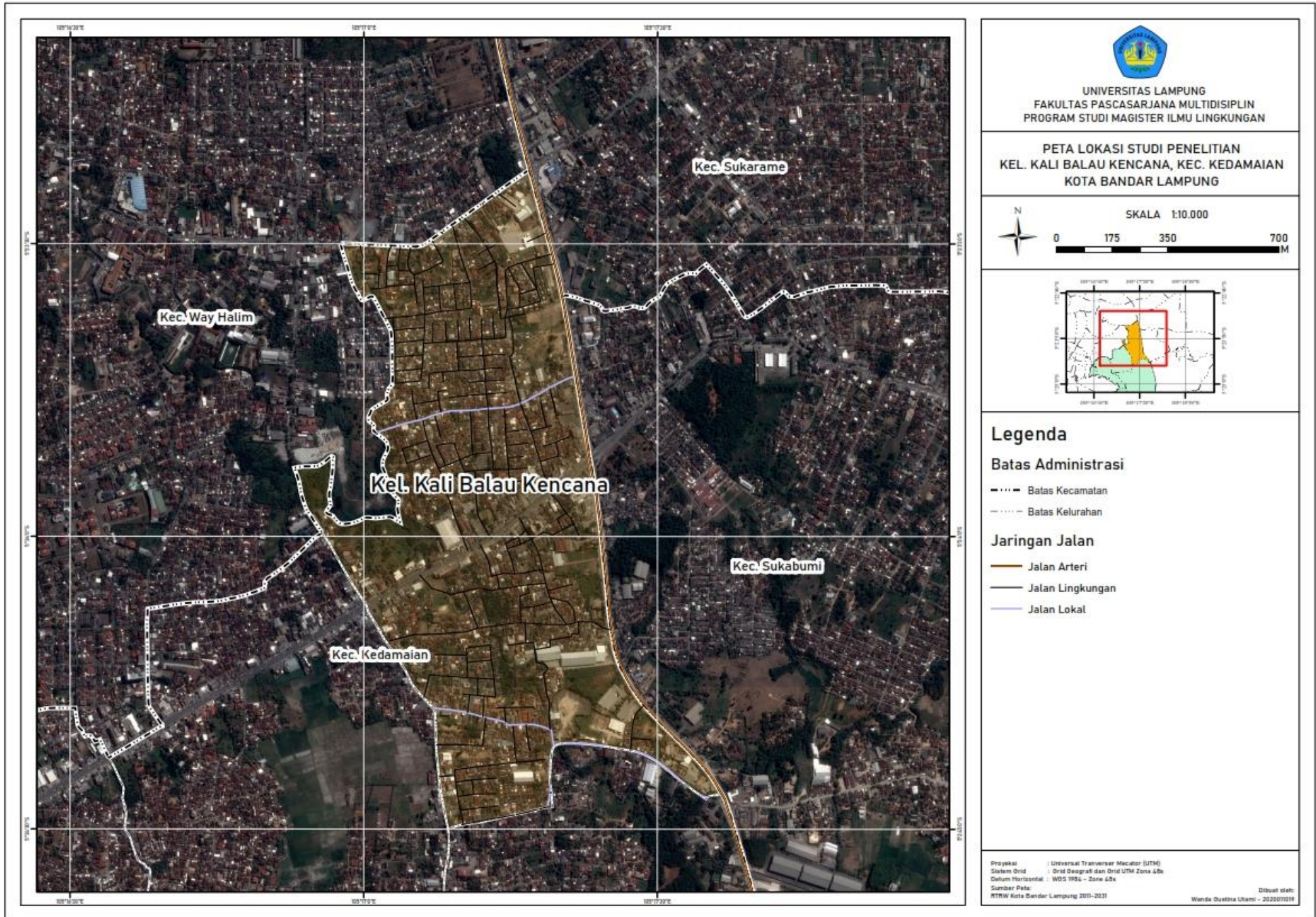
Kondisi operasi penelitian adalah sebagai berikut:

Volume reaktor	: 25 liter
Volume kerja	: 20 liter
Jenis reaktor	: <i>Continue Stirrer Tank Reactor</i> (CSTR)
Suhu operasi	: 25-30°C
Tekanan operasi	: 1 atm
pH	: 6,00 – 7,50
Jenis substrat	: <i>slurry</i> (campuran limbah organik rumah tangga dan air)
HRT	: 20 hari

3.4. Prosedur Penelitian

3.4.1. Tahap Pengumpulan Bahan Baku

Pada penelitian ini menggunakan sampah organik rumah tangga sebagai substrat bahan baku dan *sludge* lumpur aktif dari kolam anaerobik sebagai inokulum. Sampah organik rumah tangga diperoleh dari rumah tangga dikumpulkan setiap hari dari Kelurahan Kali Balau Kencana, Kecamatan Kedamaian, Kota Bandar Lampung yang disajikan pada Gambar 10. Sedangkan *sludge* lumpur aktif diperoleh dari CV. Tapioka Bangun Makmur, Dusun Sriwaluyo II, Desa Buyut Iilir, Kecamatan Gunung Sugih, Lampung Tengah.



Gambar 10. Peta Lokasi Pengumpulan Sampah Organik Rumah Tangga.

Pengambilan dan pengukuran timbulan sampah organik rumah tangga mengacu pada SNI 19-3964-1994 untuk menentukan laju timbulan dan komposisi sampah organik rumah tangga. Sampel diambil setiap hari selama 10 hari pada 10 rumah tangga. Jumlah sampah organik rumah tangga yang dibuang oleh satu orang penduduk didapatkan dari data hasil sampling berupa perhitungan laju timbulan rata-rata. Kemudian prediksi jumlah timbulan sampah organik rumah tangga Kota Bandar Lampung dapat dihitung dengan persamaan berikut (Iryani dkk., 2019).

Jumlah sampah organik

$$= \text{Populasi} \times \text{laju timbulan sampah organik rumah tangga}$$

Kemudian sampel sampah organik rumah tangga di karakterisasi kadar TS untuk menjadi basis perhitungan perbandingan limbah organik dan air dalam pembuatan *slurry* bahan baku biogas. Sampah organik rumah tangga juga disortir menurut jenisnya yaitu sisa sayuran, sisa buah dan sisa makanan. Masing-masing kategori sampah tersebut kemudian ditimbang beratnya dan dihitung persentasenya berdasarkan persamaan berikut (Iryani dkk., 2019):

$$W_i(\%) = \frac{\text{Berat jenis } i}{\text{Berat total}} \times 100\%$$

3.4.2. Tahap Pembuatan *Slurry* Bahan Baku

Bahan baku utama berupa sampah organik rumah tangga yang telah disortir kemudian dihancurkan menggunakan *crusher* hingga ukurannya <4 x 4 mm (Oh *et al.*, 2018) dan dibantu dengan penambahan air dengan perbandingan tertentu. Jika *total solids* sampah organik rumah tangga diketahui sebesar 6,7%, maka perbandingan jumlah antara sampah organik rumah tangga dan air dapat diuraikan dengan persamaan berikut:

Sampah organik rumah tangga = X kg

Air = Y kg

TS_{sampah organik rumah tangga} = 6,7%

TS_{air} = 0%

Volume kerja digester = 80% x volume total = 80% x 25 L = 20 L = 20 kg

Maka, $Slurry = X + Y$

20 kg = X + Y

Sedangkan,

$$TS\ Total = \frac{(TS_{sampah} \times X) + (TS_{air} \times Y)}{X + Y}$$

$$TS\ Total = \frac{(6,7\% \times X) + (0 \times Y)}{20\ kg}$$

$$TS\ Total = \frac{(6,7\% \times X)}{20\ kg}$$

Dengan menggunakan persamaan di atas, jika akan dibuat *slurry* dengan kadar TS sebesar 1%, maka:

$$TS\ Total = \frac{(6,7\% \times X)}{20\ kg}$$

$$1\% = \frac{(6,7\% \times X)}{20\ kg}$$

$$X = \frac{(1\% \times 20\ kg)}{6,7\%}$$

$$X = 2,99\ kg$$

Maka dapat dihitung kebutuhan air sebagai berikut:

$$X + Y = 20\ kg$$

$$Y = 20\ kg - X$$

$$Y = 20\ kg - 2,99$$

$$Y = 17,01\ kg$$

Dengan cara perhitungan yang sama, jika akan dibuat *slurry* dengan kadar TS sebesar 1,5%, 2% dan 2,5% yang disajikan pada Tabel 5 berikut

Tabel 5. Jumlah Sampah organik rumah tangga dan air yang ditambahkan ke digester dalam satu HRT

Kode Digester	Kadar TS (%)	Sampah (kg)	Air (kg)
V1	1,0	2,99	17,01
V2	1,5	4,48	15,52
V3	2,0	5,97	14,02
V4	2,5	7,46	12,54

Karakterisasi *slurry* bahan baku bertujuan untuk mengetahui sifat dan karakter bahan baku sehingga dapat menjadi pembanding hasil penelitian. Bahan yang dikarakterisasi adalah *sludge* inokulum dan *slurry* sampah organik rumah tangga sebagai bahan baku produksi biogas. Variabel yang dianalisa antara lain pH, suhu, *Total Solid* (TS), *Total Suspended Solid* (TSS), *Volatile Solid* (VS), *Chemical Oxygen Demand* (COD).

Metode pengujian masing-masing variabel diuraikan sebagai berikut:

1. Pengujian pH

Pengujian pH dilakukan dengan menggunakan metode (APHA, 2017) Part 4500 – H⁺ B. Elektroda pada pH meter dibilas dengan air suling sebanyak tiga kali dan keringkan dengan tisu. Rendam elektroda ke dalam sampel selama ± 1 menit kemudian keringkan dengan tisu. Ganti sampel dan rendam elektroda ke dalam sampel baru tersebut sampai pH meter menunjukkan pembacaan yang tetap dan kemudian mencatat hasil pembacaan pH.

2. Pengujian Suhu

Pengujian suhu dilakukan dengan menggunakan metode (APHA, 2017) Part 2550 B. Termometer dicelupkan ke dalam sampel sampai termometer menunjukkan nilai yang stabil dan kemudian mencatat hasil pembacaan suhu.

3. Pengujian *Total Solid* (TS)

Pengujian TS dilakukan dengan menggunakan metode (APHA, 2017) Part 2540 B. Keringkan cawan porselen di dalam oven pada suhu 103 – 105°C selama 1 jam. Dinginkan dalam desikator dan timbang. Catat bobot sebagai bobot awal cawan. Kemudian ambil sejumlah sampel ke dalam cawan dan timbang. Catat bobot sebagai bobot cawan+sampel. Panaskan cawan yang berisi sampel di dalam oven pada suhu 103 – 105°C selama 1 jam. Ulangi pemanasan hingga perubahan bobot <0,5 mg. Setelah itu, dinginkan kembali dalam desikator dan timbang. Catat bobot sebagai bobot akhir TS.

Rumus perhitungan TS:

$$\%TS = \frac{W_{akhir\ TS} - W_{cawan}}{W_{sampel+cawan} - W_{cawan}} \times 100\%$$

(APHA, 2017)

4. Pengujian *Volatile Solid* (VS)

Pengujian VS dilakukan dengan menggunakan metode (APHA, 2017) Part 2540 E. Masukkan cawan yang berisi residu hasil pengujian TS ke dalam furnace pada suhu 550 ± 50°C selama 15 menit. Dinginkan dalam desikator dan timbang. Catat bobot sebagai bobot akhir. Ulangi pemanasan hingga perubahan bobot <0,5 mg.

Rumus perhitungan VS:

$$\%VS = \frac{W_{akhir\ TS} - W_{akhir\ VS}}{W_{akhir\ TS}} \times 100\%$$

(APHA, 2017)

5. Pengujian *Chemical Oxygen Demand* (COD)

Pengujian COD dilakukan dengan menggunakan metode (APHA, 2017) Part 5220 D. Ambil sampel sebanyak 2,5 ml kemudian tambahkan 1,5 ml *digestion solution* dan 3,5 ml reagen asam sulfat. Refluks campuran sampel dan reagen tersebut pada suhu 150°C selama 2 jam. Dinginkan sampai suhu ruang dan uji menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 420 nm.

Reagen yang diperlukan untuk pengujian COD terdiri dari:

- *Digestion solution* : larutkan 10,216 gram $K_2Cr_2O_7$ yang telah dikeringkan pada suhu 150°C selama 2 jam ke dalam 500 ml air suling. Kemudian tambahkan 167 ml H_2SO_4 pekat dan 33,3 gram $HgSO_4$. Setelah itu encerkan sampai 1000 ml.
- Reagen asam sulfat : larutkan Ag_2SO_4 ke dalam H_2SO_4 pekat dengan perbandingan 5,5 gram Ag_2SO_4 untuk 1 kg H_2SO_4 . Atau setara dengan 10,12 gram Ag_2SO_4 untuk 1000 ml H_2SO_4 pekat. Diamkan selama 1 – 2 jam agar larut sempurna, kemudian homogenkan.

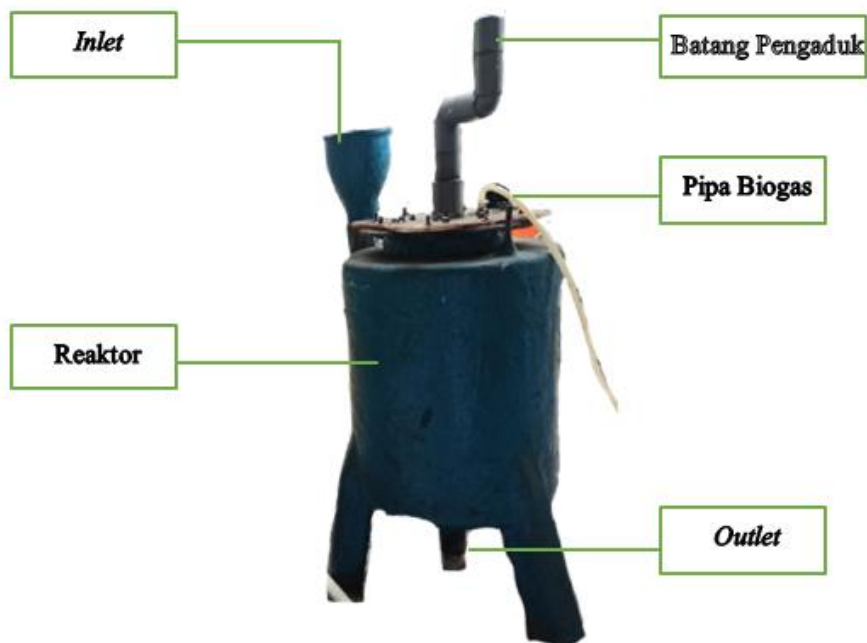
Rumus perhitungan COD:

$$COD (mg L^{-1}) = [COD]_{hasil\ pembacaan\ spektro} \times 10$$

(APHA, 2017)

3.4.3. Tahap Aklimatisasi Mikroba

Digester yang digunakan pada penelitian ini terbuat dari bahan fiberglass, dimana bahan ini memiliki kekuatan yang baik, tahan lama, tidak berkarat dan ringan. Digester yang digunakan memiliki volume sebesar 25 liter. Menurut (Iriani dkk., 2017), volume yang efektif untuk proses fermentasi adalah 80% dari kapasitas maksimum sehingga volume kerja yang digunakan adalah 20 liter. Proses aklimatisasi mikroba dilakukan dengan memasukkan inokulum sebanyak 50% dari volume kerja digester yaitu sebanyak 10 liter *sludge*. Pada proses ini menggunakan substrat *slurry* sampah organik rumah tangga sebagai nutrisi untuk pertumbuhan mikroba. Setiap hari dimasukkan *slurry* sebanyak 1 liter dengan konsentrasi TS sebesar 1%. Proses aklimatisasi mikroba dilakukan sampai pH outlet dan produksi biogas yang dihasilkan stabil. Komponen digester disajikan pada Gambar 11 sebagai berikut



Gambar 11. Komponen Digester.

3.4.4. Tahap *Anaerobic Digestion*

Produksi biogas ini menggunakan variasi *organic loading rate* yaitu dengan kadar TS sebesar 1%, 1,5%, 2% dan 2,5%. Proses *anaerobic digestion* pada penelitian ini dilakukan secara *continous feeding*. *Countinuous feeding* merupakan proses *anaerobic digestion* yang pengisian bahan organiknya dilakukan setiap hari dalam jumlah tertentu. Mulanya *sludge* residu dari dalam reaktor dikeluarkan secara manual melalui saluran *outlet* sebanyak 1 liter, kemudian bioreaktor diisi kembali dengan *slurry* bahan baku sebanyak 1 liter melalui saluran *inlet*. Setelah itu dilakukan pengadukan hingga *inokulum* dan substrat homogen. Variabel yang diamati saat proses *anaerobic digestion* antara lain:

1. Setiap hari : volume biogas, pH dan suhu *sludge* outlet digester
2. 3 kali seminggu : TS, TSS, VS, COD inlet dan outlet digester serta komposisi biogas

Pengukuran volume biogas dilakukan sejak hari pertama bahan baku dimasukkan ke dalam digester. Penelitian ini menggunakan galon yang telah dimodifikasi sebagai alat ukur volume biogas. Produksi gas harian diukur dengan cara membuka kran tempat keluaran biogas, kemudian dialirkan menggunakan selang yang tersambung dengan galon yang berisi air. Gas yang keluar dari reaktor akan mendorong air sehingga volume air akan turun. Selisih penurunan volume air merupakan volume biogas. Volume gas harian yang dihasilkan adalah hasil pengurangan angka yang terbaca hari ini dikurangi dengan angka yang terbaca pada hari sebelumnya. Sedangkan untuk pengujian komposisi biogas dilakukan dengan cara menampung gas ke dalam *gas bag sampler* kemudian diuji di laboratorium menggunakan *Gas Chromatography* tipe Shimadzu Shincarbon ST 50-80 D- 375. Alat ini menggunakan kolom jenis shincarbon dengan panjang 1- 4 meter dan detektor TCD (*Thermal Conductivity Detector*) pada temperatur 200°C dan arus 80 mA. Sampel gas sebanyak 0,2 ml menggunakan *srynge* lalu

disuntikan pada *injection port*, kemudian didapatkan data berbentuk kromatogram dan komposisi biogas. Instalasi produksi biogas disajikan pada Gambar 12 berikut



Gambar 12. Instalasi Produksi Biogas yang Digunakan.

Sludge keluaran digester dianalisa pH, suhu, *Total Solid* (TS), *Total Solid* (TS), *Volatile Solid* (VS) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD), dilakukan seperti pada tahap pembuatan *slurry* bahan baku. Karakterisasi *sludge* bertujuan untuk membandingkan sifat dan karakter antara bahan baku dan keluaran digester. Karakterisasi ini dilakukan sesuai jadwal pada Tabel 6.

Tabel 6. Jadwal Pelaksanaan Penelitian dalam Satu HRT

Para meter	Hari ke-																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
pH	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Suhu	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
TS	√	√			√		√		√		√		√		√		√		√	
TSS	√	√			√		√		√		√		√		√		√		√	
VS	√	√			√		√		√		√		√		√		√		√	
COD	√	√			√		√		√		√		√		√		√		√	
Kom*						√						√						√		
Vol**	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

Keterangan:

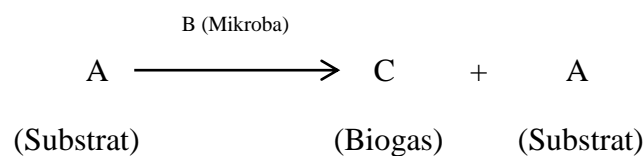
*komposisi biogas, **volume biogas

3.4.5. Tahap Perhitungan Kinetika Reaksi Produksi Biogas

Perhitungan kinetika reaksi dilakukan dengan melakukan *plotting* data menggunakan persamaan kinetika *First Order* dan Michaelis-Menten. Setelah data hasil analisa biogas di plotkan pada persamaan kinetika, maka akan diketahui korelasi dari kurva yang terbentuk. Persamaan kinetika yang paling baik adalah yang memiliki nilai korelasi (R^2) mendekati 1. Setelah itu, konstanta kinetika yang telah dipilih diplotkan ke persamaan neraca massa substrat sehingga dapat digunakan sebagai basis data dalam melakukan *scale up* digester.

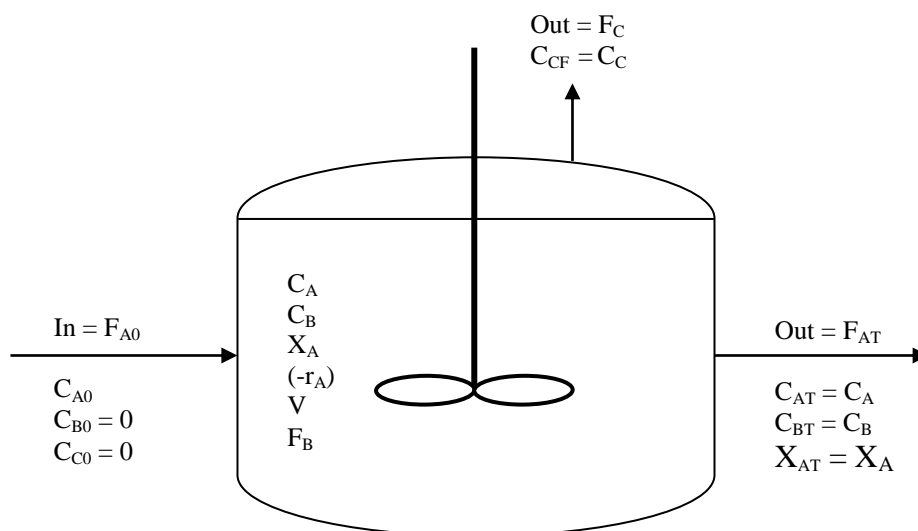
3.4.5.1. Neraca Massa Reaktor

Reaktor yang digunakan pada produksi biogas di penelitian ini adalah digester tipe *Continue Stirrer Tank Reaktor*. Reaksi yang terjadi:



(Coker, 2001)

Maka, keadaan di dalam digester dapat diilustrasikan seperti Gambar 13 berikut:



Gambar 13. Reaktor *Continue Stirred Tank Reactor*.

Persamaan neraca massa total pada reaktor:

(Rate of total mass input) - (Rate of total mass output) - (Rate of total mass reaction) = (Rate of total mass accumulation)

(Coker, 2001)

$$(F_{A0}) + (F_C + F_{AT}) + (F_B) = 0$$

Persamaan neraca massa komponen A pada reaktor :

(Rate of mass A input) - (Rate of mass A output) - (Rate of mass A reaction) = (Rate of mass A accumulation)

$$F_{A0} - F_{AT} - ((-r_A) \times V) = 0$$

Jika $F_A = F_{A0}(1 - X_A)$, maka:

$$F_{A0} - (F_{A0}(1 - X_A)) - ((-r_A) \times V) = 0$$

$$F_{A0} - (F_{A0} - (F_{A0} \times X_A)) - ((-r_A) \times V) = 0$$

$$F_{A0} - F_{A0} + (F_{A0} \times X_A) - ((-r_A) \times V) = 0$$

$$(F_{A0} \times X_A) - ((-r_A) \times V) = 0$$

$$F_{A0} \times X_A = (-r_A) \times V$$

Jika $X_A = \frac{C_{A0} - C_{AT}}{C_{A0}}$, maka:

$$F_{A0} \times \left(\frac{C_{A0} - C_{AT}}{C_{A0}} \right) = (-r_A) \times V$$

$$V = \frac{F_{A0} \times \left(\frac{C_{A0} - C_{AT}}{C_{A0}} \right)}{(-r_A)}$$

Keterangan:

F_{A0}	= massa substrat mula-mula
F_{AF}	= massa substrat akhir
F_B	= massa mikroba
F_C	= massa biogas
C_{A0}	= konsentrasi substrat mula-mula
C_{B0}	= konsentrasi mikroba mula-mula
C_{C0}	= konsentrasi biogas mula-mula
C_A	= konsentrasi substrat di dalam reaktor
C_B	= konsentrasi mikroba di dalam reaktor
C_C	= konsentrasi biogas di dalam reaktor
C_{AT}	= konsentrasi substrat akhir
C_{BT}	= konsentrasi mikroba akhir
C_{CF}	= konsentrasi biogas akhir
$(-r_A)$	= Laju pengurangan substrat
X_A	= konversi di dalam reaktor
X_{AT}	= konversi akhir
V	= volume reaktor

Untuk memperoleh volume reaktor yang dibutuhkan, maka diperlukan data perhitungan $(-r_A)$ menggunakan persamaan kinetika.

Kecepatan produksi biogas dapat disimulasikan menggunakan persamaan linier (Budiarti dkk., 2018). Pada persamaan linier, kecepatan pembuatan biogas akan meningkat secara linier selama waktu *digestion*. Kemudian mencapai puncak tertentu lalu turun secara linier sampai nol. Persamaan linier ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$y = ax + b$$

(Budiarti dkk., 2018)

dimana:

y = kecepatan produksi biogas

a = slope

x = waktu produksi biogas

b = intercept

3.4.5.2. Model Kinetika First Order

Untuk memudahkan dalam *plotting*, maka model kinetika first order dapat diturunkan menjadi persamaan berikut:

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A$$

$$\int_0^t -\frac{dC_A}{C_A} = \int_0^t k dt$$

$$-\ln \left[\frac{C_{At}}{C_{A0}} \right] = kt$$

Dimana:

C_{A0} = Konsentrasi awal mikroba

C_{AT} = Konsentrasi akhir mikroba

3.4.5.3. Model Kinetika Michaelis-Menten

Untuk memudahkan dalam *plotting*, maka model kinetika Michaelis-Menten dapat diturunkan menjadi persamaan berikut:

$$-\frac{dC_A}{dt} = \frac{V_{max} \times C_A}{k_m + C_A}$$

$$(k_m + C_A) \times \frac{dC_A}{C_A} = \int_0^t -V_{max} dt$$

$$-k_m \frac{dC_A}{C_A} - C_A \frac{dC_A}{C_A} = \int_0^t V_{max} dt$$

$$\int_0^t -k_m \frac{dC_A}{C_A} - \int_0^t dC_A = \int_0^t V_{max} dt$$

$$-k_m \ln \frac{C_{At}}{C_{A0}} - (C_{At} - C_{A0}) = V_{max} t$$

Di kali $\frac{1}{k_m t}$

$$-\frac{k_m}{k_m t} \ln \frac{C_{At}}{C_{A0}} - \left(\frac{C_{At} - C_{A0}}{k_m t} \right) = \frac{V_{max} t}{k_m t}$$

$$-\frac{1}{t} \ln \frac{C_{At}}{C_{A0}} - \frac{1}{k_m} \left(\frac{C_{At} - C_{A0}}{t} \right) = \frac{V_{max}}{k_m}$$

$$-\frac{1}{t} \ln \frac{C_{At}}{C_{A0}} = \frac{1}{k_m} \left(\frac{C_{At} - C_{A0}}{t} \right) + \frac{V_{max}}{k_m}$$

$$\frac{1}{t} \ln \frac{C_{A0}}{C_{At}} = -\frac{1}{k_m} \left(\frac{C_{A0} - C_{At}}{t} \right) + \frac{V_{max}}{k_m}$$

Dimana:

C_{A0} = Konsentrasi awal substrat

C_{AT} = Konsentrasi akhir substrat

3.4.6. Tahap Analisis Dampak Bagi Lingkungan

3.4.6.1. Perhitungan Pengurangan Sampah

Perhitungan pengurangan sampah dilakukan pada cakupan wilayah Kota Bandar Lampung. Konsep perhitungan ini dilakukan dengan cara mengurangi total timbulan sampah di Kota Bandar Lampung dengan total timbulan sampah organik rumah tangga yang datanya telah didapatkan pada tahap sebelumnya, dengan asumsi bahwa seluruh sampah organik rumah tangga telah dikelola. Sedangkan jumlah timbulan sampah di Kota Bandar Lampung diperoleh dengan cara *forecasting* menggunakan persamaan sebagai berikut:

Timbulan Sampah Total Di Bandar Lampung

$$= \text{Timbulan Sampah Per Orang} \times \text{Populasi di Bandar Lampung}$$

Timbulan Sampah Organik Rumah Tangga Total di Bandar Lampung

$$= \text{Timbulan Sampah Organik Per Orang} \times \text{Populasi di Bandar Lampung}$$

Setelah diketahui jumlah timbulan sampah total dan sampah organik rumah tangga, maka dapat dihitung pengurangan sampah yang masuk TPA menggunakan persamaan berikut:

Timbulan Sampah Masuk TPA

$$= \text{Timbulan Sampah Total} - \text{Timbulan Sampah Organik Rumah Tangga}$$

Dengan asumsi:

1. Timbulan sampah total merupakan jumlah sampah yang masuk ke TPA
2. Semua sampah organik rumah tangga dikelola menjadi biogas.

3.4.6.2. Perhitungan Bangkitan Energi

Perhitungan bangkitan energi dilakukan pada cakupan wilayah Kota Bandar Lampung. Konsep perhitungan ini dilakukan dengan cara membandingkan nilai kalor biogas dengan nilai kalor gas LPG yang pada umumnya digunakan masyarakat untuk memasak. Bangkitan energi diperoleh dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Bangkitan Energi} = \text{Laju Produksi Biogas} \times \text{Nilai Kalor Biogas}$$

(Suyitno dkk., 2010)

3.4.6.3. Perhitungan Potensi Penurunan Gas Rumah Kaca

Perhitungan potensi penurunan emisi GRK pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode Tier-1 dan Tier-3. Metode Tier-1 dilakukan berdasarkan pada data aktivitas dan faktor emisi yang sudah ada di *default* IPCC 2006. Perhitungan Tier-1 dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Emisi } CH_4 \text{ di TPA} = \text{DDOCmdecomp}_T \times F \times \frac{16}{12}$$

(KLH, 2012)

Keterangan:

Emisi CH ₄	= CH ₄ total pada saat inventori (g CH ₄)
DDOCmdecomp T	= DOC yang terdekomposisi (15% sampah organik)
F	= Fraksi CH ₄
16/12	= rasio berat molekul CH ₄ /C

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

$$\text{Jumlah } CH_4 \text{ yang direcovery} = \text{Laju produksi biogas} \times \text{fraksi } CH_4$$

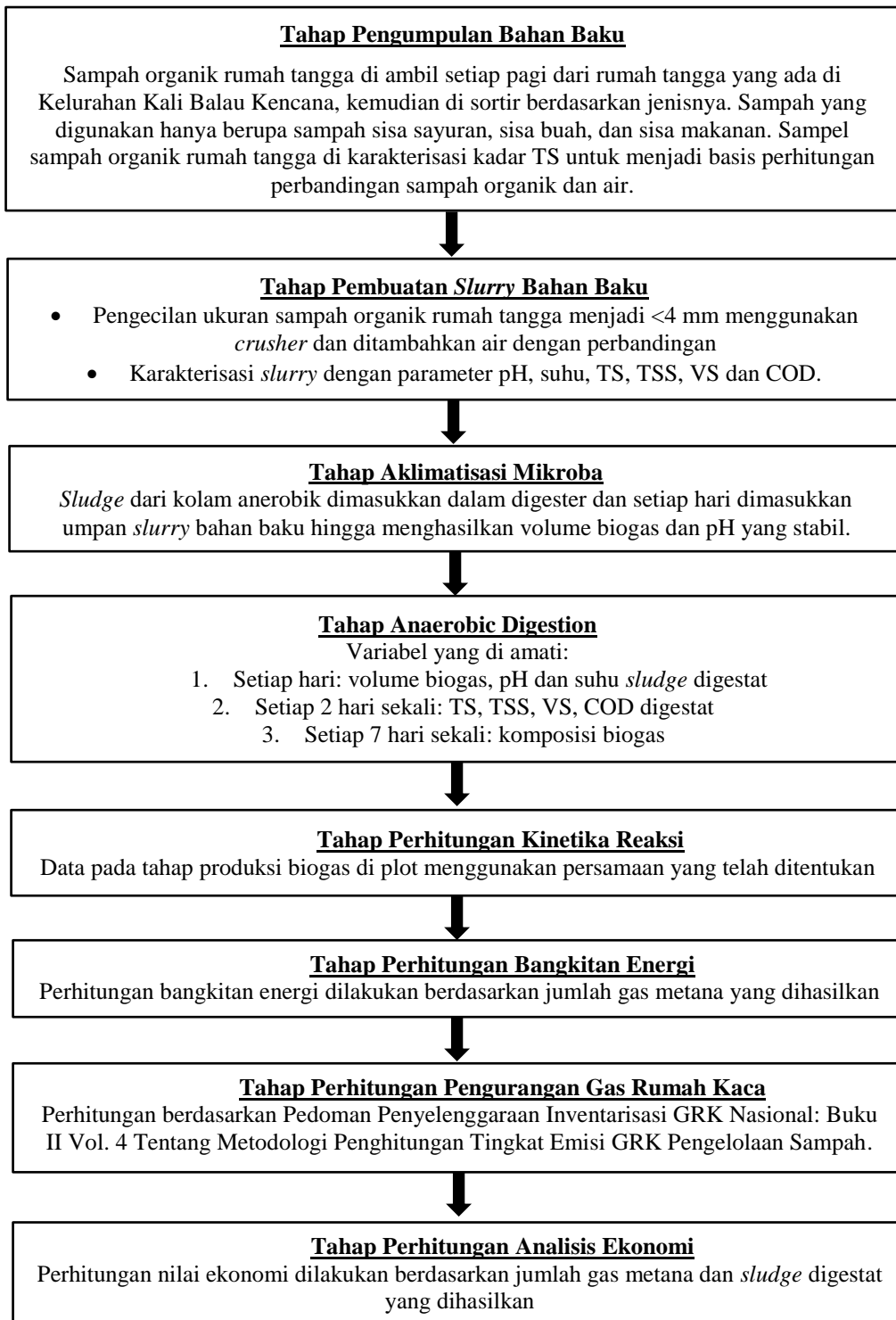
(KLH, 2012)

3.4.6.4. Perhitungan Nilai Ekonomi

Perhitungan nilai ekonomi pemanfaatan sampah organik rumah tangga mengacu pada kondisi suatu rumah tangga yang menghasilkan sampah organik setiap hari, namun hanya berakhir pada tempat pembuangan sampah dan tidak terdapat pengolahan menjadi bahan yang lebih bernilai. Pemanfaatan sampah organik rumah tangga menjadi bahan bakar dapat menggantikan penggunaan LPG. Selain itu, digestat hasil samping dari pembuatan biogas dapat dimanfaatkan sebagai pupuk cair sehingga dapat meningkatkan ekonomi rumah tangga. Maka dari itu, perhitungan nilai ekonomi pada penelitian ini hanya akan berfokus pada penerimaan manfaat berupa gas dan pupuk cair dengan persamaan sebagai berikut

Nilai Ekonomi

$$= [(\text{Jumlah gas } CH_4 \times \text{harga gas}) + (\text{jumlah pupuk cair} \times \text{harga pupuk cair})]$$



Gambar 14. Diagram Alir Penelitian.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data percobaan maka dapat disimpulkan:

1. Mekanisme reaksi *anaerobic digestion* pada produksi biogas dari sampah organik rumah tangga terdiri dari 4 tahap yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis dan metanogenesis. Tahap hidrolisis dipengaruhi oleh konsentrasi TS *slurry* bahan baku. Semakin tinggi konsentrasi TS pada bahan baku akan meningkatkan jumlah biogas yang dihasilkan. Namun jumlah biogas mengalami penurunan saat konsentrasi TS bahan baku sebesar 2% dan 2,5%. Hal ini disebabkan karena peningkatan laju pembebanan bahan organik menimbulkan ketidakseimbangan buffer di dalam digester.
2. Model kinetika yang paling cocok untuk menggambarkan kondisi reaksi tahap hidrolisis pada produksi biogas dari sampah organik rumah tangga ditunjukkan oleh Model Kinetika *First Order* terhadap penguraian TS dengan konsentrasi TS bahan baku sebesar 1,5%. Nilai R^2 yang diperoleh sebesar 0,9962, nilai k sebesar 0,0633 dan laju reaksi rata-rata sebesar 1.091,78 mg hari⁻¹.
3. Pengolahan sampah organik rumah tangga menjadi biogas akan mengurangi beban TPA sebesar 24,80%, membangkitkan energi sebesar 57,22 TJ tahun⁻¹, menurunkan emisi gas rumah kaca sebesar 19,43% dan meningkatkan pendapatan masyarakat sebesar 2,77 juta rupiah per orang per tahun.

5.2. Saran

Berdasarkan pengamatan pada hasil penelitian dan analisis data percobaan maka dapat disarankan:

1. Perlunya mempertimbangkan keseragaman komposisi dan mengevaluasi peranan masing-masing komponen pada sampah organik rumah tangga sehingga tahap hidrolisis dapat berlangsung dengan baik.
2. Perlunya dikaji lebih lanjut penggunaan model kinetika lainnya selain model kinetika *First Order* dan Michaelis-Menten untuk memperoleh model kinetika yang mendekati kebenaran.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- Aberilla, J.M., Gallego-Schmid, A., and Azapagic, A. 2019. Environmental Sustainability of Small-Scale Biomass Power Technologies for Agricultural Communities in Developing Countries. *Renewable Energy* 141: 493-506.
- Abimbola, O., and Olumide, O. 2014. Evaluation of Biogas Production from Food Waste. *The International Journal of Engineering and Science* 3(1): 01-07.
- Ahamed, J., Riyan, M., Hossain, M., Rahman, M., and Salam, B. 2016. Production of Biogas From Anaerobic Digestion of Poultry Droppings and Domestic Waste Using Catalytic Effect of Silica Gel. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 13(2): 3503-3517.
- Aktar, M.A., Alam, M.M., and Al-Amin, A.Q. 2021. Global Economic Crisis, Energy Use, CO₂ Emissions and Policy Roadmap Amid COVID-19. *Sustainable Production and Consumption* 26: 770-781.
- Amelia, J.R., Hasanudin, U., dan Suroso, E. 2019. Potensi Biogas dari Proses Rekayasa Aklimatisasi Bioreaktor Akibat Perubahan Substrat Pada Industri Bioethanol. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung* 8(3): 224-233.
- Andreev, O., Lomakina, O., and Aleksandrova, A. 2021. Diversification of Structural and Crisis Risks in the Energy Sector of the ASEAN Member Countries. *Energy Strategy Reviews* 35: 1-8.
- APHA, AWWA and WEF. 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd Edition*. American Public Health Association, Washington DC. 1545 p.
- Awasthi, M.K., Sarsaiya, S., Wainaina, S., Rajendran, K., Awasthi, S.K., and Liu, T. 2021. Techno-Economics and Life-Cycle Assessment of Biological and Thermochemical Treatment of Bio-Waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 144: 1-23
- Azargoshasb, H., Mousavi, S., Amani, T., Jafari, A., and Nosrati, M. 2015. Three-Phase CFD Simulation Coupled With Population Balance Equations of

Anaerobic Syntrophic Acidogenesis and Methanogenesis Reactions in a Continuous Stirred Bioreactor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 27: 207-217.

- Babu, R., Veramendi, P.M., and Rene, E.R. 2021. Strategies for Resource Recovery From the Organic Fraction of Municipal Solid Waste. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 3: 1-8.
- Bedoic, R., Spehar, A., Puljko, J., Cucek, L., Cosic, B., and Puksec, T. 2020. Opportunities and Challenges: Experimental and Kinetics of Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Rendering Industry Streams for Biogas Production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 130: 1-14.
- Behrooznia, L., Sharifi, M., and Hosseinzadeh-Bandbafha, H. 2020. Comparative Life Cycle Environmental Impacts of Two Scenarios For Managing an Organic Fraction of Municipal Solid Waste in Rasht-Iran. *Journal of Cleaner Production*, 268: 1-16.
- Blasius, J.P., Contreta, R.C., Maintinguer, S.I., & de Castro, M.C. 2020. Effects of Temperature, Proportion and Organic Loading Rate on the Performance of Anaerobic Digestion of Food Waste. *Biotechnology Reports* 27: 1-9.
- BPS. 2016. *Neraca Energi Indonesia 2011-2015*. BPS-Statistics Indonesia, Jakarta. 91 hlm.
- BPS. 2018. *Statistik Lingkungan Hidup Indonesia: Pengelolaan sampah di Indonesia*. Badan Pusat Statistik, Jakarta. 250 hlm.
- BPS. 2021. Jumlah Penduduk (Jiwa), 2019-2021. Badan Pusat Statistik Provinsi Lampung. <https://lampung.bps.go.id/indicator/12/45/1/jumlah-penduduk.html>. Diakses pada 03 Desember 2021.
- BPS. 2021. *Neraca Energi Indonesia 2016-2020*. BPS-Statistics Indonesia, Jakarta. 82 hlm.
- Budiarti, G.I., Shitophyta, L.M., Fajariyanto, D., dan Nugroho, Y. E. 2018. Perbandingan Model Kinetika Pembuatan Biogas Dari Jerami Jagung Dengan Co-Digestion Limbah Makanan. *Conference on Innovation and Application of Science and Technology* 1(1): 352-357.
- Chaerul, M., Febrianto, A., dan Tomo, H. S. 2020. Peningkatan Kualitas Penghitungan Emisi Gas Rumah Kaca dari Sektor Pengelolaan Sampah dengan Metode IPCC 2006 (Studi Kasus: Kota Cilacap). *Jurnal Ilmu Lingkungan* 18(1): 153-161.

- Chen, J., Yun, S., Shi, J., Wang, Z., Abbas, Y., and Wang, K., 2020. Role of Biomass-Derived Carbon-Based Composite Accelerants in Enhanced Anaerobic Digestion: Focusing on Biogas Yield, Fertilizer Utilization and Density Functional theory Calculations. *Bioresource Technology* 307: 1-11.
- Chin, W.W. 1998. The Partial Least Squares Approach to Structural Equation Modeling. *Modern Methods for Business Research* 295(2): 295-336.
- De Clercq, D., Wen, Z., Fan, F., and Caicedo, L. 2016. Biomethane Production Potential from Restauran Food Waste in Megacities and Project Level-Bottlenecks: A Case Study in Beijing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59: 1676-1685.
- Coker, A.K. 2001. *Modelling of Chemical Kinetics and Reactor Design*. Gulf Professional Publishing, Texas. 1126 p.
- Eriksson, O., Bisailon, M., Haraldsson, M., and Sundberg, J. 2016. Enhancement of Biogas Production From Food Waste and Sewage Sludge - Environmental and Economic Life Cycle Performance. *Journal of Environmental Management* 175: 33-39.
- Garritano, A.N., Faber, M.d., and Sa, L.R. 2018. Palm Oil Mill Effluent (POME) as Raw Material for Biohydrogen and Methane Production Via Dark Fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 92: 676-684.
- Hamzah, M.A.A., Alias, A.B., Him, N.R.N., Rashid, Z.A., and Ghani, W.A.W.A.K 2019. Characterization of Food Waste and Empty Fruit Bunches (EFB). *Journal of Physics* 1349(1): 1-12.
- Hartono, D., Yusuf, A.A., Hastuti, S.H., Saputri, N.K., & Syaifudin, N. 2021. Effect of COVID-19 on Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions in Indonesia. *Sustainable Production and Consumption*, 28: 391-404.
- Hasanudin, U. 1993. *Pengolahan Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit Dengan Bioreaktor Unggun Fluidisasi Anaerobik Dua Tahap*. (Tesis). Institut Teknologi Bandung, Bandung. 197 hlm.
- Hossain, H.Z., Hossain, Q.H., Monir, M.M.U., and Ahmed, M.T. 2014. Municipal Solid Waste (MSW) as a Source of Renewable Energy in Bangladesh: Revisited. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39: 35-41.
- Hultman, S., and Alshwan, Z. 2019. *Production of Volatile Fatty Acids From Anaerobic Digestion Using Food Waste, Sludge and Cow Manure*. Hogskolan I Boras. 54 p.

- Iriani, P., Suprianti, Y., and Yulistiani, F. 2017. Fermentasi Anaerobik Biogas Dua Tahap Dengan Aklimatisasi dan Pengkondisian pH Fermentasi. *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan* 1(1): 1-10.
- Iryani, D.A., Ikrom, M., Despa, D., dan Hasanudin, U. 2019. Karakterisasi Sampah Padat Kota dan Estimasi Emisi Gas Rumah Kaca di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Bakung Kota Bandar Lampung. *Journal of Natural Resources and Environmental Management* 9: 218-228.
- Kader, F., Baky, A.H., Khan, M.N.H., and Chowdhury, H.A. 2015. Production of Biogas by Anaerobic Digestion of Food Waste and Process Simulation. *American Journal of Mechanical Engineering* 3(3): 79-83.
- Kangle, K.M., Kore, S.V., Kore, V.S., and Kulkarni, G.S. 2012. Recent Trends in Anaerobic Codigestion: A Review. *Universal Journal of Environmental Research and Technology* 2(4): 210-219.
- KLH. 2012. *Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional Buku II Volume 4 Metodologi Penghitungan Tingkat Emisi Gas Rumah Kaca Pengelolaan Limbah*. Kementerian Lingkungan Hidup, Jakarta. 165 hlm.
- KLHK. 2019. *Peta Jalan Implementasi Nationally Determined Contribution Mitigasi*. KLHK, Jakarta. 310 hlm.
- Koszel, M., and Lorencowicz, E. 2015. Agricultural Use of Biogas Digestate as A Replacement Fertilizers. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 7: 119-124.
- KPPN/BAPPENAS. 2021. *Laporan Kajian Food Loss and Waste di Indonesia dalam Rangka Mendukung Penerapan Ekonomi Sirkular dan Pembangunan Rendah Karbon*. KPPN/BAPPENAS, Jakarta. 116 hlm.
- Metcalf, and Eddy. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse Fourth Edition*. McGraw-Hill, New York. 1846 p.
- Monnet, F. 2003. *An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes*. Remade, Scotland. 48 p.
- Muratcobanoglu, H., Gokcek, O.B., Mert, R.A., Zan, R., and Demirel, S. 2020. Simultaneous Synergistic Effects of Graphite Addition and Co-Digestion of Food Waste and Cow Manure: Biogas Production and Microbial Community. *Bioresource Technology* 309: 1-8.
- Nasiruddin, S.M., Li, Z., Mang, H.P., Uddin, S.M., Zhou, X., Cheng, S., and Wang, X. 2020. Assessment of Organic Loading Rate by Using A Water

- Tank Digester For Biogas Production in Bangladesh. *Journal of Cleaner Production* 265: 1-10.
- Oh, J.I., Lee, J., Lin, K.Y. A., Kwon, E.E., and Tsang, Y.F. 2018. Biogas Production From Food Waste Via Anaerobic Digestion With Wood Chips. *Energy and Environment* 29(8): 1-8.
- Ohimain, E.I., and Izah, S.C. 2017. A Review of Biogas Production From Palm Oil Mill Effluents Using Different Configurations of Bioreactors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70: 242-253.
- Oktina, T.D., Santoso, J., dan Kawaroe, M. 2015. Alga Hijau (*Ulva* sp.) Sebagai Bahan Baku Produksi Biogas. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis* 7: 191-204.
- Ometto, F., Karlsson, A., Ejlertsson, J., Bjorn, A.V., and Shakeri, S.Y. 2019. Anaerobic Digestion: An Engineered Biological Process. In: *Substitute Natural Gas from Waste*. Academic Press, pp. 63-74.
- Patil, P.D., Dehankar, S.P., Tathe, D.B., Hande, V.R., and Patil, N.S. 2019. Biogas Production From Kitchen Waste: A Review. *International Journal of Research and Analytical Reviews* 6(1): 865-867.
- Phelia, A., dan Damanhuri, E. 2019. Evaluation of Landfill and Cost Benefit Analysis Waste Management System Landfill (Case Study TPA Bakung City Bandar Lampung). *Jurnal Teknik Lingkungan* 25(2): 85-100.
- Pramanik, S.K., Suja, F.B., Porhemmat, M., and Pramanik, B.K. 2019. Performance and Kinetic Model of a Single-Stage Anaerobic Digestion System Operated at Different Successive Operating Stages for the Treatment of Food Waste. *Processes* 7(9): 1-16.
- Pratama, R. 2019. Efek Rumah Kaca Terhadap Bumi. *Buletin Utama Teknik* 14(2): 120-126.
- Rahmani, P., Hartono, D.M., dan Kusnoputranto, H. 2013. Kajian Kelayakan Pemanfaatan Biogas dari Pengolahan Air Limbah untuk Memasak. *Jurnal Ilmu Lingkungan* 11(2): 132-140.
- Rakasiwi, R.R., Ivontianti, W.D. dan Haryati, Y. 2019. Evaluasi Waktu Start Up Pada Proses Penguraian Sampah Organik Pasar Secara Anaerobic Menggunakan Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR). *Prosiding Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir* 3: 539-546

- Rambe, S.M. 2015. Penentuan Model Kinetika Reaksi Hidrolisis Pada Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit dengan Anaerobic Baffle Reactor. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri* 26(2): 77-85.
- Rasyid, H.A., Hasanudin, U., dan Rakhdaitmoko, R. 2015. Potensi Pemanfaatan Limbah Organik dari Pasar Tradisional di Bandar Lampung Sebagai Bahan Baku Pembuatan Kompos dan Biogas. *Inovasi Pembangunan: Jurnal Kelitbangan* 3(02): 191-202.
- Rennuit, C., Triolo, J.M., Eriksen, S., Jimenez, J., Carrere, H. and Hafner, S.D. 2018. Comparison of Pre- and Inter-Stage Aerobic Treatment of Wastewater Sludge: Effects on Biogas Production and COD Removal. *Bioresource Technology* 247: 332-339.
- Rukmini, P. 2016. Produksi Biogas dari Sampah Buah dan Sayur: Pengaruh Volatile Solid dan Limonen. *Konversi* 5(2): 66-72.
- Sandoval-Cobo, J.J., Casallas-Ojeda, M.R., Carabalí-Orejuela, L., Muñoz-Chávez, A., Caicedo-Concha, D.M., Marmolejo-Rebellón, L.M., and Torres-Lozada, P. 2020. Methane Potential and Degradation Kinetics of Fresh and Excavated Municipal Solid Waste from a Tropical Landfill in Colombia. *Sustainable Environment Research* 30(1): 1-11.
- Sawyer, N., Trois, C., Workneh, T., and Okudoh, V. 2019. An Overview of Biogas Production: Fundamentals, Applications and Future Research. *International Journal of Energy Economics and Policy* 9: 105-116.
- Senol, H. 2019. Biogas Potential of Hazelnut Shells and Hazelnut Waste in Giresun City. *Biotechnology Reports* 24: 1-6.
- Shibata, T., Wilson, J.L., Watson, L.M., Nikitin, I.V., Ansariadi, Ane, R.L. and Maidin, A. 2015. Life in Landfill Slum, Children's Health, and the Millenium Development Goals. *Science of the Total Environment* 536: 408-418.
- Silaen, M., Taylor, R., Bobner, S., Anger-Kraavi, A., Chewprecha, U., Badinotti, A., and Takama, T. 2019. Lessons From Bali For Small-Scale Biogas Development in Indonesia. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 35: 445-459.
- Singgih, B. dan Yusmiati. 2018. Pemanfaatan Residu/Ampas Produksi Biogas dari Limbah Ternak (Bio-Slurry) Sebagai Sumber Pupuk Organik. *Journal Balitbangda Lampung* 6(2): 139-148.

- Singh, A.K., Singh, A., Pathak, P., and Singh, N. 2018. Relative Analysis of Biogas from Kitchen Waste. *International Organization of Scientetic Research Journal of Engineering* 8(9): 1-5.
- Somashekar, R., Verma, R., and Naik, M.A. 2014. Potential of Biogas Production From Food Waste in a Uniquely Designed Reactor Under Lab Conditions. *International Journal of Geology, Agriculture and Environmental Sciences* 2(2): 1-7.
- Sturmer, B., Leiers, D., Brugging, E., Scharfy, D., and Wissel, T. 2021. Agricultural Biogas Production: A Regional Comparison of Technical Parameters. *Renewable Energy* 164: 171-182.
- Suryati, T., Salim, F., dan Titiresmi. 2007. Pemanasan Global dan Keanekaragaman Hayati. *Jurnal Teknik Lingkungan* 8(1): 61-68.
- Suyitno, Sujono, A., dan Dharmanto. 2010. *Teknologi Biogas: Pembuatan, Operasional dan Pemanfaatan*. Graha Ilmu, Yogyakarta. 118 hlm.
- Tsunatu, D., Atiku, K., Samuel, T., Hamidu, B., and Dahutu, D. 2017. Production of Bioethanol from Rice Straw using Yeast Extracts Peptone Dextrose. *Nigerian Journal of Technology* 36(1): 296-301.
- Utami, I., Redjeki, S., Astuti, D.H., and Sani. 2015. Biogas Production And Removal COD – BOD And TSS From Wastewater Industrial Alcohol (Vinasse) By Modified UASB Bioreactor. *MATEC Web of Conference* 58: 1-5.
- Vaez, E., and Zilouei, H. 2020. Towards the Development of Biofuel Production From Paper Mill Effluent. *Renewable Energy* 146: 1408-1415.
- Wei, S., and Guo, Y. 2017. Comparative Study of Reactor Performance and Microbial Community in Psychrophilic and Mesophilic Biogas Digesters Under Solid State Condition. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 125(5): 543-551.
- Yaqoob, H., Teoh, Y.H., Din, Z.U., Sabah, N.U., Jamil, M.A., Mujtaba, M., Abid, A. 2021. The Potential of Sustainable Biogas Production From Biomass Waste For Power Generation in Pakistan. *Journal of Cleaner Production* 307: 1-15.
- Yi, J., Dong, B., Jin, J., and Dai, X. 2014. Effect of Increasing Total Solids Contents on Anaerobic Digestion of Food Waste Under Mesophilic Conditons: Performance and Microbial Characteristics Analysis. *PLoS One* 9(7): 1-10.

- Zainol, N., and Ismail, S. N. 2019. Evaluation of Enzyme Kinetic Parameters to Produce methanol Using Michaelis-Menten Equation. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis* 14(2): 436-442.
- Zhao, J., Wang, D., Liu, Y., Ngo, H. H., Guo, W., Yang, Q., and Li, X. 2017. Novel Stepwise pH Control Strategy to Improve Short Chain Fatty Acid Production from Sludge Anaerobic Fermentation. *Bioresource Technology* 249: 431-438.