

**PRODUKSI BIOGAS DARI CAMPURAN LIMBAH
CAIR PABRIK KELAPA SAWIT DAN KOTORAN SAPI
MENGUNAKAN BIOREAKTOR CSTR**

(Tesis)

Oleh

SUPRIYANTO



**PROGRAM PASCASARJANA
MAGISTER TEKNOLOGI INDUSTRI PERTANIAN
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2016**

ABSTRAK

PRODUKSI BIOGAS DARI CAMPURAN LIMBAH CAIR PABRIK KELAPA SAWIT DAN KOTORAN SAPI MENGUNAKAN BIOREAKTOR CSTR

Oleh

SUPRIYANTO

Biogas merupakan sumber energi yang dapat diperbarui. Penggunaan bahan utama untuk memproduksi biogas salah satunya adalah LCPKS dan kotoran sapi. Kandungan COD yang tinggi pada LCPKS berpotensi untuk menghasilkan biogas sebagai sumber energi. Namun hasil yang didapatkan belum optimal, sehingga dilakukanlah penambahan kotoran sapi yang banyak mengandung bakteri metanogen agar mampu meningkatkan produksi metana pada suatu proses fermentasi anaerobik. Kotoran sapi tersebut banyak didapatkan di sekitar perkebunan dan pabrik kelapa sawit. Penelitian ini dilakukan untuk memanfaatkan kotoran sapi terutama bagi industri yang telah menerapkan program ISSE. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan laju pembebanan substrat LCPKS dan kotoran sapi yang optimal dengan melakukan kajian terhadap proses produksi biogas dan efisiensi penyisihan COD serta mendapatkan pemodelan matematika kinetika produksi biogas yang sesuai, sehingga dapat digunakan untuk skala yang lebih besar (*scale up*). Perlakuan dilakukan dengan tiga kali ulangan dan lima perlakuan yang berbeda pada tiap bulannya (0,5 L/hari, 1,0 L/hari, 1,5 L/hari, 2,0 L/hari, dan 2,5 L/hari).

Proses produksi biogas yang dihasilkan dari masing-masing perlakuan mengalami peningkatan sampai laju alir 2,0 L/hari atau laju pembebanan $2,1884 \text{ Kg/m}^3/\text{hari}$ yaitu mencapai rata-rata 28,17 L/hari. Sedangkan laju alir yang mempunyai COD removal tertinggi terdapat pada laju alir 0,5 L/hari yaitu sebesar 75,68% hampir sama pada perlakuan laju alir 1,0 L/hari yaitu sebesar 75,28%, namun nilai konversi COD menjadi metana tertinggi, terdapat pada laju alir 1,0 L/hari $0,320 \text{ LCH}_4/\text{CODremoval}$ pada kondisi STP (*Standard Temperature and Pressure*) atau $0,362 \text{ LCH}_4/\text{CODremoval}$ pada temperatur 35°C . Berdasarkan pada pemodelan kinetika dengan menggunakan bioreaktor CSTR, model kinetika yang sesuai adalah model Moser, dengan nilai korelasi yang didapatkan sebesar 0,9767.

Kata kunci : Biogas, LCPKS, kinetika, metana

ABSTRACT

BIOGAS PRODUCTION FROM PALM OIL MILL EFFLUEN AND CATTLE MANURE WITH CSTR BIOREACTOR

By

SUPRIYANTO

Biogas is a renewable energy. POME and cattle manure are the main material for producing biogas. POME have a high concentration of COD, its potential to produce biogas as an energy source, but the results are not optimal, so perform the addition of cattle manure. Cattle manure contains a lot of methanogenic bacteria in order to increase the production of methane in an anaerobic fermentation process. The cattle manure are abundant around the plantation and palm oil mill. This study was conducted to use cattle manure especially for industries that have implemented ISSE program. The purpose of this study was to obtain of loading rate substrates POME and cattle manure are optimal with an investigate of the biogas production process and efficiency of COD removal, furthermore to describe the biogas production process, it's using the mathematical kinetics form of biogas production, so that it can be used on a scale up bioreactor. The treatment was done with three replications and five different treatments on each month (0,5 L/day, 1,0 L/day, 1,5 L/day, 2,0 L/day and 2,5 L/day).

The production process of the best biogas produced from each treatment loading rate is 2,0 L/day or organic loading rate of 2.1884 Kg/m³/day, reaching an average of 28,17 L/day. While the flow rate which has the highest COD removal are at a flow rate of 0.5 L/day amounting to 75.68% is almost the same in the treatment flow rate of 1.0 L/day amounting to 75.28%, but the value of the highest conversion into methane COD, is at a flow rate of 1.0 L/day 0.320 LCH₄/CODremoval at STP (Standard Temperature and Pressure) conditions or 0.362 LCH₄/CODremoval at a temperature of 35°C. Based on kinetic modeling by using biorekator CSTR, appropriate kinetic model is a model Moser, with a correlation value obtained by 0.9767.

Key words : Biogas, POME, kinetics, methane

**PRODUKSI BIOGAS DARI CAMPURAN LIMBAH
CAIR PABRIK KELAPA SAWIT DAN
KOTORAN SAPI MENGGUNAKAN BIOREAKTOR
CSTR**

Oleh

SUPRIYANTO

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
Magister Sains**

Pada

**Program Studi Magister Teknologi Industri Pertanian
Jurusan Teknologi Hasil Pertanian
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA
MAGISTER TEKNOLOGI INDUSTRI PERTANIAN
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2016**

Judul Tesis

**: PRODUKSI BIOGAS DARI CAMPURAN
LIMBAH CAIR PABRIK KELAPA SAWIT
DAN KOTORAN SAPI MENGGUNAKAN
BIOREAKTOR CSTR**

Nama Mahasiswa

: Supriyanto

Nomor Pokok Mahasiswa

: 1424051006

Program Studi

: Magister Teknologi Industri Pertanian

Sub Program Studi

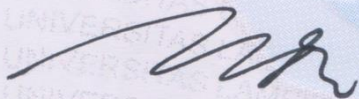
: Teknologi Proses Agroindustri

Fakultas

: Pertanian

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

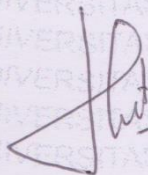


Prof. Dr. Eng. Ir. Udin Hasanudin, M.T.
NIP 19640106 198803 1 002



Dr. Ir. Saroni, M.Si.
NIP 19681113 199203 1 002

2. Ketua Program Magister Teknologi Industri Pertanian



Dr. Sri Hidayati, S.T.P., M.P.
NIP 19710930 199512 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

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

Sekretaris

: Dr. Ir. Sarono, M.Si.

Penguji

Bukan Pembimbing : Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.

2. Dekan Fakultas Pertanian



Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si.

NIP. 19611020 198603 1 002

3. Direktur Program Pascasarjana



Prof. Dr. Sudjarwo, M.S.

NIP. 19530528 198103 1 002

4. Tanggal Lulus Ujian Tesis : 10 Juni 2016

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa :

1. Tesis dengan judul : **Produksi Biogas dari Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit dan Kotoran Sapi menggunakan Bioreaktor CSTR** 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 ilmiah ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

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

Bandar Lampung, 10 Juni 2016



Supriyanto
NPM. 1424051006

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Tanjung Karang, Kecamatan Tanjung Karang Timur, Kotamadya Bandar Lampung, Provinsi Lampung pada tanggal 05 Oktober 1979, sebagai anak pertama dari empat bersaudara dari pasangan Bapak Rusman dan Ibu Supiani. Menikah dengan Herlina, S.Si. pada tanggal 04 Juli 2010 dan telah mempunyai dua orang putra bernama Faeyza Syazani Naufal dan Ghaisan Tsaqib Alkhalifi.

Penulis menyelesaikan Pendidikan Dasar di SD Negeri 1 Kotabaru Bandar Lampung dari tahun 1986 sampai 1992, Pendidikan Menengah Pertama di SLTP Negeri 1 Bandar Lampung dari tahun 1992 sampai 1995, dan Pendidikan Menengah Kejuruan di SMK Negeri 2 Bandar Lampung dengan Jurusan Teknologi Pengerjaan Logam dan Program Studi Mesin Produksi. Penulis melanjutkan Program Pendidikan Diploma 3 di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung Jurusan Kimia dengan Program Studi Analis Kimia dari tahun 2001 sampai 2005. Pada tahun 2011 penulis melanjutkan pendidikannya pada jenjang Sarjana di Sekolah Tinggi Perkebunan (STIBUN) Lampung Jurusan Budidaya Tanaman Perkebunan Program Studi Agroteknologi. Dalam menjalankan pendidikannya tersebut penulis membuat Skripsi yang berjudul “ Pengaruh berbagai jenis *starter* dan abu sisa boiler terhadap kualitas kompos tandan kosong kelapa sawit (TKKS) ”.

Selanjutnya untuk mendalami tentang proses pengolahan limbah pada pabrik kelapa sawit, penulis melanjutkan pendidikan Pascasarjana program Magister Teknologi Industri Pertanian Universitas Lampung pada tahun 2014.

Penulis pernah bekerja di PT. IKA NUSA PRATAMA sebagai *Engineering* pada tahun 1998. Bekerja di PT. NESTLE BAVERAGES INDONESIA Pabrik Panjang dari tahun 1998-2000 sebagai *Operator Filling and Packing*. Bekerja sebagai Analis di Laboratorium Instrumen FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2005 sampai 2007. Dan terakhir bekerja sebagai Pranata Laboratorium Pendidikan di Laboratorium Analisis Politeknik Negeri Lampung pada tahun 2008 sampai sekarang.

SANWACANA

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Salawat serta salam semoga selalu tercurahkan pada kasih-Nya, Rasulullah Muhammad SAW.

Tesis dengan judul “ PRODUKSI BIOGAS DARI LIMBAH CAIR PABRIK KELAPA SAWIT DAN KOTORAN SAPI MENGGUNAKAN BIOREAKTOR CSTR” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains di Fakultas Pertanian Universitas Lampung.

Dengan selesainya tesis ini, penulis menghaturkan ucapan terima kasih yang tulus dan ikhlas kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.S. selaku Dekan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Dr. Sudjarwo, M.S. selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung.
3. Bapak Prof. Dr. Eng Ir. Udin Hasanudin, M.T. selaku dosen pembimbing utama yang terus bersedia memberikan perhatian, bimbingan, nasehat serta saranya.
4. Bapak Dr. Ir. Saroni, M.Si. selaku dosen anggota pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk membimbing saya dalam penyusunan tesis ini.

5. Bapak Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P. selaku dosen penguji utama yang telah berperan dalam menguji dari isi maupun penyusunan tesis ini.
6. Ibu Dr. Ir. Sri Hidayati, M.P. selaku ketua Program Studi Magister Teknologi Industri Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
7. Bapak dan ibu dosen serta staf Program Studi Magister Teknologi Industri Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
8. Orang Tuaku Bapak Rusman dan Ibu Supiani, Istriku Herlina, S.Si. dan kedua anakku Faeyza Syazani Naufal dan Ghaisan Tsaqib Alkhalifi, serta adik-adiku Iwan Purwanto, Ahmad Ridwan, Rosmala Sari, Harish Saputra dan Habib Solehuddin.
9. Bapak Ir. Joko S.S. Hartono, M.T.A. selaku Direktur, Bapak Ir. Yatim R. Widodo, M.Sc. selaku Wakil Direktur I, Bapak Ir. Nurman Abdul Hakim, M.P. selaku Wakil Direktur II, Bapak Ir. Bambang Utoyo, M.P. selaku Wakil Direktur III.
10. Bapak Ir. M. Rofiq, M.P. dan Ibu Ir. Any Kusumastuti, M.P. selaku Ketua Jurusan Budidaya Tanaman Perkebunan dan Ketua Program Studi PMIP Politeknik Negeri Lampung yang telah memberikan izin serta dukungan atas pendidikan yang penulis laksanakan.
11. Tim Laboratorium Limbah THP Universitas Lampung, Mas Joko Sugiono, Mas Midi, Arafat, Amel, Mba Sinta, Widya, Ica dan teman-teman lainnya
12. Teman-teman di Unit Layanan Pengadaan Politeknik Negeri Lampung Yasir, Subarjo, Andi, Kamyono, Ram Ma'ruf dan Bu Erlis yang memberikan bantuan dan kerjasamanya.

13. Teman-teman Pranata Laboratorium Pendidikan Politeknik Negeri Lampung.
14. Mb Dini, Mas Suryo, Bang Dim, Deary, Tulus, Mb Reni, Mas Sutoyo, Mb Fizaria dan Bigi serta teman-teman di Magister Teknologi Industri Pertanian Universitas Lampung yang memberikan bantuan dan kerjasamanya.
15. Teman-teman di Laboratorium Analisis Politeknik Negeri Lampung.

Penulis berharap semoga Allah SWT berkenan melipatgandakan pahala atas amal perbuatan mereka yang diberikan kepada penulis dan semoga tesis ini dapat memberikan manfaat. Amin.

Bandar Lampung, Juni 2016

Penulis

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke at the end.

Supriyanto

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Tujuan Penelitian.....	5
C. Kerangka Pemikiran.....	5
D. Hipotesis.....	8
II. TINJAUAN PUSTAKA	9
A. Kebutuhan Energi Listrik Indonesia.....	9
B. Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit.....	11
1. Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit.....	11
2. Proses Pengolahan Limbah secara Anaerobik.....	14
3. Potensi Gas Metana Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit.....	17
C. Program Integrasi Sapi Sawit	18
D. Kotoran Sapi	19
E. Biogas	20
1. Konversi Bahan Organik menjadi Biogas	22
2. Dekomposisi Bahan Organik	27
3. Stoikiometri Fermentasi Anaerob	27
4. <i>Completely Stirred Tank Reactor</i> (CSTR)	29
5. Beberapa yang mempengaruhi Produksi Biogas.....	31

F. Kinetika Pertumbuhan Mikroorganisme dalam Bioreaktor Anaerobik..	35
III. METODE PENELITIAN	43
A. Tempat dan Waktu Penelitian.....	43
B. Bahan dan Alat	43
C. Metode Penelitian	44
D. Pelaksanaan Penelitian	47
E. Pengamatan	48
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	55
A. Aklimatisasi	55
B. Proses Operasional Bioreaktor Anaerob dalam Memproduksi Biogas dari LCPKS dan Kotoran Sapi.....	59
1. Nilai pH	63
2. Biomassa Aktif dalam Bioreaktor Anaerobik	66
3. Kandungan VS terhadap Produksi Biogas	72
4. COD, Penyisihan COD dan Konversi COD menjadi Metana ...	76
5. Potensi Biogas dan <i>Sludge Activity Index</i> (SAI)	83
6. Kandungan Gas Metana dan Karbondioksida.....	86
C. Profil Kinetika Pertumbuhan Biomasa	91
1. Penentuan Nilai Kinetika Model Monod	92
2. Penentuan Nilai Kinetika Model Moser	96
3. Penentuan Nilai Kinetika Model Chen-Hashimoto	98
V. SIMPULAN DAN SARAN	102
A. Simpulan	102
B. Saran	103
DAFTAR PUSTAKA	104
LAMPIRAN	111

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Contoh uji dan larutan pereaksi untuk bermacam-macam <i>digestion vessel</i>	52
2. Hasil karakterisasi sludge yang digunakan sebagai inokulum utama	54
3. Karakteristik LCPKS yang digunakan sebagai substrat	57
4. Baku Mutu Air Limbah Industri Sawit sesuai dengan MENKLH No. 5 Tahun 2014 dan PERGUB No. 7 2010.....	60
5. Karakteristik kotoran sapi	61
6. Karakteristik campuran LCPKS dan kotoran sapi	62
7. Rekapitulasi nilai rata-rata hasil penelitian untuk perlakuan laju alir terhadap produksi biogas dari substrat campuran LCPKS dan larutan kotoran sapi	90
8. Konsentrasi COD dan VSS sebagai dasar untuk menghitung pemodelan kinetika	91
9. Hasil Perhitungan regresi linier untuk menentukan nilai K_d dan Y pada fermentasi anaerob	92
10. Hasil perhitungan regresi linier, K_s , dan μ_{max} model kinetika Monod pada ketiga bioreaktor.....	94
11. Hasil Perhitungan Nilai Y , K_d , K_s dan μ_{max} model kinetika Monod pada bioreaktor anaerobik	95
12. Hasil perhitungan regresi linier untuk menentukan nilai μ_{max} dan K_s dengan pemodelan kinetika Moser	96
13. Hasil perhitungan nilai Y , K_d , K_s dan μ_{max} model kinetika Moser pada bioreaktor anaerobik	97

14.	Hasil perhitungan regresi linier untuk menentukan nilai μ_{\max} dan K_s dengan pemodelan kinetika Chen-Hashimoto	99
15.	Hasil Perhitungan Nilai Y , K_d , K_s dan μ_{\max} dengan model kinetika Chen-Hashimoto pada bioreaktor anaerob	100
16.	Nilai pH efluen aklimatisasi pada masing-masing bioreaktor anaerob	112
17.	Volume Biogas (L) aklimatisasi pada masing-masing bioreaktor anaerob.....	112
18.	Nilai pH efluen pada masing-masing bioreaktor anaerob.....	113
19.	Konsentrasi TSS outlet (mg/L) pada masing-masing bioreaktor anaerob	118
20.	Konsentrasi VSS outlet (mg/L) pada masing-masing bioreaktor anaerob	119
21.	Nilai Rasio VSS/TSS pada masing-masing bioreaktor anaerob..	120
22.	Konsentrasi VS outlet (mg/L) pada masing-masing bioreaktor anaerob	121
23.	Konsentrasi COD outlet (mg/L) pada masing-masing bioreaktor anaerob	122
24.	Nilai penyisihan COD outlet (%) pada masing-masing bioreaktor anaerob	123
25.	Konversi bahan organik menjadi gas metana secara stoikiometri ($L\ CH_4/gCOD$) pada kondisi STP	124
26.	Nilai <i>Sludge Activity Index</i> ($g\ COD/gVSS/hari$) pada masing-masing bioreaktor anaerob	124
27.	Volume Biogas (L) pada masing-masing bioreaktor anaerob...	125

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Skema Pengolahan Pabrik Sawit.....	12
2. Skema pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit	13
3. Skema Pengolahan Kotoran sapi yang terintegrasi untuk pembangkit Listrik.....	20
4. Skema <i>Completely Stirred Tank Reactor</i> (CSTR)	30
5. Bioreaktor Fermentasi <i>Completely Stirred Tank Reactor</i> (CSTR).....	44
6. Metode Penelitian proses produksi biogas dengan menggunakan substrat LCPKS dan larutan kotoran sapi	46
7. Nilai pH rata-rata pada tahap aklimatisasi dengan sumber inokulum dari kolam anaerob menggunakan substrat LCPKS	57
8. Rata-rata volume biogas yang dihasilkan dari proses aklimatisasi inokulum anaerob	58
9. Perubahan pH outlet rata-rata dari tiga bioreaktor selama proses degradasi bahan organik	64
10. Rata-rata TSS outlet bioreaktor selama proses degradasi bahan organik pada ketiga bioreaktor	67
11. Rata-rata penurunan penyisihan TSS outlet substrat pada ketiga bioreaktor	68
12. Rata-rata VSS outlet bioreaktor selama proses degradasi bahan organik pada ketiga bioreaktor	69
13. Rata-rata rasio VSS/TSS outlet selama proses degradasi bahan organik pada ketiga bioreaktor	71

14.	Rata-rata VS outlet bioreaktor selama proses degradasi bahan organik pada ketiga bioreaktor	73
15.	Rata-rata penyisihan VS outlet selama proses degradasi bahan organik pada ketiga bioreaktor	74
16.	Perubahan rata-rata penurunan VS yang terkonversi menjadi biogas pada ketiga bioreaktor	75
17.	Kandungan rata-rata COD hasil degradasi bahan organik pada ketiga bioreaktor	76
18.	Nilai rata-rata penyisihan COD hasil degradasi bahan organik pada ketiga bioreaktor	78
19.	Peningkatan rata-rata volume biogas terhadap OLR pada ketiga bioreaktor	80
20.	Nilai konversi COD menjadi metana dalam kondisi STP pada ketiga bioreaktor.....	81
21.	Rata-rata hasil pengukuran produksi biogas selama proses produksi berlangsung pada ketiga bioreaktor	84
22.	Nilai rata-rata SAI dari ketiga bioreaktor dengan beberapa perlakuan laju alir	85
23.	Konsentrasi rata-rata metana dan karbondioksida dari tiap-tiap bioreaktor dengan beberapa perlakuan laju alir	87
24.	Hasil <i>Slope</i> dan <i>Intercept</i> untuk menentukan nilai Y dan K_d pada bioreaktor anaerobik	93
25.	Kurva linier untuk menentukan nilai μ_{max} dan K_s dengan pemodelan kinetika Monod.....	94
26.	Kurva linier untuk menentukan nilai μ_{max} dan K_s dengan pemodelan kinetika Moser	97
27.	Kurva linier untuk menentukan nilai μ_{max} dan K_s dengan pemodelan kinetika Chen-Hasimoto	100

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang dan Masalah

Indonesia merupakan negara yang mempunyai jumlah penduduk ke empat terbesar di dunia. Semakin bertambahnya jumlah penduduk, maka semakin tinggi pula kebutuhan energi yang dibutuhkan untuk melakukan kegiatan masyarakat sehari-harinya. Apabila kebutuhan energi hanya didapatkan dari bahan-bahan fosil, maka ketersediaan bahan baku tersebut akan habis. Oleh karena itu diperlukan alternatif energi yang dapat diperbarui dan lebih *sustainable*. Salah satu sumber yang dapat dijadikan alternatif adalah biogas yang berasal dari metana. Banyaknya agroindustri yang mengolah limbah dengan sistem *lagoon* dapat dijadikan sebagai sumber metana yang jumlahnya cukup banyak. Industri kelapa sawit merupakan industri yang sangat berpotensi untuk menghasilkan metana yang didapatkan dari pengolahan limbah anaerobnya.

Masih tingginya permintaan dunia akan kebutuhan minyak sawit membuat penambahan industri kelapa sawit semakin meningkat. Dengan perkembangan produksi minyak sawit dari tahun 2009 sampai dengan 2014 berkisar antara 5,17 sampai 10,25 % (Ulum, 2014) mengakibatkan tingginya permintaan produk minyak kelapa sawit dan turunannya. Hal ini merupakan sumber devisa negara yang penting dan terus meningkat dari tahun ke tahun. Penerimaan devisa dari

produk olahan kelapa sawit meningkat dari US\$ 1.087,3 juta (2000) menjadi US\$ 17.464,9 juta (2014) (Badan Pusat Statistik, 2015). Pabrik minyak kelapa sawit dalam mengolah setiap satu ton tandan buah segar akan menghasilkan 0,75 – 0,9 m³ atau setiap ton CPO menghasilkan 3,33 ton LCPKS (Sarono, 2013).

Tingginya produksi LCPKS dapat mengakibatkan rusaknya lingkungan, sehingga pabrik dituntut untuk menangani limbah tersebut melalui peningkatan pengolahan. Pengolahan LCPKS pada saat ini didominasi oleh pengolahan dengan menggunakan teknologi kolam limbah terbuka. Pengolahan ini menggunakan kolam anaerobik, kolam fakultatif dan kolam aerobik. Teknologi ini diketahui kurang efektif dan tidak ramah lingkungan bila dibandingkan dengan menggunakan reaktor biogas karena pada pengolahan dengan menggunakan kolam-kolam penampungan memerlukan lahan yang lebih luas, selain itu proses tersebut menghasilkan gas metan yang merupakan gas rumah kaca. LCPKS mempunyai nilai COD 41.250 – 52.000 mg/L, TSS 46.174 – 55.328 mg/L dan VSS 12.324 – 20.720 mg/L (Sarono, 2013).

Pengolahan dengan menggunakan kolam (*lagoon*) selain digunakan untuk menurunkan kandungan COD, BOD, padatan tersuspensi dan total padatan, prosesnya juga menghasilkan gas metana sebagai emisii gas rumah kaca yang dilepaskan bebas di atmosfer (Nasution, 2011). Menurut Tong (2011), potensi produksi biogas dari suatu limbah cair yang dihasilkan oleh pabrik dengan kapasitas 60 ton/jam tersebut kurang lebih sebesar 216.000 m³/tahun, dengan total kandungan COD yang dihasilkan 10.800 ton/tahun, produksi dari LCPKS tersebut menghasilkan CH₄ 2.657 ton/tahun atau produksi biogas sebesar 6.726.318

m³/tahun atau setara energi yang dihasilkan sebesar 133.398.934 MJ/tahun atau menghasilkan listrik sebesar 37.039 MWh/tahun.

Pabrik pengolahan dan perkebunan kelapa sawit tidak hanya menghasilkan minyak sawit (CPO) sebagai produk utama tetapi juga hasil samping (*by product*) tandan kosong kelapa sawit, serabut sawit, limbah cair kelapa sawit dan bungkil sawit yang dapat dimanfaatkan sebagai makanan untuk sumber energi dan protein bagi peternakan sapi. Banyaknya tanaman gulma yang ada di sekitar perkebunan kelapa sawit merupakan sumber makanan hijauan yang berpotensi besar bagi peternakan sapi. Dengan adanya sumber makanan untuk peternakan sapi, saat ini pemerintah sedang mengembangkan program Sistem Integrasi Sapi dan Kelapa Sawit (SISKA) (Bambang *et al*, 2012) atau Program Integrasi Sapi Sawit Energi (ISSE) (Sulaiman *et al*, 2013). Program ini dilakukan karena Indonesia merupakan salah satu produsen industri kelapa sawit terbesar di dunia dan dengan semakin meningkatnya kebutuhan masyarakat terhadap protein dari daging.

Perkebunan kelapa sawit dipilih karena mempunyai potensi bahan pangan hijauan yang melimpah untuk mengembangkan peternakan sapi. Luas perkebunan kelapa sawit pada tahun 2014 sebesar 10,956 juta hektar dengan produksi CPO mencapai 29,344 juta ton dan LCPKS sebanyak 96,835 juta ton (Ditjen Perkebunan, 2015). Meningkatnya produksi sapi diharapkan dapat meningkatkan kebutuhan protein masyarakat Indonesia. Pada tahun 2011 standar konsumsi protein sudah di atas standar yaitu 1,997 kg perkapita pertahun kemudian turun pada tahun 2014 menjadi 1,65 kg (Ditjen Peternakan dan Kesehatan Hewan, 2015).

Program ISSE dalam pelaksanaannya akan menghasilkan dua jenis limbah yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber metana yang baik. Dari pengolahan pabrik kelapa sawit didapatkan LCPKS (Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit) dan pada peternakan sapi didapatkan feses. Kedua limbah ini berpotensi untuk dijadikan bahan baku pembuatan energi alternatif, salah satunya adalah biogas. Pada umumnya kotoran sapi hanya digunakan sebagai pupuk untuk tanaman, karena mempunyai kandungan nitrogen, fosfor, dan kalium. Kotoran sapi dianggap substrat paling cocok untuk pemanfaatan biogas. Substrat dalam kotoran sapi telah mengandung bakteri penghasil gas metana yang terdapat dalam perut hewan ruminansia.

Hasil penelitian Saronno (2013) menggunakan bioreaktor CSTR, menyatakan bahwa pembuatan biogas dari LCPKS sangat tidak menguntungkan. Hal ini disebabkan gas metana yang dihasilkan sangat kecil (0,28 L/g COD) dan membutuhkan waktu yang lama. LCPKS memiliki COD 40.000-50.000 mg/L, kandungan nitrogen 750 mg/L dan kandungan fosfor 120 mg/L, sumber utama bakteri penghasil gas metana berasal dari mikroorganisme yang terdapat pada LCPKS. Dengan adanya program SSKA, maka akan didapatkan sumber nutrisi dan bakteri penghasil gas metana yang murah dengan jumlah yang banyak.

Proses pengolahan LCPKS ini dilakukan dengan fermentasi anaerob, untuk dapat menghasilkan proses dekomposisi yang akurat dan presisi pada bioreaktor, maka diperlukan beberapa nilai model matematika atau beberapa nilai parameter kinetika berdasarkan pada hasil percobaan. Kinetika produksi biogas merupakan hal yang dapat dijadikan acuan untuk mengukur performa dari bioreaktor.

Banyaknya sumber limbah dengan konsentrasi yang bervariasi, mengakibatkan pemodelan kinetika produksi biogas ini dapat digunakan sebagai acuan analisis kemampuan dan efisiensi bioreaktor serta prediksi biogas yang akan dihasilkan.

B. Tujuan Penelitian

1. Mendapatkan laju alir substrat LCPKS dan kotoran sapi yang optimal dengan melakukan kajian terhadap proses produksi biogas dan efisiensi penyisihan bahan organik.
2. Mendapatkan pemodelan matematika kinetika produksi biogas yang sesuai, sehingga dapat digunakan untuk skala yang lebih besar (*scale up*).

C. Kerangka Pemikiran

Kotoran sapi merupakan sumber nutrisi yang dapat digunakan untuk pembentukan biogas pada LCPKS. Akan tetapi kotoran sapi mengandung sejumlah komponen yang sulit dihidrolisis seperti selulosa, hemi selulosa dan lignin, oleh karena itu diperlukan waktu yang lama agar bahan-bahan tersebut dapat terhidrolisis. Penelitian Mahajoeno (2008) terhadap produksi biogas yang berasal dari LCPKS dengan penambahan kotoran sapi sebesar 10 % memproduksi biogas 64,5 liter biogas selama 12 minggu percobaan dikondisi tekanan suhu dan tekanan rumah kaca. Produksi biogas tersebut lebih tinggi bila dibandingkan dengan menggunakan inokulum yang berasal dari kolam anaerob pengolahan limbah pabrik kelapa sawit.

Selain sebagai sumber nutrisi penghasil gas metana, kotoran sapi merupakan sebagai sumber inokulum yang baik bagi mikroorganisme metanogenik pada

pembentukan biogas, sehingga mikroorganisme tersebut dapat bekerja secara optimal untuk meningkatkan produksi biogas dari LCPKS. Sakinah (2012), menyatakan bahwa produksi biogas dengan biostater kotoran sapi lebih tinggi apabila dibandingkan dengan menggunakan biostater kotoran ayam dengan produksi tertinggi 23,67 gram pada konsentrasi 15 %. Selain itu juga penambahan ko-substrat organik untuk meningkatkan konsentrasi nitrogen pada LCPKS berupa sampah sayuran sawi hijau dapat dilakukan dengan tujuan menjaga keseimbangan C/N rasio untuk meningkatkan produksi biogas (Sastika *et al*, 2013).

Penggunaan kotoran sapi sebagai sumber nutrisi tidak dapat secara langsung digunakan untuk mendegradasi LCPKS, tetapi perlu dilakukan tahapan aklimatisasi terlebih dahulu. Aklimatisasi merupakan upaya penyesuaian fisiologis atau adaptasi dari suatu mikroorganisme terhadap substrat baru yang akan digunakan sebagai inokulum (Amelia, 2012). Efektivitas biogas terbentuk dengan kisaran pH 7. Hal ini menunjukkan bahwa proses netralisasi acetogenesis optimal pada pH 7 memberikan kondisi proses yang optimum untuk pertumbuhan bakteri (Budiyono, 2013).

Substrat campuran lebih baik dibandingkan menggunakan satu jenis substrat, kondisi campuran yang menghasilkan produksi biogas dan penyisihan COD yang tinggi adalah 30 % manur terhadap LCPKS yaitu 75 % (Sidik *et al*, 2013). Penggunaan kotoran sapi sebagai sumber inokulum dalam produksi biogas pernah dilakukan oleh Nasir *et al*, (2012) menggunakan LCPKS dan manur dengan konsentrasi 500 g manur dan 1,5 L LCPKS menghasilkan penyisihan COD yang

masih sedikit yaitu 33 % dengan sistem semi *batch* reaktor. Penelitian selanjutnya masih dilakukan Nasir *et al* (2013) dengan meningkatkan volume manur menjadi 5 : 1 dan 5 : 1,5 antara manur dan LCPKS. Dari hasil penelitian tersebut penyisihan COD yang dihasilkan masih sedikit yaitu 30 % dan 33 %.

Pengaturan umpan dilakukan dengan menjaga pH substrat tidak terlalu asam serta mengendalikan jumlah pencampuran agar kesetimbangan reaksi antara tahap asidogenik dan metanogenik terjaga baik. Konsentrasi pH dalam reaktor sangat dipengaruhi oleh jumlah asam lemak volatil (VFA), amoniak, dan CO₂ (Khaerunnisa *et al*, 2013).

Selain kondisi pH yang optimum ada beberapa kondisi yang harus diperhatikan, seperti perlu adanya agitasi yang berpengaruh terhadap produksi biogas pada bioreaktor (Luthfianto, 2012). Menurut Lim *et al* (2013), menyatakan bahwa temperatur merupakan faktor yang penting untuk meningkatkan performa dari digester anaerobik, temperatur yang rendah akan mengurangi pertumbuhan mikroorganisme metanogenik. Hal ini disebabkan oleh beberapa senyawa volatil yang diproduksi seperti amoniak akan menekan aktifitas metanogenik. Temperatur sekitar 55°C telah ditemukan sebagai temperatur yang optimum. Aplikasi dengan menggunakan temperatur 55°C pada pengolahan anaerob mengakibatkan penambahan biaya pemanas untuk digester tersebut. Oleh sebab itu pada penelitian ini menggunakan temperatur udara normal yaitu 35° – 40°C.

Masih kecilnya produksi biogas yang dihasilkan dari pengolahan LCPKS secara anaerob, memerlukan adanya evaluasi untuk meningkatkan produksi biogas LCPKS. Salah satunya adalah memberikan penambahan kotoran sapi sebagai

sumber inokulum untuk meningkatkan perombakan bahan organik oleh mikroorganisme. Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan, penyisihan COD dan produksi biogas yang dihasilkan masih sedikit. Selain itu laju alir optimal substrat yang mampu dirombak oleh mikroorganisme belum dapat diketahui. Selain penetapan nilai pH dan temperatur, evaluasi proses produksi biogas dilakukan dengan melakukan pengukuran beberapa parameter lain pada influen dan efluen. Parameter-parameter tersebut antara lain; konsentrasi *volatile suspended solids*(VSS), *total suspended solids* (TSS), *volatile solids* (VS), *total solids* (TS), *chemical oxygen demand* (COD), dan persentase metana.

Sedangkan untuk mengetahui kinerja bioreaktor dan besarnya laju alir yang berasal dari LCPKS dan larutan kotoran sapi dapat digambarkan melalui hasil produksi metabolit dari fermentasi anaerobik tersebut dengan menggunakan pemodelan kinetika produksi biogas. Untuk menggambarkan pemodelan matematika kinetika produksi biogas, maka digunakan pemodelan kinetika Monod, Moser dan Chen-Hashimoto.

D. Hipotesis

1. Laju alir substrat LCPKS dan kotoran sapi yang optimal akan menghasilkan biogas yang tinggi dan penyisihan COD yang optimal.
2. Dengan penambahan kotoran sapi sebagai inokulum dapat meningkatkan produksi biogas karena banyak mengandung bakteri metanogen dan bahan organik yang tinggi.
3. Untuk menggambarkan pemodelan kinetika produksi biogas yang sesuai dapat menggunakan pemodelan Monod, Moser dan Chen-Hashimoto.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Kebutuhan Energi Listrik Indonesia

Kebutuhan energi listrik merupakan suatu kenyataan yang harus dihadapi oleh bangsa Indonesia. Semakin berkembangnya pembangunan dibidang teknologi, industri dan informasi, menjadi bagian yang tidak dapat dihindari. Namun pelaksanaan penyediaan energi listrik yang dilakukan oleh PT.PLN (Persero), selaku lembaga resmi yang ditunjuk oleh pemerintah untuk mengelola masalah kelistrikan di Indonesia, sampai saat ini masih belum dapat memenuhi kebutuhan masyarakat akan energi listrik secara keseluruhan. Kondisi geografis negara Indonesia yang terdiri atas ribuan pulau dan kepulauan, tersebar dan tidak meratanya pusat-pusat beban listrik, rendahnya tingkat permintaan listrik di beberapa wilayah, tingginya biaya marginal pembangunan sistem suplai energi listrik, serta terbatasnya kemampuan finansial, merupakan faktor-faktor penghambat penyediaan energi listrik dalam skala nasional.

Selain itu, makin berkurangnya ketersediaan sumber daya energi fosil, khususnya minyak bumi, yang sampai saat ini masih merupakan tulang punggung dan komponen utama penghasil energi listrik di Indonesia, serta makin meningkatnya kesadaran akan usaha untuk melestarikan lingkungan, menyebabkan diperlukannya alternatif penyediaan energi listrik yang memiliki karakter.

Beberapa karakter yang digunakan untuk penyediaan energi listrik tersebut adalah:

1. dapat mengurangi ketergantungan terhadap pemakaian energi fosil, khususnya minyak bumi
2. dapat menyediakan energi listrik dalam skala lokal regional
3. mampu memanfaatkan potensi sumber daya energi setempat, serta
4. cinta lingkungan, dalam artian proses produksi dan pembuangan hasil produksinya tidak merusak lingkungan hidup di sekitarnya.

Sistem penyediaan energi listrik yang dapat memenuhi kriteria di atas adalah sistem konversi energi yang memanfaatkan sumber daya energi terbarukan seperti: matahari, angin, air, biomas dan lain sebagainya. Menurut Muchlis et al., (2013) peningkatan pertumbuhan kebutuhan energi listrik di Indonesia pada masing-masing sektor pengguna energi di beberapa wilayah pemasaran listrik PLN, dan selama kurun waktu 17 tahun (2003 s.d. 2020) diperkirakan tumbuh sebesar 6,5% per tahun dari 91,72 TWh pada tahun 2002 menjadi 272,34 TWh pada tahun 2020.

Pemerintah saat ini mendorong pengembangan biomassa dan biogas dengan terbitnya Peraturan Menteri ESDM Nomor 27 Tahun 2014 tentang Pembelian Tenaga Listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa dan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas oleh PT Perusahaan Listrik Negara (Persero). Dalam rangka pengembangan ini, diperlukan kerjasama dengan pemerintah daerah untuk menyediakan lahan serta regulasi mengenai harga bahan bakar biomassa jangka panjang.

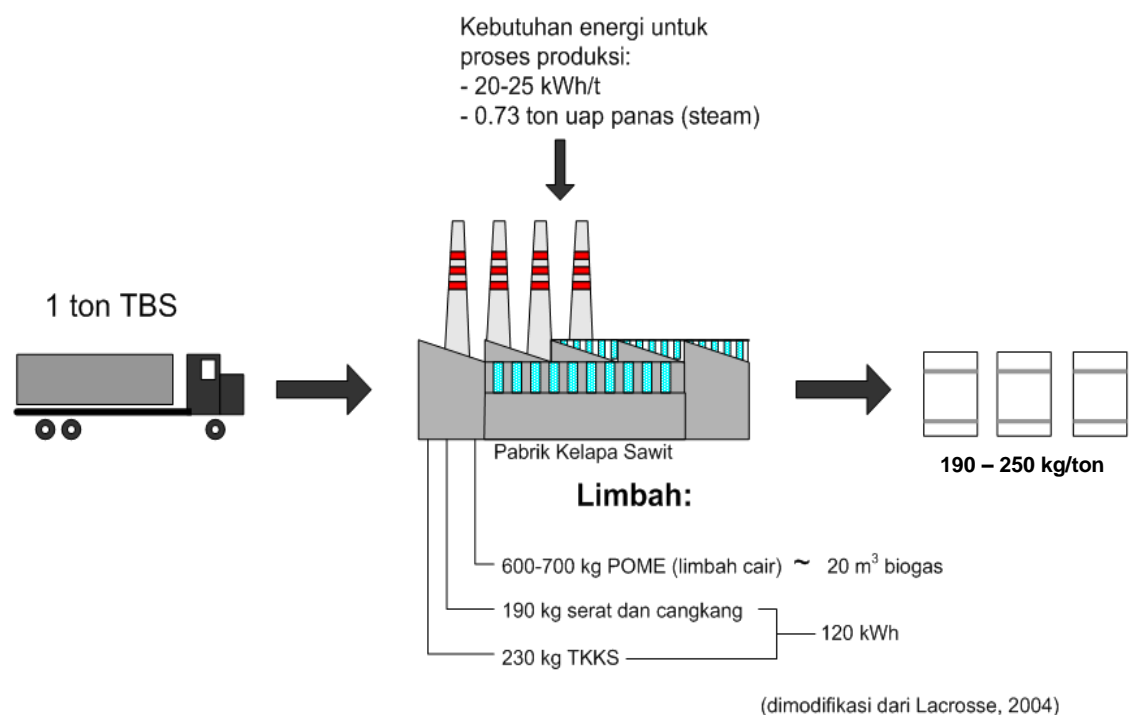
Pengembangan pembangkit biomassa memerlukan kepastian dalam pasokan bahan bakar biomassa. Oleh karena itu sebelum dilakukan pembangunan pembangkit biomassa, pasokan bahan bakar biomassa harus sudah dipastikan mengenai sumbernya maupun harga jangka panjang. Dalam tahap awal pertumbuhan PLT Biomassa ini, PLN lebih memberi kesempatan kepada swasta untuk menjalin kerjasama dengan pemilik industri perkebunan. Beberapa industri perkebunan yang dapat dilakukan upaya sebagai sumber biomassa dan biogas adalah industri kelapa sawit, industri tebu, industri tapioka dan beberapa industri lainnya.

B. Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit

1. Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit

Limbah adalah suatu bahan yang terbuang atau dibuang dari suatu sumber hasil aktivitas manusia, maupun proses alam dan tidak atau belum mempunyai nilai ekonomi. Aktivitas pengolahan pada pabrik kelapa sawit menghasilkan dua jenis limbah, antara lain limbah padat dan limbah cair. Limbah padat, antara lain tandan kosong kelapa sawit, cangkang, dan serat yang sebagian besar telah dimanfaatkan sebagai sumber energi dengan membakarnya secara langsung. Sisa pengolahan kelapa sawit berupa limbah padat memiliki kandungan energi yang cukup tinggi. Bila dikelola dengan baik, limbah padat kelapa sawit dapat digunakan sebagai energi alternatif pengganti bahan bakar fosil dan minyak yang biasa digunakan PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) (Syafriudin dan Hanesya, 2012).

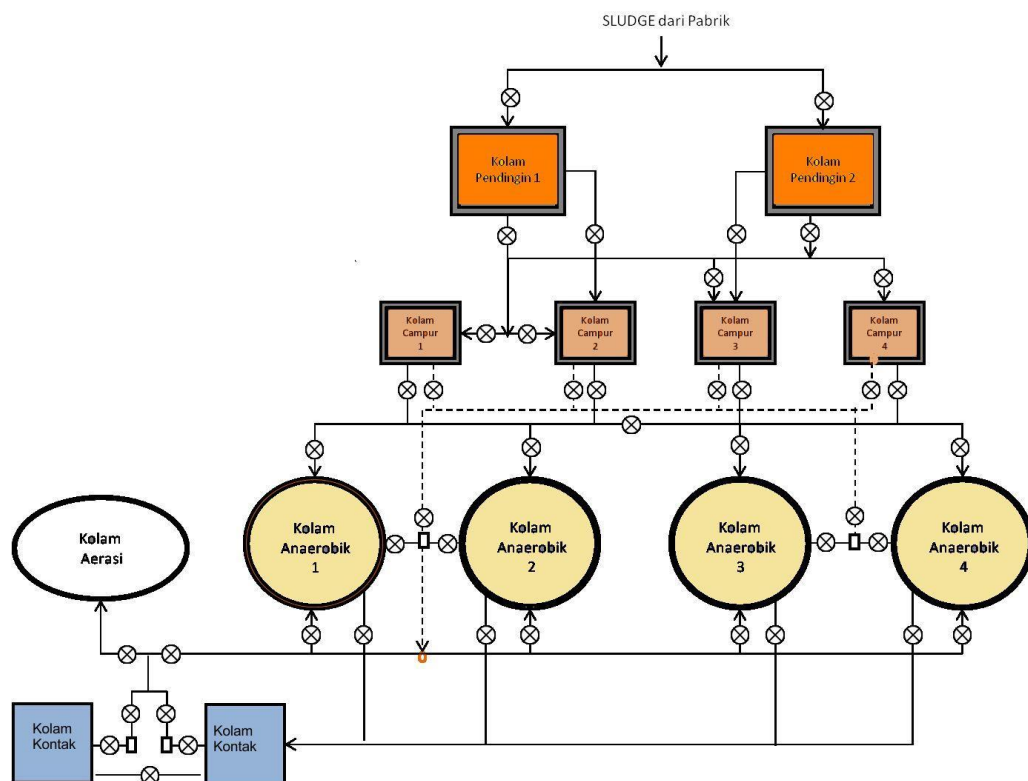
LCPKS mempunyai beberapa karakteristik, seperti bersifat koloid, kental, coklat susu, suhu 50-70°C, COD 41.250-52.000mg/L dan TSS 46.174-55.328 mg/L. Keseluruhan parameter diukur di atas ambang baku mutu peruntukan yang telah ditetapkan MENKLH (2014), sehingga LCPKS berpotensi sebagai pencemar lingkungan. Tanpa adanya upaya untuk mencegah atau mengelola secara efektif akan timbul dampak negatif terhadap lingkungan seperti timbulnya bau, pencemaran air dan perairan umum di sekitar pabrik, dan gas rumah kaca yang berdampak perubahan iklim global (Sarono, 2013).



Gambar 1. Skema Pengolahan Pabrik Kelapa Sawit

Menurut Mawarti (2012), LCPKS yang dihasilkan pabrik pengolahan kelapa sawit di Malaysia untuk setiap ton produksi CPO adalah 2,5-3 ton. Hasil samping proses produksi tersebut berasal dari air kondensat rebusan 36 % (150-175 kg/ton TBS). Sistem pengelolaan LCPKS pada saat ini didominasi oleh pengelolaan dengan menggunakan teknologi kolam limbah terbuka. Pengelolaan ini

menggunakan kolam anaerobik, kolam fakultatif dan kolam aerobik. Teknologi ini diketahui mengeluarkan biaya yang besar untuk perawatan dan juga dalam prosesnya menghasilkan gas metana sebagai gas rumah kaca yang dilepaskan bebas ke atmosfer (Nasution, 2012). Sistem kolam adalah sistem operasi yang mudah tetapi memiliki kelemahan seperti membutuhkan lahan yang luas, waktu retensi hidrolis yang relatif lama untuk kinerja yang efektif, bau busuk serta kesulitan dalam memperbaiki kualitas LCPKS dan penyerapan biogas.



Gambar 2. Skema Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (Malangyudo, 2011, yang dimodifikasi)

Pada emisi gas metana dari kolam anaerobik menunjukkan bahwa gas metana yang dipancarkan sebesar 1043,1 kg/hari/kolam. Dengan demikian, gas metana dapat diserap sebagai sumber energi terbarukan. Kolam anaerobik memiliki waktu

retensi terpanjang di sistem tambak yaitu sekitar 20-200 hari. Umumnya, retensi waktu air limbah di tangki anaerobik terbuka 20 hari. Akumulasi lumpur terjadi dan air di tangki dikeringkan sekali setiap dua minggu. Lumpur dikeringkan dalam lubang dangkal dan kemudian dijual ke petani untuk digunakan sebagai pupuk di perkebunan mereka. Selama perawatan di tangki anaerobik terbuka, gas metana mempunyai potensi meningkatkan emisi gas rumah kaca 25 kali dibandingkan dengan karbon dioksida (Yahaya *et al*, 2013).

2. Proses Pengolahan Limbah Secara Anaerobik

Bakteri metanogen terjadi secara alami di dalam sedimen yang dalam atau dalam pencernaan herbivora. Kelompok ini dapat berupa kelompok bakteri gram positif dan gram negatif dengan variasi bentuk yang banyak. Mikroorganisme metanogen tumbuh secara lambat dalam air limbah dan waktu tumbuh berkisar 3 hari pada suhu 35°C dengan 50 hari pada suhu 10°C. Bakteri metanogen dibagi menjadi dua kategori, yaitu 1) bakteri metanogen hidrogenotropik (seperti *chemolitotrof* yang menggunakan hidrogen) merubah hidrogen dan karbondioksida menjadi metan, 2) bakteri metanogen asetotropik atau bakteri asetoklastik atau bakteri penghilang asetat, yang merubah asetat menjadi metan dan CO₂. Bakteri asetoklastik tumbuh jauh lebih lambat daripada bakteri pembentuk asam. Kelompok ini terdiri dari dua kelompok, yaitu Metanosarkina dan Metanotrik. Kurang lebih sekitar 2/3 metan dihasilkan dari konversi asetat oleh metanogen asetotropik. Sepertiga sisanya adalah hasil reduksi karbondioksida oleh hidrogen.

Proses pembentukan metan digunakan untuk stabilisasi limbah, seperti kotoran lumpur, pupuk kandang, limbah industri, dan fraksi organik dari limbah kota

(Classen *et al.*, 1999; Finstein, 2010; Verstraete *et al.*, 2002). Dalam proses degradasi biokimia, senyawa organik kompleks didekomposisi menjadi senyawa organik dan anorganik sederhana. Selama proses pembentukan metana, mikroba mereduksi sulfat menjadi sulfida dan hidrogen sulfida yang terjadi selama amonifikasi anaerobik dan reduksi nitrat menjadi ammonia. Selain pengurangan asimilasi nitrat, denitrifikasi dapat terjadi (Scherer *et al.*, 2000).

Tahap awal metabolisme anaerobik serupa dengan proses aerobik. Ketika oksigen terlarut hilang, beberapa organisme kemolitotrof memanfaatkan senyawa mineral yang teroksidasi (sulfat dan nitrat sebagai akseptor hidrogen terakhir). Hasil oksidasi tersebut, sama seperti pada kondisi aerobik menggunakan rantai respirasi, tetapi produk akhir adalah hidrogen atau molekul nitrogen dan energi (Santosh *et al.*, 2004). Proses digesti yang dilepaskan ke lingkungan merupakan produk akhir berenergi tinggi, seperti alkohol atau metana. Pembentukan metana adalah proses yang kompleks yang mengalami empat fase: hidrolisis, acidogenesis-fase pengasaman, acetogenesis, dan metanogenesis. Keterlibatan dalam konversi biokimia H_2 dan CO_2 menjadi metana, dan asetat menjadi metana dan CO_2 adalah berbagai enzim dan senyawa prostetik yang hanya terjadi pada metanogen.

Senyawa prostetik ini terdiri dari turunan *Deazariboflavine* F420, *methanopterin*, *methanofurane*, *nikel-tetrapyrrol* F430 dan koenzim M (merkaptan sulfonat). Pengikatan CO_2 secara autotrof oleh metanogen terjadi tanpa bagian dari reaksi siklus *ribulosa-bisphosphatic*. Sintesis bahan selular dengan CO_2 terjadi melalui reaksi reduksi dari asetil-CoA dengan piruvat (Mashaphu, 2005; Saxena *et al.*, 2009). Pada tahap pertama dari proses reaksi, CO_2 tersebut diikat oleh

methanofurane (MFR) yang kemudian direduksi menjadi metanil dan metilen pada tahap akhir metanasi, lalu diikat oleh koenzim: *Tetrahy-dromethanopterin*, *2-methylthioethanesulfonic acid* dan *2-mercaptoethanesulfonic acid* (Medigan *et al.*, 2000).

Pada tahap pembentukan methanopterin senyawa metil piruvat akan direduksi oleh CO₂. Kelompok metil dalam proses karbonilasi diubah menjadi gugus karbonil dengan bantuan enzim karbon monoksida dehidrogenase (Mashaphu, 2005; Saxena *et al.*, 2009). Tahap ini disebut tahap metanogenesis, pada tahap ini banyak koenzim yang tidak memiliki gugus *flavinic* atau *quinonic*. Metabolisme metanogenesis adalah unik, karena berjalan di sepanjang jalur yang membutuhkan koenzim yang tidak terjadi pada organisme lain kecuali metanogen.

Methanogenes C1 berpartisipasi dalam metabolisme jalur *methanofurane*, methanopterin dan koenzim M, sedangkan koenzim F420 dan B bertindak sebagai donor elektron. Senyawa C1 tidak mengandung ikatan karbon-karbon. Senyawa tersebut berisi senyawa monokarbon, seperti metana (CH₄), metanol (CH₃OH), dimetil karbonat (CH₃OCOOCH₃) dan senyawa monokarbon lainnya. Senyawa ini muncul dalam lingkungan sebagai akibat dari pencernaan dan pembusukan produk dari bahan nabati dan hewani dan juga pestisida. Metana dihasilkan oleh metanogen archaeons menggunakan karbondioksida sebagai akseptor elektron (Medigan *et al.*, 2000; Mashaphu, 2005). Derivatif Deazariboflavine - F420 adalah koenzim transfer elektron yang digunakan oleh banyak enzim, seperti hidrogenase, dehidrogenase format, metilen dehidrogenase dari *tetrahydromethanopterin* (H4MPT), metilen reduktase H4MPT dan hetero

dihydrogen sulfida reduktase. Seperti disebutkan sebelumnya, MFR berpartisipasi dalam tahap inisiasi methanogenese hanya ketika CO₂ terikat dengan furan. Pada tahap berikutnya MRF direduksi secara alami lalu menjadi koenzim lainnya yaitu *tetrahydromethanopterin* (Mashaphu, 2005).

3. Potensi Gas Metana Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit

Perbandingan gas metana dengan bahan bakar lain sangat menguntungkan. Menurut Tong (2011), Pabrik Kelapa Sawit (PKS) dengan kapasitas produksi 60 Ton TBS/ jam atau 360.000 ton TBS/tahun akan menghasilkan LCPKS sebanyak 216.000 m³/tahun dengan total COD 10.800 ton/tahun. Produksi LCPKS tersebut dapat menghasilkan metana 2.675 ton/tahun atau biogas 6.726.318 m³/tahun atau setara dengan energi yang dihasilkan 133.398.934 MJ/tahun atau 31.867.877 KCal/tahun atau 37.039 MW.

Metana adalah salah satu bahan bakar yang dapat digunakan pada pembangkitan listrik, dengan cara membakarnya dalam gas turbin atau pemanas uap. Jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil lainnya, pembakaran metana menghasilkan gas karbon dioksida yang lebih sedikit untuk setiap satuan panas yang dihasilkan. Panas pembakaran yang dihasilkan metana adalah 891 kJ/mol. Jumlah panas ini lebih sedikit dibandingkan dengan bahan bakar hidrokarbon lainnya. Tetapi jika dilihat rasio antara panas yang dihasilkan dengan massa molekul metana (16 g/mol), maka metana akan menghasilkan panas per satuan massa (55,7 kJ/mol) yang lebih besar daripada hidrokarbon lainnya. Pada beberapa kota, metana dialirkan melalui pipa ke rumah-rumah dan digunakan untuk pemanas rumah dan kebutuhan memasak. Metana yang dialirkan di rumah

ini biasanya dikenal dengan gas alam. Gas alam mempunyai kandungan energi 39 megajoule per meter kubik, atau 304,8 BTU per meter kubik standar.

C. Program Integrasi Sapi Sawit Energi (ISSE)

Program integrasi adalah suatu kegiatan yang memadukan 2 (dua) atau lebih usaha dengan tujuan untuk meningkatkan keuntungan. Dengan peningkatan efisiensi suatu usaha atau kedua usaha yang dipadukan disamping menghasilkan produk utamanya juga menghasilkan produk hasil samping, sebagai input usaha yang kedua atau juga terjadi hal yang sebaliknya, maka diperoleh keuntungan/pendapatan ganda.

Pada kebun kelapa sawit menghasilkan pelepah, hijauan daun dan gulma sedangkan pada ternak sapi dapat menghasilkan kotoran/pupuk organik yang dapat dimanfaatkan untuk kesuburan tanah dalam kebun kelapa sawit, dimana kondisi ini saling sinergi dan bermanfaat. Pembinaan masyarakat petani kelapa sawit bertujuan untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat melalui sistem integrasi sapi-sawit untuk meningkatkan pendapatan.

Pakan merupakan komponen biaya produksi tertinggi dalam usaha peternakan, dengan kisaran 65-75% untuk sapi potong. Tingkat produksi dan reproduksi sapi potong di Indonesia lebih rendah dibandingkan dengan di daerah temperature. Hal tersebut disebabkan ketersediaan dan pemberian pakan tidak mencukupi kebutuhan ternak, baik untuk hidup pokok maupun produksi.

Produk samping industri kelapa sawit yang belum dimanfaatkan secara optimal adalah pelepah, daun, tandan kosong, serat perasan, lumpur sawit, dan bungkil

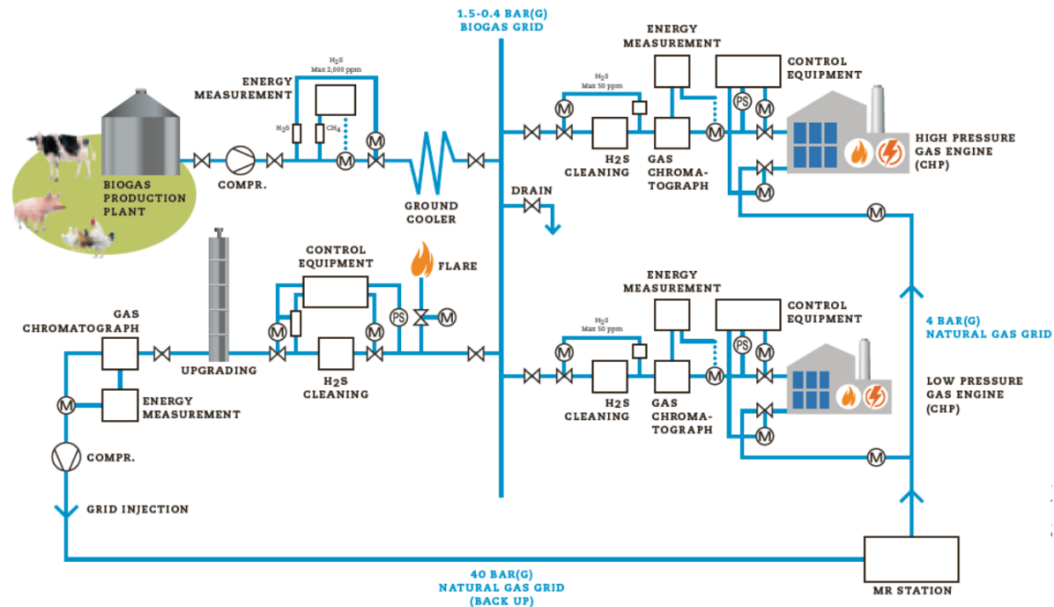
kelapa sawit (Bangun, 2010). Salah satu cara pemecahannya adalah dengan memanfaatkannya untuk pakan ternak. Sapi dapat memanfaatkan produk samping tersebut sebagai pakan dan sekaligus menghasilkan pupuk organik untuk tanaman. Pola integrasi ataupun diversifikasi tanaman dan ternak diharapkan dapat menjadi bagian integral dalam usaha perkebunan. Dengan perkataan lain, pemanfaatan produk samping industri kelapa sawit pada wilayah perkebunan dapat menjadi basis pengembangan sapi potong. Kehadiran sapi potong di perkebunan kelapa sawit diharapkan dapat memberikan nilai tambah, baik secara langsung maupun tidak langsung, selain dampaknya terhadap kebersihan lingkungan.

D. Kotoran Sapi

Potensi biogas yang berasal dari kotoran sapi sudah banyak digunakan dalam dunia industri. Energi tersebut dibutuhkan dalam bidang industri maupun pada bidang pembangkit tenaga listrik. Hal ini berguna untuk menunjang kualitas hidup masyarakat secara nasional. Ini berarti pula bahwa dalam mencari energi alternatif, biogas tersebut harus ramah lingkungan yang nantinya limbah yang akan diproses tidak mengganggu lingkungan sekitar. Dalam prosesnya nanti hendaknya petani/peternak mengetahui pengaturan lingkungan sehingga limbah tidak akan membebani lingkungan sekitar.

Kotoran sapi mengandung hemiselulosa sebesar 18,6 %, selulosa 25,2 %, lignin 20,2 %, nitrogen 1,67%, fosfat 1,11 %, kalium 0,56 % dan C/N rasio 6,6-25 % (Widyasmara, 2012). Populasi ternak sapi merupakan sumber energi yang potensial dalam pengolahan produksi biogas karena jumlahnya yang sangat banyak. Bila pada tahun 2011 populasi sapi 14.824 ribu ekor dengan produksi

kotoran 29/kg perhari, maka akan dihasilkan limbah kotoran sapi sebesar 429.896 ton perhari. Dengan potensi 1 kg kotoran sapi menghasilkan minimal 0,023m³ biogas maka akan menghasilkan biogas 9.887.608m³ (Wahyuni, 2013).



Gambar 3. Skema Pengolahan Kotoran Sapi yang Terintegrasi untuk Pembangkit Listrik (IEA Bioenergy, 2014)

E. Biogas

Biogas merupakan sebuah proses biokonversi dari material organik dengan bantuan bakteri. Biokonversi adalah sebuah proses yang mampu mengubah bahan organik menjadi produk lain yang berguna dan memiliki nilai tambah dengan memanfaatkan proses biologis dari mikroorganisme dan enzim (Wahyuni, 2013). Bahan organik diproses dalam kondisi anaerob sehingga menghasilkan metana (CH₄) dengan kadar dominan dan karbondioksida (CO₂). Material organik yang terkumpul pada digester (bioreaktor) akan diuraikan menjadi dua tahap dengan bantuan dua jenis bakteri.

Tahap pertama material organik akan didegradasi menjadi asam-asam rantai pendek dengan bantuan bakteri pembentuk asam. Bakteri ini akan menguraikan substrat pada tingkat hidrolisis dan asidifikasi. Hidrolisis yaitu penguraian senyawa kompleks atau senyawa rantai panjang seperti lemak, protein, karbohidrat menjadi senyawa yang sederhana. Sedangkan asidifikasi yaitu pembentukan asam dari senyawa sederhana.

Setelah material organik berubah menjadi asam-asam, maka tahap kedua dari proses anaerobik digestion adalah pembentukan gas metana dengan bantuan bakteri pembentuk metana seperti *methanococcus*, *methanosarcina*, *methanobacterium*. Perkembangan proses Anaerobik digestion telah berhasil pada banyak aplikasi. Proses ini memiliki kemampuan untuk mengolah sampah / limbah yang keberadaannya melimpah dan tidak bermanfaat menjadi produk yang lebih bernilai. Aplikasi anaerobik digestion telah berhasil pada pengolahan limbah industri, limbah pertanian limbah peternakan dan *municipal solid waste* (MSW).

Komposisi biogas yang dihasilkan terdiri atas metana (50-70%), karbondioksida (25-45%), hidrogen, nitrogen, dan hidrogen sulfida dalam jumlah yang sedikit (Wahyuni, 2013). Komposisi biogas terdiri atas metana (55-65%) dan karbondioksida (45-35%) yang merupakan komponen gas dominan, serta nitrogen (0-3%), hidrogen (0-1%), hidrogen sulfida (0-1%), dan unsur nitrogen, fosfor dan kalium serta mineral lainnya yang terakumulasi dalam *sludge*.

1. Konversi Bahan Organik pada Proses Anaerob ke Biogas

Senyawa organik yang ada dalam air limbah merupakan bagian terpenting dalam teknik sanitasi. Berbagai mikroorganisme yang ada dalam air limbah atau di badan air akan berinteraksi dengan senyawa organik. Dari hasil interaksi ini dapat sebagai sumber energi atau sebagai sumber bahan untuk menghasilkan sintesis senyawa yang baru. Pemanfaatan bahan organik oleh mikroorganisme yang disebut metabolisme.

Reaksi biokimia yang menghasilkan energi dalam asimilasi senyawa organik dan produksi produk akhir yang stabil disebut katabolisme, dan hasil sintesis materi senyawa yang baru disebut anabolisme. Untuk dapat menggambarkan proses metabolisme yang terjadi dalam proses lumpur aktif, maka perlu menentukan parameter kuantitatif yang cukup menjelaskan konsentrasi senyawa organik yang ada dalam air limbah dan menetapkan katabolik yang berbeda dan proses anabolik yang mungkin terjadi.

Dengan banyaknya jenis pencemar lingkungan yang berbeda, mengakibatkan proses pengendalian tidak efisien jika penanganannya harus dilakukan secara bagian-perbagian dari pencemar tersebut. Oleh sebab itu konsep bahan organik dapat dijadikan sebagai indikator untuk konsentrasi gabungan dari semua senyawa organik yang ada dalam air limbah. Untuk mengukur jumlah ataupun konsentrasi bahan organik dapat dilakukan dengan dua cara pengujian yaitu; *Biochemical Oxygen Demand (BOD)* dan *Chemical Oxygen Demand (COD)*.

Proses konversi bahan organik menjadi gas metana dilakukan secara fermentasi anaerob. Proses fermentasi tersebut berlangsung melalui 4 tahap yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis dan metanogenesis.

a. Hidrolisis

Selama hidrolisis dari polimer yang sebagian besar senyawa organik tidak larut (karbohidrat, protein, dan lemak) didekomposisi menjadi monomer larut, yaitu gula sederhana, asam amino dan asam lemak. Tahap pembentukan metan ini melalui enzim ekstraseluler dari kelompok hidrolisis (amilase, protease, lipase) yang dihasilkan oleh strain yang tepat dari bakteri hidrolisis. Hidrolisis polimer yang sulit didekomposisi yaitu selulosa dan *cellucottons* dianggap tahap yang membatasi laju pencernaan limbah. Selama pencernaan limbah padat, hanya 50 % dari senyawa organik mengalami biodegradasi. Sedangkan bagian yang tersisa masih tetap dalam kondisi utama dari senyawa tersebut akibat kurangnya enzim yang berfungsi untuk mendegradasi (Zakariah, 2013). Tingkat proses hidrolisis tergantung pada parameter seperti: Ukuran partikel, pH, produksi enzim, difusi dan adsorpsi enzim pada partikel limbah mengalami proses pencernaan. Hidrolisis dilakukan oleh bakteri dari kelompok anaerob relatif genera: *Streptococcus*, *Enterobacterium*.

b. Acidogenesis

Selama tahap ini, bakteri pengasam mengkonversi zat kimia yang larut dalam air, termasuk produk hidrolisis rantai pendek asam organik (format, asetat, propionat, butirat, pentanoik), alkohol (metanol, etanol), aldehid, karbon dioksida dan

hidrogen. Dari dekomposisi protein, asam amino dan peptida dapat dijadikan sumber makanan yang akan dirubah menjadi sumber energi bagi mikroorganisme anaerobik. Acidogenesis akan berlangsung secara dua arah karena efek dari berbagai populasi mikroorganisme. Proses ini dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu hidrogenasi dan dehidrogenasi. Jalur dasar transformasi perombakan bahan organik akan menghasilkan asetat, CO₂ dan H₂, sedangkan produk acidogenesis lainnya berperan untuk meningkatkan proses perombakan bahan organik kembali. Sebagian hasil dari transformasi oleh bakteri metanogen dapat langsung menghasilkan produk baru (metana) dan sebagian lagi dapat dijadikan sumber energi. Akumulasi elektron oleh senyawa, seperti laktat, etanol, propionat, butirat, asam lemak volatil yang lebih tinggi adalah respon bakteri terhadap peningkatan konsentrasi hidrogen dalam larutan. Substrat yang baru masuk dalam sistem tidak dapat digunakan secara langsung oleh bakteri metanogen dan harus dikonversi oleh bakteri obligatif yang memproduksi hidrogen dalam proses yang disebut acetogenesis. Diantara produk acidogenesis, amonia dan hidrogen sulfida memberikan bau yang tidak sedap (Ntaikou *et al.*, 2010;. Classen *et al.*, 1999; Conrad, 1999). Bakteri fase asam termasuk anaerob fakultatif menggunakan oksigen sengaja diperkenalkan ke dalam proses, menciptakan kondisi yang menguntungkan bagi pengembangan anaerob genera berikut: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Micrococcus* atau *Flavobacterium*.

c. Acetogenesis

Dalam proses ini, bakteri asetat termasuk dari genera *Syntrophomonas* dan *Syntrophobacter* yang mengkonversi produk asam ke fase asetat dan hidrogen

yang dapat digunakan oleh bakteri metanogen (Schink, 1997). Bakteri *Methanobacterium suboxydans* berfungsi untuk dekomposisi asam pentanoat menjadi asam propionat, sedangkan *Methanobacterium propionicum* menyangkut dekomposisi asam propionat menjadi asam asetat. Akibat dari acetogenesis, hidrogen akan dilepaskan sehingga menimbulkan efek beracun pada mikroorganisme yang melaksanakan proses dekomposisi. Oleh karena itu, suatu simbiosis diperlukan untuk bakteri acetogenik dengan bakteri metana autotrof menggunakan hidrogen, selanjutnya disebut syntrophy (Schink, 1997; De Bok et al, 2005). Acetogenesis adalah fase yang menggambarkan efisiensi produksi biogas, karena sekitar 70 % dari metana muncul diproses reduksi asetat. Akibatnya, asetat yang merupakan produk setengah jadi menjadi kunci utama dari proses pembentukan metana. Dalam fase acetogenesis sekitar 25 % dari asetat terbentuk dan sekitar 11 % hidrogen yang dihasilkan dalam proses degradasi dijadikan limbah.

d. Metanogenesis

Metanogenesis ialah proses pembentukan gas metan dengan bantuan bakteri Metanogen seperti *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanosarcina*, dan *Methanococcus*. Tahap ini mengubah asam-asam lemak rantai pendek menjadi H_2 , CO_2 , dan asetat. Asetat akan mengalami dekarboksilasi dan reduksi CO_2 , kemudian bersama-sama dengan H_2 dan CO_2 menghasilkan produk akhir, yaitu metan (CH_4) dan karbondioksida (CO_2). Metanogen adalah jenis mikroorganisme yang menghasilkan metana sebagai produk sampingan dari metabolisme dalam kondisi oksigen yang sangat rendah. Metanogen

diklasifikasikan sebagai *Archaea*, berbeda dari bakteri. Metanogen sering ditemukan dalam rawa dan lahan basah lainnya, di mana metana yang dihasilkan dikenal sebagai “gas rawa”. Metanogen juga ada dalam perut beberapa hewan, termasuk sapi dan manusia. Metanogen tidak memerlukan oksigen dalam reaksi metanogenesis, dan dalam beberapa kasus, bahkan tidak bisa bertahan di oksigen, meskipun mereka mungkin dapat mentolerir kehadirannya untuk waktu yang berkelanjutan. Metanogen adalah kelompok yang sangat beragam. Mereka menggunakan sumber karbon, seperti karbon dioksida atau asetat, untuk mendorong metabolisme mereka, yang disebut metanogenesis, bersama dengan hidrogen sebagai agen pereduksi (Tchobanoglous *et al*, 2003). Oleh karena itu, mereka memiliki manfaat ekologis membuang kelebihan hidrogen dan karbon dari lingkungan anaerobik.

Beberapa jenis metanogen termasuk dari genus *Methanopyrus* adalah *extremophiles* organisme yang berkembang dalam kondisi yang paling ekstrim, seperti mata air panas, ventilasi hidrotermal, tanah gurun yang panas, dan lingkungan bawah tanah yang mendalam. Lainnya, seperti dari genus *Methanocaldococcus*, adalah *mesophiles*, berkembang terbaik di suhu sedang. *Methanobrevibacter smithii* adalah metanogen yang dominan yang terdapat dalam usus manusia, bakteri tersebut membantu mencerna polisakarida, atau gula kompleks. Hanya 30 % gas metana yang dihasilkan berasal dari dalam proses ini, sedangkan pengurangan CO₂ dilakukan oleh bakteri metan autotrofik. Selama proses ini H₂ habis, yang menciptakan kondisi yang baik untuk pengembangan bakteri asam yang menghasilkan rantai pendek asam organik pada fase pengasaman dan produksi H₂ yang terlalu rendah di fase asetonik. Sebuah

konsekuensi dari konversi tersebut mungkin gas yang kaya CO₂, karena hanya bagian kecil yang akan diubah menjadi metan (Griffin *et al.*, 2000.; Karakashev *et al.*, 2005).

2. Dekomposisi Bahan Organik

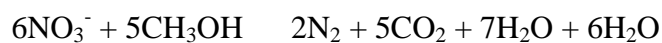
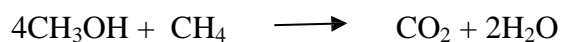
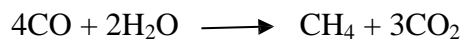
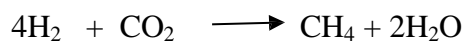
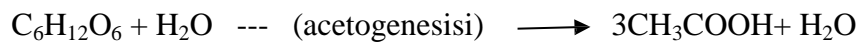
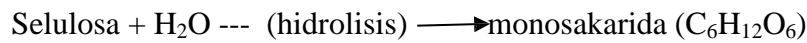
Fermentasi aerobik adalah proses perombakan bahan organik yang dilakukan oleh sekelompok mikrobia anaerobik fakultatif maupun obligat dalam suatu reaktor tertutup pada suhu 35 - 55°C. Perombakan bahan organik dikelompokkan dalam empat tahapan proses. Pertama, bakteri fermentatif menghidrolisis senyawa polimer menjadi senyawa sederhana yang bersifat terlarut. Ke dua, monomer dan oligomer dirombak menjadi asam asetat, H₂, CO₂, asam lemak rantai pendek dan alkohol; tahap ini disebut pula sedogenesis. Ke tiga, disebut tahap non-metanogenik yang menghasilkan asam asetat, CO₂ dan H₂. Ke empat, perubahan senyawa-senyawa tersebut menjadi metana (Mahajoeno, 2008).

Dekomposisi bahan organik yang mengandung selulosa, hemiselulosa dan lignin berlangsung sangat lambat. Untuk mempercepat proses degradasi bahan organik yang mengandung lignoselulosa perlu dilakukan perlakuan awal bahan baku (Herawati, 2010). Perlakuan tersebut dapat menggunakan asam atau mikroorganisme yang mampu merombak lignoselulosa.

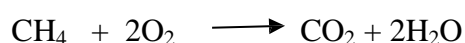
3. Stoikiometri Fermentasi Anaerobik dan Oksidasi

Penetapan nilai perubahan substrat bahan organik yang akan digunakan dalam proses metogenik dapat ditentukan dengan reaksi CO₂ dan gugus metil. Pembentukan metana dihasilkan dari selulosa yang dihidrolisis menjadi mono

sakarida, sedangkan pembentukan nitrogen dihasilkan dari protein yang dihidrolisis menjadi asam amino. Reaksi-reaksi tersebut melibatkan beberapa senyawa organik seperti asam format, asam asetat, karbon monoksida, methanol dan metil amin.



Berdasarkan reaksi tersebut, pembentukan asam asetat akan menjadi metana dan karbon dioksida. Perombakan COD pada proses fermentasi akan digantikan oleh oksigen untuk mengurangi COD pada proses anaerobik. Dengan demikian secara stoikiometri COD setara dengan jumlah metana yang dihasilkan atau besarnya nilai COD untuk berubah menjadi metan setara dengan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk pembentukan karbon dioksida dan air :



Dari hasil persamaan reaksi tersebut, maka dapat dinyatakan 1 mol COD metan adalah $(2(32 \text{ g O}_2/\text{mol})) = 64 \text{ g O}_2/\text{mol CH}_4$. Volume per mol metan standar pada

kondisi 0°C dan 1 atm adalah 22,414 L, sehingga 1 mol metana setara dengan COD pada kondisi anaerob adalah $22,414\text{L}/64 \text{ g COD} = 0,35\text{L CH}_4/\text{g COD}$. (Tchobanoglous *et al*, 2003). Jika produksi gas pada kondisi 35°C, maka nilai konversi COD menjadi metan adalah :

$$V = \frac{n.RT}{P}$$

$$V = \frac{(1 \text{ mol})(0,082507 \text{ atm.L/mol.K}) ((273,15+35)\text{K})}{1.0 \text{ atm}}$$

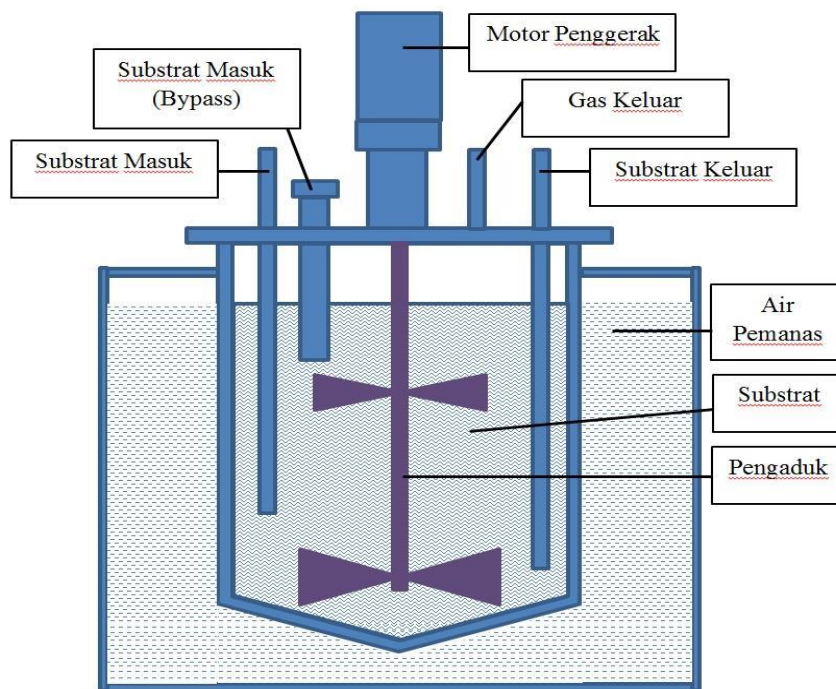
$$= 25,29 \text{ L}$$

Dari hasil konversi tersebut secara stoikiometri perubahan COD menjadi metan pada kondisi temperatur 35°C adalah $(25,29 \text{ L/mol})/(64 \text{ g COD/mol CH}_4) = 0,40\text{L CH}_4/\text{g COD}$.

4. *Completely Stirred-Tank Reactor (CSTR)*

Reaktor kimia adalah suatu tabung yang berbentuk silinder dirancang untuk tempat berlangsungnya reaksi kimia. Salah satunya adalah *Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)*. Proses pemasukan substrat dalam bioreaktor berlangsung secara bertahap dan homogenasi substrat yang terdapat pada bioreaktor dilakukan oleh pengaduk sehingga mikroorganisme akan menyebar secara merata. Selain itu fungsi pengadukan sendiri akan membantu untuk memecah substrat yang masih mengikat kuat pada jaringan lemak, dengan demikian partikel-partikel pada substrat akan menjadi lebih kecil. Semakin kecil partikel substrat yang digunakan sebagai makanan mikroorganisme, maka akan semakin cepat mikroorganisme untuk berkembang biak. Beberapa aspek penting yang jadi pengamatan pada bioreaktor CSTR adalah :

1. Pada kondisi *steady state*, laju alir biomassa yang masuk harus seimbang dengan laju alir yang keluar dari bioreaktor. Sedangkan kondisi bioreaktor pada kondisi transisi, sisa biomassa dalam sel harus memperhitungkan metabolit yang dihasilkan.
2. Reaksi secara mikrobiologis akan berlangsung dengan berasosiasi bersama-sama dengan beberapa jenis mikroorganisme yang lain, karena beberapa jenis mikroorganisme tersebut dalam kondisi homogen dalam bioreaktor.



Gambar 4. Skema *Completely Stirred Tank Reactor* (CSTR)

CSTR merupakan suatu sistem yang dapat diisolasi dari udara luar atau terlindungi dari induksi oksigen. CSTR dapat dikelilingi (dialiri sekelilingnya) dengan cairan (air) pendingin/pemanas untuk dapat diserap ke dalam sistem bioreaktor, sehingga temperatur dalam bioreaktor dapat dikendalikan. Reaksi yang

terjadi di dalam bioreaktor CSTR terdiri dari reaksi satu arah, reaksi bolak-balik atau reaksi berantai, aliran masa masuk dan keluar berlangsung secara terus menerus. Penggunaan CSTR memiliki beberapa kekurangan dan kelebihan. Kelebihan dari CSTR adalah distribusi sifat fisis dan kimiawi dapat berlangsung secara merata dari zat yang bereaksi di setiap titik dalam bioreaktor. Sedangkan kekurangannya adalah perubahan reaktan per volumenya relatif kecil dibandingkan dengan bioreaktor lain, sehingga dibutuhkan bioreaktor yang lebih besar ukurannya. Selain itu CSTR hanya dapat digunakan untuk reaksi dalam fase cair (Rosadi, 2000).

5. Beberapa Hal yang Mempengaruhi Pembentukan Biogas

a. Pengaruh Suhu dalam Pembentukan Biogas

Produksi metan dapat dihasilkan pada temperatur antara 0°C sampai 97°C. Walaupun bakteri metan *psycrophilic* tidak dapat diisolasi, bakteri termofilik beroperasi secara optimum pada temperatur 50 sampai 75°C ditemukan di daerah panas. *Methanothermus fervidus* ditemukan di Iceland dan tumbuh pada temperatur 63 sampai 97°C.

Pertumbuhan bakteri metan lebih lambat dibandingkan bakteri acidogenik, maka bakteri metan sangat sensitif terhadap perubahan kecil temperatur. Karena penggunaan asam volatil oleh bakteri metan, penurunan temperatur cenderung menurunkan laju pertumbuhan bakteri metan. Oleh karena itu, penguraian mesofilik harus didesain untuk beroperasi pada temperatur antara 30 sampai 35°C untuk fungsi optimal.

b. Pengaruh pH dalam Pembentukan Biogas

Kebanyakan pertumbuhan bakteri metanogenik berada pada kisaran pH 6,7 sampai 7,4, tetapi optimalnya pada kisaran pH antara 7,0 sampai 7,2 dan proses dapat gagal jika pH mendekati 6,0. Bakteri acidogenik menghasilkan asam organik yang cenderung menurunkan pH bioreaktor. Salah satu metode untuk memperbaiki keseimbangan pH adalah meningkatkan *alkalinity* dengan menambah bahan kimia seperti *lime* (kapur), *anhydrous ammonia*, natrium hidroksida atau natrium bikarbonat.

c. Komposisi Kimia Air Limbah

Bakteri metanogenik dalam fermentasi anaerobik dapat menghasilkan metan dari karbohidrat, protein, dan lipida, dan juga senyawa kompleks aromatik (contoh: ferulik, vanilik, dan asam syringik). Walaupun demikian beberapa senyawa lignin dan n-parafin sulit terurai oleh bakteri anaerobik. Rasio C:N:P untuk bakteri anaerobik adalah 700:5:1. Metanogen menggunakan ammonia dan sulfur sebagai sumber nitrogen dan sulfur. Walaupun sulfida bebas bersifat toksik terhadap metanogen bakteri pada tingkat 150 sampai 200 mg/L, unsur ini sumber sulfur utama untuk bakteri metanogen.

d. Kompetisi Metanogen dengan Bakteri Pemakan Sulfat

Bakteri pereduksi sulfat dan metanogen memperebutkan donor elektron yang sama, asetat dan H_2 . Bakteri pemakan sulfat memiliki afinitas yang lebih tinggi terhadap asetat ($K_s = 9,5$ mg/L) daripada metanogen ($K_s = 32,8$ mg/L). Ini berarti

bahwa bakteri pemakan sulfat akan memenangkan kompetisi pada kondisi konsentrasi asetat yang rendah. Bakteri pemakan sulfat dan metanogen sangat kompetitif pada rasio COD/SO₄ berkisar 1,7 sampai 2,7. Pada rasio yang lebih tinggi baik untuk metanogen, sedangkan bakteri pemakan sulfat lebih baik pada rasio yang lebih kecil.

Beberapa zat toksik yang dapat menghambat pembentukan metan antara lain: 1) oksigen, metanogen adalah bakteri anaerob dan dapat terhambat pertumbuhannya oleh oksigen dalam kadar *trace level*, 2) ammonia, ammonia beracun untuk bakteri metanogen karena produksi ammonia tergantung pH (ammonia bebas terbentuk pada pH tinggi), sedikit toksisitas yang dapat diamati pada pH netral. Ammonia dapat menghambat pembentukan metanogen pada konsentrasi 1500 sampai 3000 mg/L, 3) hidrokarbon terklorinasi, kloroform sangat toksik terhadap bakteri metanogen dan cenderung menghambat secara total, hal ini dapat diukur dari produksi metan dan akumulasi hidrogen pada konsentrasi di atas 1 mg/L, 4) senyawa benzena, 5) formaldehid, 6) asam volatil, 7) asam lemak rantai panjang, 7) logam berat, 8) sianida, 9) sulfida, 10) tannin, 11) salinitas, 12) efek balik, sistem anaerobik dapat dihambat oleh beberapa hasil antara selama proses.

e. Laju Pembebanan (*Loading rate*)

Laju pembebanan biasanya disebut *loading rate* adalah besaran yang menyatakan jumlah material organik dalam satu satuan volume yang diumpangkan pada reaktor. Substrat cair yang diumpangkan dapat didegradasi oleh mikroba, kemudian diubah menjadi metana melalui proses biologis oleh mikroba-mikroba pengurai di dalam reaktor. Perubahan laju pembebanan yang mendadak dapat

mengakibatkan kenaikan yang setara dalam produksi asam, yang tidak dapat disesuaikan oleh kenaikan yang setara dalam pembentukan metana. Pembentukan produk asam asetat (asam lemak organik) akan mengakibatkan penurunan pH dan penghambatan lebih jauh dari produksi metan akan terjadi. Satuan laju pembebanan adalah $\text{kg COD/m}^3\text{hari}$.

f. Konsentrasi Substrat (COD)

Konsentrasi bahan organik sangat berpengaruh terhadap perencanaan pembuatan dimensi reaktor dan juga bagi kelangsungan proses penguraian zat organik kompleks menjadi senyawa sederhana. Kelemahan perencanaan reaktor dengan kandungan COD yang rendah adalah kebutuhan volume reaktor yang cukup besar untuk dapat menampung umpan substrat.

g. Kandungan Asam Lemak Organik (*Volatile Fatty Acid*)

Asam lemak organik bisa disebut sebagai *volatile fatty acid* yang mempunyai rumus $\text{R} - \text{COOH}$, dimana $\text{R} = \text{CH}_3 (\text{CH}_2)_n$. Asam lemak yang dibentuk dalam hidrolisa polisakarida umumnya adalah jenis rantai pendek seperti asetat, propionat dan butirat. Konsentrasi asam lemak yang tinggi akan menyebabkan turunnya pH reaktor dan akan membuat terbentuknya asam lemak rantai panjang. Batas konsentrasi asam asetat yang dapat ditoleransi adalah dibawah 10 mg/L; diatas batas tersebut menyebabkan rusaknya sistem biologi.

h. Alkalinitas

Alkalinitas pada proses fermentasi anaerobik adalah kemampuan lumpur didalam reaktor untuk menetralkan asam. Hal ini diperlukan untuk mengimbangi fluktuasi konsentrasi asam didalam reaktor, sehingga fluktuasi pH tidak terlalu besar dan tidak sampai mengakibatkan gangguan pada stabilitas reaktor.

F. Kinetika Pertumbuhan Mikroorganisme dalam Bioreaktor Anaerobik

Pada proses pembentukan biogas ada beberapa hal tinjauan yang digunakan dalam mengukur kinerja dari bioreaktor tersebut. Pengukuran kinerja bioreaktor dilakukan dengan tujuan meningkatkan skala (*scale up*) dari bioreaktor biogas yang akan digunakan. Pengukuran kinerja pada bioreaktor tersebut dilakukan dengan menggunakan pemodelan kinetika produksi biogas.

Michaelis dan Menten (1913), mengawali penelitian dengan menggunakan pemodelan matematika kinetika produksi biogas. Berdasarkan pada persamaan tersebut aktivitas enzim yang dihasilkan oleh mikroorganisme tergantung pada konsentrasi substrat. Ketergantungan ini dapat ditransformasikan sebagai pertumbuhan bakteri, karena pertumbuhan mikroba merupakan jenis reaksi auto katalitik. Mikroorganisme mampu memperbanyak dengan sendiri untuk menghasilkan biogas. Selanjutnya Monod (1942) melakukan penelitian terhadap hubungan non linier antara laju pertumbuhan dan konsentrasi substrat pembatas. Selain Michaelis-Menten dan Monod, beberapa peneliti juga mengembangkan pemodelan matematika kinetika produksi biogas seperti Blackman, Moser dan Chen-Hashimoto.

Pemodelan kinetika produksi biogas yang banyak digunakan adalah Monod, namun menurut Contois (1959), model Monod pada umumnya digunakan untuk kultur yang mempunyai kemurnian sangat tinggi dan jenis substrat yang sederhana. Model ini cocok untuk substrat yang homogen, tetapi tidak untuk substrat yang heterogen atau substrat kompleks. Maka disimpulkan bahwa model Monod tidak dapat menggambarkan degradasi limbah kota yang memiliki kandungan substrat yang sangat kompleks (Mahanta et al, 2014). Keterbatasan pemodelan kinetika Monod adalah tidak memperhitungkan evaluasi terhadap sel-sel yang dimungkinkan memerlukan substrat ataupun produk yang dapat disintesis meskipun tidak ada pertumbuhan bakteri (Raghuvanshi et al, 2010). Selanjutnya Chen-Hashimoto (1981) melakukan pengamatan terhadap fermentasi kotoran ternak dan sisa pakan tumbuhan menggunakan digester CSTR (*Completely Stirred Tank Reactor*) kapasitas $5,4\text{m}^3$. Pendekatan pemodelan kinetika yang dilakukan dengan memodifikasi persamaan yang digunakan Contois dengan menambahkan pengaruh pertumbuhan mikroorganisme terhadap suatu hasil produksi biogas dari kotoran ternak dan sisa pakan. Selain itu Hermann Moser (1958) juga memodifikasi persamaan Monod terhadap fermentasi bakteri dengan menggunakan *Chemostat*. Pertumbuhan mikroorganisme dalam suatu reaktor anaerobik dilakukan oleh jenis mikroorganisme bakteri, sehingga dalam meningkatkan proses pertumbuhan, bakteri berkembang biak dengan membelah diri (biner).

Proses pertumbuhan mikroorganisme dalam suatu bioreaktor merupakan peningkatan semua komponen sel sehingga menghasilkan peningkatan ukuran sel dan jumlah sel (kecuali mikrobial yang berbentuk filamen) akan menyebabkan

peningkatan jumlah individu di dalam populasi. Pertumbuhan mikrobia dalam bioreaktor terjadi secara pertumbuhan individu sel dan pertumbuhan populasi, pertumbuhan individu sel meliputi peningkatan substansi dan komponen sel, peningkatan ukuran sel serta pembelahan sel. Sedangkan pertumbuhan populasi meliputi peningkatan jumlah akibat pembelahan sel dan peningkatan aktivitas sel yang melibatkan sintesa enzim.

Dalam pertumbuhan mikrobia juga terlibat proses metabolik yaitu mulai dari transport nutrisi dari medium ke dalam sel, konversi bahan nutrisi menjadi energi dan konstituen sel, replikasi kromosom, peningkatan ukuran dan masa sel serta pembelahan sel secara biner yang terjadi pula pewarisan genetik (genom turunan) ke sel anakan.

Pertumbuhan mikroba dalam suatu medium mengalami fase-fase yang berbeda, yang berturut-turut disebut dengan fase lag, fase eksponensial, fase stasioner dan fase kematian. Pertumbuhan sel pada fase eksponensial adalah pertumbuhan sel ketika sel telah menyesuaikan diri dengan lingkungan yang baru maka sel mulai membelah hingga mencapai populasi yang maksimum. Fase ini disebut fase logaritma. Fase eksponensial ditandai dengan terjadinya periode pertumbuhan yang cepat, sel membelah dengan laju konstan, aktivitas metabolik konstan, dan keadaan pertumbuhan seimbang.

Kecepatan penggandaan sel berlangsung konstan dan maksimal, tergantung jenis dan kondisi pertumbuhannya. Setiap sel dalam populasi membelah menjadi dua sel dengan laju sama. Variasi derajat pertumbuhan bakteri pada fase eksponensial ini sangat dipengaruhi oleh sifat genetik yang diturunkannya. Selain itu, derajat

pertumbuhan juga dipengaruhi oleh kadar nutrien dalam media, suhu inkubasi, kondisi pH dan agitasi. Ketika derajat pertumbuhan bakteri telah menghasilkan populasi yang maksimum, maka akan terjadi keseimbangan antara jumlah sel yang mati dan jumlah sel yang hidup. Pada fase ini, kadar substrat menurun, bersamaan dengan peningkatan kadar sel dan akumulasi hasil akhir metabolik.

Model kinetika merupakan suatu metode yang berguna untuk menggambarkan dan memprediksi kinerja sistem perombakan bahan organik secara anaerobik. Jenis model Monod adalah jenis model yang banyak digunakan untuk menggambarkan kinetika proses perombakan bahan organik secara anaerobik. Meskipun telah ada beberapa keberhasilan dalam menerapkan kinetika Monod untuk proses anaerobik, beberapa peneliti telah menemukan kesulitan dalam menerapkan model tersebut (Grady et al, 1972). Ini mungkin karena persamaan Monod yang tidak mempertimbangkan ketergantungan konsentrasi substrat limbah pada konsentrasi influen substrat. Grady *et al.* (1972) telah menunjukkan bahwa konsentrasi substrat limbah tergantung pada konsentrasi influen substrat jika pertumbuhan membatasi substrat diukur sebagai kebutuhan oksigen kimia (COD). Chen dan Hashimoto (1980) telah menyarankan bahwa kinetika Contois akan lebih cocok daripada model Monod untuk menggambarkan kinerja proses perombakan bahan organik secara anaerobik. Kinetika Contois berasumsi bahwa ada hubungan langsung antara influen dan konsentrasi substrat limbah. Namun demikian, tidak banyak memberikan informasi tentang kinetika proses perombakan bahan organik secara anaerobik untuk menanggulangi limbah cair menggunakan kinetika Contois.

Proses perombakan bahan organik diawali dengan tahapan hidrolisis, kemudian dilanjutkan dengan pembentukan asam-asam organik dalam bentuk asam volatil dan sebagian lagi digunakan untuk pertumbuhan dan pembentukan biomassa. Selanjutnya beberapa bagian asam volatil di konversi menjadi metana dan karbondioksida oleh bakteri-bakteri metanogenik dan sebagian lagi akan digunakan untuk pertumbuhan dan pembentukan biomassa. Dengan demikian laju pertumbuhan mikroorganisme dapat dibuat melalui model kinetika salah satunya adalah Monod.

Tingkat perubahan biomassa mikroba dengan menggunakan bioreaktor berpengaduk dapat dinyatakan dengan :

$$\frac{dX}{dt} = \frac{Q}{V} (X_0 - X) + \mu X - K_d X \quad (1)$$

Dimana : Q = Laju alir (L/hari)

V = Volume reaktor (L)

X₀ dan X = Konsentrasi biomassa reaktor/efluen (g VSS)

μ dan K_d = Laju pertumbuhan spesifik dan laju kematian (1/hari)

Jika diasumsikan bahwa konsentrasi biomassa pada influen dapat diabaikan, maka pada kondisi *steady state* dX/dt = 0, apabila Waktu Retensi Hidrolik (WRH) didefinisikan sebagai volume reaktor dibagi dengan pengaruh laju alir substrat, maka hubungan laju pertumbuhan dan konsentrasi substrat pembatas dapat dinyatakan oleh persamaan Monod (1942):

$$\mu = \frac{\mu_{max} X}{K_s + X} \quad (2)$$

Dimana : μ = Laju pertumbuhan spesifik (hari⁻¹)

μ_{max} = Laju pertumbuhan spesifik maksimum (hari⁻¹)

K_s = Konstanta setengah jenuh (g/L)

S = Konsentrasi substrat (g/L)

Sehingga dari persamaan itu akan menghasilkan :

$$S = \frac{K_s x (K_d + \frac{1}{HRT})}{\mu_a - K_d - \frac{1}{HRT}} \quad (3)$$

Persamaan tersebut dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi substrat efluen pada kondisi *steady state*. Untuk menentukan tingkat pertumbuhan berdasarkan konsentrasi substrat dapat digunakan persamaan :

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{S}{V} - (\mu x) \quad (4)$$

dimana : Y = Koefisien pertumbuhan (g VSS/ g COD)

S_0 = Konsentrasi substrat dalam bioreaktor (g COD/L)

Pada kondisi *steady state* laju perubahan konsentrasi substrat dapat diabaikan dan diganti dengan konsentrasi substrat efluen dengan menentukan konsentrasi biomassa efluen.

$$X = \frac{x_0 (1 - \frac{S}{S_0})}{(1 + K_d x H)} \quad (5)$$

Selain penetapan laju pertumbuhan spesifik maksimum (μ_{max}) dan konstanta setengah jenuh (K_s), ditentukan juga nilai koefisien pertumbuhan mikroorganisme (Y) dan konstanta kematian (K_d) dengan mensubstitusi persamaan (5) berdasarkan pada persamaan Monod sehingga akan didapatkan persamaan :

$$\frac{x_0 (1 - \frac{S}{S_0})}{K_x} = \frac{1}{H} x \frac{1}{\mu} + \frac{1}{d} \quad (6)$$

Dengan memplotkan persamaan (6) maka nilai Y dan K_d dapat ditentukan dengan menghitung nilai *slope* dan *intercept*. Sedangkan untuk menentukan nilai kinetika μ_{max} dan K_s (model Monod) dapat ditentukan dengan memplotkan persamaan (7), persamaan tersebut menggunakan turunan dari persamaan (3). Nilai μ_{max} dapat

ditentukan dari nilai *intercept* ($1/\text{intercept}$) dan K_s dapat ditentukan sebagai nilai *slope* ($u_{\max} \times \text{slope}$).

$$\frac{H}{1+H} = \frac{K_s}{\mu_{ax}} \times \frac{1}{\mu_{ax}} + \frac{1}{\mu_{ax}} \quad (7)$$

Model kinetika selanjutnya adalah model Chen-Hashimoto. Chen-Hashimoto menggunakan teknik pemodelan yang hampir sama dengan Monod, tapi pada model Chen-Hashimoto ditambahkan parameter laju pertumbuhan spesifik sebagai pembatas konsentrasi substrat dan konsentrasi substrat influen seperti yang terdapat pada persamaan Contois. Persamaan Chen-Hashimoto dapat ditentukan dengan :

$$\frac{\mu_{ax}}{\mu} = K \frac{S}{S_0} + 1 \quad (8)$$

dimana : μ = Laju pertumbuhan spesifik (hari^{-1})

μ_{\max} = Laju pertumbuhan spesifik maksimum (hari^{-1})

K = Konstanta setengah jenuh (g/L)

S = Konsentrasi substrat efluen (g/L)

S_0 = Konsentrasi substrat influen (g/L)

Berdasarkan pada persamaan 8 dibuatlah persamaan dalam bentuk regresi linier :

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{ax}} + \frac{K_s}{\mu_{ax}} \quad (9)$$

Sehingga dari persamaan tersebut dapat dibuat persamaan lengkap dalam bentuk regresi linier :

$$\frac{H}{1+H} = \frac{1}{\mu_{ax}} + \frac{K_s}{\mu_{ax}} \quad (10)$$

Model persamaan kinetika selanjutnya adalah model Moser, parameter kinetika yang ditentukan adalah μ_{\max} dan K_s . Penentuan nilai μ_{\max} dan K_s dapat ditentukan dengan memplotkan persamaan (11), persamaan tersebut merupakan perubahan dari persamaan (6). Nilai μ_{\max} dapat ditentukan sebagai *intercept* ($1/\text{intercept}$) dan K_s dapat ditentukan sebagai nilai *slope* ($\mu_{\max} \times \text{slope}$).

$$\frac{H}{1+H} = \frac{K_s}{\mu_{\max}} \times \frac{1}{\mu_{\max}} + \frac{1}{\mu_{\max}} \quad (11)$$

Penggunaan model kinetika Moser didasarkan pada proses penggandaan mikroorganisme untuk membelah diri. Sehingga kinerja suatu bioreaktor dapat diukur berdasarkan pada populasi mikroorganisme, waktu penggandaan dan konsentrasi metabolit hasil dari fermentasi oleh mikroorganisme.

III. METODE PENELITIAN

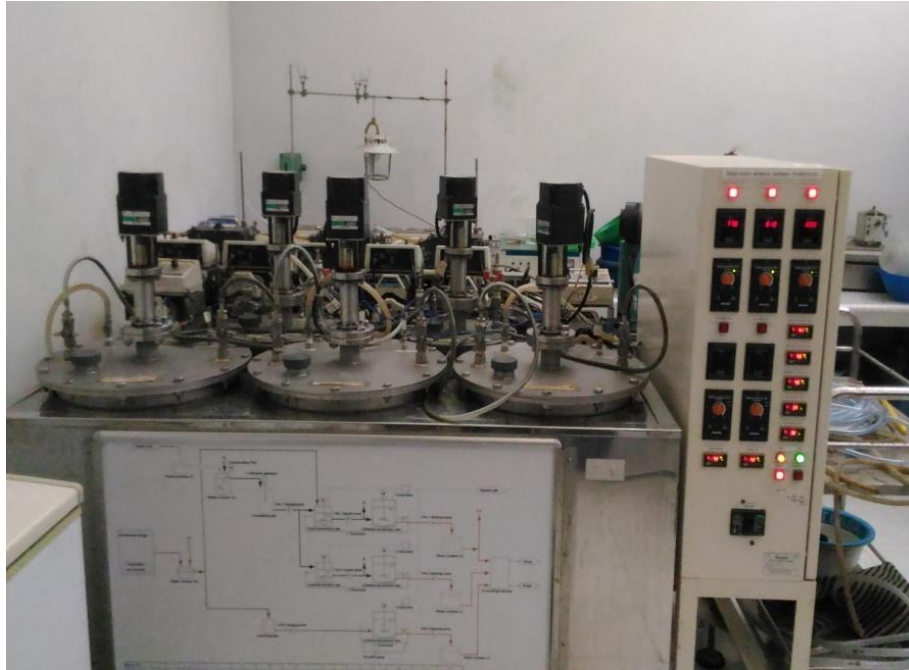
A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan pada Bulan Agustus 2015 sampai dengan Maret 2016 dan pengambilan sampel air limbah cair berasal dari Industri Pabrik Kelapa Sawit PT. Perkebunan Nasional VII Bekri, Lampung Tengah. Sedangkan untuk pemeriksaan secara laboratorium dilakukan di Laboratorium Limbah THP Universitas Lampung dan Laboratorium Analisis Politeknik Negeri Lampung.

B. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan adalah limbah cair pabrik kelapa sawit dari Industri Pabrik Kelapa Sawit PT. Perkebunan Nasional VII Bekri, Lampung Tengah, kotoran sapi, Kalium Dikromat, Fero Amonium Sulfat, Asam Sulfat, Natrium Hidroksida, Aquades, Aquabides, Kertas Saring bahan kimia lain yang digunakan untuk analisis COD, TSS, VSS, VFA dan Gas Metana.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Bench Scale Advance Methane Fermentation* yang dilengkapi dengan pengaduk (bioreaktor CSTR), *Gasflow Meter*, *gas sampler bag*, pH meter, termometer, neraca analitik, *furnace*, spektrofotometer, gas kromatografi dan beberapa alat gelas lainnya.



Gambar 5. Bioreaktor fermentasi anaerobik *Completely Stirred Tank Reactor* (CSTR)

C. Metode Penelitian

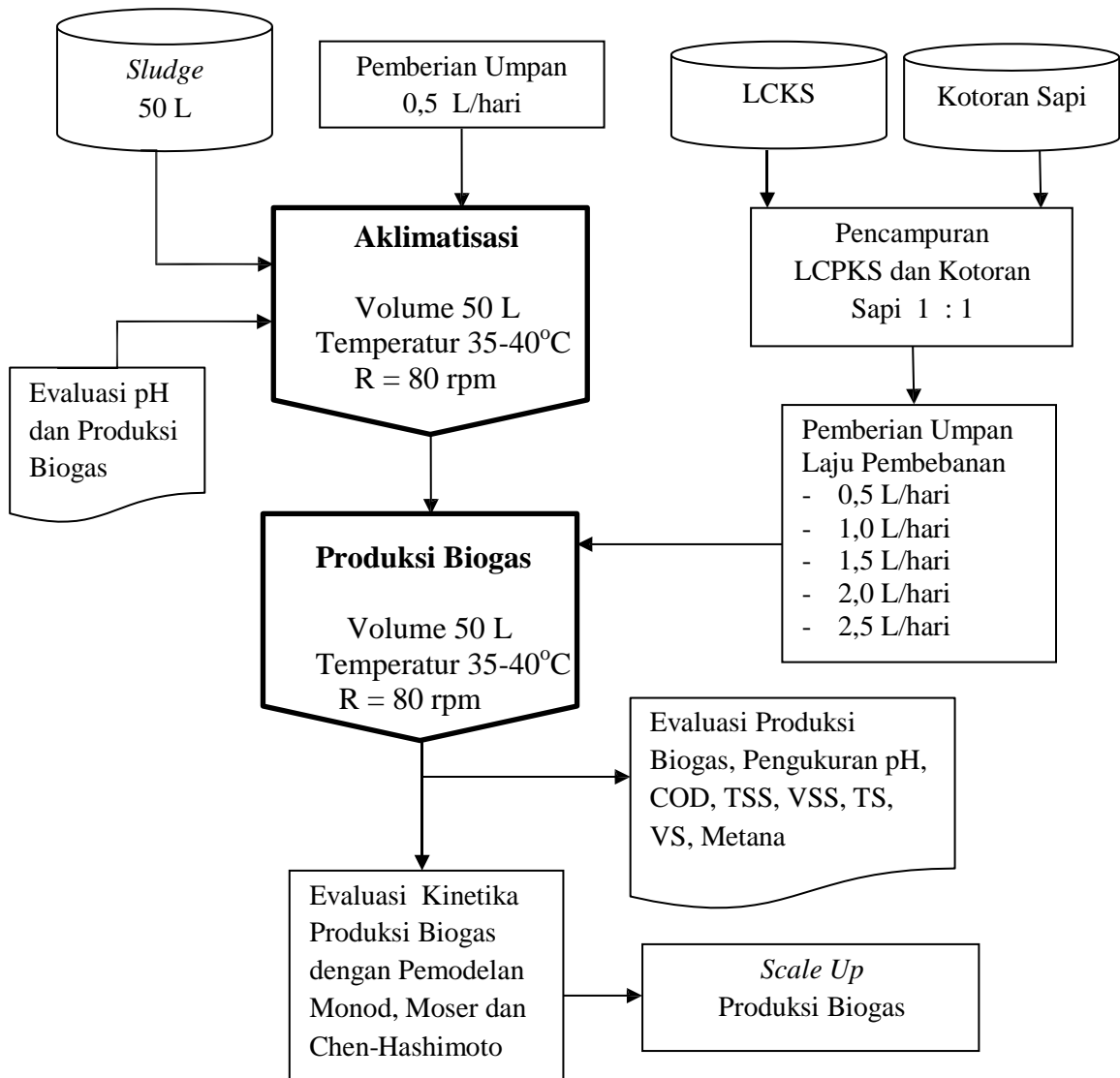
Penelitian ini menggunakan eksperimen laboratorium. Kegiatan dilaksanakan di Laboratorium Limbah THP Universitas Lampung dan Laboratorium Analisis Politeknik Negeri Lampung, baik proses produksi biogas maupun analisis bahan baku dan produk biogasnya. Metode penelitian yang digunakan adalah metode deskriptif dengan menyajikan hasil pengamatan dalam bentuk tabel dan grafik dan dianalisis secara deskriptif dengan menggunakan tiga bioreaktor kapasitas masing-masing 50 L. Proses penelitian dilaksanakan dengan 3 tahap yaitu aklimatisasi, proses produksi biogas dan evaluasi kinetika produksi biogas.

1. Aklimatisasi

Pada proses aklimatisasi masing-masing bioreaktor dimasukkan *sludge* yang banyak mengandung bakteri metanogen yang berasal dari pengolahan IPAL kolam anaerob pabrik kelapa sawit PTPN VII sebanyak 50L. Sebelumnya *sludge* dikarakterisasi terlebih dahulu dengan mengukur parameter pH, COD, VSS, VS, TSS dan TS. Pemberian umpan limbah cair pabrik kelapa sawit dilakukan dengan penamabahan sebanyak 0,5 liter dan dikeluarkan sebanyak volume yang dimasukkan. Pengamatan dilakukan terhadap perubahan pH dan volume biogas yang dihasilkan serta beberapa parameter lain seperti COD, VSS, VS, TSS dan TS. Pengamatan dilakukan sampai produksi gas yang dihasilkan dan penyisihan COD sudah stabil.

2. Proses Produksi Biogas

Setelah proses aklimatisasi selesai, pemberian umpan dilakukan pada masing-masing bioreaktor. Pemberian perlakuan dibedakan pada laju pembebanan campuran limbah cair pabrik kelapa sawit dan kotoran sapi yang ditambahkan dalam bioreaktor. Pada masing-masing tank akan ditambahkan substrat limbah cair pabrik kelapa sawit dan kotoran sapi dengan perbandingan konsentrasi 50% limbah cair pabrik kelapa sawit dan 50% larutan kotoran sapi, dengan pengulangan sebanyak 3 kali pengulangan. Jumlah laju pembebanan diberikan berbeda dengan variasi pemberian 0,5 L/hari, 1 L/hari, 1,5 L/hari, 2 L/hari dan 2,5 L/hari. Secara keseluruhan skema penelitian dapat dilihat pada gambar 10.



Gambar 6. Metode penelitian proses produksi biogas dengan menggunakan substrat LCPKS dan larutan kotoran sapi

Pemberian campuran limbah cair pabrik kelapa sawit dan larutan kotoran sapi dilakukan dengan mengurangi substrat sebanyak volume yang akan dimasukkan. Persiapan limbah cair pabrik kelapa sawit dan kotoran sapi dilakukan setiap satu minggu sekali. Parameter yang diamati adalah volume gas, suhu, pH, COD, VSS, VS, TSS, TS, dan konsentrasi gas metana. Pengamatan volume biogas, pH dan suhu dilakukan dua hari. Pengamatan COD, VSS, VS, TSS dan TS dilakukan

setiap minggu. Pengamatan konsentrasi gas metana dilakukan setiap kali perlakuan laju pembebanan.

3. Evaluasi Kinetika Produksi Biogas

Pengukuran kinetika produksi biogas dilakukan dengan menggunakan parameter pengujian yang dihasilkan dari proses produksi biogas yaitu : COD, VSS dan HRT. Perlakuan tersebut dilakukan dengan mengaplikasikan persamaan model kinetika Monod, Moser dan Chen-Hashimoto. Dari persamaan model kinetika tersebut akan didapatkan nilai *growth yield* (Y), *endogeneous constant* (K_d), *maximum specific growth rate* (μ_{max}) dan *substrat saturation constant* (K_s). Data-data tersebut digunakan untuk menghitung kinerja bioreaktor kemudian dibandingkan dengan hasil penelitian yang didapatkan, selanjutnya dihitung tingkat penyimpangan datanya (tingkat kesalahan).

D. Pelaksanaan Penelitian

Untuk mempersiapkan jalannya penelitian maka akan dilakukan analisis terhadap limbah cair pabrik kelapa sawit, *sludge* dan larutan kotoran sapi untuk menentukan karakteristik dari semua bahan baku tersebut. Analisis yang dilakukan adalah COD, VSS, VS, TSS dan TS

Tahap selanjutnya adalah aklimatisasi cairan limbah cair pabrik kelapa sawit dan *sludge*. Setelah proses aklimatisasi selesai dan produksi gas stabil pemberian cairan limbah cair pabrik kelapa sawit dan larutan kotoran sapi ditambahkan. pH substrat stabil pada nilai 6,5 – 7,5 proses aklimatisasi limbah cair pabrik kelapa sawit dan *sludge* dimulai dengan penambahan limbah cair pabrik kelapa sawit

pada tiap-tiap bioreaktor dengan laju pembebanan yang berbeda. Perlakuan masing-masing bioreaktor setelah aklimatisasi dilakukan dengan pemberian limbah cair pabrik kelapa sawit yang berbeda setelah produksi gas stabil.

Fermentasi dilakukan dengan 3 kali pengulangan yang dilakukan secara bersamaan. Parameter yang diamati adalah volume biogas, suhu, pH, COD, VSS, VS, TSS, TS dan konsentrasi gas metana.

E. Pengamatan

1. Pengukuran Volume Gas

Pengukuran produksi biogas menggunakan gas meter. Hasil yang ditunjukkan oleh gas meter dicatat ke dalam lembar data setiap hari. Volume biogas didapat dengan cara mengurangi pencatatan hari pada saat pengukuran dengan pencatatan hari sebelumnya (Shinagawa Corporation, 2006).

2. Pengukuran pH dan Suhu

Pengukuran pH dan suhu limbah dilakukan dengan menggunakan alat pH meter secara langsung setelah sampel dikeluarkan dari dalam bioreaktor. Caranya dengan memasukkan pH meter ke dalam sampel limbah sambil diaduk kemudian catat nilai pH dan suhu yang terbaca pada alat (DKK-TOA Corporation, 2004).

3. Pengukuran VSS dan TSS

Pengukuran produksi TSS dan VSS dilakukan dengan metode gravimetri. Sebanyak 50 mL sampel limbah keluaran dari bioreaktor dimasukkan ke dalam

tabung sentrifius kemudian disentrifius dengan kondisi pengoperasian sentrifius pada putaran 300 rpm selama 15-20 menit. Endapan yang terbentuk dari hasil sentrifius dimasukkan ke dalam cawan porselin yang telah diketahui berat keringnya kemudian cawan + sampel dimasukkan ke dalam elektrik oven pada 105°C selama 2 jam. Setelah 2 jam cawan + sampel dimasukkan ke dalam desikator sekitar 30 menit atau sampai suhu ruang kemudian ditimbang. Selisih berat cawan + sampel setelah dioven pada 105°C selama 2 jam dengan berat kering cawan kosong dibagi volume sampel yang disentrifius dalam Liter adalah TSS (APHA, 1998).

$$TSS = \frac{\text{berat cawan setelah dioven } 105^{\circ}\text{C, 2 jam (g)} - \text{berat kering cawan (g)}}{\text{volume sampel yang disentrifius (L)}}$$

Kemudian cawan + sampel yang telah dioven 105°C dan ditimbang pada analisis TSS dimasukkan ke dalam *electrical furnace* pada temperatur 600°C selama 40 menit, setelah 40 menit biarkan cawan + sampel dalam *furnace* hingga suhu dalam *furnace* turun sampai 60°C cawan dimasukkan ke dalam desikator selama 30 menit atau sampai suhu ruang dan setelah itu ditimbang. Selisih berat cawan + sampel setelah dioven pada 105°C selama 2 jam dengan cawan + sampel setelah ditanur pada 600°C dan dibagi dengan volume sampel yang disentrifius dalam liter merupakan nilai VSS (APHA, 1998).

$$VSS = \frac{\text{berat cawan setelah dioven } 105^{\circ}\text{C, 2 jam (g)} - \text{berat cawan setelah di tanur (g)}}{\text{volume sampel yang disentrifius (L)}}$$

4. Pengukuran COD

Senyawa organik dan anorganik, terutama organik dalam contoh uji dioksidasi oleh $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ dalam refluks tertutup menghasilkan Cr^{3+} . Jumlah oksidan yang dibutuhkan dinyatakan dalam ekuivalen oksigen (O_2 mg/L) diukur secara spektrofotometri sinar tampak. $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ kuat mengabsorpsi pada panjang gelombang 420 nm dan Cr^{3+} kuat mengabsorpsi pada panjang gelombang 620 nm.

a. Bahan :

1. Air bebas organik
2. *Digestion solution* pada kisaran konsentrasi tinggi. Tambahkan 10,216 g $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ yang telah dikeringkan pada suhu $150\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam ke dalam 500 mL air suling. Tambahkan 167 mL H_2SO_4 pekat dan 33,3 g HgSO_4 . Larutkan dan dinginkan pada suhu ruang dan encerkan sampai 1000 mL.
3. *Digestion solution* pada kisaran konsentrasi rendah. Tambahkan 1,022g $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ yang telah dikeringkan pada suhu $150\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam ke dalam 500 mL air suling. Tambahkan 167 mL H_2SO_4 pekat dan 33,3 g HgSO_4 . Larutkan dan dinginkan pada suhu ruang dan encerkan sampai 1000 mL.
4. Larutan pereaksi asam sulfat
Larutkan 10,12g serbuk atau kristal Ag_2SO_4 ke dalam 1000 mL H_2SO_4 pekat. Aduk hingga larut.
5. Asam sulfamat ($\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$). Digunakan jika ada gangguan nitrit. Tambahkan 10 mg asam sulfamat untuk setiap mg $\text{NO}_2\text{-N}$ yang ada dalam contoh uji.

6. Larutan baku Kalium Hidrogen Ftalat ($\text{HOOC}_6\text{H}_4\text{COOK}$, KHP) \approx COD 500 mg O_2/L . Gerus perlahan KHP, lalu keringkan sampai berat konstan pada suhu 110°C . Larutkan 425 mg KHP ke dalam air bebas organik dan tepatkan sampai 1000 mL. Larutan ini stabil bila disimpan dalam kondisi dingin pada temperatur $4^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ dan dapat digunakan sampai 1 minggu selama tidak ada pertumbuhan mikroba.
7. Bila nilai COD contoh uji lebih besar dari 500 mg/L, maka dibuat larutan baku KHP yang mempunyai nilai COD 1000 mg O_2/L .
8. Larutan baku KHP dapat menggunakan larutan siap pakai.

b. Peralatan Pengujian COD

1. Spektrofotometer HACH DR4000 sinar tampak (400 nm sampai dengan 700 nm)
2. Kuvet
3. *Digestion vessel*, lebih baik gunakan kultur tabung borosilikat dengan ukuran 16 mm x 100 mm; 20 mm x 150 mm atau 25 mm x 150 mm bertutup ulir. Atau alternatif lain, gunakan ampul borosilikat dengan kapasitas 10 mL (diameter 19 mm sampai dengan 20 mm)
4. Pemanas dengan lubang-lubang penyangga tabung (*heating block*)
5. Buret
6. Labu ukur 50 mL; 100 mL; 250 mL; 500 mL dan 1000 mL
7. Pipet volumetrik 5 mL; 10 mL; 15 mL; 20 mL dan 25 mL
8. Gelas piala
9. *Magnetic stirrer*

c. Persiapan Contoh Uji

Homogenkan contoh uji, kemudian cuci *digestion vessel* dan tutupnya dengan H₂SO₄ 20 % sebelum digunakan. Bila contoh uji tidak dapat segera diuji, maka contoh uji diawetkan dengan menambahkan H₂SO₄ pekat sampai pH lebih kecil dari 2 dan disimpan dalam pendingin pada temperatur 4°C ± 2°C dengan waktu simpan maksimum yang direkomendasikan 7 hari.

d. Pembuatan Larutan Kerja

Buat deret larutan kerja dari larutan induk KHP dengan 1 (satu) blanko dan minimal 3 kadar yang berbeda secara proporsional yang berada pada rentang pengukuran.

e. Prosedur Kerja

1. Pipet volume contoh uji atau larutan kerja, tambahkan *digestion solution* dan tambahkan larutan pereaksi asam sulfat yang memadai ke dalam tabung atau ampul, seperti yang dinyatakan dalam tabel berikut:

Tabel 1. Contoh uji dan larutan pereaksi untuk bermacam-macam *digestion vessel*

<i>Digestion Vessel</i>	Contoh uji (mL)	<i>Digestion Solution</i> (mL)	Larutan Pereaksi Asam (mL)	Total Volume (mL)
Tabung kultur				
16 x 100 mm	2,50	1,50	3,5	7,5
20 x 150 mm	5,00	3,00	7,0	15,0
25 x 150 mm	10,00	6,00	14,0	30,0
Standar Ampul:				
10 mL	2,50	1,50	3,5	7,5

2. Tutup tabung dan kocok perlahan sampai homogen
3. Letakkan tabung pada pemanas yang telah dipanaskan pada suhu 150 °C, lakukan refluks selama 2 jam. Selalu gunakan pelindung wajah dan sarung tangan untuk melindungi dari panas dan kemungkinan menyebabkan ledakan tinggi pada suhu 150 °C.

f. Pembuatan Kurva Kalibrasi

Kurva kalibrasi dibuat dengan tahapan sebagai berikut:

1. Hidupkan alat dan optimalkan alat uji spektrofotometer sesuai petunjuk penggunaan alat untuk pengujian COD. Atur panjang gelombangnya pada 620 nm
2. Ukur serapan masing-masing larutan kerja kemudian catat dan plotkan terhadap kadar COD
3. Buat kurva kalibrasi dari data di atas dan tentukan persamaan garis lurus nya
4. Jika koefisien korelasi regresi linier (r) < 0,995, periksa kondisi alat dan ulangi proses analisis hingga diperoleh nilai koefisien $r \geq 0,995$.

g. Pengukuran Contoh Uji

Untuk contoh uji COD 100 mg/L sampai dengan 900 mg/L

1. Dinginkan perlahan-lahan contoh yang sudah direfluks sampai suhu ruang untuk mencegah terbentuknya endapan. Jika perlu, saat pendinginan sesekali tutup contoh dibuka untuk mencegah adanya tekanan gas;

2. Biarkan suspensi mengendap dan pastikan bagian yang akan diukur benar-benar jernih;
3. Ukur serapan contoh uji pada panjang gelombang yang telah ditentukan (620 nm);
4. Hitung kadar COD berdasarkan persamaan linier kurva kalibrasi;
5. Lakukan analisa duplo.

Apabila kadar contoh uji berada di atas kisaran pengukuran, lakukan pengenceran.

Perhitungan

Nilai COD sebagai mg O₂/L:

$$\text{Kadar COD (mg O}_2\text{/L)} = C \times f$$

Keterangan:

- C adalah nilai COD contoh uji, dinyatakan dalam miligram per liter (mg/L)
- f adalah faktor pengenceran.
- Masukkan hasil pembacaan serapan contoh uji ke dalam regresi linier yang diperoleh dari kurva kalibrasi.
- Nilai COD adalah hasil pembacaan kadar contoh uji dari kurva kalibrasi.

5. Pengukuran Konsentrasi Biogas

Pengukuran konsentrasi biogas dilakukan dengan cara menampung gas yang terbentuk pada bioreaktor ke dalam gas sampler kemudian sampel gas dianalisis dengan menggunakan *Gas Chromathography* (GC) untuk mengetahui jenis gas yang ada berikut dengan konsentrasinya (Shimadzu Corporation, 2004).

V. SIMPULAN DAN SARAN

A. SIMPULAN

1. Penggunaan kotoran sapi terhadap substrat LCPKS dapat meningkatkan produksi biogas yang dihasilkan dari masing-masing perlakuan mengalami peningkatan sampai laju alir 2,0 L/hari atau laju pembebanan 2,1884 Kg/m³/hari yaitu mencapai rata-rata 28,17 L/hari.
2. Laju alir yang mempunyai COD removal tertinggi terdapat pada laju alir 0,5 L/hari yaitu sebesar 75,68% hampir sama pada perlakuan laju alir 1,0 L/hari yaitu sebesar 75,28%, namun nilai konversi COD menjadi metana tertinggi, terdapat pada laju alir 1,0 L/hari atau laju pembebanan 0,9956 kg/m³/hari. Penetapan tersebut didasari oleh perolehan nilai konversi COD menjadi metana yang paling tinggi yaitu 0,320 L CH₄/gCOD *removal* pada kondisi STP atau 0,362 pada temperatur 35°C.
3. Penggunaan ketiga pemodelan kinetika Monod, Moser dan Chen-Hashimoto memberikan respon yang baik dengan tingginya nilai korelasi dari ketiga persamaan tersebut, namun model kinetika Moser mempunyai nilai korelasi yang sangat baik yaitu sebesar 0,9767.

B. Saran

1. Selain produksi biogas yang dihasilkan dari substrat LCPKS dan larutan kotoran sapi, perlu adanya evaluasi terhadap kualitas dari sludge yang dapat digunakan sumber unsur hara pupuk cair.
2. Perlu adanya evaluasi terhadap proses *recycle* substrat outlet untuk menjaga jumlah bakteri tetap meningkat pada bioreaktor sehingga produksi metana lebih meningkat

DAFTAR PUSTAKA

- Agustine, R. 2011. Produksi Biogas dari Palm Oil Mill Effluent (POME) dengan penambahan kotoran sapi sebagai aktivator. Skripsi IPB Bogor
- Alqahtani, R.T. 2013. Modelling of Biological Wastewater Treatment. University of Wollongong. New South Wales. Australia.
- Amelia J.R. 2012. Rekayasa Proses Aklimatisasi Bioreaktor Akibat Perubahan Substrat dari Thinslop ke Vinnase. Tesis Universitas Lampung Bandar Lampung.
- Amri Qayuum. 2015. Kebutuhan Minyak Nabati Dunia Tergantung pada CPO Indonesia. *Majalah Sawit Indonesia*. Jakarta.
- Andriani. 2003. Escherichia Coli 01157 H:7 sebagai Penyebab Penyakit Zoonosis. *Balai Penelitian Veteriner*. Bogor.
- Badan Pusat Statistik. 2015. Ekspor Minyak Kelapa Sawit Menurut Negara Tujuan Utama, 2008-2014. Badan Pusat Statistik. <http://www.bps.go.id/linkTabelStatis/view/id/1026> Diunduh tanggal 14 Mei 2016
- Bambang S., Kusuma D., Wisri P., Mahendri dan Bess T. 2011. Peta Potensi dan Sebaran Perkebunan Kelapa Sawit di Indonesia : Sistem Integrasi Sapi-Kelapa Sawit (SISKA). *Pusat Penelitian dan Pengembangan Peternakan. Balai Penelitian dan Pengembangan Pertanian*. Kementerian Pertanian.
- Bangun R. 2010. Analisis Sistem Integrasi Sapi-Kebun Kelapa Sawit dalam Meningkatkan Pendapatan Petani di Kabupaten Rokan Hulu Provinsi Riau. Tesis Universitas Andalas Padang.
- Benefield, L.D. dan Randall C.W. 1980. *Biological Process Design for Waste Water Treatment* Prentice. Hall, Inc. Englewood Cliffs. 526 Halaman.
- Budiyono., Mariyah E.P. dan Noviantari Y. 2013. Pengaruh Metode Fermentasi, Komposisi Umpan, pH Awal, dan Variasi Pengenceran terhadap produksi Biogas dari Vinasse. *Jurnal Penelitian Kimia*. Vol. 9, No. 2, hal. 1-12. Universitas Dipenogoro. Semarang.

- Cahyono A., Faridah E., Wulandari D. dan Purwanto B.H. 2014. Peran Mikroba Stater dalam Dekomposisi Kotoran Ternak dan Perbaikan Kualitas Pupuk Kandang. Skripsi Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Chen, Y. dan Hashimoto, A.G. 1978. Kinetic Methane Fermentation : *Biotechnol, Bioeng. Vol 8*, pp. 269-282.
- Classen PAM, Van Lier JB, Lopez Contreras AM, Van Niel EWJ, Sittsma L, Stams AJ, De Vries S.S. dan Westhuis R.A. 1999. *Utilisation of biomass for the supply of energy carries. Appl. Microbiol. Biotechnol. 52: 741-755.*
- Conrad, R. 1999. Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen concentration in methanogenic soils and sediments. *FEMS Microbiol. Ecol. 28: 193-202.*
- Contois, D.E. 1959. *Kinetics of Bacterial Growth : Relationship Between Population Density and Space Growth Rate of Continuous Cultures, J. Gen Microbiol. 21, 40-50.*
- De Bok F.A.M., Harmsen H.J.K., Plugge C.M., De Vries M.C., Akkermans A.D.L, De Vos W.M. dan Stams A.J.M. 2005. The first true obligatory syntrophic propionate-oxidizing bacterium, *Pelotomaculum Schinkii* sp. nov., co-culture with *Methanospirillum hungatei*, and emended description of the genus *Pelotomaculum*. *Int. J. Syst. Evolut. Microbiol. 55: 1697-1703.*
- Ditjen Peternakan dan Kesehatan Hewan. 2015. *Laporan Kinerja Tahun 2014. Direktorat Jendral Peternakan dan Kesehatan Hewan. Kementerian Pertanian. Jakarta Selatan.*
- Ditjen Perkebunan. 2015. *Statistik Perkebunan Indonesia 2014. Ditjen Perkebunan Departemen Pertanian. Jakarta.*
- Finstein MS (2010). Suitability of anaerobic digestion variants for the treatment of municipal soild waste. *Anaer. Digest. Technol. 4: 1-6.*
- Gerardi, M.H. 2003. *The Microbiology of Anaerobic Digesters. Wiley-Interscience. A Jhon Wiley and Sons, Publication. United State of America. 188 Halaman.*
- Grady. C.P.L. and H. C. Lim. 1980. *Biological Wastewater Treatment, Theory and Applications. Marcel Dekker Inc. New York.*

- Gubernur Provinsi Lampung. 2010. *Peraturan Gubernur Lampung 07 tentang Baku Mutu Air Limbah di Provinsi Lampung*. Pemerintah Provinsi Lampung.
- Griffin M.E., McMahon K.D., Mackie R.I. dan Raskin L. 2000. Methanogenic population dynamics during start-up of anaerobic digesters treating municipal solid waste and biosolids. *Biotechnol. Eng.* 57: 342-355.
- Hasanudin, U. 1993. Pengolahan limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit dengan Bioreaktor Unggun Fluidisasi Anaerobik Dua Tahap. Tesis. Program Studi Teknik Kimia. Tesis ITB. Bandung. 197 halaman.
- Hasanudin, U. Suroso, E. Risfaheri dan Misgiyarta. 2007. Optimasi Fermentasi Air Limbah Tapioka Sebagai Sumber Biogas. Laporan Hasil Penelitian. Universitas Lampung.
- Haandel A C dan Lubbe J.G.M. 2012. *Handbook of Biological Wastewater Treatment Design and Optimisation of Activated Sludge Systems Second Edition*. London.
- Herawati, D.A. dan Arif W.A. 2010. Pengaruh Pretreatment Jerami Padi pada Produksi Biogas dari Jerami Padi dan Sampah Sayur Sawi Hijau secara Batch. *Jurnal Rekayasa Proses Vol. 4*. Universitas Setia Budi.
- Hu, W.C., Thayanithy, K. dan Forster, C.F. 2001. Kinetic Study of Anaerobic Digestion of Sulphate-Rich Wastewaters from Manufacturing Food Industries. *School of Chemical Engineering. University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham. United Kingdom*.
- Igoni, A.H., Ayotamuno, M.J., Eze, C.L., Ogaji, S.O.T. dan Probert, S.D. 2008. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solidwaste. *Applied Energy* 85: 430 – 438.
- Khaerunnisa Gita. dan Rahmawati Ika. 2013. Pengaruh pH dan Rasio COD : N Terhadap Produksi dengan Bahan Baku Limbah Industri Alkohol (Vinasse). *Jurnal Teknologi Kimia dan Industri*, Vo. 2, No. 3, Hal. 1-7 Universitas Diponegoro. Semarang.
- Karakashev D, Batstone DJ, Angelidaki I (2005). Influence of environmental conditions on methanogenic compositions in anaerobic biogas reactors. *Appl. Environ. Microbiologi.* 71: 331-338.
- Kharpour, M., Najafpour, G.D., Ghoreyshi, A., Jahanshahi, M dan Bambai, B. 2011. Biodesulfurization of Natural Gas : *Growth Kinetic Evaluation*. Babol. Iran.

- Michaelis, L. dan Menten, M.L. 1913. *Die Kinetic Investinwerking (The Kinetic of Investase Action, Translated by Roger S. Goody and Kenneth). Biochem. Ze. 49. 334-369.*
- Muchlis dan Permana, A.D. 2013. *Proyeksi Kebutuhan Listrik PLN Tahun 2003 s/d 2020.* RUPTL-PLN.
- Lim Soo King dan Yu Low Chong. 2013. A Retrofitted Palm Oil Mill Effluent Treatment for Tapping Biogas. *European International Journal of Science and Technology.* ISSN : 2304-9693. Kuala Lumpur.
- Liu, C-f., Yuan, X-z., Zeng, G-m., Li, W-w., Li, J. 2008. Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology* 99: 882 – 888.
- Luthfianto Dodik, Edwi Mahajoeno, Sunarto. 2012. Pengaruh Macam Limbah Organik dan Pengenceran terhadap Produksi Biogas dari Bahan Biomassa Peternakan Ayam. *Bioteknologi* 9 (1) : ISSN : 0216-6887.
- Mawarti, Syarif, Zulfansyah. 2012 Pengolahan Limbah Cair Pabrik CPO dengan Teknologi Ozonasi. Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik. Skripsi Universitas Riau. Riau
- Mahajoeno E., Widiyati B.L., Sutjahjo S.H., Siswanto. 2008. Potensi Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit untuk Produksi Biogas. Disertasi IPB Bogor.
- Mahanta, D.J., Borah, M., dan Saikia, P. 2014. A Study on Kinetic Models for Analysing the Bacterial Growth Rate. *Department of Mathematical Science Tezpur University, Napaam.*
- Malangyudo, A. 2011. Flow Proses Pabrik Kelapa Sawit. <http://arieyoedo.blogspot.co.id/2011/03/tanya-jawab-pabrik-kelapa-sawit.html>. Diunduh tanggal 12 Juni 2015.
- Mashaphu, N. 2005. The microbial composition of natural mathanogenic consortium. A thesis M.Sc. University of Western Cape.
- Menteri Lingkungan Hidup. 2014. *Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Minyak Sawit.* Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. Jakarta.
- Medigan, M.T., Martinko, J.M. dan Parker, J. 2000. Brock biology of microorganisms. *Prentice Hall International*, New Jersey.
- Monod, J. 1942. *Recherches Sur La Croisances des Cultures Bacteriennes.* 2nd Edition. Hermann et Cie. Paris.

- Moser, H. 1958. *The Dynamic of Bacterial Population Maintained in the Chemostat*. Carnegie Institute. Washinton D.C.
- Nasir I.M., Mohd G., Omar R. dan Idris A., 2012. Anaerobic Digestion of Cattle Manure : Influence of Inoculum Concentration. Universiti Putra Malaysia. Serdang, Selangor, Malaysia.
- Nasir I.M., Mohd G., Omar R. dan Idris A., 2013. Palm Oil Mill Effluent as an Additive with Cattle Manure in Biogas Production. *International Convergence on Advances Science and Contemporary Engineering 2012*. Universiti Putra Malaysia.
- Nasution, M.A. 2012. Pengolahan LCPKS keluaran Fat pit, Kolam Anaerobik dan Reaktor Biogas dengan Elektrokoagulasi. Bogor. *Prosiding InSINas 2012*.
- Ni'mah, L. 2014. Biogas From Solid Waste Of Tofu Production and Cow Manure Composition Effect. *Jurnal Chemica Vol.1 No.1 Juni 2014*, 1-9.
- Ntaikou I., Gavala H.N. dan Lyberatos G. 2010 Application of Modified Anaerobic Digestion Model 1 version for Fermentative Hydrogen Production from Sweet Sorghum Extract by *Ruminococcus albus*. *Department of Chemistry and Bioscience*. Aalborg University Copenhagen.
- Persson, T. dan Baxter, D. 2015. Country Summary Report 2014. European Commission, Joint Research Centre, *Institute for Energy and Transport* (Netherlands)
- Raghuvanshi S. and Babu, B.V. 2010. Biodegradation kinetics of methyl isobutyl ketone by acclimated mixed culture. *Biodegradation*, 31-42
- Rosadi, H.Y. 2000. Pemodelan Continuous Stirred Tank Reactor. Program Pascasarjana Teknologi Industri Pertanian . Tesis IPB. Bogor.
- Riliandi, D.H. 2010. Studi Pemanfaatan Kotoran Sapi untuk Genset Listrik Biogas, Penerangan dan Memasak Menuju desa Nongkojajar (Kecamatan Tukur) Mandiri Energi. Skripsi ITS . Surabaya.
- Sakinah., Abu Bakar Tawali., Musrizal Muin. 2012. Pengaruh Konsentrasi Biostater Kotoran Sapi dan Kotoran Ayam pada Produksi Biogas dengan menggunakan Limbah Jerami Padi. Universitas Hasanuddin. Makasar.
- Sarono, 2013. Strategi Pengurangan Gas Rumah Kaca Melalui Konversi Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit menjadi Energi Listrik (Studi Kasus di Lampung). Disertasi. IPB. Bogor.

- Sastika Yuliana, Dharma Abdi dan Mardiah Elida. 2013. Produksi Biogas dari Kombinasi Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit dan Sampah Sawi Hijau dalam Sistem Batch. *Jurnal Kimia Unand* (ISSN No. 2303-3401), Volume 2.
- Schink, B. 1997. Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiol Mol Biol Rev* 61: 262-280.
- Santosh Y, Sreekrishnan TR, Kohli S, Rana V (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques-a review. *Bioresour. Technol.* 95: 1-10.
- SaxenaRC, Adhikari DK, Goyal HB (2009). Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review, *Renewable Sustainable Energy Rev.* 13: 167-178.
- Scherer, P.A., Vollmer, G.R., Fakhouri T. dan Martensen, S. 2000. Development of methanogenic process to degrade exhaustively the organic fraction of municipal grey waste under thermophilic and hyperthermophilic conditions. *Water Sci. Technol.* 41: 83-91.
- Sidik U.H., Firdausi, Rafidah S. dan Maigari F. 2013. Biogas Production through CO₂-digestion of Palm Mill Effluent with Cow Manure. *Nigerian Journal of Basic and Applied Science*. Universiti Teknologi Malaysia.
- Soegiman, Bucman, Harry. O. dan Brady N.C. 1982. *Ilmu Tanah terjemahan* . 1982. Brata Karya Aksara. Jakarta. 788 Halaman.
- Sulaiman I, Arifin A N dan Ereskayanto. 2013. Integrasi Sawit-Sapi di PT Perkebunan Nusantara VI (Persero). *Seminar Nasional Teknologi Peternakan dan Veteriner 2013*.
- Syafriudin dan Hanesya Rio. 2012. Perbandingan Penggunaan Energi Alternatif Bahan Bakar Serabut (Fiber) dan Cangkang Kelapa Sawit Terhadap Bahan Bakar Batubara dan Solar padaPembangkit Listrik. Institut Sains dan Teknologi AKPRIND Yogyakarta.
- Tchobanoglous G., Buton F.L. dan Stensel H.D. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse (fourth Edition)*. Metcalf and Eddy Inc.
- Tyas, D. R. N. dan Wardhani, G.S. 2010. Pengaruh COD Influent Terhadap Produksi Biogas dari Limbah Cair Pabrik Etanol dengan Bioreaktor 5000L. Skripsi. Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- Tong, SL. 2011. Recents Development On Palm Oil Mill Residues Biogas Recovery and Utilization. *International Conference an Exhibition of Palm Oil*. Jakarta.

- Ulum, M. 2014. Statistik Kelapa Sawit Indonesia 2014. Badan Pusat Statistik Indonesia. Katalog BPS no. 5504003.
- Wahyuni Sri. 2013. *Panduan Praktis Biogas*. Penebar Swadaya. Jakarta.
- Windyaswara Ludfida., Pertiwiningrum Ambar., dan Yusianti Lies Mira. 2012. Pengaruh Jenis Kotoran Ternak Sebagai Substrat dengan Penambahan Serasah Daun Jati (*Tectona grandis*) terhadap Karakteristik Biogas pada Proses Fermentasi. *Buletin Peternakan Vol. 36(1) : 40-47*.
- Widyastuti, F.R., Purwanto dan Hadiyanto. 2013. Potensi Biogas Melalui Pemanfaatan Limbah Padat pada Peternakan Sapi Perah Bangka Botanical Garden Pangkal Pinang. Jurusan Teknik Kimia. Skripsi. Universitas Dipenogoro. Semarang.
- Veeken, A., Kalyuzhnyi, S., Scharff, H. dan Hamelars, B. 2000. Effect of pH and VFA on hydrolysis of organic solid waste. *Journal of Environmental 9 Engineering, Vol. 126, No.12*, page 1076 – 1081.
- Verstraete, W., Doulami, F., Volcke, E., Tavarnier, M., Nollet, H. dan Roels J. 2002. *The importance of anaerobic digestion for global environmental development. J. Environ. Syst. Eng.* 706: 97-102.
- Yahaya S., Madaki. dan Lau Seng. 2013. Palm Oil Mill Effluent (POME) from Malaysia Palm Oil Mills : Waster or Resource. Intitute of Biodiversity and Environmental Cocervation. Universiti Malaysia Serawak.
- Zakariah, A. 2013. Fermentasi Gas Metan. <http://maskarizakariah.blogspot.co.id/2013/03/pendahuluan-gasmetan-termasuk-gas-rumah.html>
Diunduh tanggal 12 Juni 2015.