

**KINETIKA PROSES PENGOLAHAN LIMBAH CAIR
PABRIK MINYAK KELAPA SAWIT DALAM
BIOREAKTOR ANAEROBIK SKALA PILOT**

Tesis

Oleh

Shintawati



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

**KINETIKA PROSES PENGOLAHAN LIMBAH CAIR
PABRIK MINYAK KELAPA SAWIT DALAM
BIOREAKTOR ANAEROBIK SKALA PILOT**

Oleh

Shintawati

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER SAINS

Pada

Program Pascasarjana Magister Teknologi Industri Pertanian
Fakultas Pertanian Universitas Lampung



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

ABSTRACT

KINETICS OF ANAEROBIC CPO WASTE WATER TREATMENT IN PILOT SCALE

Shintawati

CPO industrial waste water contains high concentration of organic pollutants and through anaerobic treatment potentially produce electricities. Design and operational of anaerobic bioreactor requires understanding of kinetics that were occurring in the bioreactor.

This study aims to determine kinetic parameters of growth and substrat utilization and to estimate production of methan gas using CIGAR bioreactor in pilot scale. Four m³ seed was collected from anaerobic pond of PTPN VII Bekri and introduced into 5 m³ CIGAR bioreactor. The kinetics of anaerobic degradation were held by fed the substrat semicontinually at a loading rate of 100 to 250 liter/day.

Results showed, Moser and first order reaction kinetics represented the microbial activities in the bioreactor. Moser biokinetic coefficients : maksimum growth rate, μ_{mak} and saturation constant, K_s were 0,0395 day⁻¹ and 22,2213 g/l. Maximum substrat utilization, k_s and biomass yield, $Y_{x/s}$ were 1,110 day⁻¹ and 0,036. The maximum efficiency of anaerobic degradation was 82,71% and maximum methan production was 0,32 m³CH₄/kg CODremoval.

Keywords : Kinetics, anaerobic dan bioreactor

ABSTRAK

KINETIKA PROSES PENGOLAHAN LIMBAH CAIR PABRIK MINYAK KELAPA SAWIT KASAR DALAM BIOREAKTOR ANAEROBIK SKALA PILOT

Shintawati

Limbah cair industri CPO mengandung senyawa organik dengan konsentrasi tinggi dan melalui pengolahan anaerobik berpotensi menghasilkan energi listrik. Operasional dan design bioreaktor pengolahan limbah secara anaerobik membutuhkan pemahaman kinetika proses.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan parameter kinetika pertumbuhan mikroba dan pemanfaatan substrat pada proses degradasi anaerobik limbah cair pabrik minyak kelapa sawit dalam bioreaktor CIGAR serta mengestimasi gas metan yang dihasilkan. Biakan mikroba sebanyak 4 m³ yang berasal dari kolam anaerobik PTPN VII Bekri, diumpungkan kedalam bioreaktor bervolume 5 m³. Penentuan kinetika proses anaerobik dilaksanakan dengan mengumpungkan limbah cair segar secara bertahap sebanyak 100 liter/hari hingga 250 liter/hari.

Hasil penelitian menunjukkan kinetika Moser dan kinetika reaksi orde pertama mewakili penelitian ini. Diperoleh parameter kinetika laju pertumbuhan maksimum, $\mu_{\max} = 0,0395 \text{ hari}^{-1}$, laju pemanfaatan substrat maksimum, $k_s = 1,110 \text{ hari}^{-1}$, konstanta kejenuhan substrat $K = 22,2213 \text{ g/l}$ dan perolehan sel, $Y_{x/s} = 0,036$. Efisiensi maksimum proses anaerobik diperoleh 82,71% dengan perolehan gas metana $0,32 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{kg COD}$.

Kata kunci : Kinetika, anaerobik dan bioreaktor

Judul Tesis

**: KINETIKA PROSES PENGOLAHAN
LIMBAH CAIR PABRIK MINYAK
KELAPA SAWIT KASAR DALAM
BIOREAKTOR ANAEROBIK SKALA
PILOT**

Nama Mahasiswa

: Shintawati

Nomor Pokok Mahasiswa

: 1324051005

Program Studi

: Magister Teknologi Industri Pertanian

Fakultas

: Pertanian

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing


Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, MT

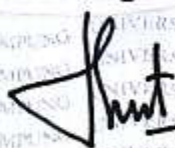
NIP 19640106 198803 1 002


Dr. Ir. Agus Haryanto, MP

NIP 19650527 199303 1 002

2. Ketua Program Studi

Magister Teknologi Industri Pertanian


Dr. Sri Hidayati, STP, MP

NIP. 19710930 199512 2 001

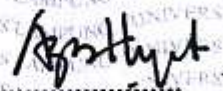
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji :

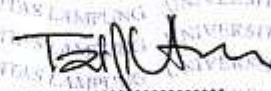
Ketua : Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, MT



Sekretaris : Dr. Ir. Agus Haryanto, MP



Penguji : Dr. Ir. Tanto Pratondo Utomo, MSi.



2. Dekan Fakultas Pertanian



Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si
NIP 19611020 198603 1 002



3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Sudjarwo, M.S.
NIP 19530528 198103 1 002

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 24 November 2016

PERNYATAAN KEASLIAN HASIL KARYA

Saya yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : Shintawati


NPM : 1324051005

Dengan ini menyatakan bahwa apa yang tertulis dalam karya ilmiah ini adalah hasil kerja saya sendiri yang berdasarkan pada pengetahuan dan informasi yang telah saya dapatkan. Karya ilmiah ini tidak berisi materi yang telah dipublikasikan sebelumnya atau dengan kata lain bukan hasil dari plagiat karya orang lain.

Demikianlah pernyataan ini saya buat dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari terdapat kecurangan dalam karya ini, maka saya siap mempertanggungjawabkan.



Bandar Lampung, Nopember 2016
Pembuat Pernyataan,


Shintawati
NPM. 1324051005

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 13 Juli 1975. Penulis merupakan anak keempat dari keluarga Bapak Drs. Maddun Abbas dan Ibu Dra. Ratna Dewi (alm).

Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 2 Rawa Laut pada tahun 1987; Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 2 Tanjung Karang pada tahun 1990; Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 3 Bandung pada tahun 1993. Pada tahun 1993 penulis diterima sebagai mahasiswa Institut Teknologi Bandung Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Kimia dan lulus tahun 1998. Tahun 2013 penulis diterima sebagai mahasiswa pada Program Studi Magister Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

*Apa yang ada di langit dan apa yang ada di bumi senantiasa
bertasbih kepada Allah; milik-Nya semua kerajaan dan bagi-Nya
(pula) segala puji; dan Dia Maha Kuasa atas segala sesuatu*

(At Tagabun:1)

*Dan pada penciptaan dirimu dan pada makhluk bergerak yang
bernyawa yang bertebaran (di bumi) terdapat tanda-tanda (kebesaran
Allah) untuk kaum yang meyakini*

(Al Jasiyah : 4)

Methanogenics glorify God to illuminate the world

SANWACANA

Alhamdulillah, atas rahmat dan ridho-Nya penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul Kinetika Proses Pengolahan Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit Kasar Dalam Bioreaktor Anaerobik Skala Pilot. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, MT selaku pembimbing pertama, atas saran dan bimbingannya selama penelitian dan penyelesaian tesis ini;
2. Bapak Dr. Agus Haryanto, MP selaku pembimbing kedua atas saran dan bimbingannya selama penelitian dan penyelesaian tesis;
3. Bapak Dr. Ir. Tanto Pratondo Utomo, MSi selaku pembahas atas saran, bimbingan dan evaluasinya terhadap penyelesaian tesis.
4. Ibu Prof. Ir. Neti Yuliana, M.Si.,Ph.D. selaku pembimbing akademik;
5. Ibu Dr. Sri Hidayati STP. MP, selaku Ketua Program Studi Magister Teknologi Industri Pertanian atas dukungannya dalam menyelesaikan tesis.
6. Bapak Dr. Saron dukungannya terhadap penelitian ini.
7. Staf pengajar, staf administrasi, dan pranata Laboratorium pada Program Studi Magister Teknologi Industri Pertanian, Pak Joko, Pak Midi dan Mia.
8. Ayah, Ibu (alm) yang telah mendidik dan memberikan bekal kehidupan kepada penulis.
9. Suamiku “Budi Satria”, Aqiel, Fira dan Majid, terimakasih atas doa, dukungan, kesabaran, waktu dan keikhlasannya.
10. Teman-teman MTIP 2013 serta teman-teman laboratorium limbah THP atas bantuannya selama ini.

Semoga Alloh SWT membalas segala kebaikan dan amal semua pihak serta semoga tesis ini dapat bermanfaat.

Bandar Lampung,

2016

SHINTAWATI

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL.....	iv
DAFTAR ISTILAH.....	v
I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang Dan Masalah	1
B. Tujuan	3
C. Kerangka Pemikiran	4
D. Hipotesis.....	6
II TINJAUAN PUSTAKA	
A. Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit.....	7
B. Pengolahan Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit Secara Anaerobik.....	10
C. Anaerobik Konvensional.....	22
D. Bioreaktor Tangki Tertutup.....	23
E. Kinetika Pemanfaatan Substrat dan Pertumbuhan Mikroba.....	25
III METODOLOGI PENELITIAN	
A. Lokasi dan Waktu Penelitian	37
B. Bahan dan Alat.....	37
C. Metode Penelitian	37
D. Pelaksanaan Penelitian	38
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
A. Karakteristik Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit.....	45
B. Aklimatisasi Mikroba.....	48

C. Pengaruh Variasi Laju Beban Organik Terhadap Kestabilan Proses Pengolahan Anaerobik.....	50
D. Pengaruh Laju Beban Organik (OLR) Terhadap Penyisihan COD dan Produksi Biogas.....	53
E. Penentuan Model Kinetika Pertumbuhan Yang Sesuai.....	57
F. Penentuan Parameter Kinetika Pemanfaatan Substrat.....	66
G. Perolehan Gas Metana.....	69

V KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan.....	73
B. Saran.....	73

DAFTAR PUSTAKA.....	74
---------------------	----

LAMPIRAN.....	77
---------------	----

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Proses Produksi Minyak Kelapa Sawit (CPO).....	9
Gambar 2. Design Bioreaktor Anaerobik 5m ³ Skala Pilot.....	39
Gambar 3. Skema Penelitian.....	41
Gambar 4. pH Umpan Air Limbah Pabrik Minyak Kelapa Sawit.....	47
Gambar 5. Aklimatisasi Mikroba Anaerobik.....	48
Gambar 6. pH Inlet dan Outlet Pengolahan Air Limbah Pabrik Minyak Kelapa Sawit.....	50
Gambar 7. pH Proses Anaerobik dalam Bioreaktor.....	52
Gambar 8. Pengaruh Laju Beban Organik (OLR) terhadap Rata-Rata % COD Removal.....	53
Gambar 9. Pengaruh OLR terhadap Laju Penyisihan COD dan Biogas yang Dhasilkan.....	56
Gambar 10. Kinetika Monod.....	60
Gambar 11. Kinetika Contois.....	61
Gambar 12. Kinetika Shuler.....	62
Gambar 13. Kinetika Moser n=2.....	63
Gambar 14. Kinetika Moser n=3.....	64
Gambar 15. Kinetika Moser n=4.....	64
Gambar 16. Kinetika Pemanfaatan Substrat.....	67
Gambar 17. Kinetika Reaksi Orde Pertama.....	68
Gambar 18. Produksi Biogas dan CH ₄	71

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Karakteristik Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit Kasar.....	8
Tabel 2. Perbandingan Energi Proses Aerobik dan Anaerobik.....	21
Tabel 3. Parameter, Lokasi dan Frekuensi Pengambilan Sampel.....	40
Tabel 4. Karakteristik Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit Kasar.....	45
Tabel 5. Karakteristik Derajat Keasamab Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit.....	48
Tabel 6. Persentase Penyisihan COD Pada Pengolahan Anaerobik Limbah Pabrik Minyak Kelapa Sawit.....	54
Tabel 7. Laju Penyisihan Organik dan Produksi Biogas.....	55
Tabel 8. Kondisi Tunak Bioreaktor CIGAR.....	59
Tabel 9. Nilai Parameter Kinetika Moser.....	65
Tabel 10. Validasi Model Kinetika Pertumbuhan Moser dengan $n=2$	65
Tabel 11. Kinetika Reaksi Anaerobik Orde Pertama.....	69
Tabel 12. Maksimum Produksi Biogas dan Gas Metan pada Berbagai OLR.....	70
Tabel 13. Maksimum Gas Metan yang Terbentuk (%) pada berbagai OLR.....	70
Tabel 14. Efisiensi Proses Anaerobik dalam Produksi CH_4	72

DAFTAR ISTILAH

CPO	Crude Palm Oil
GRK	Gas Rumah Kaca
GWP	Global Warming Potential
OLR	Organic Loading Rate
COD	Chemical Oxygen Demand
BOD	Biological Oxygen Demand
g/l	gram/liter
CH ₄	Metana
CO ₂	Karbon dioksida
m ³	meter kubik
kg	kilogram
VSS	Volatile Suspended Solid

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang dan Masalah

Indonesia merupakan negara penghasil minyak kelapa sawit kasar atau CPO (*Crude Palm Oil*) terbesar di dunia. Jumlah produksi nasional tahun 2013 sebesar 31 juta ton dengan jumlah produksi Provinsi Lampung 401.952 ton (GAPKI, 2014). Target pemerintah terhadap produksi minyak kelapa sawit kasar diakhir tahun 2020 adalah 40 juta ton (Boer, 2012)

Peningkatan produksi minyak kelapa sawit kasar berarti meningkatkan jumlah limbah cair yang dihasilkan. Produksi 1 (satu) ton minyak kelapa sawit kasar membutuhkan 5-7,5 ton air dan 50% di antaranya menjadi limbah cair (Abdurahman, 2013). Menurut Ahmad (2004) produksi 1 (satu) ton minyak kelapa sawit kasar akan menghasilkan 2,5 m³ limbah cair. Hal ini berarti tahun 2013 Provinsi Lampung menghasilkan 1 juta m³ limbah cair dan akan terus meningkat seiring dengan peningkatan produksi minyak kelapa sawit kasar.

Limbah cair pabrik minyak kelapa sawit berwarna coklat pekat, kental, tinggi kandungan organik, mengandung unsur hara yang dibutuhkan tanaman (Naibaho, 1998) dan memiliki bau yang tidak memenuhi estetika (Ibrahim, 2012).

Limbah cair pabrik minyak kelapa sawit tanpa pengolahan berpotensi mencemari lingkungan. Pencemaran yang ditimbulkan berupa penurunan kualitas perairan, penurunan kualitas udara dan penurunan kualitas air tanah.

Industri minyak kelapa sawit kasar di Provinsi Lampung mengolah limbah cair secara anaerobik konvensional pada kolam-kolam terbuka. Pengolahan anaerobik konvensional memiliki waktu tinggal yang panjang yaitu 20-200 hari (King, 2013), lahan yang luas serta pengumpulan dan pemanfaatan gas CH_4 sulit untuk dilakukan (Yejian, 2008).

Gas CH_4 memiliki dua sisi yang berbeda yaitu sebagai sumber energi terbarukan serta sebagai salah satu senyawa gas rumah kaca (GRK). Potensi pemanasan global (GWP) gas CH_4 adalah 23 kali dari gas CO_2 (Vijaya, 2010). Kontribusi terbesar emisi gas rumah kaca pada pabrik minyak kelapa sawit kasar berasal dari kolam pengolahan limbah anaerobik. Pemanfaatan biogas pada pabrik minyak kelapa sawit kasar mengakibatkan emisi GRK berkurang secara signifikan.

Salah satu cara pengolahan limbah cair pabrik minyak kelapa sawit yang lebih ramah lingkungan adalah pengolahan anaerobik dalam tangki tertutup atau bioreaktor. Kinerja proses pengolahan air limbah dalam bioreaktor anaerobik dipengaruhi oleh dinamika pemanfaatan substrat dan pertumbuhan mikroba dalam bioreaktor. Laju pemanfaatan substrat dan pertumbuhan mikroba yang terjadi dalam bioreaktor dapat dinyatakan dalam persamaan kinetika pemanfaatan substrat dan pertumbuhan mikroba.

Terdapat beberapa persamaan kinetika pertumbuhan biomassa. Monod menggambarkan pertumbuhan mikroba dalam substrat terbatas, laju pertumbuhan yang lambat dan populasi mikroba yang rendah. Persamaan Contois menggambarkan pertumbuhan mikroba dalam substrat terbatas dengan populasi mikroba yang tinggi (Shuler, 1992). Persamaan Moser (Bailey, 1987) merupakan bentuk persamaan umum dari kinetika pertumbuhan sel. Kinetika pertumbuhan mikroba anaerob juga dapat dinyatakan sebagai fungsi dari konsentrasi substrat yang diumpankan maupun konsentrasi substrat keluar bioreaktor (Shuler, 1992).

Kinetika pemanfaatan substrat dapat dinyatakan dalam kinetika reaksi orde pertama (Nwabanne, 2012) dan model kinetika yang dikemukakan oleh Michaelis Menten (Thobalogus, 2003). Data percobaan di lapangan dimodelkan dalam suatu persamaan kinetika yang mendekati keadaan sebenarnya. Model kinetika proses tersebut memberikan nilai parameter kinetika yang dibutuhkan untuk merancang dan mengoperasikan bioreaktor pada skala yang lebih besar atau skala pabrik.

B. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menentukan parameter kinetika pemanfaatan substrat dan pertumbuhan mikroba pada bioreaktor skala pilot antara lain k , K_s , $Y_{x/s}$, μ_{maks} .
2. Mengestimasi produksi gas metana pada penerapan pengolahan air limbah pabrik minyak kelapa sawit kasar dalam bioreaktor tertutup.

C. Kerangka Pemikiran

Kinerja proses biologis dalam pengolahan air limbah dipengaruhi oleh dinamika pemanfaatan substrat dan pertumbuhan mikroba. Proses yang terjadi dalam bioreaktor pada pengolahan anaerobik cukup kompleks. Interaksi antara mikroba dan lingkungan didalam bioreaktor mempengaruhi kemampuan mikroba untuk memanfaatkan substrat yang digunakan sebagai sumber energi untuk pertumbuhan, kelangsungan hidup sel dan pembentukan metabolit.

Operasional pengolahan limbah cair secara anaerobik seringkali mengalami kegagalan karena tingginya beban organik yang diumpankan. Beban organik dinyatakan dalam konsentrasi COD limbah cair. Pengumpanan substrat dalam jumlah sedikit membutuhkan volume reaktor yang besar dan waktu yang lama untuk mengkonversi senyawa organik, meskipun efisiensi degradasi senyawa organik menjadi tinggi.

Peningkatan laju beban organik akan meningkatkan biogas yang dihasilkan hingga pada laju tertentu bakteri metanogenik tidak dapat mengkonversi asam asetat menjadi gas CH_4 . Jumlah beban organik yang terlalu besar mengakibatkan terjadinya penumpukan asam lemak volatile yang mengakibatkan penurunan pH. Kondisi pH rendah mengakibatkan bakteri metanogenik yang bekerja optimal pada pH 6,2-7,8 tidak dapat mengkonversi asam lemak volatile tersebut menjadi gas metana.

Bioreaktor anaerobik tipe CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor), laju pembebanan COD berkisar 0,25-3 kg COD/m³/hari, dengan waktu tinggal 10-60 hari Abdurahman, 2013. Waktu tinggal pengolahan limbah cair menggunakan kolam anaerob dan fakultatif adalah 75 sampai 120 hari (Igwe, 2007). Penelitian ini akan dilaksanakan pada rentang OLR 0,5-3,5 kg COD/m³/hari dengan memvariasikan waktu tinggal 15-100 hari.

Selain hal di atas, peningkatan laju volume limbah cair minyak kelapa sawit yang diumpukan ke bioreaktor dapat mengakibatkan jumlah mikroba keluar bioreaktor melebihi pertumbuhan mikroba dalam bioreaktor (*wash out*). Kejadian *wash out* akan menurunkan intensitas kontak antara substrat dan mikroba sehingga dapat mengganggu stabilitas degradasi anaerob. Dengan demikian perlu dipelajari pengaruh peningkatan beban organik yang diumpukan ke dalam bioreaktor terhadap dinamika proses pengolahan anaerobik, sehingga keseimbangan antara kebutuhan substrat dan pemanfaatan substrat dapat tercapai.

Pada penelitian ini penentuan kinetika pemanfaatan substrat dan pertumbuhan mikroba didekati dengan kondisi bioreaktor ideal, diasumsikan dalam bioreaktor terjadi pencampuran sempurna dan tidak adanya pengaruh inhibitor terhadap pertumbuhan mikroba. Pengendalian kondisi bioreaktor dilakukan dengan mengontrol parameter pH inlet dan outlet bioreaktor. Terdapat beberapa persamaan kinetika pertumbuhan biomassa. Monod menggambarkan pertumbuhan mikroba dalam substrat terbatas, laju pertumbuhan yang lambat dan populasi mikroba yang rendah. Persamaan Contois menggambarkan pertumbuhan mikroba dalam substrat

terbatas dengan populasi mikroba yang tinggi. Kinetika pemanfaatan substrat dapat dinyatakan dalam bentuk kinetika orde pertama dan kinetika Michaelis Menten. Kinetika reaksi orde pertama menunjukkan degradasi substrat dalam proses sangat cepat, mengikuti pola logaritmik, tanpa adanya pengaruh jumlah mikroba yang terlibat dalam degradasi tersebut. Kinetika pemanfaatan substat Michaelis Menten melibatkan konsentrasi sel, kinetika ini umumnya digunakan dalam proses degradasi dalam substrat terbatas.

D. Hipotesis

1. Kinetika degradasi anaerobik pengolahan limbah cair minyak kelapa sawit kasar dalam bioreaktor CIGAR diduga dapat didekati dengan kinetika reaksi orde pertama maupun kinetika Michaelis Menten sedangkan kinetika pertumbuhan mikroba dapat dipresentasikan menggunakan salah satu atau beberapa dari persamaan Monod, Contois, Shuler dan Moser.
2. Produksi gas metan dari pengolahan anaerobik dapat diestimasi menggunakan data penentuan kinetika pemanfaatan substrat dan pertumbuhan mikroba.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit

Limbah cair pabrik minyak kelapa sawit merupakan limbah berbentuk cair yang dihasilkan dari proses produksi pabrik minyak kelapa sawit. Limbah cair pabrik minyak kelapa sawit merupakan limbah yang belum mengalami pengolahan baik secara fisika, biologi maupun kimia. Komponen penyusun limbah cair pabrik minyak kelapa sawit terdiri dari komponen tersuspensi seperti serat, karbohidrat baik rantai pendek maupun panjang, senyawa nitrogen baik protein dan asam amino, asam organik dan mineral.

Limbah cair pabrik minyak kelapa sawit berwarna coklat, memiliki viskositas tinggi, bersifat asam, tidak beracun serta tinggi kandungan karbon organik.

Komposisi utama limbah cair pabrik minyak kelapa sawit adalah air, minyak, padatan tersuspensi, padatan terlarut dan pasir. Karakteristik limbah cair pabrik minyak kelapa sawit menurut Mahajoeno, 2008 dan Ibrahim, 2012 adalah sebagai Tabel 1. Nilai BOD dari limbah cair pabrik minyak kelapa sawit menurut Mahajoeno adalah 23,4-29,28 g/l, lebih tinggi dari penelitian Ibrahim. Nilai BOD tinggi menunjukkan kandungan organik lebih tinggi pada limbah tersebut.

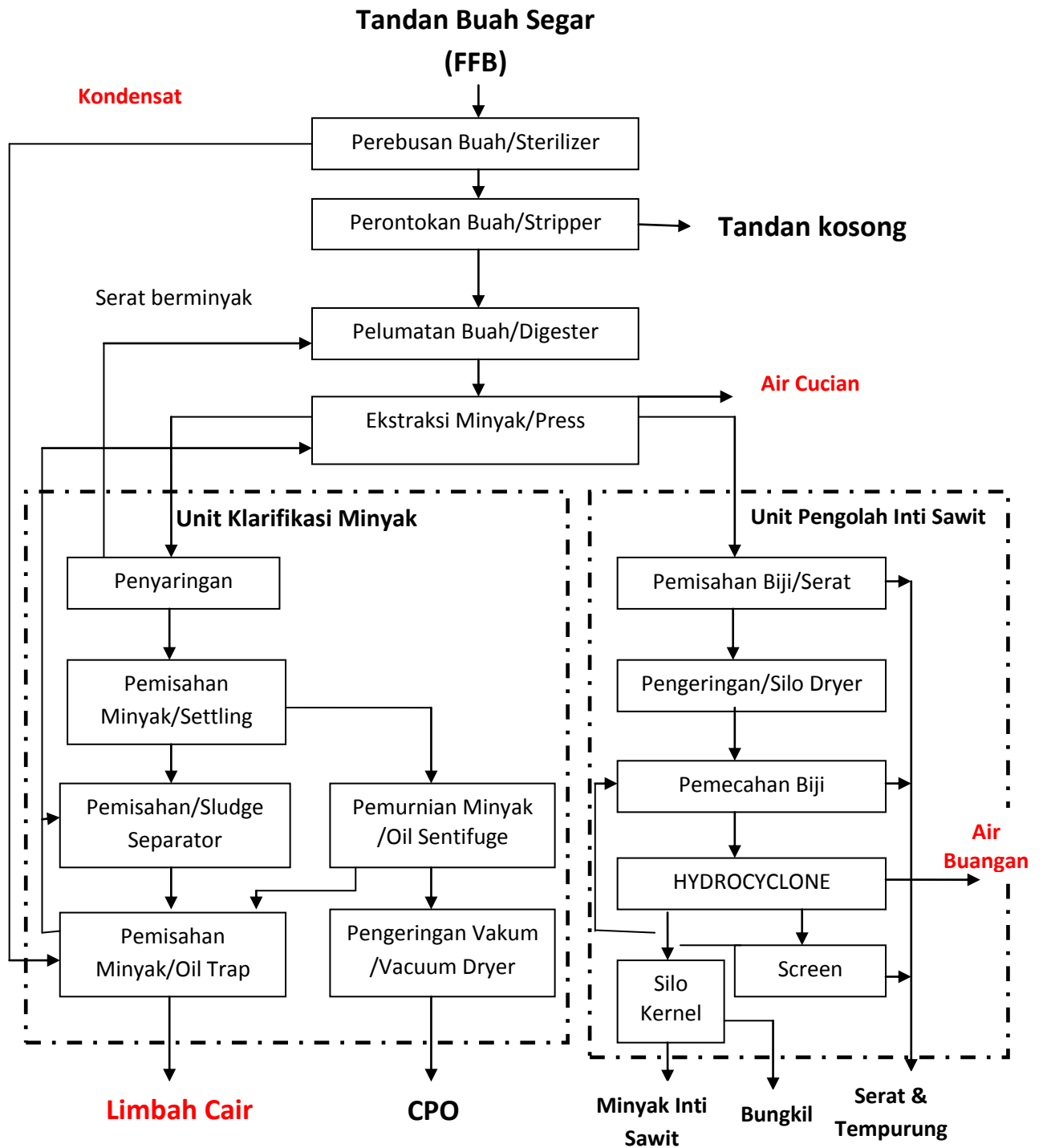
Tabel 1. Karakteristik Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit Kasar

Parameter	Mahajoeno, 2008	Ibrahim, 2012
pH (Satuan Internasional)	4,4-4,5	5,32
Suhu (°C)	50-65	54
BOD (g/L)	23,40-29,28	10,197
COD (g/L)	49,01-63,60	50,5
Padatan total (g/L)	26,57-45,38	31,533
Padatan tersuspensi (g/L)	17,00-35,88	4,007
Minyak dan lemak kasar (g/L)	29,00-29,50	15,8
Total Nitrogen (g/L)	27,00-28,70	0,613
Oksigen Terlarut (mg/l)	-	0,47

Perbedaan karakteristik limbah cair pabrik minyak kelapa sawit dipengaruhi oleh kandungan nutrisi dalam buah sawit yang disebabkan perbedaan iklim, perawatan, umur dan jenis tanaman sawit serta proses produksi CPO.

Unit produksi pabrik minyak kelapa sawit kasar yang menghasilkan limbah cair pabrik minyak kelapa sawit antara lain unit sterilisasi tandan segar kelapa sawit, unit klarifikasi minyak kelapa sawit dan unit hydro cyclone. Tandan buah segar sawit terdiri dari ratusan buah sawit, masing-masing mengandung satu biji dikelilingi pericarp yang mengandung minyak sawit. Tandan buah segar disterilisasi menggunakan uap pada 3 bar dan temperatur 140⁰C selama 75-90 menit. Tujuan proses sterilisasi adalah mencegah terbentuknya asam lemak bebas akibat aktivitas enzim, dan menyiapkan buah mesocarp untuk tahap selanjutnya. Unit proses perebusan buah (sterilisasi) berkontribusi 36% terhadap limbah cair pabrik minyak kelapa sawit yang dihasilkan. Unit klarifikasi berkontribusi 60% dan unit hydrocyclone berkontribusi 4%. Ma dalam Weng, 2014 mengemukakan 2,5m³ limbah cair pabrik minyak kelapa sawit dihasilkan dari 1 ton minyak kelapa sawit kasar, limbah cair tersebut berasal dari unit sterilisasi 0,9m³, proses klarifikasi

1,5m³ dan pencucian hydrocyclone 0,1 m³. Skema aliran proses produksi minyak kelapa sawit tertera pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses Produksi Minyak Kelapa Sawit (CPO)

Pelepasan limbah cair pabrik minyak kelapa sawit kasar secara langsung tanpa pengolahan akan mencemari lingkungan. Kandungan senyawa organik yang tinggi dapat menjadikannya sebagai bahan baku industri bioproses, misalnya bioplastik, bioetanol, asam sitrat, biohidrogen, produksi enzim, biogas, kompos dan pupuk organik (Sahilu, 2012). Dengan demikian pemilihan proses pengolahan limbah cair yang tepat, efektif dan efisien dibutuhkan industri pengolahan minyak kelapa sawit kasar.

B. Pengolahan Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit secara Anaerobik

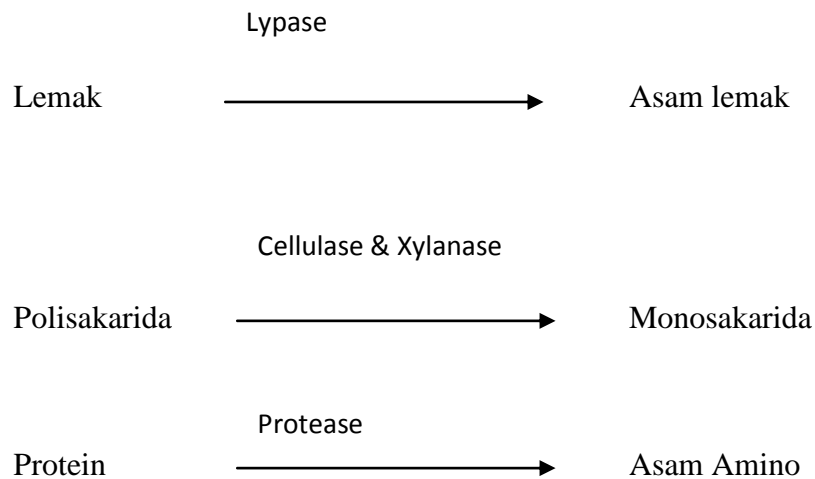
Pengolahan limbah secara anaerobik, merupakan proses degradasi senyawa organik oleh mikroba tanpa kehadiran oksigen. Pengolahan anaerobik dilaksanakan didalam tangki tertutup maupun kolam terbuka dengan kedalaman lebih dari 3 (tiga) meter. Pengolahan anaerobik efektif untuk limbah organik dengan konsentrasi COD tinggi (Saleh, 2004). Menurut Adrianto, (2013) limbah cair dengan konsentrasi lebih dari 3000 mg/l lebih baik diolah secara anaerobik. Pengolahan limbah dengan konsentrasi COD lebih dari 3000 mg/l membutuhkan energi yang besar untuk aerasi.

Penguraian senyawa karbon organik secara anaerob melewati beberapa tahap yaitu : hidrolisis, acidogenesis, acetogenesis dan metanogenesis (Kangle, 2012).

1. Hidrolisis.

Pada tahap ini senyawa organik kompleks yang tidak larut seperti selulosa, protein, dipecah menjadi senyawa lebih sederhana yang dapat masuk melalui membran sel

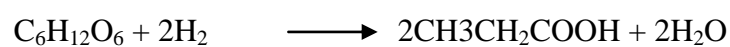
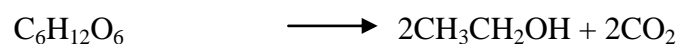
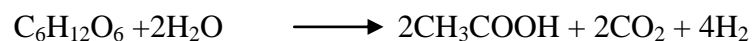
(Kangle, 2012). Hidrolisis dilaksanakan oleh enzim-enzim hidrolitik yang dikeluarkan oleh mikroba. Penguraian pada tahap hidrolisis dapat dipercepat dengan perlakuan mekanik, termal dan penambahan bahan kimia. Reaksi hidrolisis sebagai berikut :



2. Asidogenesis (fermentasi)

Tahap asidogenesis, bakteri fakultatif dan bakteri anaerob mengubah senyawa organik yang terbentuk pada tahap hidrolisis yaitu asam amino, asam lemak, monosakarida menjadi hydrogen, karbondioksida senyawa asam lemak volatil (VFA) seperti asam propionat, butirat, asam asetat, keton, alkohol dan asam laktat.

Meskipun glukosa dapat langsung difermentasi, dengan kehadiran komunitas bakteri yang beragam, glukosa diubah menjadi asetat, etanol, propionat dan senyawa sederhana lainnya, seperti reaksi berikut :



Pada sistem kesetimbangan, sebagian besar senyawa organik dikonversi menjadi senyawa yang dapat langsung digunakan oleh bakteri metanogenik, $\pm 30\%$ dari senyawa organik tersebut diubah asam lemak rantai pendek dan alkohol.

Fermentasi asam amino akan menghasilkan gas hidrogen sulfida dan amonia, yang dapat menghambat penguraian anaerobik. Tahap asidogenesis diharapkan banyak terbentuk asam asetat yang merupakan substrat untuk membentuk metan.

3. Asetogenesis

Asetogenesis merupakan penguraian senyawa hasil fermentasi seperti VFA yang memiliki lebih dari dua atom karbon, alkohol, asam lemak aromatik, menjadi asam organik sederhana, CO_2 , asam asetat dan hidrogen. Bakteri yang terlibat dalam asetogenesis (bakteri asetogenik/*acid former*) beragam, misalnya *syntrophobacter wolinii* merupakan dekomposer propionat, *sythropomonos wolfei* merupakan dekomposer butirat. *Acid former* lainnya seperti *clostridium spp*, *peptococcus anaerobus*, *lactobacilus* dan *actinomyces*. Bakteri asetogenik penghasil hidrogen mengubah VFA menjadi asetat, H_2 dan CO_2 . Dan bakteri homoasetogenik membuat asetat dari H_2 dan CO_2 .

4. Metanogenesis

Metanogenesis melibatkan berbagai jenis bakteri metanogenik, antara lain metanobakterium, metanosarcina, metanobacillus, dan metanococcus.

Metanogenesis dibagi dalam 2 (dua) kelompok bakteri yaitu bakteri yang memanfaatkan asetat dan bakteri yang mengkonsumsi H_2/CO_2 . Bakteri yang terlibat dalam metanogenesis adalah metanosarcina spp methanotrix spp dan

metanosaeta. Menurut Smith dan Hasimoto dalam Kangle, (2012) $\pm 70\%$ metana terbentuk dari asetat dan sisanya terbentuk dari reduksi CO₂ oleh hidrogen atau donor elektron lainnya.

Proses anaerobik melibatkan beberapa tahap penguraian oleh mikroba. Laju pertumbuhan mikroba dan peningkatan efisiensi penguraian anaerobik merupakan hal yang penting dalam menjalankan pengolahan anaerobik. Parameter operasional yang penting dalam pengolahan anaerobik meliputi :

1. Komposisi air limbah.

Umumnya komposisi limbah yang diolah secara anaerobik terdiri dari fraksi organik yang dapat diuraikan oleh mikroba, fraksi mudah terbakar (*combustible fraction*) dan fraksi inert (Kangle, 2012). Sejumlah besar senyawa organik dapat didegradasi secara anaerobik. *Combustible fraction* mencakup senyawa organik yang tidak dapat didegradasi secara langsung atau lambat terdegradasi oleh mikroba anaerobik seperti lignin. Fraksi inert merupakan komponen yang tidak dapat terurai seperti pasir, kaca, dan batu. Pemisahan fraksi inert sebelum pengolahan anaerob diperlukan karena dapat mengurangi volume kerja bioreaktor.

2. Feedstock

Feedstock merupakan senyawa yang dapat diubah menjadi gas metan oleh bakteri anaerobik. Komponen utama feedstock (limbah organik) antara lain karbon, oksigen, nitrogen, hidrogen dan pospor. Umumnya konsentrasi COD air limbah

diatas 1.500-2.000 mg/L baik untuk diolah secara anaerobik, sedangkan air limbah dengan COD kurang dari 1300 mg/L sebaiknya diolah secara aerobik (Tchobanoglous, 2003). Selama proses anaerobik berlangsung feedstock juga dibutuhkan untuk pertumbuhan bakteri meskipun dengan laju pertumbuhan yang kecil. Komposisi sel mikroba terdiri dari karbon, oksigen, nitrogen, hidrogen dan pospor masing-masing sebesar 50, 20, 12,8 dan 2% (Kangle, 2012). Menurut Saleh, (2004) perbandingan C:N:P optimum untuk produksi gas metan adalah 100:2,5:0,5. Rendahnya perbandingan C/N akibat akumulasi NH_3 mengakibatkan peningkatan pH yang dapat menghambat bakteri penghasil gas metan.

3. pH

Kelompok mikroba yang terlibat dalam setiap tahap degradasi anaerobik memiliki pH optimum berbeda. Bakteri asidogenesis bekerja optimal pada pH diatas 5 dan pH minimum bakteri metanogenik sebesar 6,2 (Kangle, 2012). Waktu tinggal cairan mempengaruhi pH selama proses berlangsung. Bioreaktor yang dioperasikan secara batch, proses acetogenesis terjadi secara cepat, penumpukan asam organik dapat mengakibatkan pH turun dibawah 5. Kecepatan bakteri metanogen mengkonsumsi asam organik akan meningkatkan pH dan menstabilkan kinerja proses anaerobik. pH optimum untuk mikroba penghasil metan adalah 6,5-7,5 (Zupancic, 2012). Bakteri metanogen sensitif terhadap kandungan asam dalam bioreaktor dan pertumbuhannya dapat terhambat dalam kondisi asam.

4. Alkalinitas

Alkalinitas merupakan penetralan asam atau kapasitas buffer dari proses penguraian yang sedang berlangsung. Alkalinitas berperan dalam pengendalian pH dan

menjaga stabilitas bioreaktor. Senyawa yang terlibat antara lain karbonat, bikarbonat, hidroksida yang ada dalam bioreaktor. Pada proses anaerobik sistem karbondioksida-bikarbonat berperan dalam mengendalikan alkalinitas (Kangle, 2012). Bikarbonat juga sumber karbon utama bagi bakteri metanogen. Hubungan antara pH dan alkalinitas sistem bikarbonat dinyatakan dalam tetapan reaksi kesetimbangan sebagai berikut :

$$\frac{[HCO_3^-][H^+]}{[H_2CO_3]} = K_{al}$$

$$\frac{[HCO_3^-][H^+]}{[H_2CO_3]} = K_{a1}$$

K_{a1} merupakan konstanta penguraian asam.

Asam karbonat berada dalam kesetimbangan dengan CO_2 dan air. Untuk menjaga pH netral selama degradasi anaerobik, kebutuhan alkalinitas dalam dapat diketahui dari CO_2 yang dihasilkan. Peningkatan alkalinitas dilakukan dengan penambahan sodium bikarbonat. Selain dari keseimbangan sistem karbondioksida-bikarbonat, alkalinitas pada degradasi anaerobik berasal dari senyawa organik yang mengandung nitrogen, seperti asam amino dan protein. Selama degradasi, gugus asam amino dilepaskan dan selanjutnya menjadi amonia. Amonia bereaksi dengan CO_2 , membentuk alkalinitas dalam bentuk amonium bikarbonat.

5. Waktu Tinggal

Waktu tinggal hidraulik (HRT) merupakan waktu cairan atau substrat tinggal dalam bioreaktor. Sedangkan waktu tinggal padatan (SRT) merupakan waktu tinggal bakteri dalam bioreaktor. Waktu tinggal yang dibutuhkan untuk degradasi

anaerobik dipengaruhi oleh jenis bioreaktor, temperatur operasional dan komposisi limbah. Rentang waktu tinggal penguraian anaerobik adalah 14 sampai 30 hari.

Waktu tinggal bioreaktor yang dioperasikan pada kondisi mesofilik 10 sampai 40 hari, sedangkan kondisi termofilik 14 hari (Kangle, 2012). Efektifitas pengolahan anaerobik pada suhu 30⁰C dicapai pada SRT 20 hari dan nilai SRT meningkat pada temperatur operasional yang lebih rendah (Tchobanoglous, 2003).

Menurut Kangle, (2012) untuk menghindari keluarnya mikroba yang melebihi laju pertumbuhannya dalam bioreaktor (*washout*) dibutuhkan SRT lebih dari 12 hari.

Waktu tinggal yang pendek akan menghasilkan konsentrasi biogas yang tinggi, namun senyawa organik yang terdegradasi menjadi rendah. Waktu tinggal hidraulik yang pendek akan mengurangi volume bioreaktor yang dibutuhkan. Upaya memperpendek HRT dan meningkatkan SRT dilakukan dengan modifikasi bioreaktor.

6. Suhu

Degradasi anaerobik dapat berlangsung pada rentang temperatur 5⁰C sampai 65⁰C (Zupancic, 2012). Umumnya suhu operasional degradasi anaerobik terbagi dalam 3 kelompok : psychrophilic (15-20⁰C), mesofilik (30-40⁰C) dan termofilik (50-60⁰C). Menurut Zupancic, 2012 fluktuasi $\pm 2^{\circ}\text{C}$ pada kondisi termofilik mengakibatkan penurunan biogas sebesar 30%. Disarankan perubahan temperatur pada kondisi termofilik fluktuasi tidak lebih dari $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Mikroba pada kondisi mesofilik kurang sensitif, fluktuasi temperatur operasional sebesar $\pm 3^{\circ}\text{C}$ masih dapat ditoleransi. Pengaruh temperatur pada tahap hidrolisis dan asidogenesis tidak

terlalu signifikan, sedangkan tahap acetogenesis dan metanogenesis sangat sensitif terhadap perubahan temperatur.

Secara ekonomis dan kelayakan penerapan pengolahan anaerobik dipengaruhi oleh temperatur. Pengolahan anaerobik stabil pada temperatur 25-30⁰C. Pada temperatur rendah laju reaksi anaerobik menjadi lambat sehingga dibutuhkan volume bioreaktor yang besar serta beban organik yang rendah. Pada temperatur 10-20⁰C penguraian asam lemak rantai panjang menjadi pembatas laju reaksi. Penumpukan asam lemak rantai panjang mengakibatkan terbentuknya busa dalam bioreaktor (Tchobanoglous, 2003).

7. Laju beban organik volumetrik

Variasi yang tinggi dari laju aliran dan beban organik limbah masuk dalam bioreaktor dapat mengganggu kesetimbangan proses asidogenesis dan metanogenesis. Limbah mudah terurai seperti gula dan pati terlarut, pengumpanan beban organik tinggi mempercepat reaksi asidogenesis yang berarti meningkatnya konsentrasi ion hidrogen dan menurunkan pH. Tingginya konsentrasi hidrogen akan menghambat konversi asam propionat dan butirrat sehingga metanogenesis menjadi terhambat (Tchobanoglous, 2003).

Laju beban organik volumetrik (L_{org}) merupakan jumlah BOD atau COD yang diumpukan ke bioreaktor anaerobik per hari (Tchobanoglous, 2003) yang dinyatakan dalam rumus sebagai berikut :

$$L_{org} = \frac{(Q) (S_o)}{(V) (10^3 \text{ g/kg})} \dots \dots \dots (19)$$

dengan L_{org} = beban organik volumetrik (kg COD/m³.hari)

Q = Laju alir air limbah influent (m³/hari)

S_o = Konsentrasi COD influent (g/m³)

V = volume bioreaktor (m³).

Laju beban organik yang terlalu tinggi mengakibatkan mikroba anaerob terbawa aliran keluar (*wash out*) dari bioreaktor. Upaya mengatasi *wash out* dilakukan dengan meningkatkan waktu tinggal mikroba dalam bioreaktor. Salah satu upaya meningkatkan waktu tinggal yaitu dengan menerapkan berbagai jenis bioreaktor seperti UASB (Up flow Anaerobic Sludge Blacnet Bioreactor), bioreaktor berpenyekat, dan bioreaktor menggunakan material penahan mikroba seperti cangkang sawit (Ahmad, 2012).

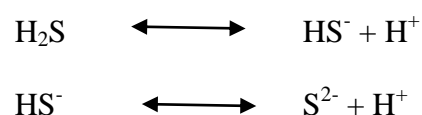
8. Nutrisi

Proses anaerobik menghasilkan sedikit biomassa, kebutuhan unsur nitrogen dan pospor relatif sedikit. Namun limbah dengan sedikit kandungan nitrogen dan pospor membutuhkan penambahan kedua unsur tersebut. Speece dalam Tchobanoglous, 2003 menyatakan aktifitas maksimum bakteri metanogenik membutuhkan nitrogen, pospor, dan sulfur dengan konsentrasi masing-masing 50, 10 dan 5 mg/L. Dan kebutuhan mikronutrisi per liter volume bioreaktor yang direkomendasikan untuk menstimulasi aktifitas bakteri metanogenik adalah 1,0 mg FeCl₂, 0,1 mg CoCl₂, 0,1 mg NiCl₂ dan 0,1 ZnCl₂.

9. Sulfida yang Dihasilkan

Berbagai jenis air limbah seringkali mengandung senyawa oksida sulfur seperti sulfat, sulfidit, tiosulfat. Senyawa ini menjadi penerima elektron bagi bakteri pereduksi sulfat yang menggunakan senyawa organik dan menghasilkan H₂S. Secara teoritis H₂S yang dihasilkan pada 35⁰C sebesar 0,4 Liter/g COD (Tchobanoglous, 2003). Hidrogen sulfida menimbulkan bau dan bersifat korosif terhadap logam. Produk hasil pembakaran sulfur dapat menimbulkan pencemaran udara.

Tingginya kandungan oksida sulfur dalam air limbah yang akan diumpangkan akan mempengaruhi pengolahan anaerobik. Bakteri pereduksi sulfur akan berkompetisi dengan bakteri metanogenik dalam memanfaatkan substrat, sehingga mengakibatkan penurunan produksi gas metan. Konsentrasi sulfida kurang dari 20 mg/l dibutuhkan bagi aktifitas bakteri metanogenik, diatas konsentrasi tersebut sulfida bersifat racun (Tchobanoglous, 2003). Aktifitas bakteri metanogenik menurun 50% atau lebih pada konsentrasi H₂S 50-250 mg/l (Tchobanoglous, 2003). H₂S bersifat larut dalam air, dengan kelarutan pada 35⁰C sebesar 2650 mg/l. Toksisitas H₂S lebih tinggi dibanding ion sulfida. Pada temperatur 30⁰C dan pH 7, 60% H₂S berada dalam fasa gas. Reaksi kesetimbangan hidrogen sulfida dalam larutan sebagai berikut:



10. Toksisitas Amonia

Ion amonium umumnya dihasilkan dari degradasi protein atau asam amino yang terkandung dalam air limbah. Amonia dalam konsentrasi tinggi bersifat racun bagi bakteri metanogenik. Toksisitas amonia terjadi pada konsentrasi 100 mg/l sebagai $\text{NH}_3\text{-N}$, namun saat aklimatisasi konsentrasi lebih tinggi masih dapat ditoleransi (Tchobanoglous, 2003).

Keunggulan pengolahan anaerobik antara lain :

1. Menghasilkan biogas yang merupakan sumber energi terbarukan, yang pemanfaatannya telah banyak digunakan untuk energi listrik dan gas rumah tangga;
2. Pengurangan emisi gas rumah kaca melalui pemanfaatan gas metan;
3. Biaya penanganan limbah dalam bentuk padat (lumpur) yang rendah. Pengolahan anaerobik menghasilkan biomassa/lumpur 6-8 kali lebih rendah dari pengolahan aerobik (Tchobanoglous, 2003)
4. Biaya untuk penambahan nutrisi lebih rendah, karena biomassa yang dihasilkan rendah;
5. Beban organik volumetrik yang tinggi. Beban organik volumetrik pengolahan anaerobik lebih tinggi dari pengolahan aerob. Laju beban organik proses anaerobik berkisar $3,2 - 32 \text{ kg COD/m}^3\text{.hari}$ sedangkan untuk proses aerobik $0,5-3,2 \text{ kg COD/m}^3\text{.hari}$ (Tchobanoglous, 2003)
6. Proses degradasi anaerobik cenderung stabil;
7. Energi yang digunakan untuk mengoperasikan cukup kecil;

Proses anaerobik menghasilkan energi. Perbandingan neraca energi pengolahan air limbah secara aerobik dan anaerobik sebagai berikut:

Tabel 2. Perbandingan Neraca Energi Proses Aerobik dan Anaerobik (Tchobanoglous, 2003)

	Jumlah Energi, kJ/hari	
	Anaerobik	Aerobik
Aerasi		$-1,9 \times 10^6$
Produksi Metan	$12,5 \times 10^6$	
Peningkatan Temperatur air limbah sampai 30°C	$-2,1 \times 10^6$	
Total Energi, kJ/hari	$10,4 \times 10^6$	$-1,9 \times 10^6$

Tabel 2 menunjukkan pengolahan limbah dengan konsentrasi senyawa organik 10 kg/m^3 dan laju alir air limbah $100 \text{ m}^3/\text{hari}$ pada temperatur 20°C yang diolah secara aerobik, membutuhkan energi sebesar $1,9 \times 10^6 \text{ kJ/hari}$. Namun jika limbah tersebut diolah secara anaerobik akan menghasilkan energi sebesar $12,5 \times 10^6 \text{ kJ/hari}$. Dan jika dilakukan peningkatan suhu air limbah dari 20°C ke 30°C , maka dibutuhkan energi sebesar $2,1 \times 10^6 \text{ kJ/hari}$, sehingga total energi yang dihasilkan sebesar $10,4 \times 10^6 \text{ kJ/hari}$ atau 5 kali dari energi yang dibutuhkan untuk pengolahan aerobik. Tchobanoglous, (2003) menyatakan proses aerobik dan anaerobik membutuhkan energi yang sama pada konsentrasi COD air limbah $1,270 \text{ kg/m}^3$. Dengan demikian pada konsentrasi COD rendah proses aerobik membutuhkan energi yang lebih sedikit.

Beberapa kelemahan dari proses pengolahan anaerobik antara lain :

1. Bakteri metanogenesis sangat sensitif terhadap perubahan kondisi sekitar dan keberadaan senyawa toksik;
2. Senyawa sulfur dapat menimbulkan bau tidak sedap dan bersifat korosif;

3. Dibutuhkan tenaga ahli untuk mendesign bioreaktor;
4. Dibutuhkan wadah biogas yang aman serta efektif untuk menampung kelebihan produksi biogas.

C. Anaerobik Konvensional

Pabrik minyak kelapa sawit kasar melakukan pengolahan anaerobik dalam kolam terbuka (anaerobik konvensional) dan tangki terbuka. Pengolahan anaerobik konvensional cocok untuk daerah yang memiliki lahan luas dengan biaya operasional yang murah. Beberapa kelemahan anaerobik konvensional adalah membutuhkan lahan yang luas, menimbulkan bau disekitarnya, tidak termanfaatkannya CH_4 sebagai sumber energi dikarenakan sulitnya mengumpulkan biogas serta adanya potensi kebakaran akibat pelepasan gas metan. Pelepasan CH_4 dan CO_2 yang terdapat dalam biogas ke udara bebas mengakibatkan meningkatnya gas rumah kaca (GRK) di atmosfer. GRK memantulkan kembali radiasi sinar inframerah yang dipancarkan permukaan bumi sehingga akan menimbulkan pemanasan global di permukaan bumi. GRK yang utama di atmosfer adalah uap air, CO_2 , N_2O , CH_4 dan O_3 . Potensi pemanasan global (GWP) gas metan 23 kali dari gas CO_2 (Vijaya, 2010). GWP merupakan pengukuran relatif terhadap panas suatu gas terperangkap di atmosfer dibandingkan dengan panas yang dilepas gas CO_2 ketika terperangkap di atmosfer. Vijaya, 2010 meneliti pada 12 pabrik minyak kelapa sawit, pemberi kontribusi emisi GRK tertinggi adalah unit pengolahan anaerobik limbah cair pabrik minyak kelapa sawit dan penangkapan biogas mengakibatkan emisi gas rumah kaca turun secara signifikan.

D. Bioreaktor Tangki Tertutup

Telah banyak penelitian produksi biogas pada bioreaktor tangki tertutup melalui pengembangan design bioreaktor. Terdapat beberapa jenis dan spesifikasi bioreaktor tangki tertutup antara lain :

- i. Bioreaktor Laju Tinggi (High-rate Bioreactor), air limbah yang akan diolah dialirkan melalui bagian bawah bioreaktor melalui kecepatan tertentu.

Keunggulan dari bioreaktor ini adalah waktu tinggal sludge (mikroba anaerob) dalam bioreaktor lebih tinggi serta kontak antara mikroba dan air limbah yang masuk lebih baik. High-Rate Bioreaktor terdiri dari :

- a. Bioreaktor Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)

UASB merupakan bioreaktor dengan hamparan sludge dibagian bawah dan dilalui aliran air limbah dari bawah reaktor. Keuntungan UASB tidak ada bahan yang dibutuhkan untuk menahan mikroba serta tidak dibutuhkan energi untuk resirkulasi. Loading rate untuk UASB adalah 6-36 kg COD/m³/hari (Parawira, 2004).

- b. Bioreaktor Expanded Granular Sludge Bed (EGSB)

EGSB merupakan modifikasi UASB, mikroba dalam bentuk granular diekspansi oleh aliran gas dan limbah cair yang masuk bioreaktor. Keunggulan EGSB adalah loading rate yang tinggi yaitu 20-40 kg COD/m³/hari.

- c. Reaktor Biofilm Anaerobik.

Pada bioreaktor ini mikroba tumbuh sebagai biofilm di permukaan material pembawa (carriers). Reaktor biofilm terbagi menjadi dua yaitu anaerobic packed-bed reactor dimana material pembawa tidak mengalami perpindahan

dan fluidized atau expanded-bed reactor, dimana material terfluidisasi mengikuti aliran air limbah yang masuk.

Parameter kinerja dari bioreaktor anaerobik dengan pertumbuhan tersuspensi, mencakup fraksi organik yang digunakan oleh biomassa, (TCOD_{utilized}) dan perolehan gas metana yang dinyatakan sebagai persamaan berikut :

$$\text{TCOD}_{\text{utilized}} = \frac{(\text{TCOD}_i - \text{TCOD}_e)}{\text{TCOD}_i} \times 100\%$$

dengan TCOD_i = Konsentrasi COD limbah cair pabrik minyak kelapa sawit yang diumpankan

TCOD_e = Konsentrasi COD limbah cair pabrik minyak kelapa sawit pada aliran keluar bioreaktor

TCOD_{utilized} = persentase pemanfaatan COD

Beberapa literatur menggunakan istilah persen efisiensi COD removal sebagai persentase pemanfaatan COD (TCOD_{utilized}) (Abdurahman, 2013). Evaluasi kinerja bioreaktor dalam menghasilkan gas metana dapat dinyatakan dalam perolehan gas metana (Y_{CH₄}) yang merupakan koefisien konversi pembentukan gas metana berdasarkan senyawa organik yang dimanfaatkan maka :

$$Y_{\text{CH}_4} (\text{l CH}_4 / \text{g COD utilized}) = \frac{Q_{\text{CH}_4}}{[Q(\text{TCOD}_i - \text{TCOD}_e)]}$$

dengan Q = laju alir limbah cair yang diumpankan perhari (l limbah cair/hari)

Q_{CH₄} = laju alir gas metana yang dihasilkan (l CH₄/hari).

Abdurahman, 2013 mengemukakan evaluasi pengaruh variasi laju beban organik (OLR) terhadap kinerja bioreaktor dapat berdasarkan beberapa indikator antara lain : kandungan gas metan, persen efisiensi COD removal, variabel keluaran unit pengolah limbah seperti stabilitas pH.

E. Kinetika Pemanfaatan Substrat dan Pertumbuhan Mikroba

Aplikasi proses pengolahan secara anaerobik sering mengalami masalah pada tahap operasional. Kegagalan proses disebabkan berlebihnya beban senyawa organik, senyawa toksik dan laju alir limbah yang diumpankan ke dalam bioreaktor. Laju alir limbah per volume bioreaktor dikenal dengan laju dilusi (D). Nilai D yang melebihi laju pertumbuhan mikroba dalam bioreaktor mengakibatkan keluarnya mikroba yang melebihi laju pembentukan mikroba dalam bioreaktor (*washout*). Tingginya beban senyawa organik yang diumpankan ke bioreaktor mengakibatkan pembentukan asam volatil yang cepat. Penurunan pH mengakibatkan kerja bakteri pembentuk metan akan terhambat, yang mengakibatkan kegagalan proses secara keseluruhan. Studi dinamika proses dan upaya pengendalian proses dibutuhkan untuk mencapai keberhasilan penerapan pengolahan anaerobik.

Penyederhanaan pertama dilakukan dengan menggambarkan kinetika populasi sel terjadi dalam suatu media tumbuh dimana seluruh komponen nutrisi berada pada konsentrasi tinggi kecuali 1 (satu) komponen. Dengan demikian perubahan konsentrasi nutrisi yang memiliki konsentrasi tinggi tidak mempengaruhi laju reaksi yang terjadi dalam bioreaktor. Namun 1 (satu) komponen yang berada dalam konsentrasi rendah akan mempengaruhi proses yang terjadi dalam bioreaktor

dan menjadi nutrisi pembatas reaksi, komponen ini disebut substrat. Kehadiran inhibitor seringkali dilibatkan untuk mendapatkan kinetika sel yang tepat.

Penentuan kinetika populasi mikroba didekati dengan kondisi bioreaktor ideal, diasumsikan dalam bioreaktor terjadi pencampuran sempurna. Kondisi eksternal dilakukan dengan pengendalian beberapa parameter dalam bioreaktor, misalnya pH dan temperatur. Tchobanoglous, (2003) laju pemanfaatan substrat dalam sistem biologi dapat dinyatakan dalam bentuk model matematik :

$$r_{su} = \frac{-k \cdot S \cdot X}{(K_s + S)} \dots\dots\dots(20)$$

dengan :

r_{su} = laju perubahan konsentrasi substrat yang termanfaatkan (g/l/hari)

S = konsentrasi substrat pembatas (g/l)

X = konsentrasi biomassa dalam bioreaktor (g/l)

k = laju spesifik pemanfaatan substrat maksimum (g substrat/g mikroba.hari)

K_s = Konstanta kejenuhan (g/l)

tanda negatif menunjukkan masa substrat berkurang terhadap waktu akibat substrat tersebut termanfaatkan.

Menurut Bailey Ollis, (1986) jumlah total masa sel mikroba yang terbentuk merupakan fungsi dari masa substrat yang dimanfaatkan dan dinyatakan dalam faktor perolehan biomassa,

$$Y_{x/s} = \frac{\Delta X}{\Delta S} \dots\dots\dots(21)$$

atau $Y_{x/s}$ = jumlah sel terbentuk/ jumlah substrat yang dimanfaatkan.

Ketika laju pemanfaatan substrat mencapai maksimum, bakteri juga berada pada laju pertumbuhan maksimum (Tchobanoglous, 2003). Hubungan antara laju pertumbuhan spesifik maksimum bakteri terhadap laju pemanfaatan substrat spesifik maksimum dinyatakan sebagai berikut :

$$\mu_{mak} = k.Y_{x/s} \dots\dots\dots(22)$$

dimana μ_{mak} = laju pertumbuhan spesifik maksimum (hari⁻¹)

k = laju pemanfaatan substrat spesifik maksimum (hari⁻¹)

$Y_{x/s}$ = Perolehan biomassa

Sehingga persamaan 2.2 menjadi :

$$rsu = \frac{-\mu_{mak}.S.X}{Y_{x/s} .(K_s + S)} \dots\dots\dots(23)$$

i. Kinetika Pertumbuhan Monod

Hubungan antara laju pertumbuhan spesifik dan konsentrasi substrat dalam bioreaktor dengan kondisi substrat terbatas akan membentuk kurva hiperbolik.

Monod, 1942 menggambarkan hubungan fungsional laju pertumbuhan spesifik (μ) terhadap konsentrasi substrat pembatas (S) sama seperti persamaan Langmuir Adsorption Isoterm (Bailey, 1986), persamaan Monod adalah sebagai berikut :

$$\mu = \frac{\mu_{max} . S}{K_s + S} \dots\dots\dots(24)$$

dengan μ = laju pertumbuhan spesifik

μ_{mak} = laju pertumbuhan spesifik maksimum

S = konsentrasi substrat

K_s = Konstanta kejenuhan

Laju pertumbuhan spesifik maksimum, μ_{mak} dicapai saat $S \gg K_s$. Nilai K_s sama dengan konsentrasi substrat ketika laju pertumbuhan spesifik mencapai setengah dari laju pertumbuhan spesifik maksimum, atau $K_s = S$ ketika $\mu = \frac{1}{2} \mu_{\text{mak}}$.

Pertumbuhan mikroba dalam kondisi substrat pembatas, pada konsentrasi substrat rendah laju pertumbuhan spesifik merupakan fungsi linier dari konsentrasi substrat.

Pada konsentrasi substrat yang tinggi laju pertumbuhan spesifik akan konstan.

ii. Model Kinetika Pertumbuhan Lainnya

Beberapa persamaan kinetika pertumbuhan lainnya dikemukakan oleh Moser,

Contois dan Shuler sebagai berikut :

$$\text{a. Moser : } \mu = \frac{\mu_{\text{mak}} \cdot S^n}{(K + S^n)}$$

$$\text{b. Contois : } \mu = \frac{\mu_{\text{mak}} \cdot S}{(K_{\text{ss}} \cdot X + S)}$$

$$\text{c. Shuler : } \mu = \frac{\mu_{\text{mak}} \cdot S}{K_{\text{SO}} \cdot S_0 + S}$$

Model kinetika Contois melibatkan konsentrasi sel (X) dalam persamaan laju pertumbuhan spesifik dan terjadi pada kondisi konsentrasi mikroba cukup tinggi.

Shuler mengemukakan laju pertumbuhan spesifik sebagai fungsi dari konsentrasi substrat yang diumpankan.

Persamaan Moser merupakan bentuk persamaan umum dari kinetika pertumbuhan sel.

Beberapa persamaan kinetika pertumbuhan mikroba sebagai berikut :

$$\text{a. Persamaan Monod : } \mu = \frac{\mu_{\text{mak}} \cdot S}{(K_m + S)} \dots\dots\dots(1)$$

b. Persamaan Contois : $\mu = \frac{\mu_{\text{mak}} \cdot S}{(K_{\text{ss}} \cdot X + S)}$ (2)

c. Persamaan Moser : $\mu = \frac{\mu_{\text{mak}} \cdot S^n}{(K + S^n)}$ (3)

d. Persamaan Shuler, 1992 : $\mu = \frac{\mu_{\text{mak}} \cdot S}{K_{\text{so}} S_0 + S}$ (4)

dengan $\mu = \text{laju pertumbuhan mikroba spesifik} = X \frac{dX}{dt} \text{ (hari}^{-1}\text{)}$

$\mu_{\text{maks}} = \text{laju pertumbuhan spesifik maksimum (hari}^{-1}\text{)}$

$K_m = \text{Konstanta Monod (g/l)}$

$S = \text{Konsentrasi substrat di aliran keluar bioreaktor (g/l)}$

$S_0 = \text{Konsentrasi substrat di aliran masuk bioreaktor (g/l)}$

$X = \text{Konsentrasi biomassa dialiran keluar bioreaktor (g/l)}$

$K_{\text{ss}} = \text{Konstanta Contois}$

$K = \text{Konstanta Moser}$

$K_{\text{so}} = \text{Konstanta Shuler}$

$n = 1, 2, \dots, n$, ketika $n = 1$ persamaan Moser sama dengan persamaan Monod.

Penelitian ini menggunakan bioreaktor tertutup tipe CIGAR (*Covered In the Ground Anaerobic Reactor*). Bioreaktor dilengkapi sekat berlubang yang berfungsi untuk meningkatkan pengadukan umpan masuk bioreaktor. Asumsi lain yang

digunakan untuk mengetahui parameter kinetika adalah laju kematian biomassa sudah termasuk di dalam laju biomassa keluar.

Neraca massa biomassa dalam bioreaktor adalah sebagai berikut laju biomassa masuk ditambah laju produksi biomassa dikurangi laju biomassa keluar sama dengan laju akumulasi biomassa dalam bioreaktor, dalam persamaan dinyatakan sebagai berikut :

$$FX_0 - FX + V_R \mu X = V_R \frac{dX}{dt} \dots\dots\dots(5)$$

dimana F = Laju alir substrat atau umpan (l.hari⁻¹)

μ = laju pertumbuhan biomassa (l.hari⁻¹)

X_0 = Konsentrasi sel dalam aliran masuk bioreaktor (g/l)

X = Konsentrasi sel di aliran keluar bioreaktor (g/l)

V_R = Volume kerja bioreaktor, diasumsikan konstan(liter).

$\frac{dX}{dt}$ = laju perubahan konsentrasi biomassa terhadap waktu (g.l⁻¹.hari⁻¹).

Jika D merupakan *dilution rate*, $D = F/V_R = 1/\theta$ dengan θ = waktu tinggal hidraulik dan diasumsikan umpan limbah cair tidak mengandung mikroba ($X_0=0$), maka dalam keadaan steady state ($dX/dt = 0$) persamaan (1.5) menjadi:

$$-\frac{F}{V_R} X + \mu X = 0 \dots\dots\dots(6)$$

atau

$$\frac{F}{V_R} = \mu = D = \frac{1}{\Theta} \dots\dots\dots(7)$$

Substitusi μ pada persamaan (1.6) dengan 4 (empat) persamaan kinetika pertumbuhan biomassa yang disarankan, persamaan di atas menjadi :

a. Persamaan Monod :

$$\frac{1}{\Theta} = \frac{1}{\mu_{mak}} + \frac{K_S}{\mu_{mak}} \frac{1}{S} \dots\dots\dots(8)$$

b. Persamaan Contois :

$$\frac{1}{\Theta} = \frac{1}{\mu_{mak}} + \frac{K_{SS}}{\mu_{mak}} \frac{X}{S} \dots\dots\dots(9)$$

c. Persamaan Moser :

$$\frac{1}{\Theta} = \frac{1}{\mu_{mak}} + \frac{K}{\mu_{mak}} \frac{1}{S^n} \dots\dots\dots(10)$$

d. Persamaan Shuler :

$$\frac{1}{\Theta} = \frac{K_{So}S_0}{\mu_{mak}S} + \frac{1}{\mu_{mak}} \dots\dots\dots(11)$$

Dengan memplot data $1/\theta$ terhadap $1/S$, X/S , $1/S^n$ dan S_0/S , maka akan diperoleh nilai parameter kinetika pertumbuhan sel masing-masing persamaan, yaitu μ_{mak} , K_S , K_{SS} dan K . Persamaan kinetika pertumbuhan yang mendekati kondisi bioreaktor adalah persamaan yang memiliki nilai koefisien korelasi (r) mendekati 1.

Laju pemanfaatan substrat dalam sistem biologi dapat dinyatakan dalam beberapa persamaan (Tchobanoglous, 2003) :

a. Kinetika pemanfaatan substrat mengikuti reaksi orde pertama :

$$-\frac{dS}{dt} = k_s.S \dots\dots\dots(12)$$

dengan k_s = konstanta
 S = konsentrasi COD out (g/l)
 S_o = konsentrasi COD umpan (g/l)
 t = θ = waktu tinggal (hari)

b. Kinetika Michaelis-Menten dinyatakan dalam persamaan :

$$r_{su} = \frac{-k.X.S}{(K_s + S)} = \frac{-k.X.S}{(K_s + S)} \dots\dots\dots(13)$$

dengan r_{su} = laju perubahan konsentrasi substrat = $dS/dt = (g.l^{-1}.hari^{-1})$
 k = laju pemanfaatan substrat spesifik maksimum ($1.hari^{-1}$)
 X = konsentrasi biomassa (g/l)
 S = konsentrasi substrat pembatas dalam larutan (g/l)
 K_s = konstanta setengah jenuh (g/l).

Neraca masa untuk pemanfaatan substrat dalam bioreaktor dinyatakan sebagai laju substrat masuk dikurangi laju substrat keluar, dikurangi laju pemanfaatan substrat sama dengan laju akumulasi substrat.

$$FS_o - FS + r_{su}.V_R = V_R \frac{dS}{dt} \dots\dots\dots(14)$$

S_0 = Konsentrasi substrat di aliran masuk bioreaktor (g/l)

V_R = volume reaktor

Dalam keadaan *steady* $dS/dt = 0$ dan substitusi r_{su} dengan persamaan (14) maka persamaan 1.14 menjadi :

$$FS_0 - FS + r_{su} \cdot V_R = 0 \dots\dots\dots(15)$$

$$\frac{S_0 - S}{V_R/F} = \frac{k \cdot X \cdot S}{(K_s + S)} \dots\dots\dots(16)$$

Jika $V_R/F = \theta$ dengan θ = waktu tinggal hidraulik maka persamaan 16 menjadi :

$$\frac{\theta X}{S_0 - S} = \frac{1}{k} + \frac{K_s}{k} \frac{1}{S} \dots\dots\dots(17)$$

Dengan memplot data lapangan yaitu $1/S$ terhadap $\frac{\theta X}{S_0 - S}$ maka diperoleh parameter kinetika pemanfaatan substrat yaitu k dan K_s .

Saat substrat dimanfaatkan pada laju maksimumnya maka mikroba tumbuh pada laju maksimumnya, sehingga parameter perolehan biomassa $Y_{x/s}$ dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$Y_{x/s} = \frac{\mu_{maks}}{k} \dots\dots\dots(18)$$

Pertumbuhan mikroba seringkali mengalami hambatan (inhibisi) akibat kehadiran substrat atau akibat kehadiran produk (metabolit) tertentu yang dihasilkannya.

1. Inhibisi Substrat

Mekanisme inhibisi substrat didekati oleh mekanisme kinetika enzimatik. Inhibisi substrat terhadap pertumbuhan mikroba terdiri dari inhibisi kompetitif dan non kompetitif. Mekanisme inhibisi kompetitif terjadi dimana substrat bersifat analog dan berkompetisi dengan substrat yang melekat pada bagian aktif enzim, umumnya akibat tingginya konsentrasi substrat. Inhibisi kompetitif tidak menurunkan laju pertumbuhan spesifik mikroba maksimum (μ_{maks}) namun akan meningkatkan nilai konstanta kejenuhan (K). Sedangkan mekanisme inhibisi non kompetitif, substrat melekat bukan pada bagian aktif enzim, kehadirannya mampu menurunkan kemampuan pengikatan enzim terhadap substrat. Inhibisi nonkompetitif akan menurunkan nilai μ_{maks} dan meningkatkan nilai konstanta kejenuhan (K).

Persamaan pertumbuhan untuk inhibisi substrat yang non kompetitif adalah :

$$\mu = \frac{\mu_{\text{maks}}}{\left(1 + \frac{K_s}{S}\right) \left(1 + \frac{S}{K_1}\right)}$$

dan untuk inhibisi substrat kompetitif adalah :

$$\mu = \frac{\mu_{\text{maks}} \cdot S}{K_s \left(1 + \frac{S}{K_1}\right) + S}$$

dengan S adalah konsentrasi substrat dan K_s , K_1 adalah konstanta.

Inhibisi substrat dapat dihindari dengan melakukan pengumpanan substrat secara perlahan, dimana konsentrasi substrat dinaikkan secara bertahap.

2. Inhibisi produk

Mekanisme inhibisi produk juga terjadi secara kompetitif dan non kompetitif, contohnya pada fermentasi etanol.

Persamaan pertumbuhan untuk inhibisi produk yang non kompetitif adalah :

$$\mu = \frac{\mu_{\text{mak.}}}{\left(1 + \frac{K_s}{S}\right) \left(1 + \frac{P}{K_p}\right)}$$

dan untuk inhibisi produk kompetitif adalah :

$$\mu = \frac{\mu_{\text{mak.}} \cdot S}{K_s \left(1 + \frac{P}{K_p}\right) + S}$$

dengan S adalah konsentrasi substrat, P adalah konsentrasi produk dan K_s , K_p adalah konstanta.

3. Inhibisi oleh senyawa toksik, dapat terjadi secara kompetitif, unkompetitif dan nonkompetitif. Inhibisi unkompetitif terjadi jika inhibitor berikatan dengan senyawa antara yang ada dalam mekanisme reaksi metabolik. Persamaan inhibisi senyawa toksik :

a. Inhibisi kompetitif :

$$\mu = \frac{\mu_{\text{mak.}} \cdot S}{K_s \left(1 + \frac{1}{K_I}\right) + S}$$

b. Inhibisi nonkompetitif :

$$\mu = \frac{\mu_{\text{mak.}}}{\left(1 + \frac{K_s}{S}\right) \left(1 + \frac{1}{K_I}\right)}$$

c. Inhibisi uncompetitif

$$\mu = \frac{\mu_{\text{mak}} \cdot S}{\left(\frac{K_s}{1 + \frac{1}{K_I}} + S\right) \left(1 + \frac{1}{K_I}\right)}$$

dengan S adalah konsentrasi substrat, dan K_s , K_I adalah konstanta.

Seringkali kehadiran senyawa toksik mengakibatkan kematian mikroba, sehingga laju pertumbuhan spesifik dengan kehadiran kematian mikroba dinyatakan dalam

persamaan :
$$\mu = \frac{\mu_{\text{mak}} \cdot S}{K_s + S} - kd'$$

dengan kd' laju kematian mikroba (jam^{-1}).

iii. Model Matematik Dinamika Penguraian Anaerobik

Graef dalam Bailey, 1986 mengemukakan model matematik pemanfaatan substrat selama penguraian anaerobik. Graef memodifikasi persamaan pertumbuhan spesifik yang dikemukakan oleh Monod dengan melibatkan faktor kematian mikroba. Laju kematian mikroba tersebut diasumsikan sebagai reaksi orde satu dari konsentrasi senyawa toksin (tox). Model matematik penguraian anaerobik dalam bioreaktor yang dikemukakan Graef sebagai berikut :

a. Laju Akumulasi biomassa dalam bioreaktor :

$$\frac{dX}{dt} = \frac{F}{V}(X_o - X) + \mu X - k_T(t_{ox})$$

dengan k_T = konstanta kematian biomassa yang diasumsikan toksin

b. Laju pemanfaatan substrat :
$$\frac{dS}{dt} = \frac{F}{V}(S_o - S) - \frac{\mu X}{Y_{x/s}}$$

c. Laju pertumbuhan spesifik biomassa : $\mu = \frac{\mu_{\text{mak.}}}{(1 + \frac{K_s}{S} + \frac{S}{K_i})}$

III. METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Juni sampai bulan Desember 2015 di Laboratorium Limbah dan halaman samping kiri gedung Jurusan Teknologi Hasil Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Lampung.

B. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah aquades, $K_2Cr_2O_7$, H_2SO_4 pekat, $HgSO_4$, Ag_2SO_4 , tissue, gas nitrogen, gas hydrogen, gas helium, label, lumpur anaerobik dari kolam ke-2 dan limbah segar dari kolam pertama setelah cooling pond PTPN VII Unit Usaha Bekri Kecamatan Bekri Kabupaten Lampung Tengah. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperangkat bioreaktor dengan kapasitas $5m^3$, tangki $5 m^3$, pH meter HM-20P, neraca analitik, desikator, oven, furnace model EPTR-13K, gas meter, sampler bag, seperangkat alat gas chromatography (GC)-2010AF Shimadzu, cawan porselen, sentrifuga, reactor unit DRB 200, HACH Spektrofotometri DR/4000U, Erlenmeyer, gelas ukur, gelas beker, labu takar, spatula, pinset, penjepit, pipet mikro, pipet tetes, botol semprot, sarung tangan dan masker.

C. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah observasi lapang dengan menyajikan data hasil pengamatan dalam bentuk tabel dan grafik. Data dianalisa secara deskriptif

yaitu analisa berdasarkan kondisi dan data selama berlangsungnya penelitian. Parameter kinetika pertumbuhan diperoleh dengan analisa regresi data hasil observasi lapangan dengan menggunakan 4 (empat) persamaan antara lain persamaan Monod, Contois, Moser dan Shuler. Model kinetika yang mendekati kondisi nyata dievaluasi berdasarkan koefisien korelasi r dari masing-masing persamaan. Parameter kinetika pemanfaatan substrat diperoleh dengan memplot data lapangan menggunakan kinetika reaksi orde pertama dan model Michaelis-Menten.

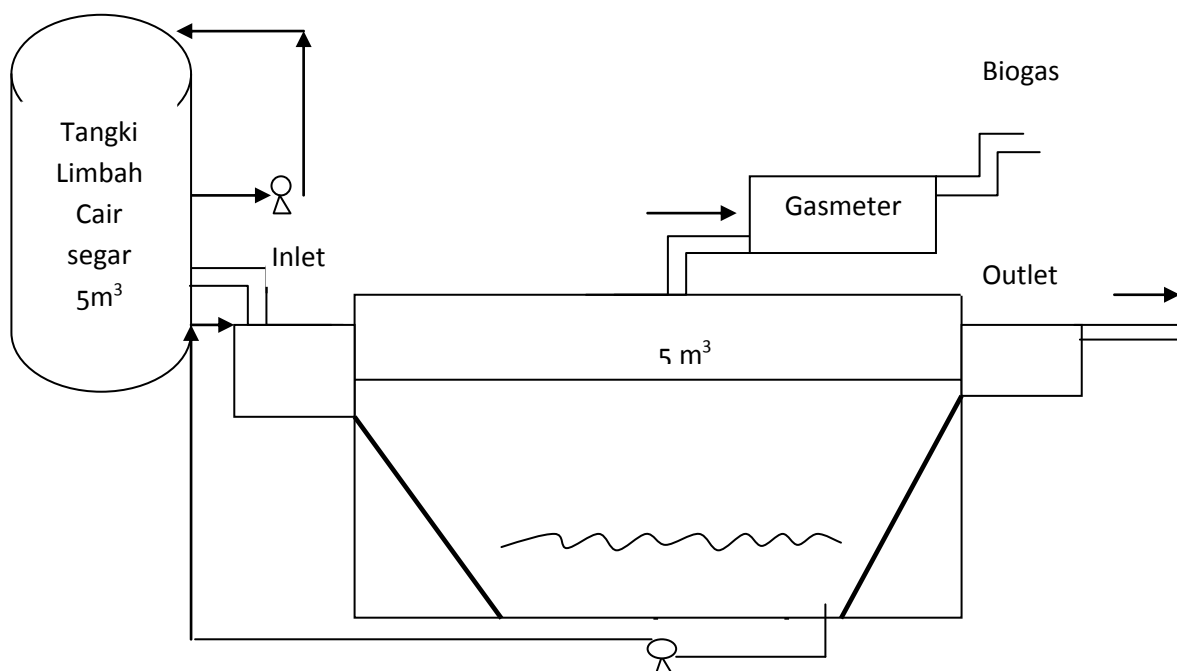
D. Pelaksanaan Penelitian

Bioreaktor anaerobik memiliki kapasitas 5 m^3 dengan volume kerja $4,375 \text{ m}^3$ (Gambar 2), terbuat dari fiber glass, berpenyekat dengan dasar bioreaktor berbentuk miring untuk pengendapan lumpur. Bioreaktor dilengkapi gas meter untuk mengukur produksi biogas setiap harinya. Limbah cair segar ditampung dalam tangki limbah cair segar dengan volume 5 m^3 .

Sebelum diumpan ke bioreaktor, limbah cair segar disirkulasi selama 1 jam untuk menghomogenkan limbah cair. Tahapan penelitian meliputi :

a. Aklimatisasi Mikroba.

Tahap ini dimulai dengan pengambilan lumpur anaerobik dari kolam anaerobik



Gambar 2. Design Bioreaktor Anaerobik 5m³ Skala Pilot

PTPN VII UU Bekri. Lumpur sebanyak 4 m³ dimasukkan ke bioreaktor, mikroba dibiarkan tumbuh dan setiap hari dialirkan LCPKS segar yang telah disirkulasi sebanyak 50 liter/hari. Tujuan dari tahap ini agar mikroba dapat menyesuaikan diri dengan lingkungan baru. Setelah menghasilkan biogas dan pH stabil pada kondisi netral, dilaksanakan penelitian tahap selanjutnya.

b. Tahap Pengamatan Pengaruh Variasi Laju Beban Organik Limbah Pabrik

Minyak Kelapa Sawit.

Dilaksanakan dengan mengumpankan limbah segar yang telah disirkulasi selama 1 jam setiap hari. Satu minggu sekali dilakukan sirkulasi bioreaktor dengan memompakan lumpur dibagian dasar bioreaktor ke bagian inlet. Peningkatan laju beban organik dilaksanakan dengan meningkatkan volume limbah cair yang

diumpangkan. Peningkatan volume limbah cair dilakukan secara bertahap yaitu 100, 150, 200 dan 250 l/hari (waktu tinggal 44, 29, 21 dan 17 hari) (Abdurahman, 2013). Peningkatan volume umpan limbah cair dilaksanakan jika telah tercapai keadaan tunak (*steady state*) yaitu apabila persentase penyisihan COD relatif konstan < 20% (Shuler, 1992). Pada tahap ini dilaksanakan pengamatan pH air limbah dan produksi biogas harian. Pengukuran biogas harian dilaksanakan dua kali yaitu pagi dan sore hari menggunakan gas flow meter yang dipasang secara permanen pada aliran keluar biogas. Parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Solid* (TS) dan *Volatile Solid* (VS) dianalisa dua kali seminggu.

Pengamatan parameter lapangan dilaksanakan sebagai berikut :

Tabel 3. Parameter, Lokasi dan Frekuensi Pengambilan Sampel

Parameter	Lokasi Sampel	Frekwensi
COD TS VS	Inlet dan Outlet Air Limbah	2 kali /minggu
Volume Biogas	Outlet Biogas	Setiap hari : pagi dan sore hari
pH	Outlet Air Limbah	Setiap hari

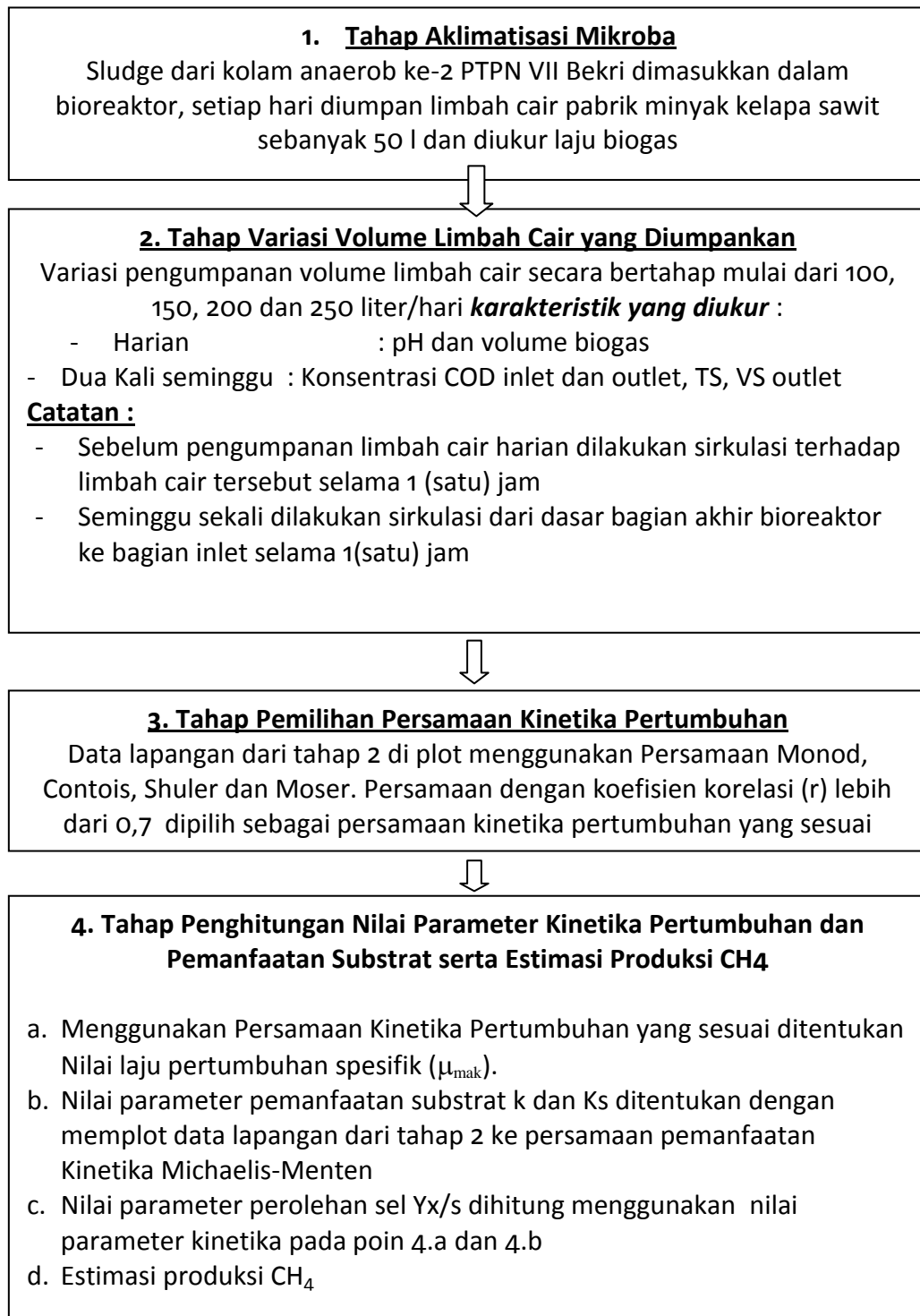
i. Pengukuran Nilai pH

Nilai pH outlet air limbah diukur setiap hari menggunakan pH meter (DKK-TOA Corporation, 2004). Nilai pH limbah cair segar diukur setiap kedatangan dari pabrik.

ii. Analisa Total Solid (TS) dan Volatil Solid (VS).

Sampel dari outlet air limbah sebanyak 50 ml disentrifugasi selama 15 menit pada 3000 rpm. Cawan porselen sebanyak 1 (satu) buah yang diketahui beratnya dan telah dikeringkan dalam oven 105⁰C selama 15 menit disiapkan.

Skema penelitian adalah sebagai berikut :



Gambar 3. Skema Penelitian

Setelah sentrifugasi padatan dipisahkan dari cairan dengan dekantasi atau menggunakan pipet. Padatan dimasukkan ke cawan porselen A lalu dikeringkan dalam oven 105⁰C hingga berat konstan ± selama 2 jam (hingga berat konstan). Cawan didinginkan dalam desikator ± 15 menit lalu ditimbang. Nilai TS sampel adalah selisih berat cawan A setelah dioven 105⁰C dengan berat cawan A kering dan dibagi volume sampel (APHA, 1998)

$$TS = \frac{\text{berat cawan A setelah dioven } 105^0\text{C, } \pm 2 \text{ jam(g) - berat kering cawan A (g)}}{\text{Volume sampel (l)}}$$

Cawan A yang telah ditimbang dimasukkan dalam furnace 550⁰C selama 20 menit, setelah selesai dimasukkan dalam desikator hingga temperatur kamar. Nilai volatil suspended solid (VS) adalah selisih penimbangan cawan A yang dioven 105⁰C dengan penimbangan cawan A setelah keluar furnace 550⁰C (APHA, 1998).

$$VS = \frac{(\text{berat cawan A sth difurnace } 550^0\text{C} - \text{berat cawan A sbl furnace } 550^0\text{C}) \text{ (g)}}{\text{Volume sampel (l)}}$$

iii. Analisa Chemical Oxygen Demand (COD)

Sampel dihomogenkan lalu pipet sampel sebanyak 0,2 ml dengan mikropipet. Masukkan sampel ke dalam vial yang berisi reagen COD lalu dipanaskan dalam reaktor unit DRB200 pada suhu 150⁰C selama 2 jam. Setelah dipanaskan, vial dikeluarkan dan dibiarkan hingga mencapai suhu kamar. Dilakukan pengukuran nilai COD menggunakan HACH Spektrofotometer DR4000 pada panjang gelombang 600nm (HACH Company, 2004).

iv. Prinsip Pengujian COD

Chemical Oxygen Demand (COD) adalah jumlah oksidan $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ yang bereaksi dengan contoh uji dan dinyatakan sebagai mg O_2 untuk tiap 1 liter contoh uji. Senyawa organik dan anorganik 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 400 nm dan Cr^{3+} kuat mengabsorpsi pada panjang gelombang 600 nm. Nilai COD 100 mg/l sampai 15.000 mg/l ditentukan kenaikan Cr^{3+} pada panjang gelombang 600 nm. Contoh uji yang mengandung COD > 15.000 mg/L dilakukan pengenceran terlebih dahulu sebelum pengujian. Untuk nilai COD lebih kecil atau sama dengan 90 mg/l ditentukan pengurangan konsentrasi $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ pada panjang gelombang 420 nm (SNI 06-6989.2-2004).

v. Cara Pembuatan Reagen COD

(1) Larutan pencerna (*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°C selama 2 jam ke dalam 500 ml air suling. Tambahkan 167 ml H_2SO_4 pekat dan 33,3 g HgSO_4 . Larutkan lalu dinginkan pada suhu kamar dan encerkan sampai 100 ml.

(2) Larutan pereaksi asam sulfat

Tambahkan serbuk atau kristal Ag_2SO_4 teknis ke dalam H_2SO_4 pekat atau 10,12 g Ag_2SO_4 untuk setiap satu kg H_2SO_4 pekat. Biarkan 1 jam sampai 2 jam hingga larut, aduk.

Reagen COD dibuat dengan mencampurkan 1,5 ml larutan pencerna dan 3,5 ml larutan pereaksi asam sulfat ke dalam vial atau tabung berukuran 16x 100 mm.

Reagen disimpan dalam tempat gelap untuk menghindari adanya kerusakan akibat sinar.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

- a. Kinetika pertumbuhan mikroba anaerobik dalam bioreaktor CIGAR mengikuti kinetika Moser dengan $n=2$ dengan nilai laju pertumbuhan maksimum $0,0395 \text{ hari}^{-1}$. Kinetika pemanfaatan substrat mengikuti reaksi orde pertama. Nilai perolehan sel didapat $Y_{x/s} = 0,036$, laju pemanfaatan substrat maksimum, k sebesar $1,110 \text{ hari}^{-1}$ dan konstanta setengah jenuh, K_s sebesar $22,2213 \text{ g/l}$.
- b. Nilai efisiensi proses anaerobik dalam memproduksi CH_4 mencapai maksimum pada OLR $2,07 \text{ kg/m}^3/\text{hari}$ yaitu $82,71\%$ dengan perolehan $0,32 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg COD}$. Dan produksi gas metan diprediksi dengan persamaan :
$$\text{CH}_4 (\text{m}^3/\text{hari}) = 0,074\text{OLR}^3 - 0,600\text{OLR}^2 + 2,050\text{OLR} - 1,243$$
 dengan nilai $r^2 = 0,910$

5.2 Saran

Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi proses anaerobik dalam memproduksi CH_4 dengan meningkatkan pengadukan di dalam bioreaktor dan pengumpanan substrat secara kontinu. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui pengaruh pengadukan dan pengumpanan substrat secara kontinu terhadap efisiensi proses anaerobik dalam memproduksi CH_4 .

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurahman N.H. dan N.H. Azhari. 2013. Effect of Organic Loading Rate on The Performance of UAMAS in Treating POME. *Journal of American Science*, Vol. 9: 23-31.
- Adrianto A., Bahruddin, dan Nurhalim, Peningkatan Kinerja Pembangkit Listrik Biogas Berbasis Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit dengan Scale Up Bioreaktor Hibrid Anaerobik dari 2,5 m³ menjadi 12,5 m³, Prosiding InSINas, disajikan 29-30 Nopember 2012.
- Bailey J. E., *Biochemical Engineering Fundamental*, Mc Graw-Hill Book Company, 1987, 983 halaman.
- Boer R., Strategi Pengembangan Sawit Kalimantan Tengah Berbasis REDD+, *Majalah Tropis*, Edisi 09 Tahun V, 2012.
- Choorit W., Pornpan W., 2007. Effect of Temperature on The Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent, *Electronic Journal of Biotechnology*, Vol: 10(3): 376-385.
- Chotwattanasak J., Puetpaiboon U., 2011, Full Scale Anaerobic Digester for Treating Palm Oil Mill Wastewater, *Journal of Sustainable Energy and Environment*, Vol.2: 133-136.
- Chaisri R, Pirayat B, Poonsuk P, dan Sumate C, 2007, Effect of Organic Loading Rate on Methane and Volatile Fatty Acid Productions from Anaerobic Treatment of POME in UASB and UFAF Reactors, *Songklanakarin Journal Science of Technology*, Vol. 29:311-323.
- Faisal M. dan Hajime U, 2001, Kinetic Analysis of Palm Oil Wastewater Treatment by Modified Anaerobic Baffled Reactor, *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 9: 25-31.
- Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia (GAPKI), 2014, Industri Minyak Sawit Indonesia Menuju 100 Tahun NKRI.
- Hasanudin U, 1993, Pengolahan Limbah Cair Minyak Kelapa Sawit dengan Bioreaktor Unggun Fluidisasi Anaerobik Dua Tahap, Tesis, Program Pascasarjana, ITB, Bandung.

- Huddin I, Dahlan I, Adlan NM dan Dasti AF, 2012 Comparative Study on Characterization of Malaysian Palm Oil Mill Effluent, *Research Journal of Chemical Science*, Vol. 2: 1-5.
- Igwe J.C., Onyegbado C.C., 2007, A Review of Palm Oil Mill effluent (Pome) Water Treatment, *Global Journal of Environmental Research*, Vol.1: 54-62.
- Kangle K.M., Kore S.V, Kulkarni G.S., 2012, Recent Trends in Anaerobic Codigestion : A Review, *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, Vol. 2 : 210-219.
- Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 28 tahun 2003 tentang Pedoman Teknis Pengkajian Pemanfaatan Air Limbah dari Industri Minyak Sawit pada Tanah di Perkebunan Kelapa Sawit.
- King L.S., Yu L.C., 2013, A Retrofitted Palm Oil Mill Effluent Treatment System for Tapping Biogas, *European International Journal of Science and Technology*, Vol.2:106-114.
- Mamun A.A., Idris A., 2008, Treatment of POME by Pilot Plant Anaerobic Fluidized Bed Reactor, *IJUM Engineering Journal*, Vol.9: 9-18.
- Saleh MMA, Mahmood UF, 2004, Anaerobic Digestion Technology for Industrial Waste Water Treatment, Eighth Water Technology Conference, IWTC8, Alexandria, Egypt.
- Kanlayanee M, Techkarnjanaruk S., Chaiprasert P., 2011, Microbial And Process Performance In Anaerobic Digestion Of POME Under Normal And Over Loading In Hybrid Reactor, International Conf on Food Eng & Biotech, IPCBEE, Vol. 9: 54-59.
- Naibaho P.M., 1998, Teknologi Pengolahan Kelapa Sawit, Pusat Penelitian Kelapa, 1998, 306 halaman.
- Nwabanne JT, AC Okoye, HC Ezedinma, 2012, Kinetics of Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent, *Canadian Journal of Pure & Applied Sciences*, Vol.6;1877-1881.
- Megat N, Jusoh A, Ghazali AH, 1989, Pome Treatment Utilizing High Rate Hybrid Anaerobic Reacor, *Journal of Islamic Academy of Science*, Vol.2: 13-16.
- Sarono, 2014, Strategi Pengurangan Gas Rumah Kaca Melalui Konversi Limbah cair Pabrik Kelapa Sawit Menjadi Energi Listrik, Desertasi, Program Doktor, IPB, Bogor.
- Shuler Michael L. dan Fikret Kargi, 1992, Bioprocess Engineering Basic Concept, Printice-Hall International, 479 halaman.

- Shian WY, Ong S, Lim K, Lee HC, 2011, *Acclimatization and Performance Study of Acidogenesis Anaerobic Degradation Process For Palm Oil Effluent*, International Conference on Environmental and Industrial Inovation IPCBEE, Vol.12;1-5.
- Tchobanoglous G, Burton FL, Stensel HD, 2003, *Waste Water Engineering Treatment and Reuse*, Mc Graw Hill, Fourth Edition, 1819 halaman.
- Vijaya S, A.N. Ma dan Y.M, Choo, 2010, *Capturing Biogas : A Means to Reduce Green House Gas Emissions for the Production of Crude Palm Oil*, *American Journal of Geoscience*, Vol.1: 1-6.
- Weng CK, Norli I, Ahmad A, 2014, *Application of Partial Mixed Semi-Countinous Anaerobic Reactor for Treating Palm Oil Mill Effluent (POME) Under Mesophilic Condition*, *Iranica Journal of Energy and Environment*, Vol. 5; 209-217.
- Zupancic DG, Grilc V, *Anaerobic Treatment and Biogas Production from Organic Waste*. www.interchopen.com, diunduh Januari 2014