

**STUDI PEMILIHAN KINETIKA REAKSI PRODUKSI BIOGAS DARI
AIR LIMBAH PABRIK KELAPA SAWIT UNTUK *SCALE UP*
*COMPLETELY STIRRED TANK BIOREACTOR***

Tesis

Oleh

AKHMAD ARAFAT MUHAEMIN



**PROGRAM PASCASARJANA
TEKNOLOGI INDUSTRI PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2018**

ABSTRACT

SELECTION OF KINETICS REACTION FOR BIOGAS PRODUCTION FROM PALM OIL MILL LIQUID WASTE FOR SCALING UP A COMPLETELY STIRRED TANK BIOREACTOR

By

Akhmad Arafat Muhaemin

Method for CPO wastewater processing by far is by anaerobic process. Anaerobic process still has many drawbacks. Ways to reduce anaerobic flaws are needed. References are needed to design and apply the optimum anaerobic waste treatment. One of which by reaction kinetics. From reaction kinetics, we can design efficient reactor size and its utilities. Seed collected was 50 L sludge from CPO plant cooling pond which then introduced as the substrate to the CSTR reactor. The reaction kinetics was obtained from the anaerobic degradation of linear regression analysis for semi-continuously feeding mode of operation said bench reactor with 1L, 1.5 L and 2 L of cooling pond CPO plant wastewater. Analysis concludes that Monod order of kinetics best describes anaerobic digestion in the bench scale CSTR bioreactor. Coefficients are; maximum growth rate 0.173 /day , u_{Max} and 0.038 endogenous constant, K_d . Maximum substrate utilization, K_s and biomass yield, $Y_{x/s}$ were 4.94 g/l and $0,07 \text{ gVSS/gCODr}$. Maximum efficiency of anaerobic degradation was 91.3% and maximum methane production was $0.058 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{day}$ at OLR $1.45 \text{ kgCOD/m}^3.\text{day}$. Five key parameters for scaling up can be consisted from similarities in the form of: power/volume 0.016 kW/m^3 , Reynolds number, $N_{\text{Re}} = 562$, Tip speed 0.62 m/s , Froude number, $N_{\text{Fr}} = 0.033$ and shaft speed 99 rpm . Each of the parameters then can be used as a reference for designing the scaled up CSTR bioreactor.

Keywords : Kinetics, Anaerobic, Scale up and Bioreactor

ABSTRAK

STUDI PEMILIHAN KINETIKA REAKSI PRODUKSI BIOGAS DARI AIR LIMBAH PABRIK KELAPA SAWIT UNTUK *SCALE UP* *COMPLETELY STIRRED TANK BIOREACTOR*

Oleh

Akhmad Arafat Muhaemin

Salah satu metode pengolahan air limbah pabrik kelapa sawit adalah dengan proses anaerobik. Proses anaerobik masih memiliki banyak kelemahan. Cara untuk mengatasi kelemahan proses anaerobik dibutuhkan. Referensi diperlukan untuk merancang dan menerapkan pengolahan limbah anaerobik yang optimum. Salah satunya dengan menggunakan kinetika reaksi pemanfaatan substrat oleh mikroba. Dari jenis kinetika pemanfaatan substrat mikroba kita juga dapat merancang reaktor yang paling efisien. Umpan yang dikumpulkan adalah lumpur 50 L dari *cooling pond* Pabrik Kelapa Sawit. Substrat kemudian dimasukkan ke dalam reaktor CSTR JFE skala bench. Kinetika reaksi diperoleh dari analisis regresi linier degradasi anaerobik yang terus diberikan umpan secara *semi-continuous* ke reaktor *CSTR bench* sebanyak 1 L, 1,5 L dan 2 L. Analisis menyimpulkan bahwa model Monod adalah model kinetika yang paling baik dalam menggambarkan pengolahan anaerobik untuk modus operasi *semi-continuous*. Koefisien kinetika yang dihasilkan adalah; laju pertumbuhan maksimum 0,173 / hari, μ_{Max} dan 0,038 konstanta endogenous, K_d . Penggunaan substrat maksimum, K_s dan hasil biomassa, $Y_{x/s}$ adalah 4,94 g/l dan 0,07 gVSS/gCODr. Efisiensi maksimum degradasi anaerobik adalah 91,3% dan produksi metana maksimum adalah 0,058 m³CH₄/hari pada OLR 1,45 kgCOD/m³.day. Digunakan 5 parameter kunci perbesaran bioreaktor. Kesamaan antara reaktor ukuran bench dan n times real scale dapat berasal dari rasio: daya/volume, P/V 0,016 kW / m³, bilangan Reynolds, $N_{Re} = 562$, kecepatan tip 0,62 m/s, bilangan Froude, $N_{Fr} = 0,033$ dan kecepatan poros 99 rpm. Setiap masing-masing parameter kemudian dapat dijadikan basis dimensi perbesaran bioreaktor.

Kata kunci: Kinetika, Anaerobik, Skala dan Bioreaktor

**STUDI PEMILIHAN KINETIKA REAKSI PRODUKSI BIOGAS DARI
AIR LIMBAH PABRIK KELAPA SAWIT UNTUK *SCALE UP*
*COMPLETELY STIRRED TANK BIOREACTOR***

Oleh

Akhmad Arafat Muhaemin

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER SAINS

Pada

**Program Pascasarjana Magister Teknologi Industri Pertanian
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA
TEKNOLOGI INDUSTRI PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2018**

Judul Tesis : **STUDI PEMILIHAN KINETIKA REAKSI
PRODUKSI BIOGAS DARI AIR LIMBAH
PABRIK KELAPA SAWIT UNTUK SCALE UP
COMPLETELY STIRRED TANK
BIOREACTOR**

Nama Mahasiswa : **Akhmad Arafat Muhaemin**


Nomor Pokok Mahasiswa : 1324051001

Program Studi : Magister Teknologi Industri Pertanian


Fakultas : Pertanian




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


Dr. Erdi Suroso, S.T.P., M.T.A.
NIP 19721006 199803 1 005

2. Ketua Program Studi
Magister Teknologi Industri Pertanian


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


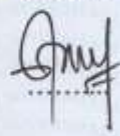
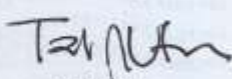
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji


Ketua : Prof. Dr. Eng. Ir. Udin Hasanuddin, M.T.

Sekretaris : Dr. Erdi Suroso, S.T.P., M.T.A.

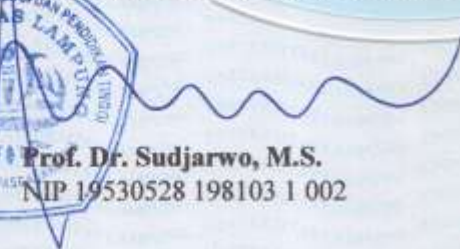
**Penguji
Bukan Pembimbing : Dr. Ir. Tanto Pratondo.U., M.Si.**


.....

.....

.....

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 : 27 Desember 2017

PERNYATAAN KEASLIAN HASIL KARYA

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Akhmad Arafat Muhaemin

NPM : 1324051001

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

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

Bandar Lampung, Desember 2017



Akhmad Arafat Muhaemin
NPM. 1324051001

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 3 Mei 1983. Penulis merupakan anak pertama dari keluarga Bapak Drs. Muhaemin A.D. M.Pd (almarhum) dan Ibu Dr. Ratu Betta R.

Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 8 Tanjung Karang pada tahun 1998; Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 2 Bandar Lampung pada tahun 2001. Pada tahun 2011 penulis lulus dari Institut Teknologi Indonesia Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Kimia. Tahun 2013 penulis diterima sebagai mahasiswa pada Program Studi Magister Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

SANWACANA

Alhamdulillah, atas rahmat dan ridho-Nya penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Studi Pemilihan Kinetika Reaksi Produksi Biogas Dari Air Limbah Pabrik Kelapa Sawit Untuk *Scale Up Completely Stirred Tank Bioreactor*”.

Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, MT selaku pembimbing pertama dan pembimbing akademik, atas saran dan bimbingannya selama penelitian dan penyelesaian tesis ini;
2. Bapak Dr. Erdi Suroso, S.T.P., M.T.A. selaku pembimbing kedua atas saran dan bimbingannya selama penelitian dan penyelesaian tesis;
3. Bapak Dr. Ir. Tanto Pratondo Utomo, M.Si. selaku pembahas atas saran, bimbingan dan evaluasinya terhadap penyelesaian tesis.
4. Ibu Dr. Sri Hidayati STP. MP, selaku Ketua Program Studi Magister Teknologi Industri Pertanian atas dukungannya dalam menyelesaikan tesis.
5. Bapak Dr. Saroni atas dukungannya terhadap penelitian ini.
6. Staf pengajar, staf administrasi, dan pranata Laboratorium pada Program Studi Magister Teknologi Industri Pertanian, Pak Joko, Pak Midi, Pak Hanafi, Mas Edi, Mas Riadi, Mbak Fiza, Mbak Sri, Mbak Nisa. Billy, Mia, Ivoni, Widya, Nurul, Rani, Ella, Pak Agus Purnomo, Pak Darmansyah, Pak Supri, Pak Bekti dan lainnya.

7. Ayah (alm) dan Ibu yang telah mendidik dan memberikan bekal kehidupan kepada penulis.
8. Teman-teman MTIP 2013 serta teman-teman laboratorium limbah THP atas bantuannya selama ini.

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

Bandar Lampung, Desember 2017

Penulis

Akhmad Arafat Muhaemin

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
SANWACANA	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Kerangka Pemikiran	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Pengelolaan Limbah Agroindustri	5
2.2. Karakteristik Air Limbah Pengolahan PKS	8
2.3. Pengolahan Anaerobik Menjadi Biogas	13
2.4. Model Kinetika Reaksi Pembentukan Biogas	25
III. BAHAN DAN METODE	30
3.1. Tempat dan Waktu Penelitian	30
3.2. Alat dan Bahan	30

3.3. Metode Penelitian	31
3.4. Pelaksanaan Penelitian	31
3.5. Pengamatan	34
3.5.1. <i>potential Hydrogen</i> (pH)	34
3.5.2. COD	34
3.5.3. TSS	35
3.5.4. VSS	36
3.5.5. Konsentrasi gas metana	37
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1. Karakteristik ALPKS	39
4.2. Pengukuran Produksi Biogas	42
4.3. Pengukuran <i>Total Suspended Solids</i>	44
4.4. Pengukuran Nilai <i>Volatile Suspended Solids</i>	45
4.5. Pengaruh Variasi Laju Beban Organik (<i>OLR</i>) terhadap Kestabilan Proses	48
4.5.1. <i>OLR</i> terhadap rata-rata COD <i>removal</i>	48
4.5.2. Pengaruh <i>OLR</i> terhadap pH	51
4.6. Menentukan Model Kinetika Pertumbuhan yang Sesuai	52
4.6.1. Model Kinetika Moser	56
4.6.2. Model Kinetika Chen-Hashimoto	58
4.6.3. Model Kinetika Shuler	59
4.6.4. Model Kinetika Contois	61
4.6.5. Model Kinetika Herbert	62
4.6.6. Ikhtisar Pemilihan Model Kinetika	65

4.6.7. Hubungan Kinetika dan Scale-up	65
4.6.8. Metode Scale-Up dan Rekomendasi Geometris Skala Riil	67
V. KESIMPULAN DAN SARAN	75
DAFTAR PUSTAKA	76
LAMPIRAN	86

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Kesetaraan biogas dengan bahan bakar lain	6
2. Parameter rata-rata ALPKS	9
3. Baku mutu air limbah bagi usaha dan atau kegiatan industri minyak sawit	14
4. Model kinetika bagi pemanfaatan substrat	27
5. Jadwal pelaksanaan penelitian dalam satu minggu	32
6. Karakteristik ALPKS penelitian sebelumnya	39
7. Persentase Penyisihan COD Pada Berbagai Pengolahan Anaerobik Limbah Pabrik Minyak Kelapa Sawit	50
8. Bentuk linier dari masing-masing model kinetika yang akan di-plot	42
9. Perbandingan Konstanta Model Kinetika dan Nilai Least Square ...	65
10. Selisih nilai konsentrasi effluent perhitungan dan eksperimen	66
11. Konsentrasi awal (COD) yang dapat dilakukan apabila akan di <i>scale-up</i> 1000x <i>bV</i>	67
12. Rekomendasi Dimensi bioreaktor dan beberapa parameternya setelah di <i>scale-up</i>	74

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Diagram alir kerangka pemikiran	4
2. Proses pengolahan anaerobik (<i>anaerobic digestion</i>)	16
3. Rancang bangun bioreaktor CSTR	33
4. Diagram alir pelaksanaan analisa penelitian	38
5. Produksi biogas, L/L, Ulangan I dan II	42
6. Pengukuran TSS, mg/L, Ulangan I dan II	44
7. Pengukuran VSS, mg/L, Ulangan I dan II	46
8. Pengukuran VSS/TSS <i>ratio</i> , mg/L, Ulangan I dan II	47
9. Pengaruh OLR terhadap % COD removal	49
10. Plot pH terhadap OLR	51
11. Plot Monod untuk mencari Y dan Kd	53
12. Plot Monod untuk mencari Ks dan μ_{max}	55
13. Plot Moser untuk mencari Ks dan μ_{max}	57
14. Plot Chen-Hashimoto untuk mencari Ks dan μ_{max}	58
15. Plot Shuler untuk mencari Ks dan μ_{max}	60
16. Plot Contois untuk mencari Ks dan μ_{max}	61
17. Plot Herbert untuk mencari Ks dan μ_{max}	63

DAFTAR ISTILAH

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

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Provinsi Lampung merupakan daerah yang mengandalkan hasil pertanian. Sebesar 35% produk domestik regional bruto (PDRB) Lampung berasal dari sektor Pertanian (Badan Pusat Statistik Provinsi Lampung, 2016). Menurut Bariot (2012) kelapa sawit adalah salah satu komoditas perkebunan unggulan Provinsi Lampung.

Luas areal perkebunan kelapa sawit meningkat sebesar 3,88 % dari tahun 2012 sampai 2013 menjadi 209,758 ha (Dinas Perkebunan Provinsi Lampung, 2014). Limbah yang dihasilkan dari proses pengolahan kelapa sawit tentunya semakin bertambah. Di Pabrik Kelapa Sawit (PKS), untuk kapasitas 40 tbs/hari atau *tpd*, volume air limbah yang dihasilkan adalah $40 \text{ tpd} \times 20 \text{ jam} \times 60\% = 480 \text{ ton/hari}$. Pabrik Kelapa Sawit sudah memiliki unit pengolahan air limbah *pond system* sejak tahun 1990. Dengan adanya unit pengolahan *pond system*, air limbah yang dibuang sudah memenuhi baku mutu yang berlaku sehingga lingkungan tidak tercemar.

Sistem pengolahan air limbah pabrik kelapa sawit (ALPKS) yang saat ini diterapkan telah mampu mencapai baku mutu sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5/2014 atau Peraturan Gubernur Lampung No.7/2010. Akan tetapi, pengolahan air limbah sistem kolam memiliki kelemahan antara lain membutuhkan areal kolam yang cukup luas, perlu pemeliharaan dan penanganan lumpur dalam

kolam, terjadinya pendangkalan kolam, terjadinya pengurangan jumlah nutrisi, terjadinya pencemaran sungai dan terjadinya *green house gas* akibat gas metan. Sementara itu hanya sedikit sekali industri yang dilengkapi dengan sistem pengolahan air limbah menjadi biogas atau *methane capture*. *Open pond system* merupakan sistem dimana gas CO₂ dan CH₄ terdispersi ke udara terbuka secara alami berpotensi menimbulkan pemanasan global, gas metan 21 kali lebih reaktif dari karbondioksida pada atmosfer (Rodhe, 1990). Teknik *methane capture* dapat memberikan keuntungan seperti tidak memerlukan lahan yang cukup luas, menghasilkan gas bahan bakar yang dapat digunakan untuk menggerakkan generator di industri setempat, mampu menghasilkan gas hingga 28 m³/ton limbah yang diolah dan menghasilkan hasil samping yang baik untuk dimanfaatkan sebagai pupuk (Mujdalipah, 2014). Penelitian tentang pengolahan limbah organik secara *anaerobic* dengan sistem *continuous stirred tank reactor* (CSTR) sudah beberapa kali dilakukan (Ohimain, 2017; Varol, 2016; Fu, 2016; Trisakti, 2015). Penelitian-penelitian tersebut masih dilakukan dalam skala laboratorium. Untuk aplikasi skala industri, para peneliti masih mengalami kesulitan karena tidak mengetahui hubungan antara skala laboratorium dan skala industri.

Penelitian ini berfungsi untuk menghubungkan reaktor CSTR skala laboratorium (*bench, R&D*) dengan perbesarannya ke skala industri. Hubungan skala *R&D* dan skala industri dapat dijelaskan oleh persamaan matematika yaitu persamaan kinetika reaksi (Donati, 1997). Dalam penelitiannya tersebut Donati menjelaskan bahwa data kinetika spesifik suatu reaksi dapat digunakan untuk *scale-up* karena mewakili reaksi spesifik yang terjadi di dalam *scaled-up* reactor. Kesesuaian antara data eksperimen dengan kurva kinetika yang terbentuk (*data*

fitting) dievaluasi dengan metode *linear-least square* (Nurhadi, 2014). Data yang paling sesuai dapat digunakan sebagai acuan untuk *scale-up* (Donati, 1997; Ehly, 2007; Schwolow, 2015).

1.2. Tujuan Penelitian

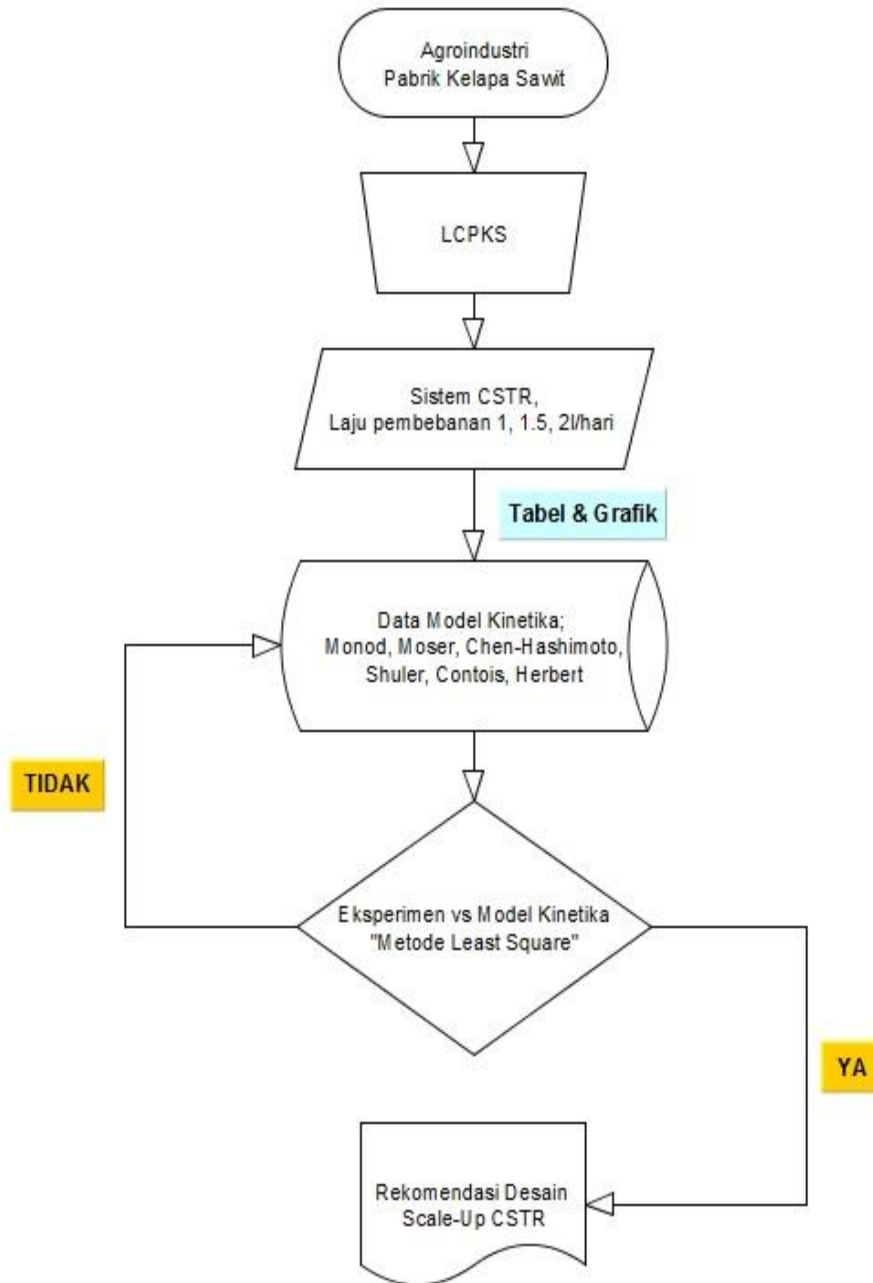
Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Memilih model kinetika yang paling sesuai dengan model kinetika reaksi pemanfaatan substrat menjadi biogas sistem *anaerobic* CSTR.
2. Menentukan desain CSTR untuk *scale-up* penelitian ke skala industri berdasarkan model kinetika reaksi sistem *anaerobic* CSTR.

1.3. Kerangka Pemikiran

Data penelitian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Dari tabel dan grafik diperoleh informasi untuk membandingkan data reaksi dengan model kinetika. Dari peneliian terdahulu, model kinetika yang dapat digunakan adalah Monod, Contois, Chen-Hashimoto, Moser, Shuler dan Herbert. Selanjutnya ditentukan model kinetika yang paling sesuai (*best fit*) dengan proses yang terjadi dalam bioreaktor CSTR *bench scale* melalui metode *least square*.

Data penelitian yang sesuai dengan model kinetika reaksi ditunjukkan dengan nilai *least square* (R^2) yang paling mendekati 1 dan nilai konstanta yang bernilai positif (+). Data model kinetika kemudian dapat digunakan sebagai data pendukung untuk menentukan desain *scale-up* bioreaktor CSTR. Rekomendasi *scale-up* mengikuti beberapa parameter umum yaitu; daya/volume, N_{Re} , kecepatan tip (*tip speed*), N_{Fr} dan kecepatan poros (*shaft speed*).



Gambar 1. Diagram Alir Kerangka Pemikiran

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengelolaan Limbah Agroindustri

Pembangunan berkelanjutan harus menjadi dasar bagi pertumbuhan ekonomi di abad dua puluh satu. Pembangunan berkelanjutan diperlukan agar arah produksi bioenergi dari bahan terbarukan berharga murah dan bahan baku dapat tersedia secara lokal. Biasanya bahan baku murah dan tersedia *locally* adalah limbah dan air limbah agroindustri. Upaya ini tidak hanya akan meringankan pencemaran lingkungan, tetapi juga mengurangi energi ketidakamanan dan permintaan menurun sumber daya alam. Perlu juga diperhatikan biaya yang paling efektif sehingga penggunaannya dapat berkelanjutan. Pendekatan yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan pilihan bioteknologi. Pengolahan anaerobik adalah teknologi yang menghasilkan bioenergi terbarukan yang diperlukan untuk mengganti kebutuhan energi sekitar melalui produksi metana dan hidrogen (Kumar, 2017).

Terdapat tantangan besar untuk pengelolaan limbah, bidang sains dan teknologi bekerja bersama-sama dalam menghasilkan energi bersih yang akan mengurangi beban pencemaran lingkungan. Sampai saat ini, sudah ada banyak publikasi yang berurusan dengan pengelolaan limbah padat, namun masih ada sedikit dokumen yang dapat memberikan informasi mengenai penggunaan limbah ini sebagai baku materi. Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian yang difokuskan

pada transformasi limbah menjadi produk yang berguna telah dapat membuat kemajuan besar. Terutama di daerah pedesaan negara-negara berkembang, hal ini terutama karena ketidakseimbangan permintaan dan pasokan energi (Kumar, 2017).

Salah satu cara yang paling menarik untuk mendapatkan sumber energi alternatif dan juga mengontrol polusi aliran limbah ialah melalui biokonversi proses (Olvera, 2013). Studi intensif dan berbagai "teknologi hijau" telah banyak diulas dalam beberapa dekade terakhir (Kleerebezem dan van Loosdrecht, 2007; Hallenbeck dan Ghosh, 2009). Bertahun-tahun, *anaerobic digestion* telah menjadi teknologi yang berlaku untuk produksi biogas, di mana substrat dikonversi ke gas metana dan produk lainnya sebagai kegiatan *digestive* bersama dari beberapa kelompok mikroba dalam sistem reaksi (Sterling, 2001).

Biogas yang dihasilkan oleh air limbah agro-industri akan memainkan peran penting dalam masa depan. Biogas merupakan sumber energi terbarukan yang serbaguna, dapat digunakan untuk penggantian bahan bakar fosil dan dapat digunakan juga sebagai bahan bakar kendaraan gas. Biogas yang kaya metana dapat menggantikan gas alam juga dan sebagai bahan baku dalam produksi bahan kimia (Shin *et al.*, 2010). Berikut beberapa kesetaraan biogas apabila dijadikan sumber bahan bakar pengganti bahan bakar lain.

Tabel 1. Kesetaraan biogas dengan bahan bakar lain

Biogas dengan methana 65% (1000 L)
600 L gas alam
25 L propana
22.3 L butana
17.79 L bensin
16.28 L solar

Sumber: Palmer D.G., 1981

Biogas diproduksi di *digester* anaerobik, terdiri dari metana (50% -80%), karbon dioksida (20% -50%), dan gas-gas lain seperti hidrogen, karbon monoksida, nitrogen, oksigen dan hidrogen sulfida. Pencernaan anaerobik adalah proses biologis di mana bahan organik terurai oleh bakteri dalam ketiadaan udara. Teknologi umum anaerobik dari bahan organik kompleks mulai dikenal dan telah diterapkan selama lebih 60 tahun sebagai bagian dari pengolahan limbah domestik untuk menstabilkan limbah organik. Bal & Dhagat (2001) menunjukkan bahwa proses anaerobik lebih menguntungkan daripada proses aerobik dalam pengolahan sampah organik karena tingkat stabilisasi limbah tinggi, produksi lumpur (*sludge*) rendah, kebutuhan nutrisi yang rendah dan terdapat *by product* gas metana.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi parameter kinetik dan persamaan model untuk pencernaan anaerobik oleh (Siles *et al.*, 2010), (Borja *et al.*, 2005), (Jimenez *et al.*, 2004), (Raposo *et al.*, 2009), (Rincon *et al.*, 2009) dan (Hu *et al.*, 2002); penelitian-penelitian tersebut didasarkan pada model kinetik Monod (Monod, 1950) dan pada model kinetik yang direvisi yang dikembangkan oleh (Chen *et al.*, 1980) dan (Hashimoto *et al.*, 1981).

Dalam proses mikrobiologi, *anaerobic digestion* dilakukan oleh empat kelompok bakteri yang berbeda. Bertanggung jawab untuk melaksanakan pencernaan anaerobik dari bahan organik kompleks, kelompok pertama adalah bakteri hidrolitik yang meng-katabolisasi karbohidrat, protein, lipid dan komponen kecil lainnya dari bahan organik menjadi asam lemak, H₂ dan CO₂. Kedua adalah bakteri hidrogen yang memproduksi bakteri *acetogenic* yang meng-katabolisasi asam lemak tertentu dan produk akhir netral menjadi asetat, CO₂ dan H₂. Kelompok ketiga adalah bakteri *homoacetogenic* yang mensintesis asetat menggunakan H₂,

CO₂, asam format dan menghidrolisis senyawa multikarbon menjadi asam asetat. Akhirnya, kelompok keempat adalah bakteri metanogen yaitu bakteri yang menggunakan asetat, karbon dioksida dan hidrogen untuk menghasilkan metana. Aksi terpadu empat kelompok bakteri ini menjamin stabilitas proses selama proses pencernaan anaerobik bahan organik kompleks (Zainol, 2013).

2.2. Karakteristik Air limbah Pengolahan CPO

Industri minyak sawit menghasilkan limbah hasil pengolahan berupa limbah padat dan cair. Air limbah pabrik kelapa sawit (ALPKS) adalah salah satu produk samping dari pabrik minyak kelapa sawit yang berasal dari kondensat dari proses sterilisasi, air dari proses klarifikasi, air *hydrocyclone* (*claybath*) dan air pencucian pabrik. ALPKS mengandung berbagai senyawa terlarut termasuk serat-serat pendek, hemiselulosa dan turunannya, protein, asam organik bebas dan campuran mineral-mineral.

Saat ini pencemaran lingkungan yang diakibatkan air limbah pabrik kelapa sawit dikategorikan sebagai pencemar lingkungan yang sangat serius, karena karakteristik air limbah mengandung minyak lemak yang cukup tinggi, berkisar 190-14.720 mg/L (Ditjen PPHP, 2006). Sementara itu baku mutu yang ditetapkan oleh pemerintah RI melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 tahun 2014 pada Tabel 3. adalah nilai minyak lemak sebesar 25 mg/L. Air limbah dengan karakteristik seperti disebutkan di atas bila langsung dibuang ke perairan akan meningkatkan kandungan minyak lemak sehingga merusak ekosistem lingkungan sekitarnya. Oleh karena itu, air limbah industri minyak sawit ini perlu penanganan terlebih dahulu sebelum dibuang ke perairan karena dapat menurunkan kualitas air.

Data ini menunjukkan betapa beratnya beban yang ditanggung oleh lingkungan akibat pencemaran oleh air limbah industri minyak sawit. Penanganan yang sesuai untuk mengolah air limbah industri minyak sawit adalah dengan proses *anaerob*.

Proses *anaerob* merupakan proses yang kompleks dengan melibatkan berbagai kelompok bakteri. Keterlibatan antara kelompok ini saling menguntungkan satu sama lainnya karena tidak terjadi saling kompetisi antara kelompok dalam rangka pemanfaatan nutrisi atau substrat. Masing-masing kelompok bakteri yang terlibat mempunyai substrat tertentu antara lain kelompok bakteri hidrolitik hanya memanfaatkan substrat berupa senyawa organik dengan molekul besar seperti karbohidrat, protein dan minyak-lemak, sedangkan kelompok bakteri asidogen hanya dapat memanfaatkan substrat yang lebih sederhana dengan molekul organik yang dihasilkan dari penguraian kelompok bakteri hidrolitik (misal glukosa, asam amino dan asam lemak bebas) (Ahmad, 2011).

Tabel 2. Parameter dan rata-rata properti ALPKS

Parameter	Rata-rata	Unit
pH	4.7	
Minyak	4000	mg/l
BOD	25000	mg/l
COD	50000	mg/l
Total Solid	40500	mg/l
Suspended Solid	18000	mg/l
Total Volatile Solid	34000	mg/l
Total Nitrogen	750	mg/l
Mineral	Rata-rata	Unit
Kalium	2270	mg/l
Magnesium	615	mg/l
Kalsium	439	mg/l
Besi	46.5	mg/l
Tembaga	0.89	mg/l

Sumber: Ngan, 2000

Kandungan minyak lemak pada air limbah industri minyak sawit menunjukkan bahwa air limbah industri minyak sawit mengandung bahan-bahan organik yang tinggi jika dibuang ke badan air penerima. Limba cair industri sawit juga akan mengakibatkan penurunan kualitas perairan dan lingkungan. Dampak yang terjadi antara lain terjadinya pembusukan pada badan air penerima. Buih yang juga dihasilkan oleh air limbah tersebut pada selang waktu tertentu akan mengeras sehingga menutupi permukaan badan air penerima. Akibatnya tentu saja akan menghambat kontak antara air dengan udara bebas sekitarnya. Terhambatnya kontak antara air dengan udara bebas akan mengakibatkan berkurangnya oksigen terlarut dalam air. Kurangnya *dissolved oxygen* akan berpengaruh terhadap kehidupan biota yang ada di dalam badan air penerima tersebut (Ahmad, 1992). Upaya pencegahan terjadinya pencemaran air dan lingkungan oleh air limbah industri minyak sawit yakni dilakukan dengan melakukan pengolahan air buangan tersebut (Ahmad dan Setiadi, 1993). Proses *anaerob* merupakan proses degradasi senyawa organik seperti karbohidrat, protein dan lemak yang terdapat dalam air limbah oleh bakteri *anaerob* tanpa kehadiran oksigen menjadi biogas yang terdiri dari CH₄ (50-70%) dan CO₂ (25-45%), serta N₂, H₂, H₂S dalam jumlah kecil (Ahmad, 2009).

Air limbah kelapa sawit merupakan nutrien yang kaya akan senyawa organik dan karbon, dekomposisi dari senyawa-senyawa organik oleh bakteri *anaerob* dapat menghasilkan biogas (Deublein dan Steinhauster, 2008). Jika gas-gas tersebut tidak dikelola dan dibiarkan lepas ke udara bebas maka dapat menjadi salah satu penyebab pemanasan global karena gas metan dan karbon dioksida yang dilepaskan adalah termasuk gas rumah kaca. Gas rumah kaca adalah sumber

pemanasan global saat ini. Emisi gas metana 21 kali lebih berbahaya dari CO₂. Metana (CH₄) merupakan salah satu penyumbang gas rumah kaca terbesar (Sumirat dan Solehudin, 2009).

Air limbah dari pabrik minyak kelapa sawit umumnya bersuhu tinggi 70-80 °C, berwarna kecoklatan, mengandung padatan terlarut dan tersuspensi berupa koloid dan residu minyak dengan BOD (*biological oxygen demand*) dan COD (*chemical oxygen demand*) yang tinggi. Apabila air limbah ini langsung dibuang ke perairan maka dapat mencemari lingkungan. Jika limbah tersebut langsung dibuang ke perairan, maka sebagian akan mengendap, terurai secara perlahan, mengkonsumsi oksigen terlarut, menimbulkan kekeruhan, mengeluarkan bau yang tajam dan dapat merusak ekosistem perairan. Pengolahan ALPKS sebelum dibuang mengikuti baku mutu Keputusan Menteri Lingkungan Hidup 5 Tahun 2014. Baku mutu air limbah usaha atau industri minyak sawit mengizinkan BOD, COD, TSS, minyak dan lemak, nitrogen total, pH dan debit dalam jumlah tertentu untuk masuk atau dibuang ke badan air penerima (*communal water body, etc.*). Jumlah tersebut disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Dan Atau Kegiatan Industri Minyak Sawit

Parameter	Kadar Paling Tinggi	Unit	Beban Paling Tinggi	Unit
BOD ₅	100	mg/l	0.25	kg/ton
COD	350	mg/l	0.88	kg/ton
TSS	250	mg/l	0.63	kg/ton
Minyak dan Lemak	25	mg/l	0.063	kg/ton
Nitrogen Total (sebagai N)	50	mg/l	0.125	kg/ton
pH			6.0-9.0	
Debit limbah paling tinggi	2.5 mb per ton produk minyak sawit (CPO)			

Sumber: Keputusan Menteri Lingkungan Hidup 5 Tahun 2014

Pengolahan air limbah pabrik kelapa sawit yang dilakukan di PKS adalah dengan menggunakan unit pengumpul (*fat pit*) yang kemudian dialirkan ke *de-oil-*

ing ponds (kolam pengutipan minyak) untuk diambil kembali minyaknya serta menurunkan suhunya, kemudian dialirkan ke kolam anaerobik atau aerobik dengan memanfaatkan mikroba sebagai perombak BOD dan menetralsir keasaman limbah.

Teknik pengolahan ini dilakukan karena cukup sederhana dan dianggap murah. Namun teknik ini dirasakan tidak efektif karena memerlukan lahan pengolahan limbah yang luas. Selain itu emisi metan yang dihasilkan dari kolam-kolam tersebut merupakan masalah yang saat ini harus ditangani. Jenie (1993) menyatakan bahwa limbah dengan kandungan bahan-bahan organik dalam konsentrasi tinggi merupakan limbah yang sesuai untuk diproses dalam sistem fermentasi anaerobik. Pengolahan air limbah secara anaerobik pada dasarnya merupakan penguraian senyawa organik oleh mikroorganisme dalam kondisi tanpa oksigen dan menghasilkan biogas sebagai produk akhir.

Pengolahan ini memiliki beberapa keuntungan dibandingkan pengolahan secara aerobik, antara lain :

1. Pengolahan air limbah secara anaerobik tidak memerlukan energi untuk aerasi.
2. Biomassa yang dihasilkan dan harus dibuang hanya sekitar 10% dari jumlah yang dihasilkan dalam proses pengolahan secara aerobik.
3. Polutan organik sebagian besar (80–90%) dapat dikonversi menjadi biogas yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi.
4. Stabilisasi dari komponen organik dan memberikan karakteristik tertentu pada daya ikat air produk yang menyebabkan produk dapat dikeringkan dengan mudah.

Disamping keuntungan-keuntungan tersebut diatas, menurut Yang dan Nagano, (1984), proses degradasi secara anaerobik juga mempunyai beberapa kekurangan, antara lain :

1. Menimbulkan masalah bau dan kontaminasi air tanah di daerah sekitar kolam.
2. Hasil sampingan proses anaerobik yang berupa gas metana tidak dapat dimanfaatkan.
3. Memerlukan pemeliharaan secara periodik untuk membuang lumpur yang terakumulasi di dasar kolam.

Sedangkan kerugian utama yang ditimbulkan oleh proses degradasi secara anaerobik adalah :

1. Laju pertumbuhan bakteri pembentuk metana yang lambat dan memerlukan kira-kira 2-3 hari untuk melipatgandakannya.
2. Memerlukan alat pemanas untuk menjaga agar digester berada pada suhu optimum (35°C) untuk pertumbuhan bakteri.
3. Sifat sensitif yang alami dari bakteri pembentuk metana (*methanogenic forming bacteria*).

Efisiensi produksi biogas sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor meliputi: suhu, derajat keasaman (pH), konsentrasi asam-asam lemak volatil, nutrisi (terutama nisbah karbon dan nitrogen), zat racun, waktu retensi hidrolis, kecepatan bahan organik dan konsentrasi amonia (Hermawan *et al.*, 2007).

2.3. Pengolahan Anaerobik Menjadi Biogas

Digester anaerobik berpengaduk *completely stirred tank reactor* (CSTR)

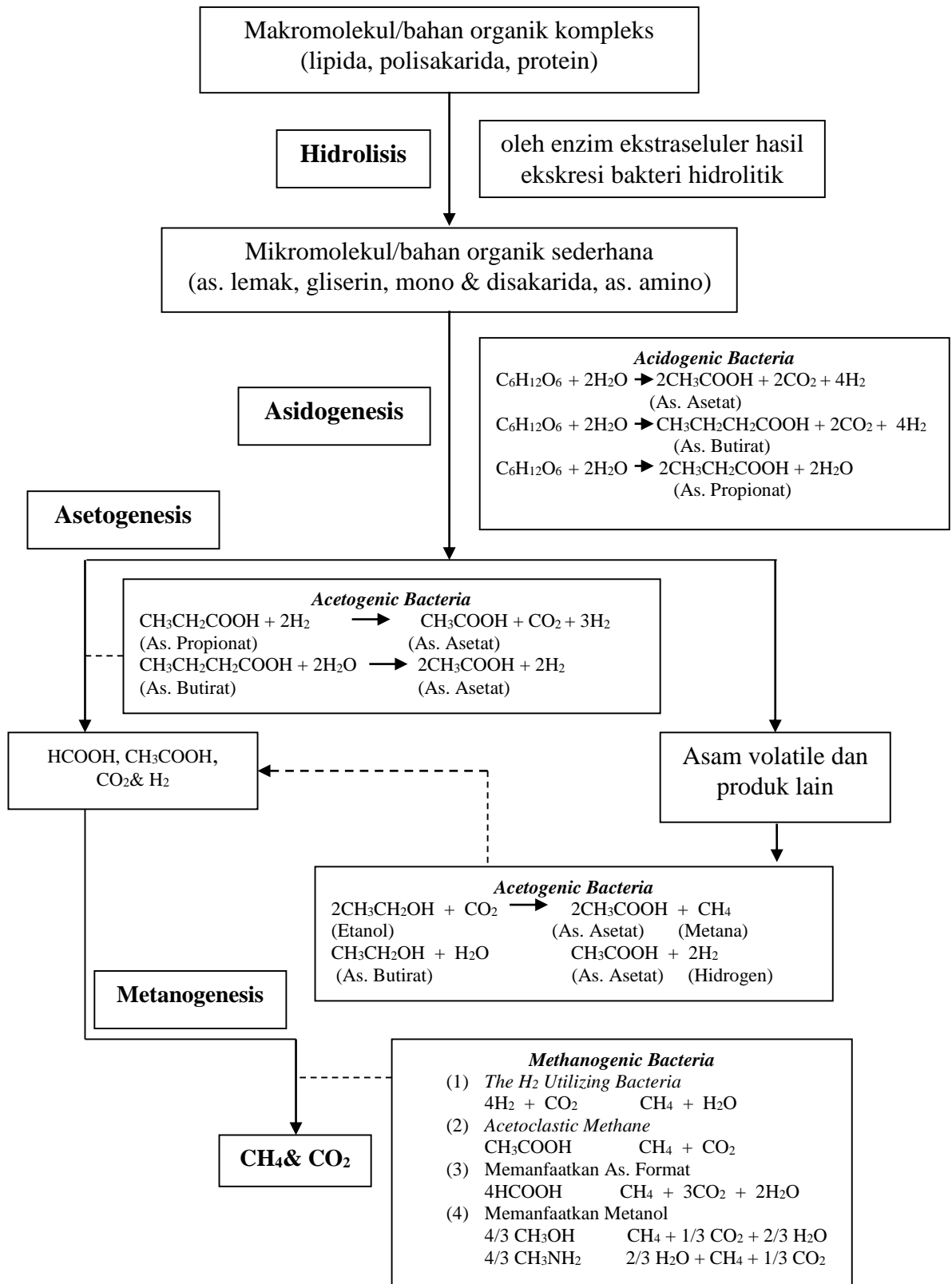
adalah sistem pengolahan anaerobik dengan *hydraulic retention time (HRT)* dan waktu retensi padatan (*SRT*) di kisaran 15-40 hari. Sistem CSTR memberikan waktu retensi yang cukup baik untuk operasi dan stabilitas proses. Digester anaerobik berpengaduk tanpa *recycle* lebih cocok untuk limbah dengan konsentrasi padatan tinggi (Tchobanoglous *et al.*, 2003). Kelemahan dari sistem ini adalah bahwa tingkat pembebanan volumetrik tinggi hanya diperoleh dengan limbah terkonsentrasi dengan konten COD *biodegradable* antara 8.000 mg/L - 50.000 mg/L. Namun, karena banyak limbah aliran yang jauh lebih encer (Rittmann dan McCarty, 2001), COD *load* per satuan volume mungkin sangat rendah. Waktu proses atau penahanan dalam sistem dapat menghilangkan biaya keuntungan dari teknologi pengolahan anaerobik. *Organic loading rate (OLR)* untuk digester ini adalah antara 1 - 5 kg COD/m³-hari (Tchobanoglous *et al.*, 2003).

Proses anaerobik merupakan proses yang dapat terjadi secara alami yang melibatkan beberapa jenis mikroorganisme. Proses yang terjadi pada pengolahan secara anaerobik ini adalah hidrolisis, asidogenesis dan metanogenesis. Beberapa jenis bakteri bersama-sama secara bertahap akan mendegradasi bahan-bahan organik dari air limbah (Deublein dan Steinhauser, 2008).

Proses mikrobiologi yang ada dalam fermentasi metan berlangsung dalam beberapa tahap. Tahap pertama (hidrolisis) melibatkan enzim yang bertugas merombak komponen kompleks menjadi komponen yang dapat digunakan sebagai sumber energi dan sumber karbon. Dalam tahapan hidrolisis, mikrobia hidrolitik mendegradasi senyawa organik kompleks yang berupa polimer menjadi monomernya yang berupa senyawa tak terlarut dengan berat molekul yang lebih ringan. Lipida berubah menjadi asam lemak dan gliserin, polisakarida menjadi gula

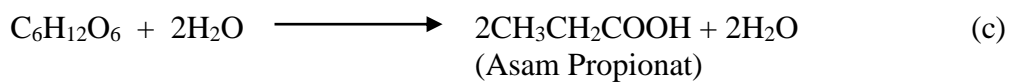
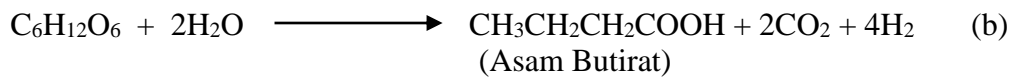
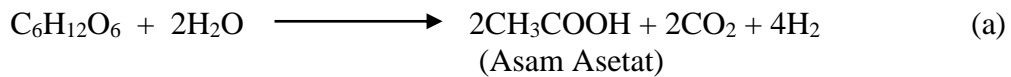
(mono dan disakarida), protein menjadi asam amino dan asam nukleat menjadi purin dan pirimidin. Konversi lipid berlangsung lambat pada suhu dibawah 20 °C. Proses hidrolisis membutuhkan mediasi ekso-enzim yang dieksresi oleh bakteri fermentatif. Hidrolisis molekul kompleks dikatalisasi oleh enzim ekstra seluler seperti sellulase, protease dan lipase.

Tahap kedua melibatkan bakteri untuk merombak komponen yang dihasilkan pada tahap pertama menjadi hasil antara (asidogenesis). Monomer-monomer hasil hidrolisis dikonversi menjadi senyawa organik sederhana seperti asam lemak volatil, alkohol, asam laktat, senyawa mineral seperti karbondioksida, hidrogen, amoniak dan gas hidrogen sulfida. Tahap ini dilakukan oleh berbagai kelompok bakteri, mayoritasnya adalah bakteri obligat anaerob dan sebagian yang lain bakteri anaerob fakultatif. Hasil pada tahap ini kemudian dikonversi menjadi hasil antara bagi produksi metana berupa asetat, hidrogen dan karbondioksida. Sekitar 70% dari COD (*chemical oxygen demand*) semula diubah menjadi asam asetat, tahap ini disebut tahap ketiga asetogenesis. Pembentukan asam asetat kadang disertai dengan pembentukan karbondioksida atau hidrogen, tergantung kondisi oksidasi dari bahan organik aslinya. Tahap keempat yaitu tahap metanogenesis yang melibatkan bakteri perombak hasil antara menjadi produk akhir berupa metana dan CO₂. Metana dihasilkan dari asetat atau dari reduksi karbondioksida oleh bakteri asetotropik dan hidrogenotropik dengan menggunakan hidrogen. Tahap-tahap tersebut diilustrasikan pada Gambar 2.



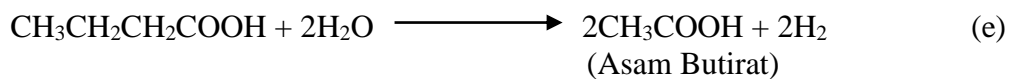
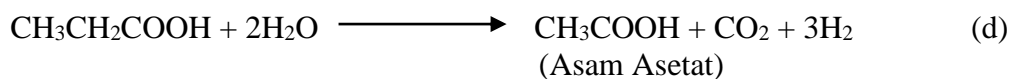
Gambar 2. Proses pencernaan anaerobik. (Jiang, 2006, dimodifikasi)

Fermentasi anaerobik dilakukan oleh empat kelompok bakteri yaitu: Pertama, bakteri-bakteri pembentuk asam. Bakteri-bakteri ini tumbuh dengan cepat dan menguraikan glukosa menjadi asam asetat, asam propionat, dan asam butirat menurut reaksi sebagai berikut:



Reaksi pembentukan asam asetat dari glukosa merupakan reaksi utama (a) dan menghasilkan energi yang besar untuk pertumbuhan bakteri asam. Asam asetat yang dihasilkan merupakan substrat utama bagi bakteri pembentuk metana dari asam asetat (*Acetoclastic methane bacteria*) (Vigneswaran, 1986).

Kedua adalah bakteri pembentuk asam asetat (*Acetogenic bacteria*). Jenis bakteri-bakteri ini dapat melangsungkan reaksi pembentukan asam asetat dari asam propionat dan asam butirat dengan reaksi sebagai berikut:



Bakteri *Syntrophobacter waliini* dapat mendegradasi asam propionat menjadi asam asetat, CO₂ dan H₂ apabila di dalamnya juga terdapat bakteri pengguna hidrogen pada pembentukan metana (*H₂-utilizing methane*) (Sham, 1984).

Selain itu bakteri pembentuk asam asetat (*acetogenic bacteria*) ini dapat menghasilkan metana dari etanol menurut reaksi:



salah satu dari spesies *acetogenic S* dapat mengoksidasi etanol menjadi asam asetat dan hidrogen menurut reaksi:



Mikroorganisme didalam lingkungan dengan derajat keasamaan (pH) 7 tidak dapat tumbuh. Akan tetapi pada tekanan parsial H_2 yang rendah, mikroorganisme dapat tumbuh pada media etanol. Ketiga adalah bakteri-bakteri pembentuk metana. Bakteri-bakteri pembentuk metana (bakteri metanogenik) yang terlibat dalam proses anaerobik dapat dikelompokkan dalam dua jenis bakteri yaitu: Pertama, bakteri pengguna hidrogen pada pembentukan metana. Bakteri-bakteri ini merupakan bakteri pengonsumsi hidrogen yang pertumbuhannya agak cepat yaitu dengan waktu minimal penggandaan sekitar 6 jam dan memperoleh energi untuk pertumbuhannya menurut reaksi:



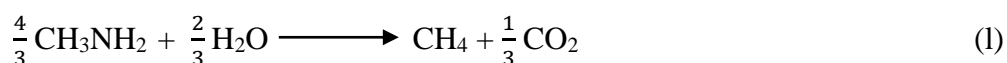
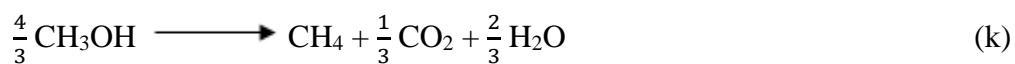
Bakteri-bakteri dalam metabolismenya menghilangkan hampir seluruh hidrogen dalam sistem. Aktifitas dari bakteri ini dapat mengatur laju pembentukan asam-asam volatil (Vigneswaran, 1986). Dan kedua adalah bakteri pembentuk metana dari asam asetat (*acetoclastic methane*). Bakteri-bakteri ini dapat mengonversi asam asetat menjadi metana dan karbondioksida dengan reaksi sebagai berikut:



Perubahan energi bebas karena konversi asam asetat menjadi metana dan karbondioksida adalah sangat kecil, mengakibatkan bakteri-bakteri ini pertumbuhannya sangat lambat. Waktu pertumbuhan bakteri mencapai 2–3 hari (Sham, 1984). Aktifitas bakteri ini dapat mengendalikan pH proses karena terjadi penguraian asam asetat dan terbentuknya karbondioksida. Meskipun sekitar 70% produksi metana dari bahan organik dihasilkan melalui penguraian asam asetat, tetapi hanya sedikit spesies metanogenik yang dapat mendegradasi asam asetat menjadi metana dan karbondioksida. Selain dua jenis bakteri pembentuk metana tersebut, terdapat juga beberapa spesies metanogenik lain yang memanfaatkan asam asetat melalui reaksi: $4\text{HCOOH} \longrightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

(j)

Sedangkan *methanosarcina barkeri* dan *methanococcus mazei* memanfaatkan metanol dari hasil amine untuk produksi metana dengan reaksi sebagai berikut:



Proses pembentukan gas metana sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor meliputi suhu, derajat keasaman, konsentrasi asam-asam lemak volatil, nutrisi, zat racun, waktu retensi hidrolis, kecepatan pengisian bahan organik dan konsentrasi amonia. Parameter-parameter ini harus dikontrol dengan cermat supaya proses degradasi yang berlangsung dapat optimal. Menurut Sham (1984) untuk mendapatkan hasil proses pengolahan air limbah secara anaerobik pada tingkat tertentu, beberapa faktor lingkungan proses harus dapat dikendalikan. Faktor-faktor

lingkungan utama yang mempengaruhi proses metanogenesis adalah komposisi air limbah, suhu, pH dan asam-asam volatil (Sham, 1984).

Proses anaerobik seperti proses biokimia lainnya, juga dipengaruhi oleh suhu. Suhu merupakan suatu variabel penting yang harus diperhatikan dalam perencanaan proses anaerobik. Menurut Jenie (1993), bakteri-bakteri anaerobik yang bersifat mesofilik biasanya dapat tumbuh pada suhu 20–45 °C. Suhu yang optimum untuk proses fermentasi metana adalah sekitar 37–40 °C. Sedangkan pada bakteri yang bersifat termofilik yaitu yang hidup pada kisaran suhu 50–65 °C suhu optimumnya adalah pada suhu 55 °C. Menurut Metcalf dan Eddy (1991), suhu optimum untuk pertumbuhan bakteri mesofilik adalah antara 30–38 °C dan bakteri termofilik hidup pada kisaran suhu 49–57 °C. Hasil penelitian Hill dan kawan-kawan menunjukkan bahwa pada suhu di atas 40 °C maka produksi metana akan menurun tajam (Jenie, 1993). Proses anaerobik umumnya dioperasikan dalam salah satu dari dua kisaran suhu, mesofilik (30–38 °C) atau termofilik (50–60 °C). Kebanyakan sistem dioperasikan pada kisaran mesofilik (Nawansih, 1996).

Agar proses perombakan anaerobik lebih efisien, diperlukan upaya untuk menjaga pH sistem pada kisaran tertentu. Pengaruh dari perubahan pH terhadap sistem adalah sangat besar, karenanya perubahan pH yang terjadi harus selalu dimonitor. Hal ini disebabkan karena pada sistem anaerobik, asam organik akan terbentuk pada tahap awal fermentasi. Bila proses oksidasi asam organik tersebut lebih lambat dari proses pembentukannya, konsentrasi asam organik akan meningkat dan mempengaruhi besarnya pH.

Pertumbuhan mikroba juga dipengaruhi oleh pH lingkungan. Bakteri pengguna hidrogen pada pembentukan metana agak sensitif terhadap pH dan

umumnya mempunyai rentang pH yang sempit. Beberapa penelitian dan percobaan praktis menunjukkan bahwa pH optimum untuk proses pengolahan limbah secara anaerobik adalah berkisar antara 6–8, diketahui pula bahwa bakteri metanogenik mempunyai pH optimum antara 6–8. pH proses anaerobik pada saat proses metanogenesis harus dapat dijaga sekitar 7 dan berbagai masalah akan muncul jika pH sampai turun di bawah 6 (Brummeler *et al.*, 1985; Jain dan Mattiasson.,1998; Savant *et al.*, 2002). Nilai pH yang rendah akan mengakibatkan perubahan substrat menjadi biogas terhambat atau mengalami penurunan dan bahkan menghentikan aktifitas bakteri metanogenik.

Reaksi biokimia cenderung dapat menjaga pH pada tingkat yang dikehendaki secara otomatis, hal ini berprinsip pada kondisi kesetimbangan organisme. Asam organik volatil yang diproduksi oleh bakteri-bakteri pembentuk asam (*Acidogenic*) selama proses dekomposisi bahan organik cenderung menurunkan pH substrat. Penurunan pH ini dapat diimbangi dengan menguraikan kembali asam-asam volatil menjadi metana dan karbondioksida oleh bakteri pembentuk metana. Menurut Sham (1984) pengaruh ini diimbangi dengan mendegradasi asam-asam organik volatil tersebut menjadi buffer bikarbonat selama fermentasi metana. Hal ini terjadi karena dalam fermentasi metana juga dihasilkan karbondioksida.

Karbondioksida berkesetimbangan dengan asam karbonat dan akan berdisosiasi membentuk ion-ion hidrogen dan ion-ion bikarbonat. Ion-ion ini bertindak sebagai asam dan basa kuat yang akan mengontrol pH sistem (Grady dan Lim, 1980).

Bila proses tidak berada dalam kesetimbangan, misalnya karena perubahan kondisi lingkungan yang cepat, maka bakteri pembentuk asam akan jauh lebih banyak dari bakteri metanogenik dan asam organik dalam sistem akan bertambah. Bila kapasitas *buffer* tidak mampu mengatasi perubahan ini, maka pH sistem akan turun.

Penurunan nilai pH berarti menghentikan aktifitas bakteri metanogenik. Berhentinya aktifitas bakteri metanogenik akan menyebabkan waktu tinggal hidrolis air limbah akan semakin lama. Untuk meningkatkan pH substrat dapat dilakukan dengan menurunkan laju umpan selama beberapa hari atau dengan menambahkan senyawa-senyawa alkali seperti kalsium hidroksida atau kalsium karbonat (Sham, 1984). Sedangkan menurut Nawansih (1996) bahan-bahan yang biasa digunakan untuk pengendalian pH dalam digester adalah kapur, Na-karbonat, NaOH, KOH, dan amonia. Kapur merupakan bahan kimia yang paling murah, tetapi penggunaannya harus hati-hati karena sulit untuk mencapai pH 6.5–6.7 serta jika penambahannya terlalu banyak akan terbentuk endapan yang tidak dikehendaki. Na-karbonat merupakan bahan kimia yang paling banyak digunakan.

Nutrien harus tersedia dalam jumlah cukup untuk melangsungkan proses perombakan yang efisien. Nutrien yang diperlukan dalam jumlah tinggi adalah Nitrogen dan Phosfor. Pada umumnya air buangan industri mengandung semua komponen-komponen yang diperlukan oleh bakteri anaerobik dalam jumlah yang cukup. Kebutuhan akan karbon, nitrogen, dan phosfor pada proses anaerobik adalah dengan perbandingan 800 : 5 : 1 (Sham, 1984). Pustaka lain menyebutkan dengan ratio yang berbeda C : N : P yaitu 150 : 55 : 1 (Jenie, 1993). Proses anaerobik dapat berlangsung baik apabila perbandingan BOD : N : P yaitu 100 : 5 : 1 (Nawansih,

2002) dan menurut (Ghosh, 1978) di dalam bioreaktor anaerobik, rasio dari karbon dan mineral C : K : Ca : Mg masing-masing harus 30 : 0.1 : 0.04 : 0.025. Sampai saat ini belum ada penelitian ratio mana yang paling tepat untuk proses anaerobik.

Selain membutuhkan sumber karbon dan sumber energi Untuk pertumbuhannya, bakteri juga memerlukan garam-garam anorganik untuk mensintesis bahan-bahan pembangun sel. Selain mengandung 54% karbon, 20% oksigen, dan 10% hidrogen massa sel bakteri kering juga mengandung rata-rata sekitar 12% nitrogen, 2% fosfor, sulfur, sodium, potassium, kalsium, magnesium masing-masing sekitar 1% dan beberapa *trace elements* seperti Fe, Mg, Mo, Zn, Cu, Co, dan Ni (Sham, 1984).

Proses metanogenesis dapat dihambat oleh adanya sulfat, sulfit, atau thiosulfat. Adanya komponen-komponen ini akan menghasilkan hidrogen sulfida yang menghambat aktifitas bakteri-bakteri metanogenik (Speece, 1983). Beberapa alasan yang dapat menjelaskan peranan sulfat dalam menghambat proses metanogenesis, antara lain :

- a. Kompetisi substrat; energi bebas yang dihasilkan selama reduksi sulfat menjadi sulfida meningkat jauh lebih cepat dibandingkan selama reduksi CO₂ menjadi CH₄. Data ini menunjukkan bahwa bakteri-bakteri pereduksi sulfat akan menghambat aktifitas bakteri-bakteri metanogenik.
- b. Penghambatan aktivitas bakteri metanogenik oleh sulfida yang terbentuk selama reduksi sulfat. Sulfatnya sendiri tidak bersifat racun bagi isolat-isolat bakteri metanogenik.
- c. Beberapa *trace elements* utama (Fe, Ni, Co, Mo) dapat mengendap akibat adanya sulfida.

Jumlah sulfida dalam *digester* yang lebih tinggi dari 1 – 6 mmol/L dapat menghambat aktifitas pembentukan metana. Belum diketahui secara pasti apakah penghambatan ini terjadi akibat tidak mempunyainya bakteri-bakteri metanogenik dalam berkompetisi memperebutkan H₂ dengan bakteri-bakteri pereduksi sulfat atau penghambatan aktifitas bakteri-bakteri metanogenik secara langsung (Sham, 1984). Logam-logam berat seperti Fe, Zn, Cd, dan Cu dalam bentuk ion merupakan racun terhadap populasi bakteri anaerobik. Toksisitas logam-logam ini sangat tergantung pada keberhasilan dalam mengkomplekskan ion-ion atau mengendapkan anion-anion tersebut.

Disamping sulfat dan logam berat, proses metanogenesis juga dapat dihambat oleh adanya hidrokarbon terklorinasi, detergen, dan antibiotik. Antibiotik jenis *monensin* yang dipakai sebagai bahan aditif makanan ternak dapat mengurangi aktifitas bakteri-bakteri metanogenik pada konsentrasi 1 µg/mol. Kloroform dan metana yang terhalogenasi merupakan inhibitor yang sangat potensial bagi bakteri-bakteri metanogenik pada konsentrasi sekitar 1 ppm (Sham, 1984).

Adanya senyawa yang bersifat racun bagi bakteri yang terlibat pada produksi biogas bisa menyebabkan penghambatan proses bahkan menyebabkan kerusakan *digester*. Suatu senyawa bersifat racun terhadap sistem biologis tergantung dari sifat senyawa tersebut, konsentrasi dan aklimasi mikroba. Beberapa senyawa akan memacu reaksi pada konsentrasi rendah tetapi apabila konsentrasinya ditingkatkan akan mempunyai pengaruh penghambatan. Bila waktu retensi panjang, suatu senyawa mungkin berubah dari racun menjadi tidak beracun, hal ini merupakan fenomena aklimatisasi (Nawansih, 1996).

Parameter yang sering digunakan untuk melihat terjadinya hambatan proses pembentukan metana dalam sistem anaerobik adalah meningkatnya konsentrasi asam-asam volatil. Asam-asam volatil tersebut umumnya memiliki konsentrasi lebih kecil dari 250 mg/L. Konsentrasi asam-asam volatil yang bernilai di atas 500 mg/L menunjukkan bahwa laju pembebanan organik terlalu tinggi. Pembebanan terlalu tinggi akan menyebabkan sistem menjadi terhambat.

Kecenderungan bertambahnya asam propionat merupakan suatu indikator yang baik untuk melihat bahwa bakteri-bakteri pembentuk asam telah terhambat (Sham, 1984).

2.4. Model Kinetika Reaksi Pembentukan Biogas

Tidak seperti pencernaan aerobik, fermentasi anaerob dapat ditandai dengan rendahnya konsumsi energi mikroba dan pertumbuhan biomassa. Energi yang dihasilkan selama konversi substrat disimpan dalam bentuk metana, yang dapat lebih dimanfaatkan sebagai sumber energi. Sistem anaerobik cenderung tidak stabil disebabkan terutama oleh *overloading* atau kondisi operasi yang tidak pantas. Model membantu untuk menjelaskan dan memahami langkah degradasi dalam *fermentor*. Oleh karena itu model dapat digunakan untuk meningkatkan desain dan pengoperasian reaktor biogas. Model tes skala laboratorium memungkinkan interpretasi data yang lebih baik serta memberikan informasi yang berguna untuk *scale-up*. Kompleksitas model selalu ditentukan oleh seberapa akurat proses yang berbeda terjadi dalam sistem dan tujuan model. Untuk simulasi proses anaerobik, model menggambarkan sistem anaerobik yang disesuaikan. Model yang paling

sederhana untuk menggambarkan degradasi biomassa oleh *culture* mikroba adalah model orde 1.

Kelompok lain dari model yang umum digunakan untuk menggambarkan kinetika pencernaan anaerobik adalah berdasarkan persamaan Monod (Monod, 1950, Knightes & Peters, 2000). Sebuah model Monod adalah fungsi dari konsentrasi substrat tetapi mencakup pengaruh pertumbuhan bakteri dan pembusukan pada proses pencernaan. Baik degradasi kompleks substrat (Te Boekhorst *et al.*, 1981; Pfeffer, 1974) maupun fase lag atau hambatan pencernaan dapat tepat digambarkan oleh model (Strigul *et al.*, 2009). Untuk meningkatkan akurasi model Monod dalam pencernaan anaerobik, *upgrade* diperkenalkan dengan mempertimbangkan efek fisik dan biologis yang berbeda dan berbagai istilah hambatan serta faktor fisik lainnya (Moser, 1958; Contois, 1959; Powell, 1967; Chen dan Hashimoto, 1980; Bergter, 1983; Mitsdorffer, 1991). Model kinetik yang berbeda semacam ini diulas oleh Pavlostathis dan Giraldo-Gomez (1991) dan Gerber dan Span (2008).

Meskipun banyak penelitian telah dilakukan pada pemodelan langkah pencernaan anaerobik terutama untuk limbah padat (misalnya Chen dan Hashimoto, 1980; Kiely *et al.*, 1997; Kalfas *et al.*, 2006; Sosnowski *et al.*, 2007; Boubaker dan Ridha, 2008; Liu *et al.*, 2008; Vavilin *et al.*, 2008; Qu *et al.*, 2009) atau pengolahan air limbah (misalnya Batstone *et al.*, 2002; Feng *et al.*, 2006; Tomei *et al.*, 2008; Boubaker & Ridha, 2008), tidak begitu banyak hasil dapat ditemukan untuk pemodelan produksi biogas dari hasil pertanian (Hill dan Barth, 1977; Simeonov *et al.*, 1996; Batstone *et al.*, 1999) dan hanya beberapa peneliti lain yang

mempertimbangkan energi yang bersumber dari tanaman (M. Wichern. *et al.*, 2008; Beierlein *et al.*, 2010).

Model yang selama ini dikembangkan adalah model “ADM1”. Model dapat meningkatkan akurasi model di satu sisi, tapi membuat kesulitan implementasi di sisi lain karena dalam banyak kasus semua data yang dibutuhkan oleh model tidak dapat dikumpulkan. *Software* ADM1 tidak mempertimbangkan studi perbandingan pengaruh perubahan modus operasi seperti *batch*, *semi-batch* dan kontinu.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menggunakan model kinetik sesederhana mungkin agar dapat menggambarkan degradasi substrat dalam *CSTR bench scale* kondisi operasi *semi-continuous load* yang bervariasi. Hubungan antara modus operasi pada tingkat beban organik (*organic loading rate*) yang berbeda-beda juga berfungsi untuk menggambarkan kondisi *seasonal* sistem *CSTR* pada agroindustri *palm oil mill* (Bala, 2014). Agar persamaan linier least square dapat digunakan, maka harus mengetahui persamaan linier masing-masing model kinetika. Persamaan tersebut disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Model kinetika bagi pemanfaatan substrat.

<i>Models</i>	<i>Equation 1</i>	<i>Equation 2 (linear form)</i>
Monod (1949)	$U = \frac{kS}{k_s + S}$	$\frac{1}{U} = \frac{Ks}{K} \cdot \left(\frac{1}{S}\right) + \frac{1}{K}$
Contois (1959)	$U = \frac{U_{max} \times S}{Y(B \times X + S)}$	$\frac{1}{U} = \frac{a \times X}{\mu_{max} \times S} + \frac{Y(1 + a)}{\mu_{max}}$
Chen & Hashimoto (1980)	$U = \frac{\mu_{max} \times S}{Y K S_o + (1 - K) S Y}$	$\frac{1}{U} = \frac{Y K S_o}{\mu_{max} S} + \frac{Y(1 - K)}{\mu_{max}}$

Sumber: Abdurahman, 2011

Untuk membangun *database* dengan menggunakan model kinetik yang akan memprediksi hasil metana dan tingkat produksi sebagai fungsi konsentrasi substrat. Model kinetika yang digunakan dikembangkan dari model Monod, Moser, Chen-Hashimoto, Shuler, Contois dan Herbert.

Monod Kinetic Model: Karena kompleksitas proses bakteri di sistem anaerobik, kita menganggap reaksi sebagai sistem satu langkah:

Materi kompleks organik + mikroorganisme + air \rightarrow Mikroorganisme + metana + karbondioksida. *Rate* tertentu di mana substrat menghilang dapat dianggap sebagai jumlah dari tiga proses: satu untuk pertumbuhan dari sel, satu untuk pengembangan produk, dan lainnya untuk pemeliharaan sel, masing-masing dikalikan dengan faktor stoikiometri Y menjadi :

$$\frac{-1}{X} \cdot \left(\frac{dS}{dt} \right) = Y_{\left(\frac{S}{X}\right)} \cdot \mu_x + Y_{\left(\frac{S}{P}\right)} \cdot \mu_p + m$$

μ_x adalah laju pertumbuhan spesifik sel dan μ_p adalah *rate* tertentu pembentukan metana, S adalah konsentrasi substrat limbah *biodegradable* (g/L) dan t adalah waktu. Monod memberi ekspresi umum untuk μ sehubungan dengan substrat terbatas:

Pertumbuhan spesifik dari model sel:

$$\rightarrow \mu_x = \frac{\mu_{x \max} \cdot S}{(K_s + S)}$$

Model produksi metana tertentu:

$$\rightarrow \mu_p = \frac{\mu_{p \max} \cdot S}{(K_p + S)}$$

Dimana :

$\mu_{x \max}$ adalah laju pertumbuhan maksimum spesifik sel (hari⁻¹)

$\mu_{p \max}$ adalah laju pertumbuhan maksimum spesifik produk (metana) (hari⁻¹)

K_s adalah konstanta kejenuhan substrat (g/L)

K_p adalah konstanta kejenuhan produksi metana (g/L)

Nilai yang sebenarnya dari tingkat produksi metana, pertumbuhan sel, dan *substrate disparition* ditentukan dengan membandingkan data eksperimen dengan model kinetika (Zennaki *et al.*, 1996). Untuk model kinetika dan koefisien parameternya, disajikan lebih detail pada tabel 8.

III. BAHAN DAN METODE

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di pabrik kelapa sawit dan Laboratorium Pengelolaan Limbah Agroindustri Jurusan Teknologi Hasil Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Lampung pada bulan November 2013 sampai Maret 2014.

3.2. Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah biogas reaktor CSTR di Laboratorium Pengelolaan Limbah Agroindustri Jurusan Teknologi Hasil Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Lampung, furnace model EPTR-13K, sentrifius merk AS ONE, gas *chromatography* (Shimadzu GC-2014) yang dilengkapi dengan *Sincarbon coulomb* dan *TCD detector*, neraca analitik 4 digit merk Shimadzu AUY 220, HACH spektrofotometri DR4000, reaktor unit DRB200, pH meter HM-20P, tabung gas helium, tabung sentrifius, cawan porselen, gelas ukur, gelas beker, labu takar, desikator, spatula, penjepit, pipet mikro, *coolbox*, pengaduk, botol semprot, botol sampel 250 ml, sarung tangan, dan masker.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah reagen COD (kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$), H_2SO_4 , kristal merkuri sulfat ($HgSO_4$), *silver* sulfat (Ag_2SO_4), gas helium, *aquadest*, *tissue*, label dan ALPKS.

Bahan untuk umpan adalah *sludge anaerobic pond* sebanyak 50 l sesuai dengan volume reaktor CSTR dan ALPKS segar dari *cooling pond* yang diambil

dari PKS. *Organic loading rate (olr)* air limbah *cooling pond* ditambahkan sebanyak 1 L/hari, 1.5 L/hari dan 2 L/hari.

3.3. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode deskripsi dengan menyajikan hasil pengamatan dalam bentuk tabel dan grafik, kemudian membandingkan eksperimen dan kinetika melalui nilai R^2 menggunakan model kinetika Monod, Contois, Chen-Hashimoto, Moser, Shuler dan Herbert .

Bioreaktor yang digunakan adalah 2 bioreaktor (*duplo*) sistem CSTR yang memiliki volume reaktor efektif masing-masing 50 L. Pemberian dan pengambilan ALPKS segar (dari *cooling pond*) dilakukan pada bioreaktor setiap hari dengan *organic loading rate (olr)* yang berbeda-beda mulai dari 1 L/hari, 1.5 L/hari dan 2.0 L/hari. Parameter yang diamati adalah nilai pH, *chemical oxygen demand* (COD), *total suspended solid* (TSS), *volatile suspended solid* (VSS) dan konsentrasi gas metana (CH_4 , CO_2 , N_2). Pengamatan nilai pH, COD, TSS, VSS dilakukan dua kali dalam seminggu sedangkan kandungan gas metana (CH_4 , CO_2 dan N_2) diukur satu kali dalam sebulan.

Beberapa model kinetika seperti Monod, Moser, Chen-Hashimoto, Shuler, Contois dan Herbert digunakan untuk mensimulasikan data hasil pengamatan yang diperoleh pada proses methanogenesis yang terjadi dalam bioreaktor.

3.4. Pelaksanaan Penelitian

Bioreaktor yang digunakan dalam produksi biogas dari air limbah ALPKS ini adalah bioreaktor *JFE Japan* sistem CSTR. Unit Bioreaktor CSTR dilengkapi

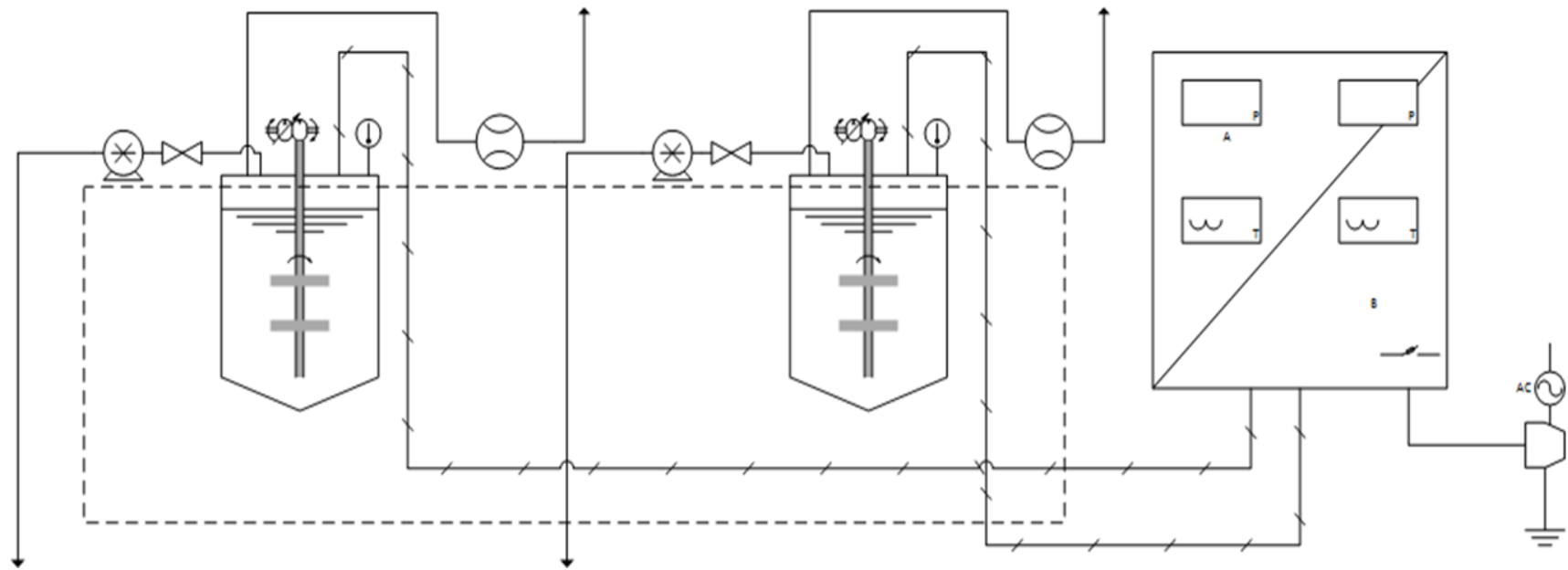
dengan selang *inlet* yang dihubungkan ke *digester* yang berfungsi untuk masuknya air limbah, selang *outlet* berfungsi untuk mengeluarkan air limbah, masing-masing selang dilengkapi dengan *PD pump* (pompa *positive displacement*). Pengambilan sampel untuk pengamatan dilakukan pada air limbah sebelum masuk ke bioreaktor yaitu di selang *inlet* dan air limbah yang keluar dari *digester* yaitu selang *outlet* dengan menggunakan botol sampel berukuran 250 ml.

Tabel 5. Jadwal pelaksanaan penelitian dalam satu minggu.

Parameter pengamatan	Senin	Selasa	Rabu	Kamis	Jumat	Sabtu
pH		•			•	
COD		•			•	
TSS		•			•	
VSS		•			•	
Konsentrasi CH ₄ *						
H ₂ S						

*. Konsentrasi gas metana CH₄, CO₂, N₂ dan H₂S diukur satu kali dalam sebulan

Bioreaktor yang digunakan dalam produksi biogas dari air limbah dibuat oleh *JFE Japan*, *preset* dan *build quality* mengikuti *Japan standard JMAA* oleh asosiasi permesinan Jepang. Telah dilakukan penelitian terdahulu (Sarono, 2013) dengan menggunakan bioreaktor ini. Dihasilkan kondisi operasi optimum untuk menghasilkan biogas adalah pada kecepatan *impeller* 99 rpm dan suhu pemanas (menggunakan *water jacket*) 55°C. Penelitian ini juga menggunakan kondisi operasi tersebut. Sedangkan untuk *feeding*, digunakan metode *semi continuous feeding*. Secara sederhana bagan bioreaktor *JFE Japan* disajikan pada gambar 3.



Gambar 3. Rancang bangun bioreaktor CSTR (*build preset & boundaries by JFE-Japan*)

3.5. Pengamatan

3.5.1. *potential Hydrogen* (derajat keasaman)

Pengukuran pH dilakukan dengan menggunakan pH meter. Sampel diletakkan dalam erlenmeyer dan pH meter kemudian dipersiapkan. Kemudian pH meter dicelupkan ke dalam sampel yang berada di erlenmeyer lalu diaduk-aduk. Angka-angka pada layar pengukuran akan terus berubah, pengukuran pH dengan menggunakan pH meter ini selesai apabila angka pada layar tidak lagi berubah (DKK-TOA Corporation, 2004).

3.5.2. *Chemical Oxygen Demand* (COD)

Pengukuran COD dilakukan guna mengetahui kebutuhan oksigen total untuk mengoksidasi bahan organik (baik yang terlarut maupun yang tidak larut) dalam air limbah secara kimia. Ambil sebanyak 0,2 ml atau 200 μ l menggunakan mikropipet, sebelumnya sampel limbah diaduk terlebih dahulu. Masukkan ke dalam *vial* yang berisi reagen COD, kemudian panaskan dengan *reactor unit* DBR 200 pada suhu 150° C selama 2 jam. Setelah dipanaskan, keluarkan *vial* dan dibiarkan hingga dingin (suhu ruang) kemudian diukur nilai *COD* dengan HACH Spektrofotometri DR4000 (HACH Company, 2004). Alur operasi analisis COD disajikan dalam gambar 4.

Larutan yang digunakan untuk pengujian COD terdiri dari :

1. Larutan pencerna (*digestion solution*) yaitu larutan asam kalium dikromat dibuat dengan cara melarutkan 10,216 g $K_2Cr_2O_7$ yang telah dikeringkan pada suhu 150 °C selama 2 jam ke dalam 500 ml air suling bebas klorida dan bebas organik.

Kemudian ditambahkan 167 ml H_2SO_4 pekat dan 33,3 gr HgSO_4 , dilarutkan dan didinginkan pada suhu ruang. Setelah itu dilakukan pengenceran sampai 1000 ml.

2. Larutan pereaksi asam sulfat dibuat dengan cara melarutkan serbuk atau kristal Ag_2SO_4 teknis ke dalam H_2SO_4 pekat dengan perbandingan 5,5 gr Ag_2SO_4 untuk 1 kg H_2SO_4 pekat (543 ml H_2SO_4 pekat) atau 10,12 gr Ag_2SO_4 untuk 1000 ml H_2SO_4 pekat. Kemudian didiamkan 1-2 jam supaya larut setelah itu dilakukan pengadukan (SNI 06-6989.2-2004, 2004).

3.5.3. Total Suspended Solids (TSS)

Analisis *total suspended solid (TSS)* dilakukan dengan mengambil sampel sebanyak 50 ml dimasukkan ke dalam tabung sentrifuge kemudian disentrifuge selama 15 menit dengan kecepatan 3000 *rpm*. Endapan yang terbentuk dimasukkan ke dalam cawan porselen yang telah di oven pada suhu 105 °C selama 30 menit, dimasukkan ke dalam desikator selama 15 menit dan telah diketahui berat keringnya. Kemudian cawan yang telah berisi endapan sampel tersebut dioven kembali pada suhu 105 °C dan selama 2 jam. Setelah keluar dari oven, cawan yang berisi endapan sampel didinginkan dalam desikator selama 15 menit lalu ditimbang. Selisih berat cawan yang berisi sampel dengan berat kering cawan (dalam mg) dibagi dengan volume sampel (dalam l) merupakan nilai TSS (APHA, 1998).

Rumus perhitungan TSS:

$$TSS (g / L) = \frac{B - A}{V}$$

Keterangan:

A = berat cawan kering setelah di oven pada suhu 105 °C selama 30 menit (g)

B = berat cawan+sampel setelah di oven pada suhu 105 °C selama 2 jam (g)

V= volume larutan sampel (l)

3.5.4. *Volatile Suspended Solids (VSS)*

Analisis *volatile suspended solid (VSS)* dilakukan dengan mengambil sampel pada analisis *TSS*. Sampel yang telah ditimbang dimasukkan ke dalam elektrik *furnace* 600 °C selama 40 menit, kemudian dimasukkan ke desikator selama 15 menit dan ditimbang. Selisish antara penimbangan cawan yang di oven 105 °C dengan cawan yang di-*furnace* 600 °C dan dibagi dengan volume sampel yang disentrifuge dalam liter (APHA, 1998). Alur analisis TSS dan VSS disajikan dalam gambar 4.

Rumus perhitungan VSS:

$$VSS (g / L) = \frac{B - C}{V}$$

Keterangan:

B = berat cawan+sampel setelah di oven pada suhu 105 °C selama 2 jam(g)

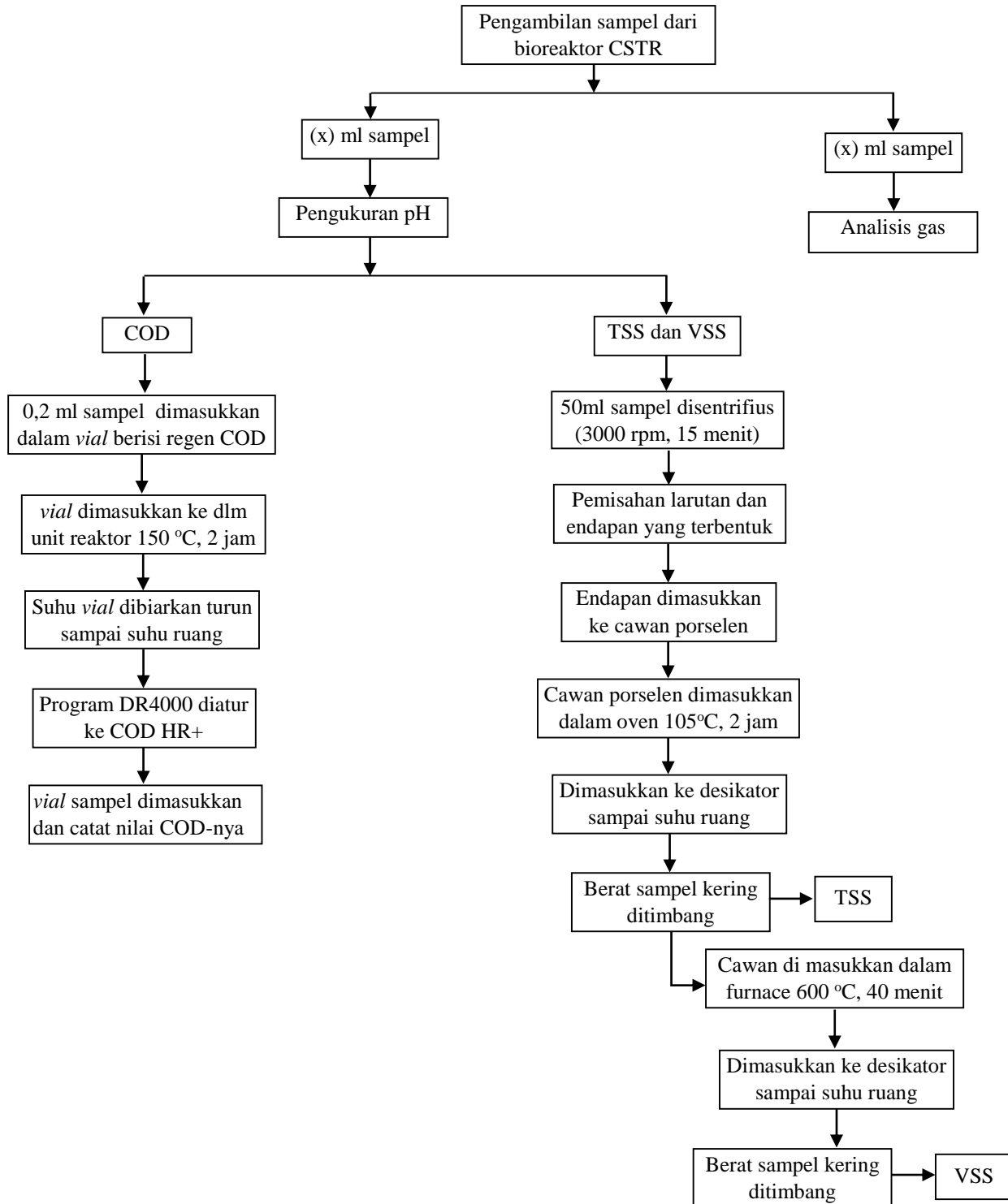
C = berat cawan + sampel setelah di *furnace* pada suhu 600 °C selama 40 menit (g)

V= volume larutan sampel (l)

3.5.5. Konsentrasi gas metana

Biogas yang diproduksi oleh bioreaktor CSTR ditampung kedalam *gas sampler* kemudian dianalisis kandungan gas metannya dengan unit *GC (gas chromatography)*. *Gas chromatography* ini juga digunakan untuk mengetahui kandungan gas lain selain gas metana (CH_4), yaitu CO_2 dan N_2 . Pengukuran gas metana dilakukan secara manual dengan mengalirkan sampel sebanyak 5 mL. Pengukuran pada gas kromatografi (*gc*) menggunakan *thermal conductivity detector (tcd)* dengan kolom *Shincarbon S 60/80* mesh (2 m x 3 mm I.D SUS), suhu kolom: 40 °C (2 menit), suhu *tcd*: 200 °C, *current (arus) tcd*: 80 mA dan sebagai *carrier gas* adalah gas Helium 43 ml/menit (Shimadzu Corporation, 2004).

Gas chromatography harus dikalibrasi dengan cara distandarisasi dengan menggunakan gas yang akan dideteksi. Standarisasi bertujuan untuk mengetahui waktu retensi gas tersebut didalam kolom. Waktu retensi gas CH_4 , CO_2 dan N_2 berturut – turut terjadi pada sekitar menit keempat, keenam dan kedua. Dengan menggunakan *GC-2014*, konsentrasi gas metana dinyatakan dalam persentase (%). Pengecekan kebocoran pada setiap sambungan dengan menggunakan air sabun (adanya kebocoran ditandai dengan munculnya gelembung busa sabun di pusat kebocoran) dilakukan sebelum *GC* digunakan.



Gambar 4. Diagram alir pelaksanaan analisa penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Kinetika reaksi pemanfaatan substrat yang paling cocok untuk mewakili proses pemanfaatan substrat secara anaerobik adalah kinetika Monod. Besaran nilai koefisien pertumbuhan mikroba yang didapat dengan model kinetika Monod adalah sebesar $Y = 0.07 \text{ gVSS/gCOD}_r$, dengan konstanta endogenous sebesar $K_d = 0.0385 \text{ /hari}$, Konstanta pemanfaatan substrat adalah 4.95 g/l dan laju pertumbuhan maksimum sebesar $\mu_{\max} = 0.1730 \text{ /hari}$.

Terdapat 5 parameter kunci untuk desain *scale-up* yaitu: daya/volume, N_{Re} , kecepatan tip (*tip speed*), N_{Fr} dan kecepatan poros (*shaft speed*). Dipilih desain reaktor dengan kesamaan *tip speed* karena memerlukan *power* (daya) yang tidak terlalu besar (*power drawn*), memiliki *bulk velocity* dan *scale of agitation* yang sama dengan *bench scale*, N_{Re} (Nilai rasio inersia dan kekentalan 10 kali lipat) juga N_{Fr} yang tidak terlalu besar (10% dari *bench scale*).

B. Saran

Disarankan untuk menguji model kinetika Monod pada *pilot scale* dengan parameter *tip speed*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurrahman, NH. 2011. *The Performance Evaluation of Anaerobic Methods for Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment: A Review*. Kuantan. Malaysia. 94-95.
- Ahmad, A. 1992. Kinerja Bioreaktor Unggun Fluidisasi Anaerobic dua tahap dalam mengolah air limbah industri minyak kelapa sawit. Pusat Antar Universitas-Bioteknologi. ITB. Bandung.
- Ahmad, A. 2009, Dasar-Dasar Teknologi Pengolahan Air limbah. UNRI Press. Pekanbaru.
- Ahmad. 2011. Penyisihan Minyak Lemak Yang Terkandung Dalam Air limbah Industri Minyak Sawit Dengan Bioreaktor Hibrid Anaerob Bermedia Cangkang Sawit. UNRI. C05-1 – C05-2.
- Ahmad, A dan T. Setiadi. 1993, Pemakaian bioreaktor ungun fluidisasi anaerob dua tahap dalam mengolah air limbah pabrik minyak sawit, Seminar Nasional Bioteknologi Industri. PAU Bioteknologi ITB. Bandung. 27-29 Januari.
- American Public Health Assosiation (APHA)*. 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition*. American Public Health Assosiation. 1015. Fifteenth Street, NW. Washington, DC 2005 – 2605. pp: (2)57 – (2)90.
- 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.
- Baei, M. 2011. *Growth kinetic parameters and biosynthesis of polyhydroxybutyrate in Cupriavidus necator DSMZ 545 on selected substrates*. Islamic Azad University, Ayatollah Amoli Branch, Department of Chemical Engineering, Amol. Iran. Faculty of chemical engineering.

- Bal AS, Dhagat NN. 2001. *Upflow anaerobic sludge blanket reactor-a review. Pubmed.* 43(2):1-82.
- Bala, JD. 2014. *Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment ‘Microbial Communities in an Anaerobic Digester’’: A Review. International Journal of Scientific and Research Publications.* Volume 4. Issue 6. June 2014.
- Bariot, H. 2014. *Peluang Peningkatan Produktivitas Kelapa Sawit di Provinsi Lampung, Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Lampung.*
- Batstone, D., J. Keller, I. Angelidaki, S. Kalyuzhnyi, S. Pavlostathis, A. Rozzi, W. Sanders, H. Siegrist, V. Vavilin,. 2002. *Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1).* IWA Publishing.
- Borja, R.; Raposo, F.; Sánchez, E. & Martín, A. 2005. *A Kinetic Evaluation of The Anaerobic Digestion of Two-Phase Olive Mill Effluent in Batch Reactors. Journal of Chemical Technology and Biotechnology.* Vol. 80. No. 3. pp. 241–250.
- Bergter, F.. 1983. *Wachstum von Mikroorganismen: Experimente und Modelle.* VEB Gustav Fisher Verlag. Jena.
- Boekhorst, T.R., J. Ogilvie, J. Pos. 1981. *Livestock Waste: A Renewable Resource.* 2, 105-108.
- Boubaker, F., B. C. Ridha,.2008. *Bioresource Technology.* ch. 99(14), 6565-6577. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.11.035.
- Brummeler, E., Hulshoff-Pol, L.W., Dolfing, J., Lettinga, G. and Zehnder, A.J.B. 1985. *Methanogenesis in an upflow anaerobic sludge blanket reactor at pH 6 on an acetate-propionate mixture. Applied and Environmental Microbiology.* 49, 1472-77.
- 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.
- Chen, Y.R. and A.G. Hashimoto. 1978. *Kinetics of Methane Fermentation. Biotechnology & Bioengineering Symposium.* 8, 269–282.
- Chen, Y.R. and A. G. Hashimoto. 1980. *Biotechnology Bioengineering.* ch.22(10), 2081-2095, DOI: 10.1002/bit.260221008.

- 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.
- 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.
- Davidson, 2011. *Waste Management Practices: Literature Review. Dalhousie University - Office of Sustainability. page 29.*
- Deublein, D. and Steinhauser, A. 2008. *Biogas from waste and renewable resources: An introduction.* Wiley-V CH. Weinheim. Germany.
- Ditjen Perkebunan. 2015. *Statistik Perkebunan Indonesia 2014.* Ditjen Perkebunan Departemen Pertanian. Jakarta.
- DKK-TOA Corporation. 2004. *G Series pH meter HM-306/506/606 Instruction Manual DKK-TOA Corporation.* Japan. 165 p.
- Donati, G. 1997. *Scale up of chemical reactors. Research Department Snamprogetti S.p.A.* Italy. 483 – 486.
- Dutta, S. 2000. *Build Robust Reactor Models. GTC Technology Corp. American Institute of Chemical Engineers.* page 38 – 46.
- Ehly, M. 2007. *Scale-up of Batch Kinetic Models. Anal Chim Acta.* 2007 Jul 9;595(1-2):80-8. Epub 2007. Feb 22.
- 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.
- Feng, Y., J. Behrendt, C. Wendland, R. Otterpohl. 2006. *Water Science Technology.* ch. 54(4), 139 - 147. DOI: 10.2166/wst.2006.535.
- Gerber, M. R. Span, 2008. *International Gas Union Research Conference Paper.* Paris.
- Ghosh, 1978. *Two Phase Anaerobic Digestion.* US Patent. US 4022665A.
- Ghosh, S. 1981. *Kinetics of Acid Phase Fermentation in Anaerobic Digestion. Biotechnology & Bioengineering Symposium.* 11, 301–313.
- Grady Jr. C.P.L. and Lim H.C. 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.
- Gujer, W. dan Zehnder, A.J.B. 1983. *Conversion Process in Anaerobic Digestion*. Dikutip dalam Pavlostathis, S.G. dan Gilardo-Gomez, E. 1991. *Kinetics of Anaerobic Treatment*. *Water Sci. Tech.* 24. 8: 35–59.
- HACH Company. 2004. *DR/4000 Spectrophotometer Models 48000 and 481000 User Manual 08/04 3ed*. HACH Company World Headquarters. Colorado. 115 p.
- Hallenbeck, P.C., and Ghosh, D. 2009. *Advances in fermentative biohydrogen production: the way forward?*. *Trends Biotechnology* 27: 287–297.
- Hasanudin, U. 1993. Pengolahan air limbah pabrik minyak kelapa sawit dengan bioreaktor unggun fluidisasi anaerobik dua tahap. Tesis. Program Studi Teknik Kimia, Program Pasca Sarjana. ITB. Bandung.
- Hasanudin, U. 2006. *Present status and possibility of biomass effective use in Indonesia*. *Proceeding. Seminar Sustainable Society Achievement by Biomass Effective Use, EBARA Hatakeyama Memorial Fund*,. January 24-25, 2006. Jakarta.
- Hasanudin, U. Suroso, E. Risfaheri dan Misgiyarta. 2007. Optimasi Fermentasi Air Limbah Tapioka Sebagai Sumber Biogas. Laporan Hasil Penelitian. Universitas Lampung.
- Hermawan, 2007. Pemanfaatan Sampah Organik sebagai Sumber Biogas. Untuk Mengatasi Krisis Energi Dalam Negeri. UNILA.
- Hill, D.T., C. L. Barth, 1997. *Journal of the Water Pollution Control Federation*. ch. 49(10), 2129-2143.
- 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*.
- Hu, W. C.; Thayanithy, K. & Forster, C.F. (2002). *A Kinetic Study of The Anaerobic Digestion of Ice-Cream Wastewater*. *Process Biochem*. Vol. 37, pp. 965–971.
- Ibrahim, A., Yeoh, B.G., Cheah, S.C., Ma, A.N., Ahmad, S., Chew, T.Y., Raj, R. and Wahid, M.J.A. 1984. *Thermophilic anaerobic contact digestion of palm oil mill effluent*. *Water Science and Technology*. 17, 155– 165.

- Jain, S. R. and B. Mattiasson. 1998. *Acclimatization of methanogenic consortia for low pH biomethanation process*. J. Biotechnology Letter. 20(8): 771 – 775.
- Jenie, B. S. L., Rahayu, W. P. 1993. *Penanganan Limbah Industri Pangan*. Kanisius. Yogyakarta.
- Jiang, B. 2006. *The Effect of Trace Elements on the Metabolisms of Anaerobic Microbial Consortia*. Thesis Wageningen University.
- Jiménez, E.; Gierczak, T.; Stark, H.; Burkholder, J. B. & Ravishankara, A. R. 2004. *Reaction of OH with HO₂NO₂ (Peroxynitric Acid): Rate Coefficients between 218 and 335 K and Product Yields at 298 K*. J. Phys. Chem. A, Vol. 108. pp. 1139- 1149
- Kalfas, H. I. V. Skiadas, H. N. Gavala, K. Stamatelatou, G. Lyberatos. 2006. *Water Sci. Technol.* ch.54(4), 149-156. DOI: 10.2166/wst.2006.536.
- 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.
- Kiely, 1997. *Environmental Engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Kleerebezem R dan van Loosdrecht MCM. 2007. *Mixed culture biotechnology for bioenergy production*. *Curr Opin Biotechnol* 18:207–212
- Kowalczyck, A. 2011. *Scale up of Laboratory Scale to Industrial Scale Biogas Plants. Conference: World Renewable Energy Congress – Sweden, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden*.
- Kumar, R. 2017. *Future Microbial Applications for Bioenergy Production: A Perspective*. *Front Microbiol.* 2017; 8: 450. Published online 2017 Mar 21.
- Liu, C. X. Yuan, G. Zeng, W. Li, J. Li. 2008. *Bioresource Technology*. ch. 99(4), 882-888. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.01.013.
- M. Wichern, M. Lübken, M. Schlattmann, A. Gronauer, H. Horn., 2008. *Water Science Technology*,. 58(1), 67-72.
- Ma, A.N. & A.S.H. Ong. 1985. *Pollution control in palm oil mills in Malaysia*. *Journal of the American Oil Chemists' Society*,. Vol.62: No.2 Pp261-266.
- McCarty, P. L., Rittmann, B. E., 2001. *Environmental biotechnology: principles and applications*. McGraw-Hill International Edition, New York.

- Metcalf and Eddy. 1991. *Wastewater Engineering : Treatment, Disposal, and Reuse. Metcalf & Eddy, Inc. -3rd ed / revised by George Tchobanoglous, Frank Burton. Mc Graw-Hill International Editions civil Engineering Series. 1334 p.*
- Meesap, K., Boonapatcharoen, N., Techkarnjanaruk, S., and Chaiprasert, P. 2012. *Microbial communities and their performances in anaerobic hybrid sludge bed-fixed film reactor for treatment of palm oil mill effluent under various organic pollutant concentrations, J. Biomed. Biotechnol.* 2012 1- 11
- Michaelis, L. dan Menten, M.L. 1913. *Die Kinetic Investinwirkung (The Kinetic of Investase Action, Translated by Roger S. Goody and Kenneth). Biochem. Ze.* 49. 334-369.
- Mitsdörffer, R. 1991. *Charakteristika der zweistufigen thermophilen/mesophilen Schlammfäulung unter Berücksichtigung kinetischer Ansätze, Berichte aus Wassergüteund Abfallwirtschaft, No. 109, Technische Universität München.*
- 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. Washington D.C.
- Mujdalipah, S. 2014. Pengaruh Waktu Fermentasi Terhadap Produksi Biogas Menggunakan Digester Dua Tahap Pada Berbagai Konsentrasi *Palm Oil-Mill Effluent* Dan Lumpur Aktif. UPI. Bandung. 57.
- N. Beierlein, K. Golkowska, M. Greger,. 2010. *Proc. of the 3rd International Symposium on Energy from Biomass and Waste.* Venesia.
- Nauman, E. B. and Collinge, C. N., 1968. *The theory of contact time distributions in gas fluidized beds. Chemical Engineering Science.*, Vol. 23, pp. 1309 – 1316
- Nawansih, O. 1996. Kinerja Inokulum Komersial dan Inokulum Isolat dalam Produksi Gasbio dari Air limbah Pabrik Kelapa Sawit. Tesis. Program Pasca Sarjana. UGM. Yogyakarta.
- Nawansih, O. 2002. Optimasi Nutrien dalam Produksi Gasbio dari Air limbah Pabrik Kelapa Sawit. *J. Sains dan Teknologi.* Bandar Lampung Vol. 8 No.1 : 65 – 71.
- Ngan, 2000. *Management of Palm Oil Industrial Effluents, Advance in Oil Palm Research, vol. 2, Malaysian Palm Oil Board, Malaysia.*

- Noor, M., Megat J. M., Ahmad Jusoh, Abdul Halim Ghazali. 1989. *Pome Treatment Utilizing High Rate Hybrid Anaerobic Reactor*. *Med J Islamic World Acad Sci*. 2(1): 13-16
- Nurhadi, 2014. Analisa Kinetika Pertumbuhan Bakteri Dan Pengaruhnya Terhadap Produksi Biogas Dari Molases Pada *Continuous Anaerobic Reactor* 3000 L. *Jurnal Teknik POMITS* Vol. 2, No. 1.
- Ohimain, EI. 2017. *A review of Biogas Production from Palm Oil Mill Effluents Using Different Configurations of Bioreactors*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 70, issue C, 242-253.
- Olvera, J. 2013. *Biogas Production from Anaerobic Treatment of Agro-Industrial Wastewater*. *CIATEJ*. Mexico. 91-92.
- Palmer, D. G.. 1981. *Biogas: Energy From Animal Waste*, *Solar Energy Research Institute*. New York. 70 Pag.
- Paramsothy, A., R. M. Wimalaweera, B. F. A. Basnayake, and D.T.N. Wijesinghe. 2004. *Optimizing Hydrolysis/acidogenesis Anaerobic Reactor with the application of Microbial Reaction Kinetics*. *Journal of Tropical Agricultural Research*. *Postgraduate Institute of Agriculture*. *University of Peradeniya*. Peradeniya. Vol. 16. Pages: 327-338.
- Pavlostathis, S., E. Giraldo-Gomez, 1991. *Critical Review Environment Contr*. 21(5-6), 411-490.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia, Nomor 5 Tahun 2014. *Tentang Baku Mutu Air Limbah*.
- Pfeffer, J.T.. 1974. *Biotechnology Bioengineering*. ch.16(6), 771-787.
- Powell, E. 1967. *Proc. of the Microbial Physiology and Continuous Culture, 3rd International Symposium*,. (Eds: E. Powell, C. Evans, R. Strange, D. Tempest), Salisbury.
- Qu, X., V. A. Vavilin, L. Mazéas, M. Lemunier, C. Duquennoi, P.-J. He, T. Bouchez, 2009. *Waste Management*. ch. 29 (6), 1823-1837.
- Raposo, F.; Borja, R.; Martín, M. A.; Martín, A.; de la Rubia, M.A. & Rincón, B.(2009). *Influence of Inoculum-Substrate Ratio On The Anaerobic Digestion Of Sunflower Oil Cake In Batch Mode: Process Stability And Kinetic Evaluation*. *Chemical Engineering Journal*,. Vol. 149, No. 1–3, pp. 70–77.

- Rincón, B.; De La Rubia, M. A.; Raposo, F. & Borja, R. 2009. *Evaluation of The Hydrolytic-Acidogenic Step of a Two-Stage Mesophilic Anaerobic Digestion Process of Sunflower Oil Cake. Bioresource Technology*,. Vol. 100, No. 18, pp. 4133– 4138.
- Rittmann B, McCarty P. 2001. *Environmental Biotechnology Principles and Applications*. Columbus. Ohio McGraw-Hill
- Rodhe, A. L., 1990. *A comparison of the contribution of various gasses to the greenhouse effect. Science*. 248, page: 1217–1219.
- Sarono, 2013. Strategi Pengurangan Gas Rumah Kaca Melalui Konversi Air limbah Pabrik Kelapa Sawit menjadi Energi Listrik (Studi Kasus di Lampung). Disertasi. IPB. Bogor.
- Savant, D.V.; Shouche, Y.S.; Prakash, S. and Ranade, D.R. 2002. *Methanobrevibacter acididurans* sp. nov., a novel methanogen from a sour anaerobic digester. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. vol. 52, no. 4, p. 1081-1087.
- Schwolow, S. 2015. *Fast and Efficient Acquisition of Kinetic Data in Microreactors Using In-Line Raman Analysis. American Chemical Society. Publication Date (Web): August 10, 2015*.
- Sham, H. 1984. *Anaerobik wastewater treatment*. Dikutip dalam Fiechter, A. (Ed.). *Advances in Biochemical Eng./Biotech*. Vol. 29. Springer Verlag. Berlin.
- Shimadzu Corporation. 2004. *GC-2014 Gas Chromatograph Instruction Manual. Shimadzu Corporation Analytical & Measuring Instruments Division*. Kyoto, Japan. 306 p.
- Shuler Michael L. dan Fikret Kargi,. 1992. *Bioprocess Engineering Basic Concept, Printice-Hall International*. 479 halaman.
- Siles, J. A.; Brekelmans, J.; Martín, M. A.; Chica, A. F. & Martín, A. 2010. *Impact of Ammonia and Sulphate Concentration on Thermophilic Anaerobic Digestion. Bioresource Technology*,. Vol.10, No. 123, pp. 9040-9048.
- Simeonov, I., V. Momchev, D. Grancharov,. 1996. *Water Res.*. 30(5), 1087-1094.
- Sosnowski, P. A. Klepacz-Smolka, K. Kaczorek, S. Ledakowicz. 2008. *Bioresource Technology*,. 99(13), 5731-5737. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.10.019.

- Speece, E. R. 1983. *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater Treatment. Environ. Science Technology*. 17 : 416 – 426.
- Sterling, MC. 2001. *Effects of Ammonia Nitrogen of H₂ and CH₄ Production During Anaerobic Digestion of Dairy Cattle Manure. Bioresour Technol*. 2001 Mar; 77(1):9-18.
- Stoker, Emily B. 2011. *Comparative Studies on Scale-Up Methods of Single-Use Bioreactors. Utah State University. All Graduate Theses and Dissertations*. 889.
- Strigul, N. 2009. *A practical guide for optimal designs of experiments in the Monod model. Journal of Environmental Modelling & Software. Volume 24 Issue 9. pages 1019-1026*.
- Sumirat, U. dan A. Solehudin. 2009. Nitrous Oksida (N₂O) dan Metana (CH₄) sebagai Gas Rumah Kaca. *Jurnal TORSI*. Vol. VIII, No.2, Juli 2009
- Tchobanoglous G., Buton F.L. dan Stensel H.D. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse (fourth Edition). Metcalf and Eddy Inc*.
- Tomei, M. C. Braguglia, G. Mininni,. 2008. *Bioresource Technology*. ch. 99(14), 6119-6126. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.12.035.
- Trisakti, B. 2015. *Acidogenesis of Palm Oil Mill Effluent to Produce Biogas: Effect of Hydraulic Retention Time and pH. Procedia - Social and Behavioral Sciences Volume 195, 3 July 2015, pages 2466-2474*.
- Vavilin, V.A., B. Fernandez, J. Palasti, X. Flotats. 2008. *Waste Management*. ch.28(6), 939-951. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.03.028.
- Vigneswaran, S., Balasuriya, B.L.N., Viraraghavan, T. 1986. *Environmental Sanitation Reviews. Anaerobic Wastewater Treatment – Attached Growth and Sludge Blanket Process. Bangkok: Environmental Sanitation Information Center (ENSIC)*.
- Wang, H., Vuorela, M., Keränen, A.L., Lehtinen, T.M., Lensu, A., Lehtomäki, A., and Rintala, J., 2010. *Development of microbial populations in the anaerobic hydrolysis of grass silage for methane production, FEMS Microbiol. Ecol.*, 2010. vol. 72, pp. 496–506.
- Weng CK, Norli I, Ahmad A. 2014. *Application of Partial Mixed Semi-Countinuous Anaerobic Reactor for Treating Palm Oil Mill Effluent (POME) Under*

- Mesophilic Condition, Iranica Journal of Energy and Environment*,. Vol. 5; 209-217.
- Wu T.Y., A. W. Mohammad, J. Md. Jahim, N. Anuar. 2007. *Palm oil mill effluent (POME) treatment and bio resources recovery using ultrafiltration membrane: effect of pressure on membrane fouling*, *Biochem. Eng. J*; 35:309-17.
- Yang, P. Y., dan Nagano, S. Y. 1984. *A Potential Treatment Alternative for Swine Waste Water in The Tropics*. *Wat. Sci. Tech*.
- Yejian, Z., Li, Y., Lina, C., Xiuhua, L., Zhijian, M., Zhenjia, Z. 2008. *Startup and operation of anaerobic EGSB reactor treating palm oil mill effluent*. *Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences*. Volume 20,. Pages 658-663.
- Zainol, N. 2012. *Kinetics of Biogas Production from Banana Stem Waste*. 395 – 396.
- Zennaki, B.Z., A. Zadi, H. Lamini, M. Aubinear and M. Boulif, 1996. *Methane Fermentation of cattle manure: Effects of HRT, temperature and substrate concentration*. *Tropicutural*, 14: 134-140.
- Zinatizadeh, A.A.L., Mohamed, A.R., Mashitah, M.D., Abdullah, A.Z. and Isa, M.H. J. 2007. *Optimization of pre-treated palm oil mill effluent digestion in an up-flow anaerobic sludge fixed film bioreactor: a comparative study*. *Biochemical Engineering Journal* 35,226–237
- Zlokarnik, Prof. Dr.-Ing. Marko. 2006. *Scale-Up in Chemical Engineering, Second, Completely Revised and Extended Edition*.
- Zupancic DG, Grilc V,. 2010. *Anaerobic Treatment and Biogas Production from Organic Waste*. www.interchopen.com, diunduh Januari 2014.