

No. Dok. 9270

Copy : 1

1)
665.77
pra
P

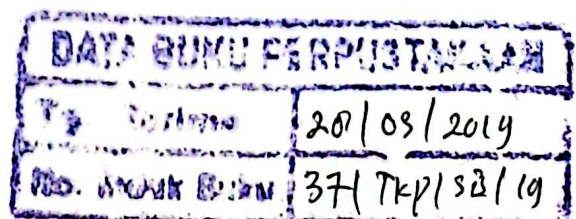
LAPORAN TUGAS AKHIR PENELITIAN
PEMBUATAN BIOGAS DARI *PALM OIL MILL*
***EFFLUENT* (POME) DAN LUMPUR POME SEBAGAI**
KULTUR CAMPURAN DENGAN FERMENTASI ANAEROB



OLEH:

LIANA PRAMUDIANTARI (1513037)
MAULIA ABRIANTI (1513043)

PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA POLIMER
POLITEKNIK STMI JAKARTA
KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN R.I
JAKARTA
2017



**POLITEKNIK STMI JAKARTA KEMENTERIAN
PERINDUSTRIAN R.I**

LEMBAR PENGESAHAN TIM PENGUJI SIDANG

JUDUL PENELITIAN:

PEMBUATAN BIOGAS DARI *PALM OIL MILL EFFLUENT* (POME)
DAN LUMPUR POME SEBAGAI KULTUR CAMPURAN DENGAN
FERMENTASI ANAEROB

DISUSUN OLEH :

NAMA : 1. LIANA PRAMUDIANTARI
2. MAULIA ABRIANTI

NIM : 1. 1513037
2. 1513043

PROGRAM STUDI : TEKNIK KIMIA POLIMER

Telah diuji oleh Tim Penguji Sidang Tugas Akhir Penelitian Program Studi
Teknik Kimia Polimer pada Politeknik STMI Jakarta pada hari Sabtu, 25
November 2017.

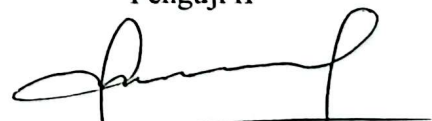
Jakarta, November 2017

Penguji I



Ir. Roosmariharso, MBA.
NIP. 195405231980031004

Penguji II



Ir. Parulian Leonard M, JMM
NIP. 195702141985031002

Penguji III



Ir. Rochni Widjajanti, M.Eng
NIP. 195609101984032002

Pembimbing



Dr. Erfina Oktariani, S.T., M.T
NIP. 1982100120140022001

**POLITEKNIK STMI JAKARTA KEMENTERIAN
PERINDUSTRIAN R.I**

LEMBAR PENGESAHAN TIM PENGUJI SEMINAR

JUDUL PENELITIAN:

PEMBUATAN BIOGAS DARI *PALM OIL MILL EFFLUENT* (POME)
DAN LUMPUR POME SEBAGAI KULTUR CAMPURAN DENGAN
FERMENTASI ANAEROB

DISUSUN OLEH :

NAMA : 1. LIANA PRAMUDIANTARI
2. MAULIA ABRIANTI

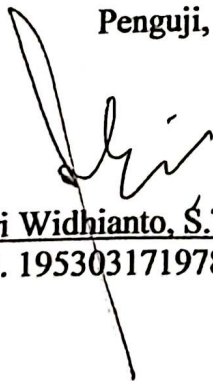
NIM : 1. 1513037
2. 1513043

PROGRAM STUDI : -TEKNIK KIMIA POLIMER

Telah diuji oleh Tim Penguji Seminar Tugas Akhir Penelitian Program Studi
Teknik Kimia Polimer pada Politeknik STMI Jakarta pada hari Jumat, 9 Juni
2017.

Jakarta, Juni 2017

Penguji,



Sakri Widhianto, S.Teks, M.M
NIP. 195303171978031001

Penguji,



Fitria Ika Aryanti, M.Eng
NIP. 198505112014022001

Pembimbing,



Dr. Erfina Oktariani, S.T., M.T
NIP. 1982100120140022001

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN PENELITIAN

Kami Mahasiswa Program Studi Teknik Kimia Polimer, Politeknik STMI Jakarta,
Kementerian Perindustrian Republik Indonesia:

Nama : Liana Pramudiantari

NIM : 1513037

Program Studi : Teknik Kimia Polimer

Dengan ini menyatakan bahwa hasil karya Tugas Akhir Penelitian yang kami buat dengan judul Pembuatan Biogas dari *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dan Lumpur POME sebagai Kultur Campuran dengan Fermentasi Anaerob:

- Dibuat dan diselesaikan sendiri dengan menggunakan literatur hasil kuliah, survei lapangan, bimbingan dengan dosen pembimbing dan pembimbing penelitian, melalui tanya jawab maupun asistensi serta buku-buku jurnal acuan yang tertera dalam referensi pada karya tulis Tugas Akhir Penelitian ini.
- Bukan merupakan duplikasi yang sudah dipublikasikan atau yang pernah dipakai untuk mendapatkan gelar sarjana di Universitas/Perguruan Tinggi lain, kecuali pada bagian-bagian tertentu digunakan referensi pendukung untuk melengkapi informasi dan sumber informasi dengan dicantumkan melalui referensi yang semestinya.
- Bukan merupakan karya tulis terjemahan dari kumpulan buku atau jurnal acuan yang tertera dalam referensi pada karya Tugas Akhir Penelitian kami.

Jika terbukti kami tidak memenuhi apa yang telah kami nyatakan seperti apa yang di atas, maka karya Tugas Akhir Penelitian kami ini dibatalkan.

Jakarta, Juni 2017



Liana Pramudiantari

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN PENELITIAN

Kami Mahasiswa Program Studi Teknik Kimia Polimer, Politeknik STMI Jakarta,
Kementerian Perindustrian Republik Indonesia:

Nama : Maulia Abrianti
NIM : 1513043
Program Studi : Teknik Kimia Polimer

Dengan ini menyatakan bahwa hasil karya Tugas Akhir Penelitian yang kami buat dengan judul Pembuatan Biogas dari *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dan Lumpur POME sebagai Kultur Campuran dengan Fermentasi Anaerob:

- Dibuat dan diselesaikan sendiri dengan menggunakan literatur hasil kuliah, survei lapangan, bimbingan dengan dosen pembimbing dan pembimbing penelitian, melalui tanya jawab maupun asistensi serta buku-buku jurnal acuan yang tertera dalam referensi pada karya tulis Tugas Akhir Penelitian ini.
- Bukan merupakan duplikasi yang sudah dipublikasikan atau yang pernah dipakai untuk mendapatkan gelar sarjana di Universitas/Perguruan Tinggi lain, kecuali pada bagian-bagian tertentu digunakan referensi pendukung untuk melengkapi informasi dan sumber informasi dengan dicantumkan melalui referensi yang semestinya.
- Bukan merupakan karya tulis terjemahan dari kumpulan buku atau jurnal acuan yang tertera dalam referensi pada karya Tugas Akhir Penelitian kami.

Jika terbukti kami tidak memenuhi apa yang telah kami nyatakan seperti apa yang di atas, maka karya Tugas Akhir Penelitian kami ini dibatalkan.

Jakarta, Juni 2017



Maulia Abrianti

Maulia Abrianti

**POLITEKNIK STMI JAKARTA KEMENTERIAN
PERINDUSTRIAN R.I**

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

JUDUL PENELITIAN:

PEMBUATAN BIOGAS DARI *PALM OIL MILL EFFLUENT* (POME)
DAN LUMPUR POME SEBAGAI KULTUR CAMPURAN DENGAN
FERMENTASI ANAEROB

DISUSUN OLEH :

NAMA : 1. LIANA PRAMUDIANTARI
2. MAULIA ABRIANTI

NIM : 1. 1513037
2. 1513043

PROGRAM STUDI : TEKNIK KIMIA POLIMER

Telah diperiksa dan disetujui sebagai salah satu syarat penyelesaian akademik
Program Studi Teknik Kimia Polimer pada Politeknik STMI Jakarta.

Jakarta, Juni 2017

Menyetujui

Ketua Program Studi
Teknik Kimia Polimer



Ir. Roosmariharso, MBA.
NIP. 195405231980031004

Dosen Pembimbing



Dr. Erfina Oktariani, S.T., M.T.
NIP.1982100120140022001

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING PENELITIAN

JUDUL PENELITIAN:

PEMBUATAN BIOGAS DARI *PALM OIL MILL EFFLUENT* (POME)
DAN LUMPUR POME SEBAGAI KULTUR CAMPURAN DENGAN
FERMENTASI ANAEROB

DISUSUN OLEH :
NAMA : 1. LIANA PRAMUDIANTARI¹
2. MAULIA ABRIANTI
NIM : 1. 1513037
2. 1513043
PROGRAM STUDI : TEKNIK KIMIA POLIMER

Jakarta, Juni 2017

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Pembimbing



Dr. SD. Sumbogo Murti, M.Eng.
NIP. 196909281988121001



Nomor : 526/ISJ-IND.7.2/X/2016
Lampiran :
Perihal : Permohonan Penelitian

Jakarta, 24 Oktober 2016

Kepada
Yth. Bapak/Ibu Pimpinan
Dr. Ir. Adiarso, M.Sc Direktur Pusat Teknologi
Sumber Daya Energi dan Industri Kimia
Gedung Energi Klaster 5 PTSEIK, BPPT,
Puspiptek Serpong

Dalam rangka menambah wawasan dan mengaplikasikan teori yang didapat Mahasiswa/i di Politeknik STMI Jakarta, Kementerian Perindustrian RI. dengan ini memohon bantuan Bapak/Ibu agar bersedia menerima mereka yang namanya tersebut di bawah ini untuk melakukan Penelitian di Perusahaan/Instansi yang Bapak/Ibu pimpin selama kurang lebih 2(dua) bulan.

Adapun nama mahasiswa/i yang akan melakukan Penelitian adalah:

No.	Nama	NIM	Kompetensi yang diharapkan
1.	Liana Pramudiantari	1513037	Proses Produksi

Dalam pelaksanaannya kami mengharapkan bantuan bimbingan Bapak/Ibu agar mahasiswa/i kami dapat melakukannya dengan baik. Untuk selanjutnya kompetensi yang diperoleh dari hasil bimbingan Bapak/Ibu akan dipresentasikan dan mudah-mudahan dapat bermanfaat bagi perusahaan

Demikian atas bantuan dan kerjasama Bapak/Ibu, kami ucapkan terima kasih.

Pembantu Direktur I Bidang Akademik,



Dr. Ridzky Kraimanandita, S.Kom, MT

NIP: 19740302 200212 1 001

ambusan:

Direktur STMI;

Ka Prodi TKP;

Mahasiswa yang bersangkutan;

Pertinggal



Nomor : 525 /SJ-IND.7.2/X/2016
Lampiran :
Perihal : Permohonan Penelitian

Jakarta, 24 Oktober 2016

Kepada
Yth. Bapak/Ibu Pimpinan
Dr. Ir. Adiarso, M.Sc Direktur Pusat Teknologi
Sumber Daya Energi dan Industri Kimia
Gedung Energi Kluster 5 PTSEIK, BPPT,
Puspiptek Serpong


Dalam rangka menambah wawasan dan mengaplikasikan teori yang didapat Mahasiswa/i di Politeknik STMI Jakarta, Kementerian Perindustrian RI, dengan ini memohon bantuan Bapak/Ibu agar bersedia menerima mereka yang namanya tersebut di bawah ini untuk melakukan Penelitian di Perusahaan/Instansi yang Bapak/Ibu pimpin selama kurang lebih 2 (dua) bulan.

Adapun nama mahasiswa/i yang akan melakukan Penelitian adalah:

No.	Nama	NIM	Kompetensi yang diharapkan
1.	Maulia Abrianti	1513043	Proses Produksi

Dalam pelaksanaannya kami mengharapkan bantuan bimbingan Bapak/Ibu agar mahasiswa/i kami dapat melakukannya dengan baik. Untuk selanjutnya kompetensi yang diperoleh dari hasil bimbingan Bapak/Ibu akan dipresentasikan dan mudah-mudahan dapat bermanfaat bagi perusahaan

Demikian atas bantuan dan kerjasama Bapak/Ibu, kami ucapkan terima kasih.


Pembantu Direktur I Bidang Akademik,


Dr. Ridzky Kramanandita, S.Kom, MT
NIP. 19740302 200212 1 001

embusan:

- . Direktur STMI;
- . Ka Prodi TKP;
- . Mahasiswa yang bersangkutan;
- . Peringatan



**BADAN PENGKAJIAN DAN PENERAPAN TEKNOLOGI
(BPPT)**

Pusat Teknologi Sumberdaya Energi dan Industri Kimia
Energi 625, Klaster 5, Puspiptek Serpong Tangerang 15314
(021) 75791355 – (021) 75791354, Fax (021) 75791355,
Website <http://www.bppt.go.id>

Nomor : B-113/BPPT/PTSEIK/SD/PR 01 /11/2016
Perihal : Izin Penelitian
Lampiran :

Serpong, 28 November 2016

Kepada Yth,
Dr. Ridzky Kramanandita, S.Kom, MT
Pembantu Direktur I Bidang Akademik
Politeknik STMI Jakarta
d.h. Sekolah Tinggi Manajemen Industri
Jl. Letjen Suprpto No. 26, Cempaka Putih
Jakarta 10510

Dengan hormat,

Menjawab Surat Saudara nomor 525/SJ-IND.7.2/X/2016 dan nomor 526/SJ-IND.7.2/X/2016, tanggal 24 Oktober 2016 perihal Permohonan Penelitian mahasiswa di bawah ini :

No.	N A M A	N I M
1.	Maulia Abrianti	1513043
2.	Liana Pramudiantari	1513037

bersama ini kiranya perlu kami beritahukan sebagai berikut :

1. Pada prinsipnya kami menerima Permohonan Kerja Praktek/Magang di Pusat Teknologi Sumberdaya Energi Industri Kimia (PTSEIK) - BPPT untuk mahasiswa tersebut di atas dengan pembimbing Dr. SD. Sumbogo Murti, M.Eng yang dimulai dari tanggal 16 Januari 2016 s.d 16 Maret 2017 dan membawa pasphoto ukuran 2 x 3 cm sebanyak 2 (dua) lembar.
2. Sebelum melaksanakan penelitian, kami mohon pembimbing mahasiswa dari STMI Jakarta untuk berkomunikasi dengan pembimbing dari BPPT.
3. Semua biaya yang timbul dalam waktu pelaksanaan kerja praktek, termasuk biaya atas kerusakan atau kehilangan alat-alat yang diperlukan adalah tanggung jawab yang bersangkutan, dan segala macam penggunaan peralatan harus diketahui oleh operator yang bertanggung jawab di laboratorium tersebut.
4. Setelah penelitian selesai mahasiswa tersebut harus mempresentasikan hasil kerja prakteknya di PTSEIK
5. Setelah selesai melaksanakan penelitian Mahasiswa diwajibkan memberi 1 (satu) copy laporan kepada PTSEIK
6. Selama penelitian berlangsung, Instansi kami tidak menanggung biaya Transport dan lain sebagainya.











Demikian kami sampaikan. Atas perhatian dan kerjasamanya diucapkan terima kasih.



LEMBAR BIMBINGAN PENYUSUNAN LAPORAN
PENELITIAN

Nama : Liana Pramudiantari / Maulia Abrianti
 NIM : 1513037 / 1513043
 Judul Penelitian : Pembuatan Biogas dari *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dan Lumpur POME sebagai Kultur Campuran dengan Fermentasi Anaerob
 Pembimbing : Dr. Erfina Oktariani, S.T., M.T.

Tanggal	BAB	Keterangan	Paraf
08-12-2016		• Bimbingan Pertama.	1.
09-12-2016		• Rencana bertemu Pembimbing BPPT	2.
15-12-2016	Jurnal Penelitian	• Pertemuan pembimbing kampus dengan Pembimbing di BPPT. • Bimbingan penyerahan jurnal terkait penelitian yang akan dilakukan.	3.
10-12-2016	Presentasi Jurnal	• presentasi jurnal terkait Penelitian yang akan dilakukan.	4.
22-12-2016	Presentasi Jurnal	• Presentasi jurnal terkait Penelitian yang akan dilakukan	5.
17-01-2017	• Revisi PPT • Jurnal Penelitian	• Bimbingan menyerahkan print out PPT yang sudah diperbaiki. • Menyerahkan Jurnal baru dari Pembimbing BPPT.	6.
20-01-2017	• Jurnal penelitian • Tabel Perbandingan Jurnal	• Bimbingan menyerahkan print out Jurnal dan translatnya. • Menyerahkan tabel perbandingan Jurnal dan kesimpulan.	7.
13-02-2017		• Bimbingan mengenai awal running.	8.
17-02-2017	BAB I s.d II	• Menyerahkan BAB I s.d II.	9.
25-02-2017	BAB I s.d III	• perbaiki sistematika penulisan, isi tinjauan pustaka, variabel.	10.
01-04-2017	BAB I s.d III	• perbaiki sistematika penulisan, isi rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, tahap penelitian	11.
07-04-2017	BAB I s.d IV	• perbaiki sistematika penulisan, isi rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, tinjauan pustaka grafik pada pembahasan.	12.
11-04-2017	BAB I s.d IV	• Perbaiki sistematika penulisan, isi rumusan masalah dan tujuan penelitian grafik pembahasan.	13.
20-04-2017	• Judul • BAB I s.d IV	• perbaiki lembar judul, sistematika penulisan, isi tinjauan pustaka, prosedur Penelitian, isi pembahasan.	14.

26-04-2017	• Judul • BAB I s.d IV	• Perbaiki lembar judul, sistematika penulisan, isi pembahasan.	15. 	
27-04-2017	• Judul • BAB I s.d IV	• Perbaiki lembar judul, sistematika penulisan, rumusan masalah, tujuan penelitian, Tsi pembahasan.		16. 
05-05-2017	• Judul • BAB I s.d IV	• Perbaiki lembar judul, sistematika penulisan, rumusan masalah, tujuan penelitian.	17. 	18. 
10-05-2017	Judul	• Perbaiki lembar judul.		
12-05-2017	• BAB V • Presentasi	• Menyerahkan kesimpulan dan saran. • Presentasi hasil penelitian.	19. 	
15-05-2017	Abstrak	• Menyerahkan abstrak		20. 
24-05-2017	• Abstrak • BAB V • PPT presentasi	• Perbaiki abstrak, kesimpulan, saran, PPT presentasi	21. 	22. 
26-05-2017	Presentasi	• Presentasi hasil penelitian		
01-06-2017		• Tanda tangan Acc seminar	23. 	
08-06-2017	Presentasi	• Presentasi hasil penelitian		24. 

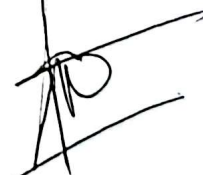
Mengetahui,

Ketua Program Studi
Teknik Kimia Polimer



Ir. Roosmariharso, MBA.
NIP. 195405231980031004

Dosen Pembimbing



Dr. Erfina Oktariani, S.T., M.T.
NIP. 198210012014022001

KATA PENGANTAR

Puji syukur Allah SWT., karena atas limpahan rahmat, hidayah dan karunia-Nya penyusun dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir penelitian yang berjudul “*Pembuatan Biogas dari Palm Oil Mill Effluent (POME) dengan Lumpur POME sebagai Kultur Campuran dengan Fermentasi Anaerob*”. Penyusunan laporan ini merupakan salah satu syarat penyelesaian akademik Program Studi Teknik Kimia Polimer, Politeknik STMI Jakarta. Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan di Laboratorium Pusat Teknologi Sumberdaya Energi dan Industri Kimia (PTSEIK), Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari s.d Maret 2017. Pada kesempatan ini penyusun juga ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung selama pelaksanaan dan penyusunan laporan ini terutama kepada:

1. Allah SWT, atas berkat dan rahmat-Nya.
2. Orang tua kami, yang selalu mendoakan dan mendukung.
3. Dr. Mustofa, S.T., M.T., selaku Direktur Politeknik STMI Jakarta.
4. Ir. Roosmariharso, MBA., selaku Ketua Program Studi Teknik Kimia Polimer Politeknik STMI Jakarta.
5. Fitria Ika Aryanti, S.T., M.Eng., selaku Sekretaris Program Studi Teknik Kimia Polimer Politeknik STMI Jakarta.
6. Dr. Erfina Oktariani, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing penelitian di Politeknik STMI Jakarta.
7. Dr. SD. Sumbogo Murti, M.Eng., selaku pembimbing penelitian di Laboratorium PTSEIK, BPPT, Serpong.
8. Ibu Zulaicha dan Sandia Primeia, selaku asisten pembimbing penelitian di Laboratorium PTSEIK, BPPT, Serpong.
9. Seluruh karyawan di Laboratorium PTSEIK, BPPT, Serpong.
10. Teman-teman Teknik Kimia Polimer Politeknik STMI Jakarta angkatan 2013 selaku kawan seperjuangan.

11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penyusun menyadari keterbatasan dan kemampuan dalam menyusun laporan ini. Oleh karena itu, penyusun mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun sehingga berguna bagi penyusun untuk menyempurnakan Laporan Tugas Akhir Penelitian. Semoga Laporan ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Jakarta, Juni 2017

Penyusun

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TIM PENGUJI SIDANG.....	i
LEMBAR PENGESAHAN TIM PENGUJI SEMINAR.....	i
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING PENELITIAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN PENELITIAN	iv
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN PENELITIAN	v
LEMBAR PENGAJUAN PENELITIAN	vi
LEMBAR KETERANGAN DITERIMA PENELITIAN.....	viii
LEMBAR BIMBINGAN PENYUSUNAN TUGAS AKHIR PENELITIAN	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
ABSTRAK.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	6
1.5 Manfaat Penelitian	6
1.6 Sistematika Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Industri Kelapa Sawit.....	8
2.1.1 Proses Pengolahan Kelapa Sawit menjadi Minyak Kelapa Sawit..	8
2.1.2 Limbah Pabrik Kelapa Sawit.....	10
2.2 <i>Palm Oil Mill Effluent (POME)</i>	12

2.3 Lumpur Limbah.....	14
2.4 Biogas.....	14
2.4.1 Proses Pembentukan Biogas dengan Fermentasi Anaerob.....	15
2.4.2 Mikroorganisme Penghasil Biogas.....	16
2.5 Tipe Digester Biogas.....	24
2.6 Analisa Biogas.....	25
2.7 Sejarah Penelitian Biogas Menggunakan POME.....	26
BAB III METODE PENELITIAN.....	30
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	30
3.2 Alat dan Bahan.....	30
3.2.1 Alat.....	30
3.2.2 Bahan.....	30
3.3 Variabel.....	31
3.4 Prosedur Penelitian.....	32
3.4.1 Persiapan POME.....	32
3.4.2 Persiapan Lumpur POME.....	32
3.4.3 Fermentasi.....	33
3.4.4 Pengukuran Gas.....	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	34
4.1 Pengaruh Temperatur terhadap Produksi Biogas.....	34
4.2 Pengaruh Keberadaan Lumpur POME terhadap Pembentukan Biogas.....	36
4.3 Pengaruh pH terhadap Pembentukan Biogas.....	37
BAB V PENUTUP.....	39
5.1 Kesimpulan.....	39
5.2 Saran.....	39
DAFTAR PUSTAKA.....	41

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Pemakaian Energi per Jenis di Indonesia	1
Gambar 1.2 Pemakaian Energi per Jenis di Indonesia pada Tahun 2014	2
Gambar 1.3 Produksi Kelapa Sawit di Indonesia	4
Gambar 2.1 Proses Produksi Minyak Kelapa Sawit	9
Gambar 2.2 <i>Palm Oil Mill Effluent</i> (POME).....	12
Gambar 2.3 Kurva Pertumbuhan Bakteri.....	18
Gambar 3.1 Tahapan Penelitian	32
Gambar 4.1 Biogas yang Dihasilkan pada Fermentasi POME.....	35

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik POME tanpa Perlakuan	13
Tabel 2.2 Sejarah Penelitian Produksi Biogas dari <i>Palm Oil Mill Effluent</i> (POME) dengan Proses Fementasi Anaerob	27
Tabel 3.1 Matriks Penelitian	31
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Biogas yang Dihasilkan dengan Fermentasi POME	34

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	47
Lampiran B	49
Lampiran C	50

ABSTRAK

Ketersediaan energi dan pencemaran lingkungan merupakan permasalahan yang sering dibicarakan saat ini. Biomassa dapat bermanfaat untuk menunjang pengembangan sumber energi alternatif. Biomassa juga dapat meliputi limbah terbiodegradasi. Salah satunya dengan memanfaatkan *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Pada penelitian ini ingin didapatkan biogas dari fermentasi anaerob POME dan lumpur POME sebagai kultur campuran pada temperatur 37 dan 55°C dengan pH 5; 5,5; 6 dan 6,5. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur, Ph dan keberadaan lumpur POME terhadap volume biogas dengan fermentasi anaerob. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan adanya lumpur POME dapat memberikan pengaruh terhadap produksi biogas. Temperatur dan pH POME juga mempengaruhi volume biogas yang dihasilkan. Pada penelitian ini didapatkan volume biogas yang terbanyak yaitu 11,85 mL pada temperatur 55°C dengan adanya lumpur POME dan pH POME 5,5.

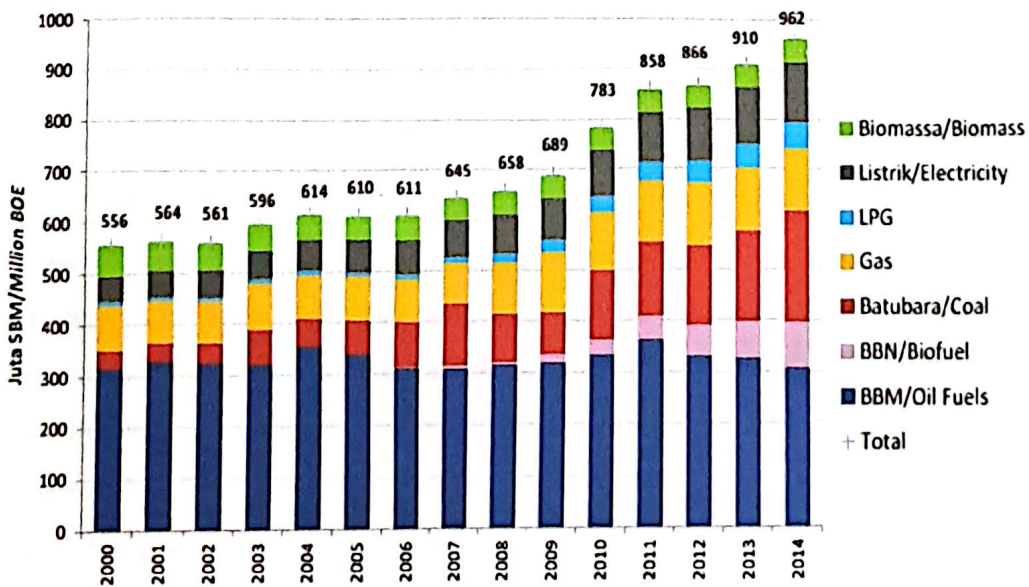
Kata kunci: *Palm Oil Mill Effluent* (POME), lumpur POME, kultur campuran, fermentasi anaerob, biogas.

BAB I PENDAHULUAN

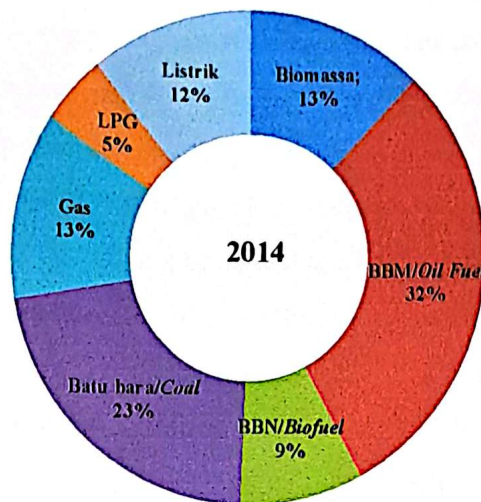
1.1 Latar Belakang Masalah

Ketersediaan energi dan pencemaran lingkungan merupakan salah satu permasalahan yang hangat dibicarakan. Saat ini sebagian besar pemakaian energi dihasilkan dari bahan bakar fosil [1]. Bahan bakar fosil seperti minyak bumi dan batu bara merupakan sumber energi utama. Permintaan akan bahan bakar fosil yang semakin meningkat menyebabkan terjadinya eksplorasi dan eksploitasi sumber energi berbahan bakar fosil secara besar-besaran [2]. Keadaan tersebut mengakibatkan penipisan cadangan bahan bakar fosil [1] sehingga menimbulkan kerusakan lingkungan, perubahan iklim secara global dan krisis energi di seluruh dunia [2].

Selama tahun 2000-2014 pemakaian energi berdasarkan jenisnya dikuasai oleh Bahan Bakar Minyak (BBM) seperti bensin, minyak solar, minyak diesel, minyak tanah, minyak bakar, avtur dan avgas [1]. Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.1 dan 1.2.



Gambar 1.1 Pemakaian Energi per Jenis di Indonesia
Sumber: *Outlook* Energi Indonesia BPPT, 2016



Gambar 1.2 Pemakaian Energi per Jenis di Indonesia pada Tahun 2014

Sumber: *Outlook Energi Indonesia* BPPT, 2016

Gambar 1.1 menunjukkan pada tahun 2000 total pemakaian BBM dari 315 juta Setara Barel Minyak (SBM) menjadi 308 juta SBM pada tahun 2014 (penurunan rata-rata 0,18% per tahun). Pada tahun 2000 jumlah penjualan terbesar diduduki oleh pemakaian minyak solar (38,7%), sedangkan pada tahun 2014 diduduki oleh pemakaian bensin (45,5%). Perubahan sistem pemakaian BBM tersebut disebabkan oleh tingginya laju pemakaian bahan bakar untuk kendaraan. Pemakaian BBM pada sektor transportasi memiliki kebutuhan penjualan yang sangat tinggi sebesar 79,7% dari total pemakaian BBM [1].

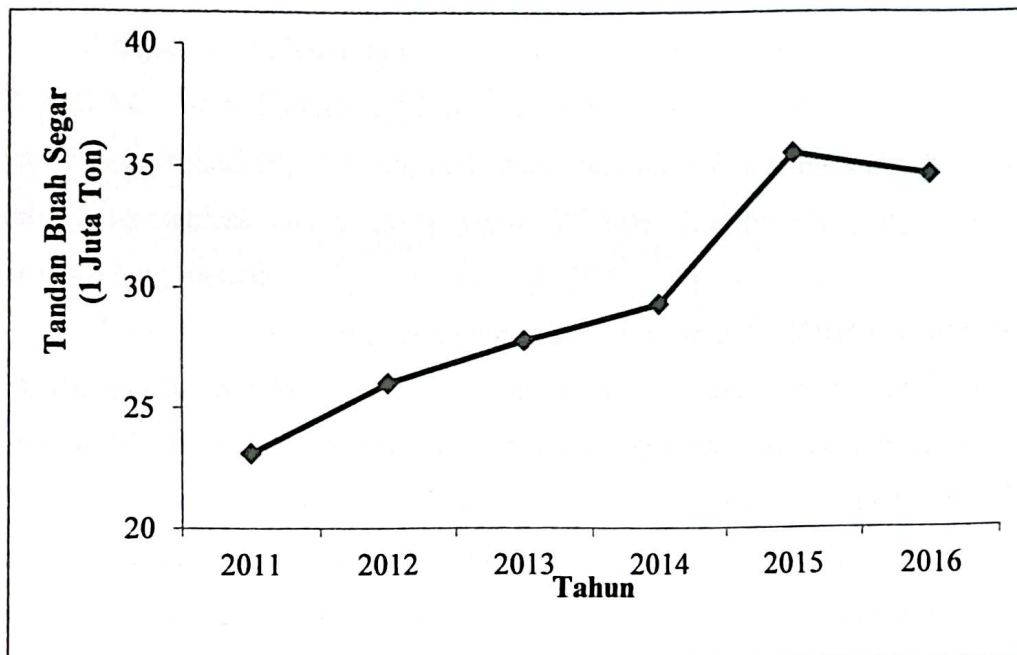
Pada sektor industri di tahun 2000 pemakaian batu bara meningkat dari 3,1 juta SBM menjadi 220,6 juta SBM di tahun 2014, sedangkan pemakaian gas bumi pada tahun 2000-2014 meningkat rata-rata 2,6% per tahun. Pertumbuhan pemakaian gas bumi tergolong rendah karena keterbatasan infrastruktur jaringan gas nasional. Pemakaian listrik pada tahun 2000-2014 mengalami kenaikan rata-rata 8% per tahun. Pada tahun 2000 konsumsi minyak bumi cair atau *Liquified Petroleum Gas* (LPG) juga meningkat dari 8 juta SBM menjadi 52 juta SBM pada tahun 2014. Peningkatan pemakaian LPG disebabkan oleh program pemerintah yang mengganti penggunaan minyak tanah untuk kegiatan rumah tangga dan usaha kecil dengan LPG [1].

Gambar 1.2 memperlihatkan pemakaian energi per jenis di Indonesia pada tahun 2014 yang didominasi oleh BBM sebanyak 32% karena konsumsi BBM di sektor transportasi memiliki kebutuhan yang sangat tinggi. Hal ini disebabkan oleh substitusi BBM ke bahan bakar gas alam yang terkompresi atau *Compressed Natural Gas* (CNG) dan gas alam cair atau *Liquified Natural Gas* (LNG) yang belum efektif karena keterbatasan infrastrukturnya. Beberapa pemakaian energi per jenis di Indonesia mengalami kenaikan dari tahun sebelumnya, seperti pemakaian batu bara, listrik dan LPG [1].

Krisis energi dan kerusakan lingkungan memerlukan penanganan yang serius. Pengembangan sumber energi alternatif termasuk bioenergi dilakukan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Bioenergi adalah energi terbarukan yang berasal dari biomassa [1]. Pengembangan bioenergi dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar minyak dan meningkatkan pasokan energi nasional [3].

Biomassa dapat bermanfaat untuk menunjang pengembangan sumber energi alternatif. Biomassa juga dapat meliputi limbah terbiodegradasi. Salah satunya adalah dengan memanfaatkan limbah cair pabrik kelapa sawit atau *Palm Oil Mill Effluent* (POME) sebagai sumber energi [4]. POME mengandung kadar bahan organik yang tinggi sehingga dapat diolah secara anaerob (tanpa oksigen) untuk menghasilkan biogas [4,5]. Air limbah dari 1 ton minyak kelapa sawit yang diproduksi memiliki komposisi 2,35 ton air; 0,13 ton minyak tidak padat atau *Non Oil Solid* (NOS) dan 0,02 ton minyak [6].

Tingginya permintaan dunia akan kebutuhan minyak kelapa sawit membuat pertumbuhan industri kelapa sawit semakin meningkat. Indonesia merupakan salah satu negara penghasil minyak kelapa sawit terbesar di dunia. Proses produksi pabrik minyak kelapa sawit sangat mempengaruhi volume limbah dan produk samping yang dihasilkan. Hasil produksi kelapa sawit di Indonesia ditunjukkan pada Gambar 1.3.



Gambar 1.3 Produksi Kelapa Sawit di Indonesia

Sumber: Kementerian Pertanian (2011-2014) dan GAPKI (2015-2016)

Gambar 1.3 menunjukkan produksi kelapa sawit di Indonesia yang cenderung mengalami peningkatan setiap tahunnya. Seiring dengan meningkatnya produksi kelapa sawit maka limbah yang dihasilkan, seperti limbah padat, limbah cair dan limbah gas juga semakin meningkat. Setiap ton Tandan Buah Segar (TBS) yang diproses menghasilkan 140-200 kg minyak sawit mentah atau *Crude Palm Oil* (CPO), 190 kg serat dan cangkang sawit, 230 kg Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dan 600-700 kg POME [7].

Biogas merupakan gas hasil dari degradasi bahan organik secara anaerobik oleh mikroorganisme. Biogas dapat dihasilkan melalui proses pembentukan hidrogen secara biologi. Bahan baku pembuatan biogas dapat berasal dari berbagai material organik, bahkan limbah yang mengandung material organik tinggi. Oleh karena itu, biogas merupakan salah satu cara pemanfaatan limbah yang potensial dan dapat dikembangkan melalui berbagai teknologi pengolahan limbah [8].

Pada sebuah penelitian tentang biogas yang dilakukan oleh Mujdalipah dkk. (2014). Menggunakan POME dan lumpur aktif dari kotoran sapi dengan variasi perbandingan yang digunakan masing-masing adalah 90:10, 80:20 dan 70:30. POME terlebih dahulu diatur derajat keasamannya (pH) 5-6 pada temperatur fermentasi mesofilik (25,7-27,8°C) dan laju alir 0,35 L/hari selama 40

hari. Didapatkan volume biogas tertinggi sebanyak 11,35 L pada kombinasi POME 90% dan lumpur aktif dari kotoran sapi 10% (90:10) selama waktu fermentasi 40 hari [9]. Namun, pada penelitian ini waktu yang dibutuhkan untuk proses fermentasi cukup lama yaitu 40 hari dan biogas yang dihasilkan mengandung metana.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Mansor dkk. (2016) menggunakan POME dan lumpur POME. Variasi yang dilakukan adalah pada perlakuan awal lumpur POME dan temperatur fermentasi. Didapatkan volume biogas sebanyak 2,6 L/hari dengan kandungan H_2 1,7 L/hari menggunakan perlakuan awal kejut panas dan pada temperatur fermentasi 55°C. Pada penelitian ini, fermentasi anaerob dilakukan secara kontinyu sehingga kemungkinan kontaminasi POME tinggi.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, penelitian kali ini dilakukan untuk menghasilkan biogas dari pembentukan hidrogen secara biologi. Penelitian ini menggunakan POME dan lumpur POME. Proses perlakuan awal menggunakan perlakuan kejut panas pada temperatur 90°C selama 1 jam dan fermentasi dilakukan secara *batch* pada temperatur mesofilik dan termofilik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dibahas sebelumnya, maka masalah yang dapat dirumuskan adalah:

1. bagaimana menghasilkan biogas dari POME dan lumpur POME sebagai kultur campuran dengan fermentasi secara anaerob?
2. bagaimana pengaruh temperatur, pH dan lumpur POME terhadap volume biogas yang dihasilkan dengan fermentasi secara anaerob?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. bahan baku yang digunakan berupa POME dan lumpur POME yang diperoleh dari PT Perkebunan Nusantara VIII, PKS, Cikasungka, Bogor, Jawa Barat.
2. variasi pH POME, yaitu 5; 5,5; 6 dan 6,5.
3. temperatur fermentasi, yaitu 37°C dan 55°C.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. menghasilkan biogas dari POME dan lumpur POME sebagai kultur campuran dengan fermentasi secara anaerob.
2. mengetahui pengaruh temperatur, pH dan lumpur POME terhadap volume biogas dengan fermentasi secara anaerob.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil pada penelitian ini diharapkan dapat menjadi informasi tambahan dalam pengolahan limbah pabrik kelapa sawit berupa POME untuk menghasilkan biogas.

1.6 Sistematika Penelitian

BAB I: PENDAHULUAN

Bab ini berisi penjelasan mengenai latar belakang dilakukannya penelitian, rumusan masalah yang akan dibahas, batasan masalah dari penelitian yang akan dilakukan, tujuan dan manfaat dari dilakukannya penelitian ini.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tinjauan umum mengenai industri kelapa sawit, *Palm Oil Mill Effluent* (POME), lumpur limbah, biogas, analisa biogas dan sejarah penelitian biogas menggunakan POME.

BAB III: METODE PENELITIAN

Bab ini berisi penjelasan tentang waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, variabel penelitian serta prosedur penelitian (persiapan penelitian dan metode penelitian).

BAB IV: HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi data hasil pengukuran, analisa data yang sudah diolah menjadi grafik, pembahasan terhadap hasil pengukuran dan analisa data.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

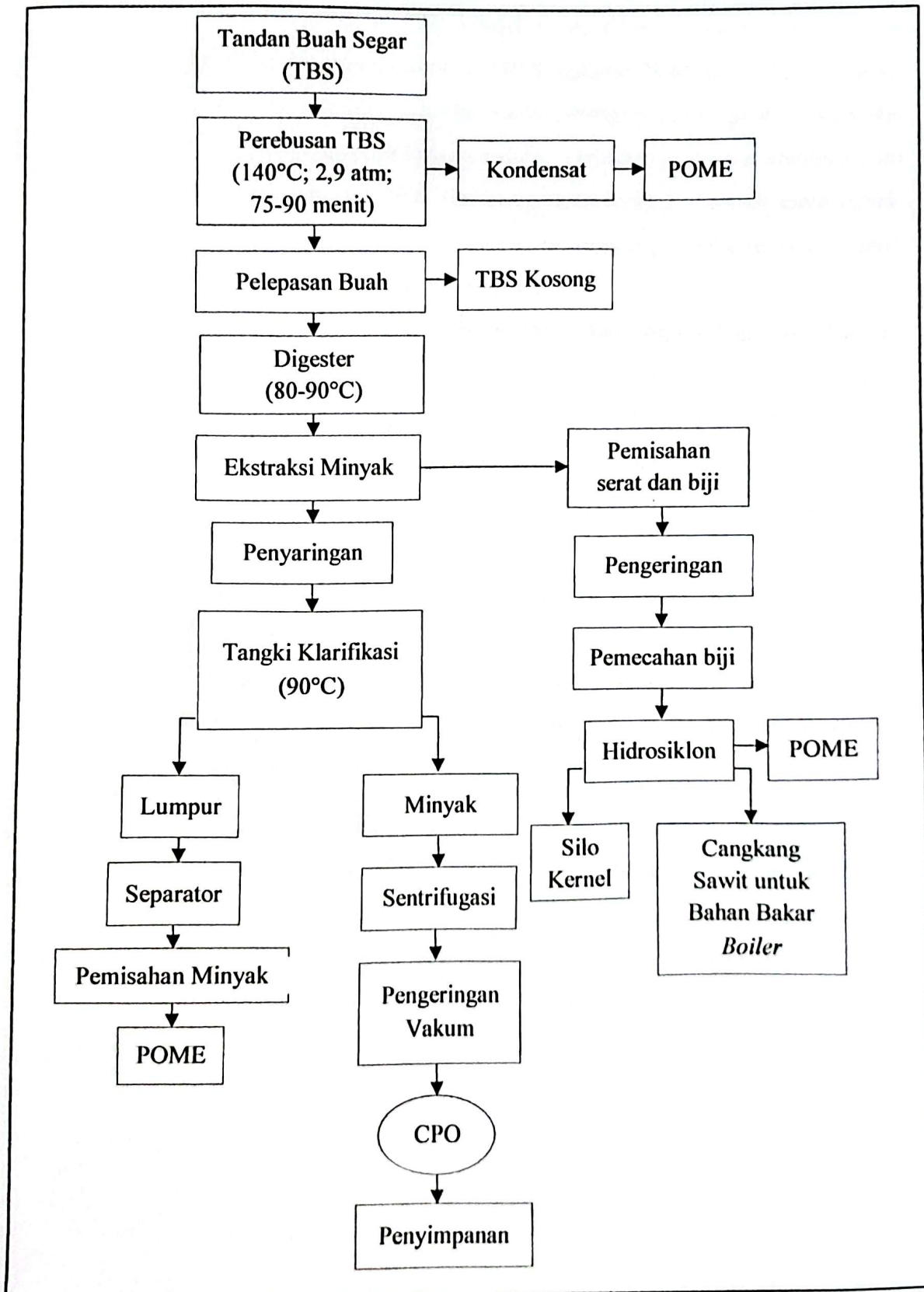
2.1 Industri Kelapa Sawit

Pabrik minyak kelapa sawit merupakan salah satu industri hasil pertanian yang cukup penting di Indonesia. Minyak kelapa sawit banyak diaplikasikan tidak hanya sebagai minyak goreng, namun juga digunakan sebagai sabun, margarin, mentega putih (*shortening*) dan minyak atau lemak makan (*vegetable ghee*). Dalam industri oleokimia minyak kelapa sawit dapat diaplikasikan berupa lemak alkohol (*fatty alcohol*), asam lemak (*fatty acid*) dan gliserin [10]. Akan tetapi, akhir-akhir ini terdapat upaya penggunaan minyak kelapa sawit sebagai bahan baku pembuatan bahan bakar alternatif. Kondisi tersebut memacu perkembangan industri pengolahan kelapa sawit baik kebutuhan dalam negeri maupun luar negeri.

2.1.1 Proses Pengolahan Kelapa Sawit menjadi Minyak Kelapa Sawit

Minyak kelapa sawit mentah atau *Crude Palm Oil* (CPO) adalah minyak yang berwarna kemerah-merahan diperoleh dari hasil ekstraksi atau dari proses pengempaan daging buah kelapa sawit [11]. Pada umumnya proses ekstraksi minyak kelapa sawit dari Tandan Buah Segar (TBS) diolah dengan proses basah. Dimana pada proses tersebut volume air dan uap yang kuat diperlukan untuk menghilangkan kotoran dan mensterilkan proses. Oleh karena itu, hal tersebut menimbulkan volume limbah cair yang besar pada pabrik kelapa sawit [12].

Pengolahan TBS kelapa sawit untuk dijadikan CPO diperoleh melalui proses yang panjang. Diawali dengan pengangkutan buah kelapa sawit menuju pabrik, proses perebusan dan pelepasan buah dari tandan (*stripping*). Kemudian dilanjutkan dengan proses pelumatan buah (*digesting*), perebusan, pengeluaran minyak (pengepresan), penjernihan, penyaringan, pemisahan ampas dan pengolahan biji sawit [11,13]. Proses produksi minyak kelapa sawit ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Proses Produksi Minyak Kelapa Sawit

Sumber: Yunus Ahmed, 2015

Saat proses perebusan TBS kelapa sawit diberi perlakuan panas pada tekanan 293,84 kPa dengan temperatur 140°C selama 75-90 menit [12]. Hal ini bertujuan untuk menghentikan aktivitas enzim, mengumpulkan protein di dalam buah sawit serta membunuh mikroorganisme. Terhentinya proses enzimatik ini akan mengurangi kerusakan akibat dari penguraian minyak menjadi asam lemak bebas [11]. Pada proses perebusan, setiap 1 ton proses produksi minyak kelapa sawit menghasilkan POME sebesar 0,9 ton [12].

Setelah proses perebusan, TBS kelapa sawit dipisahkan dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). Proses ini dilakukan dengan tekanan dan temperatur yang tinggi (80-90°C) dengan uap panas pada digester [12,14]. Proses penjernihan bertujuan untuk memasak minyak serta memisahkan kotoran dan air.

CPO dengan kandungan 35-45% minyak kelapa sawit dan 45-55% air dialirkan menuju tangki klarifikasi untuk proses pemisahan dengan temperatur 90°C [12]. Lalu pada proses penyaringan, minyak disaring secara sentrifugal supaya bersih. Kemudian dialirkan menuju tangki penyimpanan agar minyak sawit tidak membeku [14]. Hasil proses pemerasan berupa serat dan biji diolah untuk proses pemisahan. Setelah itu, serat dan cangkang sawit digunakan sebagai bahan bakar ketel uap (*boiler*) [12].

2.1.2 Limbah Pabrik Kelapa Sawit

Limbah adalah sesuatu yang dibuang atau terbuang baik dari aktivitas manusia, kegiatan industri maupun dari alam yang belum atau tidak memiliki nilai ekonomi [4]. Aktivitas pabrik produksi minyak kelapa sawit menghasilkan tiga jenis limbah, yaitu limbah padat, limbah cair dan limbah gas. Limbah terbesar yang dihasilkan oleh pabrik produksi minyak kelapa sawit adalah limbah cair [12].

1. Limbah Padat

Pada bagian proses pabrik produksi minyak kelapa sawit menghasilkan limbah padat berupa serat, TKKS, cangkang sawit (*shell*), limbah padat dari sistem *decanter* atau *Dried Decanter Solid* (DDS) dan lumpur selulosa dari kolam limbah. Limbah kelapa sawit berupa serat dapat dikonversi menjadi

bahan bakar untuk ketel uap [15], pembuatan *pulp* kertas dan papan artikel [16].

TKKS yang diperoleh dari hasil perebusan dan bantingan dapat digunakan sebagai kayu bakar, pembuatan batu bata, pupuk kompos, briket arang, pengisi (*filler*) bahan plastik yang terdegradasi dan lain-lain. DDS adalah limbah padat kelapa sawit yang berasal dari serat berondolan sawit yang telah mengalami pengolahan dan dapat digunakan sebagai pupuk kompos atau pakan ternak [7].

Lumpur selulosa yang telah terdegradasi dapat digunakan untuk kesuburan tanah karena mengandung unsur kalium sehingga dapat mengurangi pemakaian pupuk kimia (organik) [17]. Limbah padat produksi kelapa sawit dapat dimanfaatkan menjadi energi terbarukan contohnya bioetanol, biodiesel dan bahan bakar Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTB) [18].

2. Limbah Cair

Limbah cair pabrik kelapa sawit dihasilkan dari proses perebusan, ekstraksi minyak dan pemurnian. Proses pengolahan TBS menghasilkan dua bentuk limbah cair, yaitu air kondensat dan limbah cair (*effluent*). Air kondensat dapat digunakan sebagai umpan ketel uap untuk mengoperasikan mesin pengolahan kelapa sawit, sedangkan limbah cair yang banyak mengandung unsur hara digunakan sebagai bahan pengganti pupuk anorganik [19].

Air buangan pabrik produksi minyak kelapa sawit mengandung bahan organik yang dapat terdegradasi dan dapat menimbulkan pencemaran lingkungan. Oleh karena itu, dalam pengelolaan limbah perlu diketahui karakteristik limbah.

Limbah cair pabrik kelapa sawit mengandung lemak, protein dan karbohidrat yang dapat digunakan sebagai sumber nutrisi untuk mikroorganisme dalam proses biodegradasi limbah cair [20]. Limbah cair yang dihasilkan dari proses produksi minyak kelapa sawit diolah pada instalasi pengolahan air limbah berupa kolam.

3. Limbah Gas

Pabrik produksi minyak kelapa sawit juga menghasilkan limbah gas. Limbah gas ini berasal dari gas cerobong dan uap air buangan pabrik kelapa sawit [21].

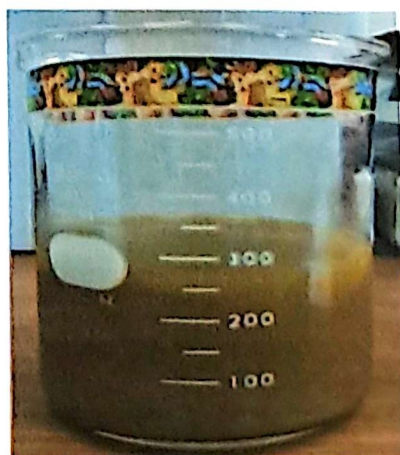
2.2 *Palm Oil Mill Effluent (POME)*

Palm Oil Mill Effluent (POME) merupakan salah satu limbah cair kelapa sawit berwarna coklat kental yang memiliki kisaran pH antara 4-5 [5]. POME berasal dari air rebusan TBS, tangki klarifikasi dari minyak kelapa sawit dan limbah cair dari hidrosiklon [22]. POME memiliki kandungan COD dan BOD yang tinggi yaitu 350 mg/L dan 100 mg/L [23]. Tingginya kandungan COD dan BOD pada POME akan menyebabkan pencemaran pada lingkungan perairan karena dapat mengurangi kadar oksigen terlarut dalam air [24].

POME terdiri atas air (95-96%), minyak (0,6-0,7%) dan padatan (4-5%) [14]. Di samping itu, POME mengandung bahan organik seperti karbohidrat, lipid, protein dan mineral yang cukup tinggi sehingga dapat dimanfaatkan untuk kegunaan tertentu [25]. POME yang dihasilkan dari pabrik produksi minyak kelapa sawit seperti pada Gambar 2.2 dapat digunakan kembali sebagai pupuk, pakan ternak dan sebagai sumber energi terbarukan melalui proses fermentasi anaerob [26].



(a) POME di Kolam Pengolahan Air Limbah
PT Perkebunan Nusantara VIII



(b) Sampel POME

Gambar 2.2 *Palm Oil Mill Effluent (POME)*
Sumber: Dokumentasi Pribadi

Gambar 2.2 (a) menggambarkan kolam pengolahan limbah dari pabrik kelapa sawit PT Perkebunan Nusantara VIII, Bogor, Jawa Barat. Kolam tersebut berisi limbah cair dari proses pengolahan yang dialiri melalui pipa. POME yang diambil dari kolam tersebut merupakan POME yang pertama kali keluar dari pipa. Pompa digunakan untuk mengambil POME dari kolam yang dialiri menuju drum besar untuk penyimpanan sementara POME, sedangkan pada Gambar 2.2 (b) menunjukkan POME yang telah diambil dari drum dan disimpan di kulkas pada temperatur kurang dari 4°C.

Padatan terlarut pada POME berasal dari lignoselulosa yang mengandung minyak dari buah kelapa sawit. Kandungan kimiawi tersebut yang membuat POME dapat dijadikan sebagai bahan baku dalam proses bioteknologi [27]. POME merupakan bahan gizi atau nutrisi yang mengandung senyawa organik dan karbon. Senyawa organik dapat menghasilkan metana karena adanya proses dekomposisi oleh bakteri anaerob (tanpa oksigen) [28]. Karakteristik POME dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Karakteristik POME tanpa Perlakuan

No.	Parameter	Satuan	Rentang
1.	pH	–	3,4-5,2
2.	Temperatur	°C	80-90
3.	Minyak dan lemak	mg/L	130-18.000
4.	BOD	mg/L	10.250-43.750
5.	COD	mg/L	15.000-100.000
6.	Padatan	mg/L	11.500-79.000
7.	Padatan tersuspensi	mg/L	5.000-54.000
8.	Padatan menguap	mg/L	9.000-72.000
9.	Amonia-nitrogen	mg/L	4-80
10.	Total nitrogen	mg/L	180-1.400
11.	Fosfor	mg/L	94-131
12.	Potassium	mg/L	1.282-1.928
13.	Magnesium	mg/L	254-344
14.	Kalsium	mg/L	276-405
15.	Chrom	mg/L	0,05-0,43
16.	Besi	mg/L	75-164
17.	Mangan	mg/L	2,1-4,4
18.	Tembaga	mg/L	0,8-1,6
19.	Seng	mg/L	1,2-1,8
20.	Kobalt	mg/L	0,04-0,06
21.	Kadmium	mg/L	0,01-0,02

Sumber: Yunus Ahmed dkk, 2014

Tabel 2.1 memperlihatkan bahwa COD merupakan kandungan terbesar yang ada pada POME. COD sangat berbahaya apabila dibuang langsung ke lingkungan. Hal tersebut dapat merusak ekologi air karena mengurangi kandungan oksigen yang terlarut dalam air [29].

2.3 Lumpur Limbah

Lumpur limbah adalah bahan padat dari fasilitas pengolahan air limbah atau bahan yang mengendap di dalam limbah dan diproduksi oleh mikroorganisme. Lumpur limbah memiliki kadar bahan organik yang tinggi sehingga dapat digunakan sebagai bahan pembuat biomassa. Lumpur yang digunakan sebagai bahan pembuatan biomassa adalah lumpur teraktivasi. Pada saat pembentukan lumpur teraktivasi bahan yang mengendap dan terkandung di dalam limbah dikeluarkan pada pencampuran primer lalu diendapkan sebagai lumpur mentah. Limbah dialirkan menuju kolam aerasi untuk ditambahkan dengan lumpur dan udara. Proses ini diiringi dengan pengadukan yang kuat. Campuran limbah dan lumpur disebut campuran cairan (*liquor*). Campuran ini dialirkan menuju pencampur akhir dimana lumpur yang sudah teraktivasi (padatan tersuspensi) akan diendapkan [30]. Lumpur yang digunakan sebagai benih lumpur pada pembentukan biogas umumnya digunakan untuk mempercepat proses perombakan bahan organik.

2.4 Biogas

Biogas merupakan teknologi pembentukan energi dengan memanfaatkan limbah, seperti limbah industri makanan, limbah pertanian dan limbah manusia. Biogas dapat dihasilkan dari pembentukan hidrogen secara biologi dengan proses fermentasi secara anaerob. Dalam proses produksinya dapat memanfaatkan limbah sebagai substrat fermentasi [33].

Biogas lebih ringan sekitar 20% dibanding udara dan memiliki temperatur nyala antara 650-750°C. Biogas merupakan gas yang tidak berbau dan tidak berwarna yang terbakar dengan bara biru serupa dengan gas minyak bumi yang dicairkan atau *Liquified Petroleum Gas* (LPG). Volume biogas biasanya dinyatakan dalam satuan normal meter kubik (Nm³) yaitu volume gas pada

temperatur 0°C dan tekanan atmosfer [29]. Energi yang dihasilkan setara dengan 21,5 MJ atau 563 Btu/ft³ [8].

2.4.1 Proses Pembentukan Biogas dengan Fermentasi Anaerob

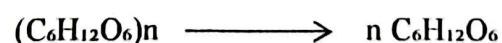
Pada umumnya fermentasi bahan organik dapat terjadi dalam keadaan aerob (dengan oksigen) dan anaerob (tanpa oksigen) [8]. Fermentasi anaerob dapat menghasilkan biogas dengan baik, sedangkan fermentasi aerob tidak menghasilkan biogas dan dapat mengolah sisa limbah lebih tuntas. Oleh karena itu, fermentasi yang sering digunakan dalam pembentukan biogas adalah fermentasi anaerob [29].

Fermentasi anaerob merupakan proses pengolahan senyawa-senyawa organik yang terkandung dalam limbah menjadi biogas tanpa memerlukan oksigen [15]. Pada kondisi anaerob ruangan harus dalam keadaan tertutup karena pertumbuhan bakteri akan terganggu apabila saat proses fermentasi terdapat oksigen terlarut [8]. Pembuatan biogas melalui fermentasi anaerob dilakukan oleh berbagai aktivitas mikroorganisme.

Proses biodegradasi senyawa karbohidrat untuk menghasilkan biogas secara anaerob melalui beberapa jalur reaksi. Dimana pada tahapan awal melalui reaksi pelarutan senyawa polisakarida menjadi senyawa sederhana berupa glukosa. Kemudian glukosa melalui berbagai tahapan reaksi berubah menjadi asam asetat, asam butirat, dan etanol. Reaksi berikutnya merupakan perubahan asam propionat dan butirat menjadi asam asetat. Reaksi akhir dari pembentukan biogas adalah penguraian asam asetat menjadi gas metana serta karbondioksida dan hidrogen menjadi gas metana. Berikut merupakan tahapan-tahapan reaksi penguraian:

1. Polisakarida-Glukosa

Tahap ini merupakan reaksi penguraian senyawa polisakarida menjadi glukosa dengan persamaan reaksi sebagai berikut:



2. Glukosa-Asam asetat

Tahap ini merupakan reaksi yang melalui lintasan glikolisis yang merubah glukosa menjadi asam piruvat dan merubah asam piruvat menjadi asam asetat. Secara sederhana persamaan reaksi pembentukan asam asetat dari glukosa sebagai berikut:



3. Glukosa-Asam propionat

Tahap ini merupakan reaksi penguraian glukosa menjadi asam propionat.



4. Glukosa –Asam butirrat

Tahap ini merupakan reaksi penguraian glukosa menjadi asam butirrat.



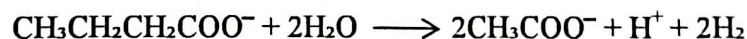
5. Asam Propionat-Asam asetat

Tahap ini merupakan reaksi perubahan asam propionat menjadi asam asetat.



6. Asam butirrat-Asam asetat

Tahap ini merupakan reaksi perubahan asam butirrat menjadi asam asetat.



7. Asam asetat-Metana

Tahap ini merupakan reaksi perubahan asam asetat menjadi metana.



8. CO₂/H₂-Metana

Tahap ini merupakan reaksi perubahan CO₂/H₂ menjadi metana.



2.4.2 Mikroorganisme Penghasil Biogas

Bakteri-bakteri metanogen tidak dapat mengolah alkohol-alkohol serta asam-asam organik dalam bentuk lain selain asam asetat, propionat, butirrat dan asam lemak volatil. Dalam proses fermentasi anaerob dibutuhkan pengelompokan bakteri [34].

1. Bakteri Hidrolisis

Bakteri-bakteri anaerob yang termasuk dalam golongan ini adalah bakteri obligat anaerob dan fakultatif anaerob. Jenis bakteri obligat anaerob adalah *Bacteroides*, *Clostridia* dan *Bifidobacteria* sedangkan jenis bakteri fakultatif anaerob adalah *Enterobacteriaceae* dan *Streptococci* [34].

2. Bakteri Asidogen

Bakteri anaerob yang digunakan dapat tumbuh pada keadaan asam, yaitu dengan derajat keasaman (pH) 5,5-6,5 [32]. Pembentukan asam lemak rantai pendek tersebut terjadi dengan bantuan bakteri, seperti *Pseudomonas*, *Eschericia*, *Flavobacterium* dan *Alcaligenes* [33]. Pertumbuhan bakteri terjadi pada temperatur mesofilik (30°C) untuk menghasilkan asam asetat. Selain itu, bakteri tersebut juga mengubah senyawa yang bermolekul rendah menjadi alkohol, asam organik, asam amino, karbon dioksida, hidrogen sulfur dan metana [32].

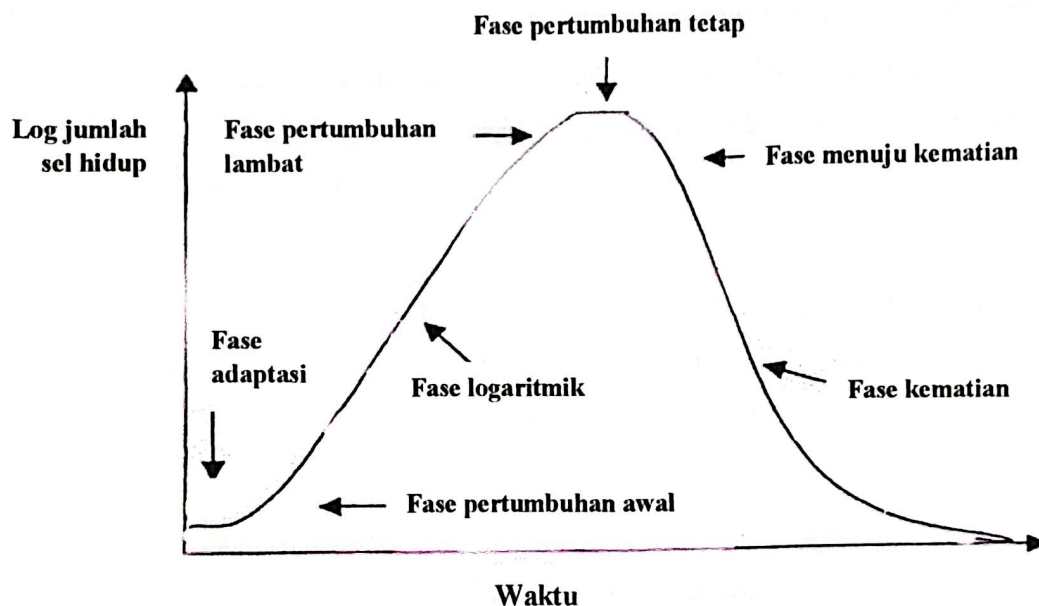
3. Bakteri Asetogen

Bakteri-bakteri yang terlibat dalam proses ini adalah *Syntrophobacter wolinii* (untuk mendegradasi propionat menjadi asam asetat, karbon dioksida dan hidrogen) dan *Synthrophomonas wolfii* (untuk mengoksidasi asam lemak bersama dengan bakteri pengguna hidrogen) [34].

4. Bakteri Metanogen

Bakteri yang bekerja pada tahap ini adalah bakteri metanogen, seperti *Methanobacterium omelianski*, *Methanobacterium ruminantium*, *Methanosarcina* dan *Methanococcus* [31]. Bakteri ini membutuhkan kondisi digester yang benar-benar kedap udara dan gelap [32]. Temperatur dimana bakteri ini bekerja secara optimum adalah pada keadaan mesofilik (35°C) [32] dan pada kisaran pH adalah 5,0-7,5 [34]. Pada akhir metabolisme dihasilkan metana dan karbon dioksida dari hidrogen dan asam asetat yang dihasilkan pada tahap pengasaman [32].

Bakteri fermentasi memiliki fase dalam kehidupannya, yaitu fase adaptasi, pertumbuhan awal, logaritmik, pertumbuhan lambat, pertumbuhan statis, menuju kematian dan fase kematian. Gambar 2.3 menunjukkan kurva pertumbuhan bakteri [36].



Gambar 2.3 Kurva Pertumbuhan Bakteri
Sumber: Fardiaz, 1992

1. Fase Adaptasi (*Lag*)

Pada fase ini perubahan bentuk dan pertumbuhan jumlah individu tidak terlihat secara nyata karena merupakan fase adaptasi (penyesuaian). Oleh karena itu, apabila dilihat pada kurva pertumbuhan bakteri selama fase ini umumnya garis grafik terlihat mendatar. Ini disebabkan tidak ada atau belum adanya sumber nutrisi untuk makanan bakteri [38]. Lamanya fase adaptasi dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti medium dan lingkungan pertumbuhan serta jumlah kultur.

a. Medium dan Lingkungan Pertumbuhan

Sel yang ditempatkan pada medium dan lingkungan pertumbuhan yang sama seperti sebelumnya mungkin tidak diperlukan waktu adaptasi. Apabila nutrisi dan kondisi lingkungan yang digunakan berbeda maka diperlukan waktu penyesuaian. Waktu penyesuaian digunakan untuk mensintesis enzim-enzim yang dibutuhkan pada saat metabolisme bakteri [38].

b. Keberadaan Kultur

Jumlah sel yang semakin tinggi akan mempercepat proses adaptasi. Fase adaptasi berjalan lambat dipengaruhi oleh kultur yang digunakan. Kultur dipindahkan dari medium yang kaya akan nutrisi ke medium yang kandungan nutrisi terbatas. Artinya, mutan (organisme yang mengalami mutasi) yang baru terbentuk harus menyesuaikan diri dengan lingkungannya. Komposisi kultur yang dipindahkan dari fase statis ke medium baru sama seperti sebelumnya [38].

2. Fase Pertumbuhan Awal

Keadaan dimana bakteri mulai membelah dengan kecepatan yang masih rendah karena baru selesai tahap penyesuaian diri. Namun, kecepatan pertumbuhan makin lama makin meningkat seperti terlihat pada Gambar 2.3 [38].

3. Fase Eksponensial atau Logaritmik

Setelah bakteri menyesuaikan diri dengan lingkungannya (pada fase adaptasi dan fase permulaan pembiakan) maka sel jasad renik membelah dengan cepat. Dimana pertambahan jumlahnya mengikuti kurva logaritmik. Kecepatan pertumbuhan sangat dipengaruhi oleh medium tempat tumbuhnya seperti pH dan kandungan nutrisi, temperatur dan kelembapan udara. Pada fase ini sel membutuhkan energi lebih banyak dibandingkan dengan fase lainnya, selain itu sel sangat sensitif terhadap keadaan lingkungan. Penambahan lumpur POME dilakukan untuk mempercepat pertumbuhan bakteri [38].

4. Fase Pertumbuhan Terhambat

Pada keadaan ini kecepatan pertumbuhan bakteri semakin lama makin menurun, hal tersebut disebabkan karena bakteri kehabisan nutrisi. Apabila nutrisi yang diberi sudah cukup dan masih terjadi penurunan kecepatan pertumbuhan maka terdapat akumulasi substansi beracun hasil metabolisme. Substansi tersebut menyebabkan represi terhadap kerja sistem sintesis enzim yang mengakibatkan terhentinya transkripsi kode genetik enzim dan mengakibatkan terhentinya pembentukan enzim baru. Perubahan kondisi

lingkungan juga dapat mengakibatkan penghambatan terhadap pertumbuhan sel [38].

5. Fase Stasioner

Selama fase ini jumlah populasi sel tetap. Artinya, jumlah sel yang tumbuh sama dengan jumlah sel yang mati atau kecepatan pertumbuhan adalah nol. Meskipun demikian, pertumbuhan sel tetap berlangsung. Jumlah pembentukan sel baru sebagai hasil reproduksi seimbang dengan jumlah sel yang mati selama fase ini. Ukuran sel pada fase ini lebih kecil karena sel tetap membelah meskipun zat nutrisi sudah habis. Maka adanya kemungkinan sel tersebut mempunyai komposisi berbeda dengan sel yang tumbuh pada fase logaritmik. Pada fase ini sel-sel menjadi lebih tahan terhadap keadaan ekstrim seperti panas, dingin, radiasi dan bahan kimia [38].

6. Fase Kematian

Keadaan dimana jumlah sel yang hidup semakin lama makin menurun, sedangkan jumlah kematian sel semakin banyak. Kematian ini terjadi karena kondisi lingkungan yang semakin memburuk disebabkan karena banyaknya akumulasi hasil metabolisme yang beracun terhadap sel. Oleh karena itu, grafik menunjukkan penurunan secara tajam karena merupakan akhir dari suatu jumlah individu yang kembali ke titik awal [38].

Berdasarkan kulturnya mikroorganisme yang digunakan untuk memproduksi biogas terdiri dari kultur murni dan campuran. Kultur murni adalah mikroorganisme yang telah dimurnikan dari konsorsiumnya yang lain sehingga didapatkan jenis mikroorganisme tunggal.

Kultur campuran merupakan kultur yang mengandung dua atau lebih spesies mikroorganisme [39]. Mikroorganisme kultur campuran pada umumnya lebih cocok digunakan untuk produksi biogas dari bahan baku terbarukan, seperti biomassa dan limbah organik. Bahan baku tersebut memiliki kandungan komposisi yang lebih kompleks dalam pemilihan kultur murni karena kurang hidrolitik [35]. Selain itu, tidak membutuhkan sterilisasi dalam proses

fermentasinya sehingga mengurangi jumlah biaya produksi dan dapat diaplikasikan ke dalam beberapa jenis substrat [40].

Terdapat beberapa cara untuk mengkulturisasi mikroorganisme seperti menggunakan kultur cair, agar-agar tegak, agar-agar miring dan agar-agar cawan [39].

1. Kultur cair, yaitu dimana pengembangbiakan mikroorganisme ditumbuhkan pada media cair di dalam tabung reaksi dengan temperatur dan waktu inkubasi tertentu [39].
2. Kultur agar-agar tegak, yaitu dimana pengembangbiakan mikroorganisme ditumbuhkan pada media agar-agar di dalam tabung reaksi yang diletakan tegak saat pendinginan. Metode ini biasanya digunakan untuk mengkulturisasi mikroorganisme yang bersifat anaerob [39].
3. Kultur agar-agar miring, yaitu dimana pengembangbiakan mikroorganisme ditumbuhkan pada media agar-agar di dalam tabung reaksi yang diletakan miring saat pendinginan. Cara ini merupakan metode yang paling mudah untuk mengkulturisasi mikroorganisme, baik yang bersifat aerob atau anaerob [39].
4. Biakan agar-agar cawan, yaitu dimana pengembangbiakan mikroorganisme ditumbuhkan pada cawan petri. Inokulasi mikroorganisme ini disebarkan di dalam medium sehingga warna koloni akan mudah terlihat [39].

2.4.3 Faktor yang Mempengaruhi Produksi Biogas dengan Fermentasi Anaerob

Faktor dan kondisi yang dapat mempengaruhi perkembangan mikroorganisme perlu diperhatikan untuk mendapatkan produksi biogas yang optimum. Faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme anaerob untuk produksi biogas antara lain, karakteristik substrat, derajat keasaman (pH), temperatur, intensitas pengadukan dan waktu tinggal [41].

1. Karakteristik Substrat

Mikroorganisme membutuhkan nutrisi untuk melakukan proses fermentasi anaerob. Nutrisi terdiri dari unsur makro seperti seperti karbon, nitrogen, fosfor, sulfur dan lain-lain serta unsur mikro seperti natrium, kalsium, magnesium, kobalt, zinkum, besi dan lain-lain. Nutrisi berupa sumber karbon dan sumber nitrogen sangat dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk tumbuh dan berkembang, khususnya mikroorganisme yang bekerja dalam proses anaerob. Apabila ketersediaan nitrogen tidak mencukupi, bakteri tidak dapat memproduksi enzim yang dibutuhkan untuk mensintesis senyawa (substrat) yang mengandung karbon. Sebaliknya ketersediaan nitrogen yang terlalu melimpah akan menghambat pertumbuhan bakteri, dalam hal ini terutama bahan yang kandungan amoniaknya sangat tinggi [8].

Imbangan karbon (C) dan nitrogen (N) yang terkandung dalam bahan organik sangat menentukan kehidupan dan aktivitas mikroorganisme. Imbangan C/N yang optimum bagi mikroorganisme perombak adalah 20-25. Kebutuhan unsur karbon dapat dipenuhi dari karbohidrat, lemak dan asam-asam organik, sedangkan kebutuhan nitrogen dipenuhi dari protein, amoniak dan nitrat. Perbandingan C/N substrat akan mempengaruhi aktivitas mikroorganisme dalam memproduksi biogas [8].

2. Derajat Keasaman (pH)

Derajat keasaman (pH) adalah ukuran keasaman atau kebasaan dari suatu bahan. Bakteri metanogen sangat sensitif terhadap perubahan pH lingkungan. Rentang pH terbaik dalam memproduksi biogas berkisar antara 6-8,3. Apabila nilai pH di bawah 6 dan di atas 8,3 aktivitas bakteri metanogen akan menurun dan pH di bawah 5 aktivitas fermentasi akan terhenti. Oleh karena itu, untuk mempertahankan pH berkisar antara 6-8,3 perlu ditambahkan kapasitas penyangga (*buffer capacity*) seperti ammonium hidroksida, larutan kapur, natrium karbonat dan lain-lain [8,41]. Kelarutan karbon dioksida dalam air berkurang pada temperatur yang meningkat. Nilai pH dalam digester anaerob termofilik akan lebih tinggi dibandingkan mesofilik. Hal ini disebabkan karena karbon dioksida terlarut akan membentuk asam karbonat yang

bereaksi dengan air [41]. Nilai pH akan meningkat apabila dihasilkan amonia selama proses degradasi protein atau adanya kandungan ammonia di dalam umpan, sementara akumulasi asam lemak volatil dapat menurunkan nilai pH.

3. Temperatur Fermentasi

Pengklasifikasian bakteri berdasarkan suhu dalam fermentasi anaerob terbagi menjadi tiga, yaitu psikrofilik (10-20°C), mesofilik (20-40°C) dan termofilik (40-60°C). Temperatur optimum pertumbuhan bakteri anaerob berkisar antara 30-35°C, sedangkan temperatur yang baik untuk proses fermentasi anaerob berkisar antara 30-55°C. Namun, sebagian bakteri mampu untuk memproduksi metana pada tingkat temperatur yang sangat rendah (0,6-1,2°C). Pada umumnya temperatur terendah dimana mikroorganisme tumbuh adalah -11°C, dibawah -25°C aktivitas enzim akan terhenti [8].

Produksi biogas lebih cepat pada temperatur termofilik dibandingkan dengan mesofilik [8]. Temperatur termofilik banyak digunakan untuk produksi biogas karena efektif menghancurkan patogen, meningkatkan laju pertumbuhan bakteri metanogen, mengurangi waktu retensi, degradasi substrat yang lebih baik. Perubahan temperatur (fluktuasi) akan mempengaruhi produksi biogas [41].

4. Intensitas Pengadukan

Pengadukan bertujuan untuk mendistribusikan bakteri, substrat dan nutrisi agar menyebar secara merata di dalam digester. Peningkatan produksi metana dipengaruhi oleh pengadukan, karena aktivitas metabolisme dari bakteri pembentuk asetat dan bakteri pembentuk metana membutuhkan jarak yang saling berdekatan. Selain itu, pengadukan dapat mengurangi terjadinya pemisahan lumpur dan terbentuknya buih (*scum*) [8].

5. Waktu Tinggal atau *Hydraulic Retention Time* (HRT)

Waktu Tinggal atau *Hydraulic Retention Time* (HRT) adalah periode waktu pada volume tertentu cairan untuk dipertahankan dalam volume kerja reaktor. HRT sangat berpengaruh dalam menetapkan jumlah waktu yang tersedia untuk pertumbuhan bakteri terutama pertumbuhan bakteri asidogenesis [31]. HRT merupakan parameter yang penting untuk proses fermentasi anaerob.

Pada proses fermentasi anaerob, pH dan HRT merupakan pasangan parameter yang saling berhubungan [41].

2.5 Tipe Digester Biogas

Digester merupakan suatu media (wadah) pembentuk biogas oleh mikroorganisme dengan menguraikan bahan-bahan organik. Pada proses pembuatan biogas, digester yang digunakan adalah digester anaerob. Menurut aliran masuk material organik, digester biogas dibedakan menjadi dua jenis, yaitu tipe *batch* dan kontinyu (*continuous*).

1. Tipe *Batch*

Pada tipe ini bahan organik ditempatkan pada tangki tertutup dengan proses secara anaerob. Bahan organik biasanya dipertahankan pada temperatur tertentu. Selain itu, dilakukan pengadukan untuk melepaskan gelembung gas dari lumpur [43]. Digester tipe ini pada umumnya digunakan untuk mengetahui potensi dari bahan yang diproses sebelum unit yang besar dibangun dan cocok untuk percobaan di laboratorium. Digester ini memiliki kelebihan yakni dapat digunakan pada bahan yang memiliki kandungan padatan tinggi (sekitar 20%) karena lamanya proses dapat ditingkatkan dengan mudah [44].

2. Tipe Kontinyu

Pada aliran kontinyu bahan organik dimasukan ke dalam digester secara teratur pada satu ujung dan setelah fermentasi dimulai dikeluarkan pada ujung yang lain. Tipe ini dapat mengatasi masalah pada proses pemasukan pada tipe *batch*. Terdapat dua aliran tipe kontinyu, di antaranya vertikal yang dikembangkan oleh *Gobar Gas Institute* di India dan horizontal dikembangkan oleh *Fry* di Afrika Selatan [44].

Terdapat beberapa jenis digester biogas yang biasa digunakan. Digester ini terbuat dari bahan dasar batu bata dan semen, digester tersebut yaitu kubah tetap (*fixed dome*) dan kubah apung (*floating drum*). Digester jenis kubah tetap memiliki volume yang tetap. Digester tersebut terdiri dari bagian pencerna yang berbentuk kubah tertutup dan tidak dapat berpindah-pindah, penahan gas kaku dan baskom pemisah substrat [45]. Bagian silinder

pencerna terbuat dari beton, walaupun demikian efektifitas penggunaan gas rendah karena fluktuasi tekanan yang tidak konstan. Jenis digester kubah tetap sebaiknya dibenamkan di dalam tanah dan hanya bagian penahan gas yang menonjol pada permukaan tanah. Hal tersebut dilakukan untuk menjaga kestabilan temperatur. Jenis ini dapat digunakan untuk waktu yang cukup lama (sekitar 20 tahun) [44].

Digester kubah apung terdiri dari ruang pencerna berbentuk silinder atau kubah yang dapat bergerak dan penahan gas yang mengapung. Bagian drum digunakan sebagai tempat penyimpanan gas yang terbentuk. Keuntungan digester jenis ini adalah mudah dioperasikan, produksi gas dapat dimonitor dan tekanan konstan. Namun, digester ini memiliki jangka waktu pakai yang pendek (kurang dari 5 tahun), hal ini disebabkan karena drum terbuat dari logam yang mudah berkarat dan bersifat inhibitor terhadap pertumbuhan bakteri. Apabila substrat mengandung bahan berserat maka pengeluaran gas akan terbat karena terjadi pembentukan buih [44].

2.6 Analisa Biogas

Kromatografi Gas atau *Gas Chromatography* (GC) merupakan metode yang baik digunakan untuk pemisahan senyawa-senyawa organik yang mudah menguap dan senyawa-senyawa gas anorganik dalam suatu campuran. Sampel yang mudah menguap dan stabil terhadap panas akan berpindah melalui kolom yang mengandung fase diam dengan suatu kecepatan yang tergantung pada rasio distribusinya. Pada kolom ini disertai dengan oven yang digunakan untuk pemanas sampel. Umumnya zat terlarut akan terpisah berdasarkan pada peningkatan titik didihnya dan afinitasnya terhadap fasa diam. Fasa gerak yang berupa gas akan mengelusi zat terlarut dari ujung kolom dan menghantarkannya ke detektor [46,47]. Kemudian hasilnya ditampilkan oleh rekorder dalam bentuk grafik melalui komputer [46].

Detektor yang paling umum digunakan dalam GC adalah *Flame Ionization Detector* (FID) dan *Thermal Conductivity Detector* (TCD). Keduanya peka terhadap berbagai komponen dan dapat berfungsi pada berbagai konsentrasi. Sementara TCD pada dasarnya universal dan dapat digunakan untuk mendeteksi

setiap komponen selain gas pembawa (selama konduktivitasnya berbeda dari gas pembawa). Sedangkan FID tidak dapat mendeteksi air. TCD adalah detektor non-destruktif sedangkan FID adalah detektor destruktif [46]. Berikut adalah penjelasan tentang GC berdasarkan detektornya:

1. GC-TCD

GC dengan TCD merupakan alat yang digunakan untuk menganalisis kandungan biogas dari hasil fermentasi dan molekul hidrokarbon kecil [48]. TCD terdiri dari *thermal-heated wire* atau *thermistor*, elemen sensor yang bekerja bergantung pada konduktivitas termal dari gas yang mengalir. TCD membandingkan konduktivitas panas dua aliran gas-gas pembawa murni (rujukan) dan sampel. Perubahan temperatur pada kabel yang dipanaskan oleh listrik di dalam detektor dipengaruhi oleh konduktivitas panas gas yang mengalir di sekelilingnya. Perubahan dalam konduktivitas panas ini dideteksi sebagai perubahan resistansi listrik dan diukur [49].

2. GC-FID

GC dengan FID merupakan alat yang digunakan untuk menganalisis kandungan udara dan H_2 yang dialirkan kemudian akan timbul pembakaran dan energi. Energi akan mengionisasi komponen-komponen yang nantinya akan keluar dari kolom. Molekul-molekul kolom tersebut berubah menjadi ion. Ion-ion positif akan tertarik ke elektroda negatif sehingga arus bertambah. Arus mengalir melalui tahanan dan menimbulkan selisih tegangan. Penurunan tegangan yang terjadi disalurkan melalui *amplifier* dan masuk ke dalam suatu rekorder (*integrator*). Kromatografi gas jenis ini sebaiknya menggunakan N_2 sebagai gas pembawa [49].

2.7 Sejarah Penelitian Biogas Menggunakan POME

Penelitian mengenai produksi biogas dari POME sudah dilakukan oleh berbagai kalangan baik mahasiswa, dosen maupun peneliti. Beberapa penelitian yang sudah dilakukan berkaitan dengan produksi biogas telah dirangkum pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Sejarah Penelitian Produksi Biogas dari *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dengan Proses Fementasi Anaerob

No.	Judul	Proses	Hasil	Rekomendasi	Analisis	
					Kelebihan	Kekurangan
1.	<i>Effect pH on Bio-hydrogen Production from POME Using Anaerobic Bacteria</i>	Fermentasi batch	<ul style="list-style-type: none"> • Biogas 138 mL/hari • H₂ 50,63% 	pH optimum pada 5,5 dapat mengurangi kadar COD dalam POME dan menghasilkan kandungan H ₂ terbanyak.	Biogas yang dihasilkan terbebas dari kandungan metana.	Tidak disebutkan temperatur yang digunakan pada proses fermentasi.
2.	<i>Bio-hydrogen Production from POME Using Immobilized Mixed Culture</i>	Fermentasi	<ul style="list-style-type: none"> • Biogas 2,257 L/L POME jam • H₂ 0,632 L H₂/L POME Jam 	Penggunaan sel amobil <i>Polyethylene Glycol</i> pada reaktor UASB dapat mengurangi biaya operasional.	Dapat digunakan untuk skala yang lebih besar.	Stabilitas inokulum di dalam sel amobil.
3.	Pengaruh Waktu Fermentasi terhadap Produksi Biogas Menggunakan Digester Dua Tahap pada Berbagai Konsentrasi <i>Palm Oil Mill Effluent</i> dan Lumpur Aktif	Fermentasi	Biogas 11,35 L	Kombinasi POME 90% dan lumpur aktif 10% menghasilkan biogas yang lebih banyak.	Biogas yang dihasilkan cukup banyak.	Waktu fermentasi yang cukup lama dan biogas yang dihasilkan mengandung metana.
4.	<i>Development of A Methane-Free, Continuous Biohydrogen Production System from Palm Oil Mill Effluent (POME) In CSTR</i>	Fermentasi kontinyu	<ul style="list-style-type: none"> • Biogas 2,6 L/hari • H₂ 1,16 L/L POME hari 	Perlakuan kejut panas dan fermentasi pada temperatur 55°C menghasilkan biogas bebas metana.	Biogas yang dihasilkan terbebas dari kandungan metana.	Fermentasi dilakukan secara kontinyu sehingga kemungkinan kontaminasi POME tinggi.

Penelitian yang dilakukan oleh Waeauma dkk. (2011) mendapatkan biogas sebanyak 138 mL/hari dengan kandungan H_2 50,63% dan penghilangan kandungan COD pada POME sebesar 68,3%. Penelitian ini menggunakan POME dengan kandungan COD 84.356,80 mg/L dan lumpur POME. Lumpur POME diberikan perlakuan kejut panas pada temperatur 100°C selama 15 menit. Kemudian lumpur POME dan POME dimasukkan ke dalam 1 L reaktor *batch* dengan variasi derajat keasaman (pH 4,63; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5 dan 7,0). Reaktor disemprot gas nitrogen untuk mendapatkan kondisi anaerob. Waeauma mendapatkan kondisi optimum pada pH 5,5 dan tidak terdeteksi kandungan metana pada biogas [50].

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Singh dkk. (2012) mendapatkan biogas sebanyak 2,257 L/L POME jam dengan kandungan H_2 0,632 L/L POME jam. Penelitian ini dilakukan dengan teknik sel amobil. Benih lumpur disaring dan kemudian diberi perlakuan kejut panas pada temperatur 80°C selama 50 menit. Benih lumpur diatur derajat keasaman pada pH 6. Sel amobil dibuat dengan memanaskan 10 g Polietilena Glikol (PEG), 1 g *N,N'*-methylenebisacrylamide (MBA) *crosslinker* dan 50 mL air suling sampai 40°C agar PEG benar-benar larut. Lumpur POME dan PEG dicampurkan kemudian 0,5 g inisiator potasium persulfat ($K_2S_2O_8$) ditambahkan untuk proses polimerisasi. Campuran didiamkan hingga menjadi kristal kemudian dipotong menjadi ukuran 3 mm. Sel amobil diletakkan di dalam reaktor *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) kemudian POME dipompa ke dalam reaktor UASB. Fermentasi dilakukan pada reaktor UASB dengan volume 500 mL dan 5 L. Pada reaktor UASB 500 mL didapatkan biogas sebanyak 1,588 L/L POME jam dengan kandungan H_2 0,589 L/L POME jam. Dan pada reaktor UASB 5 L didapatkan biogas sebanyak 2,257 L/L POME jam dengan kandungan H_2 0,632 L/L POME jam [51].

Penelitian yang dilakukan oleh Mujdalipah dkk. (2014) mendapatkan biogas tertinggi sebanyak 11,35 L selama waktu fermentasi 40 hari dan didapatkan pada kombinasi POME 90% dan lumpur aktif 10%. Produksi biogas menggunakan digester 2 tahap dimana kombinasi substrat dan lumpur aktif 90:10, 80:20 dan 70:20. Masing-masing kombinasi dimasukkan ke dalam digester 2

tahap selama 40 hari masa fermentasi. Analisa pH, temperatur dan volume gas dilakukan setiap hari [9].

Penelitian lain yang dilakukan oleh Mansor dkk. (2016) didapatkan biogas sebanyak 2,6 L/hari dengan kandungan H₂ 1,7 L/hari. Penelitian ini dilakukan dengan variasi perlakuan awal pada lumpur POME dan temperatur fermentasi. Lumpur POME diberi perlakuan awal dengan proses aklimatisasi (adaptasi mikroorganisme terhadap lingkungan baru) selama 3 bulan, derajat keasaman (pH 3) dan kejutan panas pada temperatur 80°C selama 1 jam. Fermentasi lumpur POME dan POME dilakukan secara kontinyu di dalam reaktor tangki berpengaduk pada variasi temperatur 35, 45 dan 55°C. Mansor, dkk mendapatkan kondisi optimum pembentukan biogas dengan kandungan H₂ terbanyak pada sampel yang diberi lumpur POME yang diberi perlakuan awal kejutan panas dan fermentasi pada temperatur 55°C [52].

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Pengambilan data penelitian dilaksanakan di Laboratorium Pusat Teknologi Sumberdaya Energi dan Industri Kimia (PTSEIK), Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan. Penelitian dilaksanakan selama bulan Januari s.d. Maret 2017.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

1. erlenmeyer 1000 mL dan 500 mL
2. gelas ukur 100 mL dan 50 mL
3. gelas kimia 250 mL
4. *water bath*
5. termometer
6. neraca digital
7. spatula
8. pH indikator
9. batang pengaduk
10. pipet
11. botol sampel 100 mL
12. segel penutup
13. *aluminium foil*
14. oven
15. jarum suntik
16. *autoclave*

3.2.2 Bahan

1. *Palm Oil Mill Effluent (POME)*
2. lumpur POME
3. aquades
4. NaOH
5. argon

3.3 Variabel

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi proses fermentasi anaerob untuk menghasilkan biogas antara lain, karakteristik substrat, derajat keasaman (pH), temperatur, intensitas pengadukan dan waktu tinggal [41]. Namun karena keterbatasan waktu maka variabel yang diamati adalah temperatur, pH dan keberadaan lumpur POME. Variasi yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1 tentang matriks penelitian.

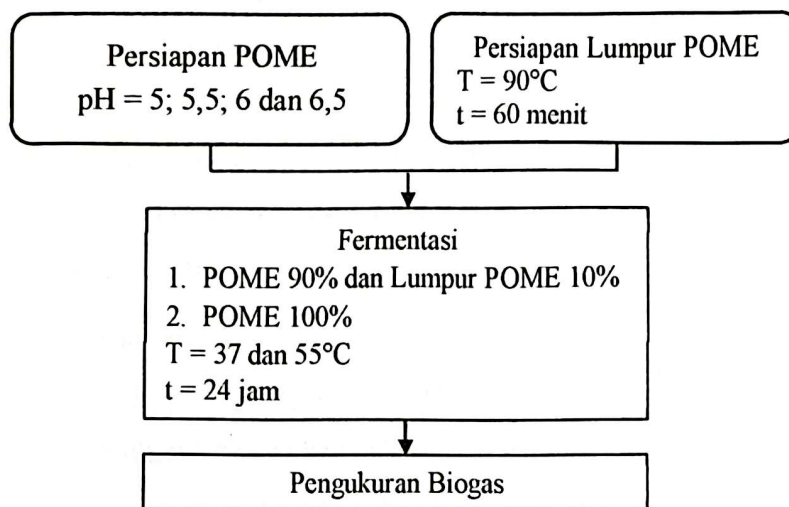
Tabel 3.1 Matriks Penelitian

Komposisi	T (°C)	pH
Lumpur POME	37	5
		5,5
		6
		6,5
	55	5
		5,5
		6
		6,5
Tanpa Lumpur POME	37	5
		5,5
		6
		6,5
	55	5
		5,5
		6
		6,5

Variasi komposisi dilakukan untuk mengetahui perbedaan volume biogas yang dihasilkan dari fermentasi POME dengan adanya lumpur POME dan tanpa adanya lumpur POME. Temperatur yang digunakan pada 37°C [53] dan 55°C [54] serta dengan variasi pH 5; 5,5; 6 dan 6,5 untuk mengetahui kondisi optimum dalam menghasilkan biogas.

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan untuk menyelesaikan pengambilan data, sehingga mendapatkan hasil yang diharapkan melalui beberapa tahapan, yaitu persiapan bahan baku, fermentasi anaerob POME dan lumpur POME serta pengukuran biogas, dimana sampai tahapan ini akan didapatkan kondisi optimum produksi biogas.



Gambar 3.1 Tahapan Penelitian

3.4.1 Persiapan POME

POME diambil dari PT Perkebunan Nusantara VIII, Pabrik Kelapa Sawit (PKS), Cikasungka, Bogor, Jawa Barat dan disimpan di dalam kulkas pada temperatur 4°C untuk menghambat pertumbuhan mikroorganisme. POME sebanyak 1.520 mL dibagi ke dalam 4 buah gelas kimia 500 mL. POME diatur derajat keasamannya dengan masing-masing pH 5; 5,5; 6 dan 6,5 menggunakan NaOH 3 M.

3.4.2 Persiapan Lumpur POME

Lumpur POME yang digunakan, diambil dari tempat yang sama dengan POME. Lumpur POME sebanyak 80 mL dimasukkan ke dalam botol sampel 100 mL. Lumpur POME diberi perlakuan kejut panas pada temperatur 90°C selama 60 menit di dalam *water bath* untuk mengurangi kontak langsung antara lumpur POME dengan pemanas. Setelah itu, lumpur POME yang telah diberi perlakuan

kejut panas disimpan ditutup menggunakan *aluminium foil* agar tidak adanya kontaminasi. Lumpur POME didiamkan hingga dingin pada temperatur ruang.

3.4.3 Fermentasi

POME yang telah diatur derajat keasamannya dan lumpur POME yang telah dingin dimasukkan ke dalam botol sampel 100 mL dengan volume kerja 50 mL. Sampel dengan tidak adanya lumpur POME terdiri dari 100% POME (50 mL) dan sampel dengan adanya lumpur POME terdiri dari 90% POME (45 mL) dan 10% lumpur POME (5 mL). Selanjutnya, botol yang sudah ditutup diberi segel penutup. Kemudian masing-masing sampel dialiri dengan gas Argon (Ar) selama 5 menit. Sampel difermentasi secara anaerob selama 24 jam dengan temperatur 37 dan 55°C di dalam oven.

3.4.4 Pengukuran Gas

Sampel yang telah mengalami fermentasi anaerob selama 24 jam, diukur volume biogas yang dihasilkan menggunakan jarum suntik.

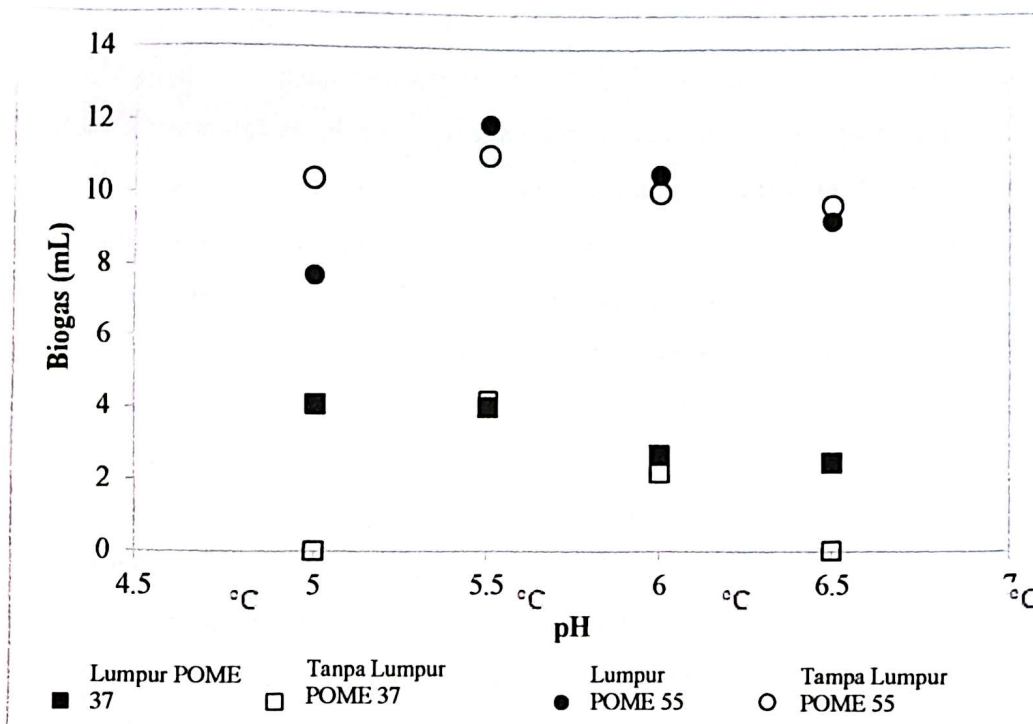
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Temperatur terhadap Produksi Biogas

Penelitian dilakukan dengan variasi temperatur 37 dan 55°C, derajat keasaman (pH) 5; 5,5; 6 dan 6,5 serta ada dan tanpa adanya lumpur POME sehingga diperoleh hasil meliputi data volume biogas (mL) dan nilai pH akhir. Data-data tersebut diuraikan pada Tabel 4.1 dan selanjutnya ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Biogas yang Dihasilkan dengan Fermentasi POME

Temperatur (°C)	Komposisi	pH Awal	pH Akhir	Volume Biogas (mL)
37	Lumpur POME	5	4,98	4,1
		5,5	5,79	4
		6	6,5	2,7
		6,5	6,75	2,5
	Tanpa Lumpur POME	5	-	0
		5,5	-	4,2
		6	-	2,2
		6,5	-	0
55	Lumpur POME	5	4,85	7,7
		5,5	5,04	11,85
		6	5,86	10,5
		6,5	6,64	9,15
	Tanpa Lumpur POME	5	-	10,4
		5,5	-	11
		6	-	10
		6,5	-	9,6



Gambar 4.1 Biogas yang Dihasilkan pada Fermentasi POME

Tabel 4.1 dan Gambar 4.1 menunjukkan total volume biogas yang dihasilkan (mL) melalui fermentasi POME selama 24 jam. Dari data pengukuran didapatkan menghasilkan rata-rata volume biogas yaitu 10 mL dan pada temperatur 37°C rata-rata volume biogas yaitu 2,4 mL. Ini disebabkan karena pada temperatur termofilik perpindahan massa baik, sehingga tingkat penguraian substrat tinggi. Temperatur yang tinggi dapat memacu perombakan secara kimiawi, perombakan yang cepat akan dimanfaatkan oleh bakteri untuk menghasilkan biogas [37].

Penelitian yang dilakukan oleh Mansor dkk. (2016) pada temperatur 35°C menghasilkan volume biogas 1,06 L dan kandungan Asam Lemak Volatil (VFA) 205 mg/L. Pada temperatur 45°C menghasilkan volume biogas 1,5 L dengan VFA 414 mg/L dan pada temperatur 55°C menghasilkan volume biogas sebanyak 2,6 L dengan VFA 2.269 mg/L. Pada temperatur termofilik (55°C) menghasilkan VFA yang paling tinggi dengan kandungan yang terbesar adalah asetat sebanyak 1.197 mg/L, dimana asetat merupakan substrat yang dibutuhkan bakteri untuk menghasilkan biogas [52].

Pada temperatur 37°C menghasilkan biogas yang lebih sedikit. Ini disebabkan karena pada temperatur mesofilik (37°C) perpindahan massa lebih rendah dibandingkan dengan temperatur termofilik. Pada penelitian yang dilakukan oleh Siegrist dkk. (2002) pada temperatur mesofilik (35°C) didapatkan koefisien perpindahan massa pada proses hidrolisis 0,25/hari. Dan pada temperatur termofilik (55°C) koefisien perpindahan massa pada proses hidrolisis adalah 0,4/hari. Ini menunjukkan pada kondisi termofilik perpindahan massa lebih baik sehingga volume biogas yang dihasilkan lebih banyak dibandingkan pada kondisi mesofilik [55].

Menurut Shin dkk. (2004) pada temperatur mesofilik pembentukan biogas yang rendah dapat disebabkan karena tingginya pembentukan propionat [56]. Dalam pembentukan biogas terdapat 4 tahapan perombakan secara kimiawi yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis dan metanogenesis. Pada tahap asidogenesis terdapat bakteri yang dapat mendegradasi gula sederhana menjadi asetat, butirat dan propionat. Pada pembentukan asetat, bakteri membutuhkan air untuk mendegradasi gula sederhana sehingga menghasilkan asetat, karbondioksida dan hidrogen. Dalam pembentukan butirat, bakteri mendegradasi gula sederhana sehingga menghasilkan butirat, karbondioksida dan hidrogen. Dan pada pembentukan propionat, bakteri membutuhkan hidrogen untuk mendegradasi gula sederhana menjadi propionat dan air [8]. Sehingga VFA dengan kandungan propionat yang tinggi hanya menghasilkan biogas yang rendah, karena pada proses pembentukan propionat bakteri membutuhkan biogas berupa hidrogen untuk mendegradasi gula sederhana.

4.2 Pengaruh Keberadaan Lumpur POME terhadap Pembentukan Biogas

Fermentasi anaerob dilakukan dengan dua keadaan, yaitu menggunakan lumpur POME dan tidak menggunakan lumpur POME pada temperatur dan pH yang berbeda. Didapatkan rata-rata volume biogas dengan adanya lumpur POME adalah 6,5 mL dan tanpa adanya lumpur POME menghasilkan rata-rata volume biogas 5,9 mL. Lumpur POME yang digunakan sebagai lumpur POME berasal dari fasilitas pengolahan air limbah yang mengendap dan dihasilkan oleh

mikroorganisme [30]. Mikroorganismenya di dalam lumpur POME ini yang akan mempercepat proses degradasi substrat yang berasal dari bahan organik menjadi biogas [42].

Sedangkan pada fermentasi yang dilakukan tanpa adanya lumpur POME menghasilkan volume biogas yang lebih sedikit dibandingkan dengan adanya lumpur POME. Ini dapat disebabkan karena jumlah mikroorganisme yang lebih sedikit sehingga proses degradasi bahan organik lebih lambat.

4.3 Pengaruh pH terhadap Pembentukan Biogas

pH awal POME divariasikan pada 5; 5,5; 6 dan 6,5. Berdasarkan data pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.1 pH 5 menghasilkan volume biogas yang lebih sedikit dibandingkan dengan pH 5,5. Pada pH 5 memiliki pH akhir fermentasi yang lebih rendah yaitu 4,98. Nilai pH dibawah 5 dapat mengakibatkan lebih banyak etanol yang dihasilkan dibandingkan VFA [57]. Pada pH 5,5 merupakan pH optimum fermentasi POME karena menghasilkan volume biogas tertinggi. Didapatkan volume biogas 4,2 mL pada temperatur 37°C tanpa adanya lumpur POME; 11,85 mL dengan adanya lumpur POME dan 11 mL tanpa adanya lumpur POME pada temperatur 55°C. Pada pH 5,5 dapat mengurangi waktu pada fase adaptasi [56].

Pada pH 6 dan 6,5 menunjukkan volume biogas yang dihasilkan semakin rendah diikuti dengan pH akhir fermentasi yang meningkat. Penelitian yang dilakukan oleh Mohan dkk. (2007) pada pH 5 menghasilkan VFA 118,4 meq/L dan pH 6-7 ditemukan VFA yang lebih rendah yaitu 94 meq/L dan 53,4 meq/L. VFA yang rendah menunjukkan lingkungan yang tidak mendukung untuk bakteri asidogen menghasilkan biogas, karena VFA merupakan sumber substrat untuk bakteri [57].

Hasil data pengukuran pH akhir fermentasi pada Tabel 4.1 menunjukkan bahwa pH 5 pada temperatur 37°C dengan adanya lumpur POME memiliki pH yang lebih rendah dibandingkan dengan pH awal. Pada pH 5,5; 6 dan 6,5 pada temperatur 37°C dengan adanya lumpur POME memiliki pH yang lebih tinggi dibandingkan dengan pH awal. Perubahan pH menjadi lebih tinggi dibarengi dengan semakin berkurangnya produksi biogas. Pada pH 5; 5,5 dan 6 pada temperatur 55°C dengan adanya lumpur POME menunjukkan pH akhir lebih

rendah dibandingkan pH awal. Dan pada pH 6,5 pada temperatur 55°C dengan adanya lumpur POME memiliki pH akhir yang lebih tinggi.

Penurunan pH diakibatkan karena tahapan asidogenesis selama fermentasi menghasilkan VFA. Produk samping VFA mengandung asetat, butirat dan propionat [37,52]. Penelitian yang dilakukan oleh Mansor dkk. (2016) VFA dengan kandungan asetat dan butirat terbanyak menghasilkan biogas yang tinggi [52]. Menurut Shin dkk. (2004) rendahnya produksi biogas berhubungan dengan meningkatnya kadar propionat yang dapat mengkonsumsi hidrogen dan mengkonversi hidrogen menjadi metana. Dengan meningkatnya propionat, pH pada fermentasi juga semakin tinggi [56].

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang kami lakukan maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Telah dihasilkan biogas dari POME dan lumpur POME sebagai kultur campuran dengan fermentasi secara anaerob, dimana volume biogas yang terbanyak adalah 11,85 mL pada temperatur 55°C dengan adanya lumpur POME dan pada pH 5,5.
2. Pengaruh temperatur, pH dan lumpur POME terhadap volume biogas dengan fermentasi secara anaerob adalah:
 - Pada temperatur termofilik (55°C) dapat memacu perombakan secara kimiawi yang dimanfaatkan oleh bakteri untuk menghasilkan biogas.
 - Dengan adanya lumpur POME di dalam substrat dapat mempengaruhi produksi biogas.
 - Didapatkan pH POME yang optimum untuk menghasilkan biogas adalah 5,5.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang kami lakukan, kami memberikan saran terkait dengan penelitian selanjutnya yaitu:

1. Perlu dilakukan pengujian kandungan mikroorganisme penghasil biogas pada lumpur POME dan karakteristik POME sebelum dilakukan penelitian.
2. Penambahan nutrien dapat dilakukan untuk menghasilkan volume biogas yang lebih banyak.
3. Dapat dilakukan penambahan zat kapur atau NaOH untuk mempertahankan pH.
4. Perlu dilakukan perlakuan lebih lanjut pada sisa sampel setelah didapatkan biogas agar memiliki manfaat.

DAFTAR PUSTAKA

1. BPPT, "Outlook *Energi Indonesia*," Pengembangan Energi untuk Mendukung Industri Hijau, p. 119, 2016.
2. J. O'M Bockris, "The Origen of Ideas on A Hydrogen Economy and It's Solution to Decay od The Enviroment," *International Journal of Hydrogen*, vol. 27, pp. 731-740, 2002.
3. L. R. Sirait, "*Produksi Gas Hidrogen dari Limbah Cair Tahu dengan Bakteri Fotosintetik Rhodobium Marinum*," Tesis 2007.
4. Edwi Mahajoeno, Bibina Widiyati Lay, Surjono Hadi Sutjahjo dan Sisiwanto, "*Potensi Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit untuk Produksi Biogas*," Jurnal Biodiversitas, vol. 9, pp. 48-52, 2008.
5. G.D. Najafpour, A.A.L. Zinatizadeh, A.R. Mohamed, M. Hasnain Isa dan H. Nasrollahzadeh, "High-rate Anaerobic Digestion of POME in An Upflow Anaerobic Sludge-Fixed Film Bioreactor," *Process Biochemistry*, vol. 41, pp. 370-379, 2006.
6. Hari Tiarasti, Irma Suraya dan Bambang Trisakti, "*Biohidrogen dari Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit dengan Fermentasi Anaerobik pada Kondisi Termofilik*," Universitas Sumatera Utara, Sumatera Utara, [Skripsi] 2012.
7. D. H. Susila dan Isroi Goenadi, "*Pemanfaatan Produk Samping Kelapa Sawit sebagai Sumber Energi*," 2005.
8. Fitria Amalia, "*Produksi Biogas dari Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit dengan Menggunakan Digester Dua Tahap*," Institut Pertanian Bogor, Bogor, Skripsi 2011.

9. Siti Mujdalipah, Salundik Dohong, Ani Suryani dan Amalia Fitria, "Effects of Fermentation Time Two toward Biogas Producing by Using Two Stages Digester on Various POME and Activated Sludge Concentration," *Agritech*, vol. 34, Februari 2014.
10. Ainul Mardhiah, "*Pabrik Kelapa Sawit PT Perkebunan Nusantara-1*," Universitas Malikussaleh, Aceh Utara, Laporan Kerja Praktik 2013.
11. S. Ketaren, *Minyak dan Lemak Pangan*. Jakarta: UI Press, 2008.
12. Yunus Ahmed, Zahira Yaakob, Parul Akhtar dan Kamaruzzaman Sopian, "Production of Biogas and Performance Evaluation of Existing Treatment Process in POME," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 1260-1278, 2015.
13. A. Mudiarti, "*Pengolahan Kelapa Sawit*," 1992.
14. Li Yu Lang, "Treatability of palm oil mill effluent (POME) using black liquor in an anaerobic treatment process," Tesis 2007.
15. Renita Manurung, "*Proses Anaerobik Sebagai Alternatif Untuk Mengolah Limbah Sawit*," vol. 2, 2004.
16. Ditjen PPHP Departemen Pertanian, 2006.
17. Thomas Fricke, *Buku Panduan Pabrik Kelapa Sawit Kecil untuk Produksi BBN*, 2009.
18. Kamal dan Netty, "*Karakterisasi dan Potensi Pemanfaatan Limbah Sawit*".
19. A. Fakhru'l Razi, Noerfadilah Nik dan Razif M. Harun, "Batch Process for Bio-hydrogen Production on Small Scale Bioreactor from POME," *Chemical and Process Engineering Research*, vol. 23, 2014.
20. Hamonangan Nainggolan dan Susilawati, "*Pengolahan Limbah Cair Industri Perkebunan*," 2011.
21. Yan Fauzi, *Kelapa Sawit, Budidaya, Pemanfaatan Hasil dan Limbah*. Jakarta: Penebar Swadaya, 2002.
22. Rafael Borja, Charles J. Banks dan Enrique Sanchez, "Anaerobic Treatment of Palm Oil Mill Effluent in a Two-Stage Up-flow Anaerobic Sludge Blanket

- (UASB) System," *Journal of Biotechnology*, vol. 45, pp. 125-135, 1996.
23. "Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 51," , Indonesia, 1995.
 24. A. R Khalid dan W. A. W Mustafa, "External Benefits of Enviromental Regulation: Resource Recovery and The Utilisation Rate on Hydrogen Production from The Fermentation of Food Industry Residues and Manure," *International Journal Hydrogen Energy*, vol. 12, pp. 277-285, 1992.
 25. Syafawati Ahmad Kamal, dkk., "Pretreatment Effect of Palm Oil Mill Effluent during Hydrogen Production by A Local Isolate Clostridium buytricum," *International Journal of Advance Science Engineering Information Technology*, vol. 2, pp. 569-582, 2012.
 26. Yahaya S Madaki dan Lau Seng, "POME from Malaysia Palm Oil Mills : Waste and Resouces," *International Journal of Science and Environment*, vol. 2, p. 18, 2013.
 27. Bambang Trisakti, Irvan, Michael Vincent dan Yohannes Tandean, "Pengolahan Lanjut Limbah Cair Kelapa Sawit Secara Aerobik Menggunakan Effective Microorganism Guna Mengurangi Nilai TSS," p. 4, 2012.
 28. D. Deublein dam A. Steinhauster, *Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction.*, 2008.
 29. Ade Sri Rahayu, dkk., *Konversi POME Menjadi Biogas*, Eds., 2015.
 30. Shinya Yokoyama, *Asian Biomass Handbook.*: Kementerian Pertanian, Kehutanan, dan Perikanan, 2008.
 31. P. E Poh and M. F. Chong, "Review Development of Anaerobic Digestion Methode for POME Treatment," *Bioresource Technology*, pp. 1-9, 2008.
 32. *Diktat Kuliah Mikrobiologi.*
 33. Sri Wahyuni, "Biogas Energi Terbarukan Ramah Lingkungan dan Berkelanjutan," di Kongres Ilmu Pengetahuan Nasional (KIPNAS) ke-10, Jakarta, 2011.
 34. Debrata Das, Namita Khanna dan Chitrlekha Nag Dasgupta, *Biohydrogen Production*. London: CRC, 2014.

35. Ganesh D. Saratale, Rijuta G. Saratale dan Jo Shu Chang, *Biohydrogen from Renewable Resources.*, 2013.
36. Dawei Liu, "Biohydrogen Production by Dark Fermentation from Organic Wastes and Residues," Technical University of Denmark, Denmark, PhD Thesis 2008.
37. Teuku Azuar Rizal, Mahidin dan Muhammad Ayyub, "*Pengembangan Anaerobic Digester untuk Produksi Biogas dari Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit*," Jurnal Ilmiah Jurutera, 2015.
38. Fardiaz, *Mikroba Pangan*. Jakarta: PT. Gramedia.
39. P. Prasertsan, S. O-Thong dan N. K. Birkeland, "Optimization and Microbial Community Analyst for Production of Biohydrogen from POME by Thermophilic Fermentative Process," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, pp. 7448-7459, 2009.
40. L. Valdez Vazquez, Rios Real, E. Esparza Garcia, F. Cecchi dan Poggi Varaldo, "Semi Continuous Solid Substrate Anaerobic Reactors for Hydrogen Production from Organic Waste: Mesophilic Versus Thermophilic Regime," *International Journal Hydrogen Energy*, vol. 30, pp. 1383-1391, 2005.
41. Teodorita Al Seadi, dkk., *Biogas Handbook*, Teodorita Al Seadi, Ed. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10, 2008.
42. Agus Purnomo, "*Pengaruh Suhu dan Sumber Inokulum Terhadap Produksi Biogas dari Limbah Makanan pada Perombakan Anaerob*," Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Skripsi 2010.
43. L. J. Fry, *Practical Building of Methane Power Plant for Rural Energy Independence.*: Chapel River Press, 1974.
44. P. J. Meynell, *Methane: Planning a Digester.*: Prism Press, 1976.
45. Suyitno, Agus Sujono dan Dharmanto, *Teknologi Biogas*. Yogyakarta, Indonesia: Graha Ilmu, 2010.
46. Ibnu Golib Gandjar dan Abdul Rohman, *Kimia Farmasi Analisis*. Yogyakarta:

Pustaka Pelajar, 2007.

47. Harold McNair dan James M. Miller, *Basic Gas Chromatography*, John Willey, Ed. New York, 1997.
48. S. O-Thong, C. Mamimin dan P. Prasertsan, "Effect of Temperature and Initial pH on Biohydrogen Production from POME: Long-Term Evaluation and Microbial Community Analysis," *Electronic Journal of Biotechnology*, vol. 14, pp. 60-70, 2011.
49. Y. Asadi dan J. Miyake, "Photobiological Hydrogen Production," *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 88, pp. 1-6, 1999.
50. Abdulhadee Waeaua, Charongpun Musikavong dan Chayanoot Sangwichien, "Effect pH on Biohydrogen Production from POME Using Anaerobic Bacteria," di *TICHe International Conference*, Bangkok, 2011.
51. Lakhveer Singh, Muhammad Faisal Siddiqui, Anwer Ahmad, Mohd. Hasbi dan Mimi Rahim Sakinah, "Biohydrogen Production from Palm Oil Mill Effluent Using Immobilized," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2012.
52. Mariatul Fadzillah Mansor, MD Jamaliah, Tabassum Mumtaz, Rakmi ABD. Rahman dan Sahilah ABD. Mutalib, "Development of A Methane-free, Continous Biohidrogen Production System from POME in CSTR," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 11, pp. 1174-1182, 2016.
53. Feng Xiaoqiong, Wang Hui, Wang Yu, Wang Xiaofang dan Huang Jianxin, "Biohydrogen Production from Apple Pomace by Anaerobic Fermentation with River Sludge," *International Journal of Hydrogen*, vol. 35, pp. 3058-3064, 2010.
54. Isnazunita Ismail, Mohd. Ali Hassan, Nor Aini Abdul Rahman dan Chen Sau Soon, "Thermophilic Biohydrogen Production from POME Using Suspended Mixed Culture," *Biomass and Bioenergy*, vol. 34, pp. 42-47, 2010.
55. Hansruedi Siergist, Dea Vogt, Jaime L. Garcia-Heras dan Willi Gujer, "Mathematical Model for Meso- and Thermophilic Anaerobic Sewage Sludge

- Digestion," *Environment Science Technology*, vol. 36, pp. 1113-1123, 2002.
56. Shin Hang Sik, Youn Jo Ho dan Kim Sang Hyoun, "Hydrogen Production from Food Waste in Anaerobic Mesophilic and Thermophilic Acidogenesis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 29, pp. 1355-1363, 2004.
57. S. Venkata Mohan, dkk., "Biohydrogen Production from Chemical Wastewater as Substrate by Selectively Enriched Anaerobic Mixed Consortia: Influence of Fermentation pH and Substrate Composition," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, pp. 2286-2295, 2007.