

TESIS
STUDI KINETIKA PENGOLAHAN *PALM OIL MILL*
EFFLUENT OLEH BAKTERI INDIGEN
(*STENOTROPHOMONAS RHIZOPHILA STRAIN E-P10*)
DALAM PRODUKSI BIOGAS SECARA ANAEROB



FENI ALVIONITA
03012681721003

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK KIMIA
JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2019

TESIS
STUDI KINETIKA PENGOLAHAN *PALM OIL MILL*
EFFLUENT OLEH BAKTERI INDIGEN
(*STENOTROPHOMONAS RHIZOPHILA STRAIN E-P10*)
DALAM PRODUKSI BIOGAS SECARA ANAEROB

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Magister Teknik
(M.T.) Pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya**



FENI ALVIONITA
03012681721003

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK KIMIA
JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2019

HALAMAN PENGESAHAN

STUDI KINETIKA PENGOLAHAN PALM OIL MILL EFFLUENT OLEH BAKTERI INDIGEN (*STENOTROPHOMONAS RHIZOPHILA STRAIN E-P10*) DALAM PRODUKSI BIOGAS SECARA ANAEROB

TESIS

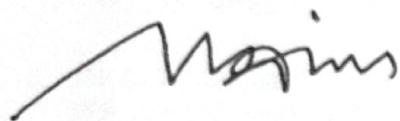
Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Magister
Teknik (M.T.) Pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

Palembang, Desember 2019

Menyetujui,

Pembimbing I

Pembimbing II



Prof. Dr.Ir. H. Muhammad Said, M.Sc
NIP. 195805141984031001

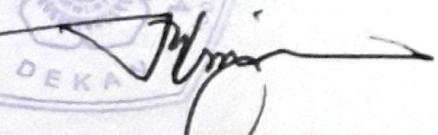


Dr. Ir. H. Muhammad Faizal, DEA
NIP. 196108121987031003

Mengetahui,



Dekan Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya,



Prof. Ir. Subriyer Nasir, M.S, Ph.D
NIP. 196009091987031004

Koordinator Program Studi
Magister Teknik Kimia,



Dr. David Bahrin, S.T, M.T.
NIP. 198010312005011003

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis berupa Tesis ini dengan judul " Studi Kinetika Pengolahan Palm Oil Mill Effluent Oleh Bakteri Indigen (*Stenotrophomonas rhizophila strain e-p10*) dalam Produksi Biogas Secara Anaerob" telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Program Studi Magister Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada 18 Desember 2019.

Palembang, 18 Desember 2019

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah berupa Tesis

Ketua :

1. Prof. Dr. Ir. H. M. Taufik Toha, DEA
NIP. 1571041408530005

(M. Taufik Toha) 29/12/2019

Anggota :

1. Prof. Dr. Ir. Hj. Sri Haryati, DEA
NIP. 195610241981032001
2. Dr. Ir. Hj. Susila Arita, DEA
NIP. 196010111985032002
3. Hj. Tuty Emilia Agustina, S.T, M.T, Ph.D
NIP. 197208092000032001
4. Dr. David Bahrin, S.T, M.T.
NIP. 198010312005011003

(S. Haryati) 23/12/2019
(S. Arita) 31/12/2019
(H. Tuty) 23/12/2019
(D. Bahrin) 23/12/2019

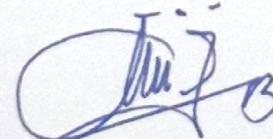
Mengetahui,



Dekan Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya,

Prof. Ir. Subriyer Nasir, M.S, Ph.D
NIP. 196009091987031004

Koordinator Program Studi
Magister Teknik Kimia,



Dr. David Bahrin, S.T, M.T.
NIP. 198010312005011003

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Feni Alvionita

NIM : 03012681721003

Judul : Studi Kinetika Pengolahan Palm Oil Mill Effluent Oleh Bakteri Indigen (*Stenotrophomonas rhizophila strain e-p10*) dalam Produksi Biogas Secara Anaerob

Menyatakan bahwa Laporan Tesis saya merupakan hasil karya sendiri didampingi tim pembimbing dan bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam Laporan Tesis ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai aturan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.



Palembang, 5 Desember 2019



Feni Alvionita
NIM. 03012681721003

KATA PENGANTAR

Dengan mengucap Puji syukur kepada Allah Yang Maha Esa, karena atas karuniaNya sehingga penyusunan Laporan Hasil Penelitian dengan judul “**Studi Kinetika Pengolahan Palm Oil Mill Effluent oleh Bakteri Indigen (*Stenotrophomonas rhizophila strain e-p10*) Secara Anaerob**” ini dapat terselesaikan. Tesis ini merupakan syarat akademik dalam menyelesaikan Magister pada Program Studi Teknik Kimia, Bidang Kajian Utama Teknologi Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Sriwijaya.

Pelaksanaan penelitian, proses penulisan dan penyelesaian tesis ini dapat berjalan dengan baik karena adanya dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, perkenankan penulis untuk menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Dr. David Bahrin, S.T,M.T. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Kimia.
2. Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Said, M.Sc dan Dr. Ir. H. M. Faizal, DEA selaku Dosen Pembimbing I dan Pembimbing II.
3. Ibu Rosmania, S.T. selaku analis di Laboratorium Mikrobiologi Fakultas MIPA Jurusan Biologi Universitas Sriwijaya, Inderalaya.
4. Staff Dosen dan seluruh Karyawan Teknik Kimia Program Magister Teknik Kimia Universitas Sriwijaya.
5. Kedua orang tua penulis, H. Elvin Ismail, S.T. dan Hj. Lili Endriyani,S.H yang telah mendukung secara finansial. Adik kandung, dr. Amellia Sefti Lestari, S.Ked yang selalu memberikan dukungan dan semangat.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih mempunyai kekurangan. Namun, demikian tesis ini dapat bermanfaat bagi kita semua dan dapat menjadi lebih baik lagi dengan adanya penelitian - penelitian lanjutan. Aamiin.

Palembang, Desember 2019

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Hipotesa	5
1.5. Ruang Lingkup Penelitian	5
1.6. Manfaat Penelitian	5
1.7. BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Proses Terbentuknya Air Limbah pada Proses Produksi CPO	6
2.1.1. Penerimaan, Pemindahan, dan Penyimpanan TBS	6
2.1.2. Sterilisasi Tandan Buah Segar (TBS)	6
2.1.3. Pengupasan, Pemrosesan, dan Ekstraksi Minyak Sawit Mentah	6
2.1.4. Klarifikasi dan Pemurnian Minyak Sawit Mentah (CPO)	7
2.1.5. Pemisahan Nut dan Fiber	7
2.1.6. Pemisahan Inti Buah Sawit dan Proses Pengeringan	7
2.2. Karakteristik POME	8
2.3. Parameter Ukuran Air Limbah Industri	9
2.3.1. <i>Biological Oxygen Demand (BOD)</i>	10
2.3.2. <i>Chemical Oxygen Demand (COD)</i>	10
2.3.3. TSS (<i>Total Suspended Solids</i>)	11
2.3.4. DO (<i>Dissolved Oxygen</i>)	11
2.3.5. Minyak dan Lemak	12
2.3.5.1. Metode Gravimetri-Partisi	12

2.3.5.2. Metode Inframerah-Partisi	13
2.3.5.3. Metode Ekstraksi Soxlet	13
2.3.6. <i>Total Volatile Suspended Solids (TVSS)</i>	14
2.3.7. Senyawa Yang Mengandung Nitrogen.....	14
2.4. Biogas	15
2.4.1. Sifat Biogas	16
2.4.2. Karakteristik Bahan Baku Biogas	16
2.4.2.1.Substrat Bahan Organik	17
2.4.2.2. Derajat Keasaman (pH).....	17
2.4.2.3. Rasio Karbon dan Nitrogen	18
2.4.2.4. Zat Toksik.....	18
2.4.2.5. Temperatur	19
2.4.2.6. Laju Pengisian Ulang	19
2.4.2.7. Pengadukan.....	19
2.4.2.8. Starter	20
2.4.2.9.Waktu Retensi.....	20
2.4.2.10. Aktivitas dan Populasi Mikroba.....	20
2.4.2.11.Kehadiran Material Inhibitor	21
2.4.2.12.Tekanan	22
2.4.2.13.Kondisi Pencampuran	22
2.4.2.14. Kesetimbangan Kimia	22
2.5. Konversi POME Menjadi Biogas	23
2.5.1.Proses Penguraian Biogas Secara Anaerobik	24
2.5.1.1.Hidrolisis	24
2.5.1.2.Asidogenesis	25
2.5.1.3. Asetogenesis	25
2.5.1.4.Metanogenesis	25
2.6. Konfigurasi Reaktor Penguraian Biogas Secara Anaerob.....	26
2.6.1.Sistem Kolam.....	26
2.6.2. Filtrasi Anaerob.....	27
2.6.3. Bioreaktor Anaerob Baffle yang Dimodifikasi	29

2.6.4. Reaktor Fluidized-Bed (RFB).....	29
2.6.5. Reaktor Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (RUASB).....	30
2.6.6. Reaktor Anaerobic Baffled (RAB).....	31
2.6.7. Reaktor Up-flow anaerobic sludge fixed-film (UASFF).....	32
2.6.8. <i>Continuous stirred tank reactor</i> (CSTR).....	34
2.6.9. Proses Kontak Secara Anaerob	35
2.6.10 Digester Anaerob.....	35
2.6.11. UMAS (Ultrasonicated Membrane Anaerobic System), UAMAS (Ultrasonic assisted Membrane Anaerobic System), dan MAS (Membrane Anaerobic System).....	36
2.6.12. Reaktor Expanded Granular Sludge Bed	36
2.6.13. Bioreaktor Suspended Close Anaerobik	38
2.7. Bakteri Metanogenik.....	38
2.8. Faktor yang Mendukung Perkembangan Bakteri	39
2.8.1. Kadar pH.....	39
2.8.2. Suhu	40
2.8.3. Nutrisi	40
2.8.3.1. Karbon	41
2.8.3.2. Oksigen	41
2.8.3.3. Nitrogen.....	42
2.8.3.4. Sulfur.....	42
2.8.3.5. Fosfor.....	42
2.8.3.6. Unsur Logam.....	42
2.9. Media Kultur untuk Pertumbuhan Bakteri	42
2.9.1. Media Padat.....	43
2.9.2. Media Kimia	43
2.9.3. Media Kompleks	43
2.9.4. Media Pertumbuhan Anaerobik	43
2.9.5. Teknik Kultur Khusus	44
2.10. Kurva Pertumbuhan Bakteri	44
2.10.1. Tahapan Lag	44

2.10.2.Tahapan Log.....	44
2.10.3.Tahapan Stasioner	44
2.10.4.Tahapan Kematian atau Tahapan Penurunan.....	45
2.11. Metode Perhitungan Mikroba.....	45
2.11.1.Metode Pengukuran Langsung.....	45
2.11.1.1.Perhitungan Cawan	45
2.11.1.2.Filtrasi	46
2.11.1.3. Most Probable Number (MPN).....	46
2.11.1.4.Perhitungan Mikroskop Langsung	46
2.11.2. Metode Pengukuran Tidak Langsung	47
2.11.2.1.Turbiditas (Kekeruhan).....	47
2.11.2.2.Aktivitas Metabolisme.....	47
2.11.2.3. Berat Kering	47
2.12. Parameter Kinetika Pertumbuhan Bakteri	47
2.12.1.Persamaan Monod	48
2.12.2.Laju Pertumbuhan Maksimum (μ_{\max}) dan Konstanta Kejenuhan (K _s)	49
2.12.3.Laju Pertumbuhan Spesifik (μ)	49
2.12.4. Waktu Generasi	50
2.12.5. Penggunaan Spesifik Substrat (q).....	52
2.12.6. Pengaruh Nilai Yield	52
2.12.6.1.Yield yang Diobservasi	52
2.12.6.2.Yield Biomassa dari Substrat.....	53
2.12.6.3.Yield Produk dari Biomassa	53
2.12.6.4.Yield Produk dari Substrat	53
2.12.7. Kinetika Kematian Sel	54
2.13. Metode Untuk Penentuan Nilai K _s dan μ_{\max}	54
2.13.1. Plotting Lineweaver-Burk.....	55
2.13.2. Plotting Eadie-Hofstee	55
2.13.3. Plotting Langmuir.....	56
2.13.4. Formula Contois	56
2.14. Penelitian Terkait	57

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	59
3.2. Studi Literatur.....	59
3.3. Alat dan Bahan Penelitian	59
3.3.1. Persiapan Alat	59
3.3.2. Perancangan Bioreaktor.....	59
3.3.3. Persiapan Bahan	60
3.3.4. Persiapan Substrat	60
3.4. Variabel Penelitian.....	60
3.4.1. Variabel Tetap.....	60
3.4.2. Variabel Bebas	60
3.5. Tahapan Penelitian.....	60
3.6. Mekanisme Penelitian	61
3.6.1. Pembuatan Medium <i>Nutrient Agar</i> Miring.....	61
3.6.2. Peremajaan Bakteri KP 1.2	62
3.6.3. Pembuatan Medium Mineral.....	62
3.6.4. Pembuatan Inokulum Bakteri KP 1.2.....	62
3.6.5. Pembuatan Starter.....	62
3.6.6. Proses Degradasi Substrat.....	62
3.7. Tahapan Analisa Sampel	63
3.7.1. Analisa Derajat Keasaman (pH).....	64
3.7.2. Analisa BOD ₅	64
3.7.2.1. Kalkulasi Kadar BOD5	64
3.7.3. Analisa COD	65
3.7.3.1.Perhitungan Kadar COD	65
3.7.4. Analisa TSS.....	66
3.7.4.1. Kalkulasi kadar TSS.....	66
3.7.5. Analisa Biogas	66
3.7.6. Perhitungan Populasi Bakteri.....	66
3.8. Penentuan Parameter Kinetika Degradasi	67
3.9. Matriks Hasil Penelitian	67

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	70
4.1. Analisa Populasi Bakteri, Kandungan Biogas, COD, BOD, TSS, dan pH	70
4.1.1.Pengaruh Waktu Degradasi Terhadap Populasi Bakteri.....	71
4.1.2. Pengaruh Waktu Degradasi Terhadap Kandungan Gas.....	73
4.1.3. Pengaruh Waktu Degradasi Terhadap BOD	75
4.1.4. Pengaruh Waktu Degradasi Terhadap COD	76
4.1.5. Pengaruh Waktu Degradasi Terhadap TSS.....	78
4.1.6. Pengaruh Waktu Degradasi Terhadap pH.....	79
4.2. Hubungan Laju Pertumbuhan dan Waktu Generasi Terhadap Titik Optimum Waktu Proses	80
4.3. Kinetika Degradasi Senyawa Organik Pada Air Limbah Pabrik Kelapa Sawit .	81
4.3.1. Metode Lineweaver-Burk Plot.....	82
4.3.2. Metode Eadie-Hofstee Plot	83
4.3.3. Metode Langmuir Plot.....	84
4.3.4. Metode Plotting dengan Persamaan Contuis	85
4.3.5. Produksi Sintesis Sel/ <i>Growth Yield</i> (Y) dan Penggunaan Substrat Maksimum (q_{\max}).....	87
4.4. Kinetika Degradasi Senyawa Organik dan Anorganik Pada Air Limbah Pabrik Kelapa Sawit.....	88
4.4.1. Metode Lineweaver-Burk Plot.....	89
4.4.2. Metode Eadie-Hofstee Plot	90
4.4.3. Metode Langmuir Plot.....	90
4.4.4. Metode Plotting dengan Persamaan Contuis	9
4.4.5. Produksi Sintesis Sel/ <i>Growth Yield</i> (Y) dan Penggunaan Substrat Maksimum (q_{\max}).....	93
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	95
5.1. Kesimpulan	95
5.2. Saran.....	95
DAFTAR PUSTAKA	96
LAMPIRAN-LAMPIRAN	102

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Standar Ketetapan Mutu Air Limbah untuk Industri Minyak Sawit (PerGub Sumsel No. 8 tahun 2012)	9
Tabel 2.2 Komposisi Biogas Menurut Bahan Bakunya.....	16
Tabel 2.3 Jenis dan Kadar Zat Toksik yang Menghambat Produksi Gas (Wahyuni, 2013).....	18
Tabel 2.4 Perbedaan penguraian anaerobik dengan aerobik (Rahayu dkk., 2015)	23
Tabel 2.5 Keuntungan dan Kerugian Sistem Kolam (Ohimain, 2017).....	27
Tabel 2.6 Keuntungan dan Kerugian Filtrasi Anaerob (Ohimain, 2017).....	28
Tabel 2.7 Keuntungan dan Kerugian Reaktor Fluidized Bed (Ohimain, 2017)...	30
Tabel 2.8 Keuntungan dan Kerugian Reaktor UASB (Ohimain, 2017)	31
Tabel 2.9 Keuntungan dan Kerugian Reaktor Anaerobic Baffled (Ohimain, 2017)	32
Tabel 2.10 Keuntungan dan Kerugian Reaktor UASFF (Ohimain, 2017).....	33
Tabel 2.11 Keuntungan dan Kerugian Reaktor CSTR (Ohimain, 2017).....	35
Tabel 2.12 Keuntungan dan Kerugian Reaktor EGSB (Ohimain, 2017).....	37
Tabel 4.1. Analisa Populasi bakteri, Kadar Gas Metana,COD, BOD, dan TSS. ..	70
Tabel 4.2. Analisa pH.....	70
Tabel 4.3. Hubungan antara Populasi Bakteri, Laju Pertumbuhan, dan Waktu Generasi	81
Tabel 4.4. Variabel yang digunakan dalam Perhitungan μ_{max} dan Ks pada BOD.	82
Tabel 4.5. Nilai μ_{max} dan Ks setiap metode plotting untuk BOD.....	86
Tabel 4.6. Variabel yang digunakan dalam Perhitungan Y dan q_{max} pada BOD....	87
Tabel 4.7. Variabel yang digunakan dalam Perhitungan μ_{max} dan Ks untuk COD	88
Tabel 4.8. Nilai μ_{max} dan Ks setiap metode plotting untuk COD.	92
Tabel 4.9. Variabel yang digunakan dalam Perhitungan Y dan q_{max} pada COD....	93

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Alur Proses Ekstraksi Pabrik Kelapa Sawit	8
Gambar 2.2 Tahap Pembentukan Biogas secara Anaerobik (Wahyuni, 2013)....	24
Gambar 2.3 Skema Filtrasi Anaerob (Cavaleiro dkk., 2001).....	28
Gambar 2.4 Desain UASB.	30
Gambar 2.5 Desain Reaktor RAB.....	32
Gambar 2.6 Desain Reaktor UASFF.....	33
Gambar 2.7 CSTR 2 liter untuk pengolahan POME (Irwan dkk., 2012).....	34
Gambar 2.8. Desain UAMAS (Abdulrahman dkk., 2011).....	36
Gambar 2.9. Skema Reaktor EGSB.....	37
Gambar 2.10. Bioreaktor SCA (Wong dkk., 2013)	38
Gambar 2.11. Penampakan Bakteri <i>Stenotrophomonas rhizophila strain e-p10</i> dari Mikroskop	39
Gambar 2.12. Bioreaktor SCA (Wong dkk., 2013)	38
Gambar 2.13. Tahapan Perkembangan Bakteri (lamission.edu)	45
Gambar 2.14. Bentuk Umum dari Persamaan Monod (Coulson dkk., 2017)	48
Gambar 2.15. Plotting Lineweaver-Burk	55
Gambar 2.16. Plotting Eadie-Hofstee (Coulson dkk., 2017).....	56
Gambar 3.1. Tahapan Penelitian.....	61
Gambar 3.2. Skema Bioreaktor.....	63
Gambar 4.1. Populasi Bakteri Selama Proses Degradasi.....	71
Gambar 4.2. Produksi Gas Selama Proses Degradasi.....	72
Gambar 4.3. Kadar BOD Selama Proses Degradasi	75
Gambar 4.4. Kadar COD Selama Proses Degradasi	77
Gambar 4.5. Kadar TSS Selama Proses Degradasi	78
Gambar 4.6. Nilai pH Selama Proses Degradasi	79
Gambar 4.4. Kadar COD Selama Proses Degradasi	77
Gambar 4.5. Kadar TSS Selama Proses Degradasi	78
Gambar 4.6. Nilai pH Selama Proses Degradasi	79
Gambar 4.7. Regresi Linier dengan Metode Lineweaver-Burk Plot pada BOD..	83
Gambar 4.8. Regresi Linier dengan Metode Eadie-Hofstee Plot pada BOD.....	84

Gambar 4.9. Regresi Linier dengan Metode Langmuir Plot pada BOD.....	85
Gambar 4.10. Regresi Linier dengan Menggunakan Persamaan Contois pada BOD	86
Gambar 4.11. Produksi Sintesis Sel/Growth Yield (Y) pada BOD.....	87
Gambar 4.12. Regresi Linier dengan Metode Lineweaver-Burk Plot pada COD.	89
Gambar 4.13. Regresi Linier dengan Metode Eadie-Hofstee Plot pada COD.....	90
Gambar 4.14. Regresi Linier dengan Metode Langmuir Plot pada COD.....	91
Gambar 4.15. Regresi Linier dengan Menggunakan Persamaan Contois pada COD	92
Gambar 4.16. Produksi Sintesis Sel/Growth Yield (Y) pada COD	94

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran A Perhitungan Laju Pertumbuhan dan Waktu Generasi	102
Lampiran B Perhitungan Nilai μ_{\max} dan Ks.....	107
Lampiran C Dokumentasi Penelitian.....	118

RINGKASAN

STUDI KINETIKA PENGOLAHAN PALM OIL MILL EFFLUENT OLEH
BAKTERI INDIGEN (*STENOTROPHOMONAS RHIZOPHILA STRAIN E-P10*)
DALAM PRODUKSI BIOGAS SECARA ANAEROB

Karya tulis ilmiah berupa Tesis, 18 Desember 2019

Feni Alvionita, Dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Said, M.Sc dan Dr. Ir. H. Muhammad Faizal, DEA

KINETIC STUDY OF THE PALM OIL MILL EFFLUENT TREATMENT
WITH INDIGENOUS BACTERIA (*STENOTROPHOMONAS RHIZOPHILA*
STRAIN E-P10) IN BIOGAS PRODUCTION ANAEROBICALLY

xi + 95 halaman, 22 Tabel, 37 Gambar, 3 Lampiran

RINGKASAN

Palm Oil Mill Effluent (POME) merupakan limbah cair dari minyak sawit yang dihasilkan dari proses sterilisasi, klarifikasi, dan air cucian hidrosiklon. POME mengandung lemak dan protein yang tinggi yang dapat mencemari lingkungan jika tidak diolah dengan baik. Kandungan karbohidrat, lemak, dan protein pada POME berpotensi untuk pembuatan biogas melalui proses fermentasi dengan bakteri indigen. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan bakteri KP 1.2 (*Stenotrophomonas rhizophila strain e-p10*). Penelitian dilakukan pada bioreaktor anaerob dengan waktu degradasi 3 – 38 hari untuk produksi biogas. Perhitungan populasi bakteri dilakukan dengan menggunakan *haemacytometer* dengan satuan sel/ml, diamati di mikroskop dan bakteri dihitung dalam kotak-kotak kecil. Biogas disimpan dalam *tedlar bag* dan diukur menggunakan alat GC (*Gas Chromatography*). Populasi bakteri meningkat selama proses fermentasi. Rentang nilai pH dari 6,8 sampai 8,3. Populasi bakteri tertinggi diperoleh $7,21 \times 10^7$ sel/ml dan terendah $3,15 \times 10^7$ sel/ml. Kadar metana dan karbon dioksida meningkat selama proses fermentasi. Kandungan metana tertinggi diperoleh sebesar 63,7 % mol dan kadar karbon dioksida sebesar 22,5 % mol, sementara kadar metana terendah sebesar 33,5 % mol dengan kadar karbon dioksida sebesar 19,5 % mol. Nilai parameter kinetika degradasi COD pada bakteri KP 1.2 memiliki laju pertumbuhan maksimum (μ_{maks}) 0,0589 generasi/hari, konstanta kejenuhan (Ks) 16,7007 mg/L, growth yield (Y) $3,05 \times 10^4$ mg MLVSS/mg COD, dan penggunaan substrat maksimum (q_{maks}) $1,928 \times 10^{-6}$ mg/hari. Sedangkan untuk degradasi BOD, bakteri KP 1.2. memiliki laju pertumbuhan maksimum (μ_{maks}) 0,0796 generasi/hari, konstanta kejenuhan (Ks) 931,484 mg/L, growth yield (Y) $1,44 \times 10^5$ mg MLVSS/mg BOD, dan penggunaan substrat maksimum (q_{maks}) $5,545 \times 10^{-7}$ mg/hari.

Kata kunci : *palm oil mill effluent* ; biogas; *Stenotrophomonas rhizophila strain e-p10* ; laju pertumbuhan maksimum; konstanta kejenuhan

SUMMARY

KINETIC STUDY OF THE PALM OIL MILL EFFLUENT TREATMENT
WITH INDIGENOUS BACTERIA (*STENOTROPHOMONAS RHIZOPHILA STRAIN E-P10*) IN BIOGAS PRODUCTION ANAEROBICALLY
Scientific paper in the form of Thesis, 18 Desember 2019

Feni Alvionita, Supervised by Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Said, M.Sc and Dr. Ir. H. Muhammad Faizal, DEA

STUDI KINETIKA PENGOLAHAN PALM OIL MILL EFFLUENT OLEH
BAKTERI INDIGEN (*STENOTROPHOMONAS RHIZOPHILA STRAIN E-P10*)
DALAM PRODUKSI BIOGAS SECARA ANAEROB

xi + 95 halaman, 22 Tabel, 37 Gambar, 3 Lampiran

SUMMARY

Palm oil mill effluent is wastewater from the production of palm oil, which is produced by the sterilization, clarification, and hydrocyclone processes. The POME contains high carbohydrates, lipids, and protein which can contaminate the environment if it not handled properly. The carbohydrates, lipids, and protein contained in the POME are potential for biogas production through the fermentation process with indigenous bacteria. The research was conducted using bacteria KP 1.2 (*Stenotrophomonas rhizophila strain e-p10*). The fermentation process was carried out in the anaerobic bioreactor with ranges of degradation time from 3 to 38 days to produce biogas. The bacterial population was calculated using a haemacytometer in which the number of bacteria was calculated in the small cubicles with a microscope. Biogas was saved in Tedlar bag and the biogas content was analyzed by Gas Chromatography (GC). The bacterial population increased along the fermentation period. The pH values range from 6.8 to 8.3. The highest bacterial population was 7.21×10^7 cells/mL and the lowest one was 3.15×10^7 cells/mL. The methane content, as well as, carbon dioxide content increased along the fermentation period. The highest methane content was obtained at 63.7 %moles and carbon dioxide was 22.5 %moles, while the lowest methane content was 33.5 %moles and carbon dioxide content was 19.5 %moles. The kinetic parameter value of COD degradation in KP 1.2 bacteria has a maximum specific growth rate (μ_{max}) of 0.0589 generation/day, substrate saturation constant (Ks) is 16.7007 mg / L, growth yield (Y) is 3.05×10^4 mg MLVSS/mg COD, and the maximum substrate (q_{max}) is 1.928×10^{-6} mg/day. While, for BOD degradation, bacteria KP 1.2. has a maximum specific growth rate (μ_{max}) of 0.0796 generations/day, substrate saturation constant (Ks) is 931.484 mg/L, growth yield (Y) is 1.44×10^5 mg MLVSS / mg BOD, and the maximum substrate (q_{max}) is 5.545×10^{-7} mg/day.

Keywords : *palm oil mill effluent ; biogas; Stenotrophomonas rhizophila strain e-p10 ; maximum growth rate; konstanta kejenuhan*

Citations : 66 (1984 - 2019)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam era globalisasi ini, kebanyakan seluruh negara sedang menghadapi krisis energi, khususnya negara berkembang. Hal ini disebabkan cadangan energi fosil semakin lama semakin menipis. Selain itu, penggunaan energi fosil dapat mencemari lingkungan dan mengakibatkan *global warming*. Maka, diperlukan suatu inovasi terbaru untuk menciptakan energi alternatif yang terbarukan bersifat murah sekaligus ramah untuk lingkungan. Biogas merupakan solusi yang tepat sebagai energi alternatif yang memiliki sifat tersebut. Kita sering mendengar, bahan baku dalam pembentukan biogas menggunakan kotoran hewan. Padahal, sumber limbah lain juga dapat dijadikan bahan baku produksi biogas, seperti limbah pertanian, limbah makanan, bahkan limbah industri. Dengan demikian, biogas merupakan sumber energi yang sangat cocok digunakan semua kalangan masyarakat karena selain murah dan ramah lingkungan, bahan bakunya mudah didapat.

Sumatera Selatan adalah satu di antara produsen atau penghasil minyak sawit yang terbesar di Indonesia. Hal tersebut diketahui dari luas lahan perkebunan sawit yang sangat luas setelah Riau dan Sumatera Utara. Bahkan menurut laman akurat.co, produksi CPO Sumsel diprediksi akan mencapai lebih dari 4 juta ton saat tahun 2019. Prospek perdagangan minyak sawit mentah (CPO) masih menjadi andalan bagi Indonesia. Hal ini ditandai dengan meningkatnya luas lahan perkebunan kelapa sawit setiap tahunnya menyebabkan Indonesia menjadi produsen minyak sawit terbesar dunia. Melalui data yang dihimpun pada laman website beritagar.id, pada tahun 2018, total volume produksi CPO mencapai 43,9 juta ton. Dan data yang dihimpun dari laman website gapki.id, total dari produksi pada minyak sawit sampai Agustus 2019 sudah mencapai 27 juta ton. Dengan melimpahnya produksi CPO tersebut, tentunya air limbah (POME) yang dihasilkan akan melimpah pula.

Sekitar $1,5 \text{ m}^3$ air digunakan untuk pemrosesan 1 ton tandan buah segar (TBS) dan hampir setengahnya dibuang sebagai POME, dimana POME ini adalah

gabungan dari beberapa air limbah, yang dihasilkan dari 3 sumber utama yaitu klarifikasi (60%), kondensat sterilisasi (36%), dan hidrosiklon (4%). Kemudian pada masing-masing sumber tersebut dihasilkan 0,9, 1,5, dan 1,0 m³ POME untuk setiap pengolahan 1 ton CPO (Ahmed, 2015). Pada umumnya, hampir semua pabrik minyak sawit mengolah air limbah (POME) dengan sistem kolam terbuka karena pengoperasianya sangat mudah dan lebih ekonomis. Meskipun metode ini sangat praktis, tentunya metode ini membutuhkan areal yang sangat luas dan lebar, waktunya lama, serta melepaskan gas metana secara langsung ke lingkungan atmosfer yang terjadi pada kolam anaerob. Pelepasan metana tersebut menghasilkan hingga mencapai 70% dari total emisi gas rumah kaca pada keseluruhan proses pembuatan CPO (Rahayu dkk., 2015). POME berwarna kecoklatan, kental, mengandung 95-96% air, mengandung 4-5% total solid termasuk padatan tersuspensi sebesar 2-4%, dan bersifat asam yang memiliki pH 4-5 (Ahmed, 2015 ; Ji, 2013). POME juga mengandung kandungan zat organik yang tinggi dan biasanya dibuang dengan temperatur tinggi sekitar 60 – 70 °C (Khrisan, 2019). Untuk setiap jam pengolahan 30 ton tandan buah segar menghasilkan POME yang menghasilkan metana dengan laju pembakaran 12 juta liter bahan bakar setiap tahunnya (Ohimain, 2017).

Pada uraian tersebut dapat dikatakan bahwa POME memiliki potensi untuk menjadi biogas. Produksi biogas dapat dilakukan secara proses aerob atau anaerob. Digester aerob melibatkan oksigen selama proses pengolahannya dan memiliki laju pertumbuhan mikroba tinggi yang mengarah pada waktu retensi yang lebih rendah selama produksi biogas. Sedangkan proses anaerob tidak menggunakan oksigen dan ditandai dengan laju mikroba yang lambat, dan waktu retensi lebih tinggi dibandingkan proses aerob. POME dapat didegradasi secara anaerob dalam digester anaerob untuk menghasilkan biogas. Metode anaerob terbukti lebih efektif untuk mendegradasi POME dalam hal biaya dan konversi menjadi produk lebih berguna, dimana sisa air limbah dapat digunakan untuk pemupukan (Ohimain, 2017). Penguraian POME secara anaerobik melibatkan bantuan mikroba atau bakteri yang memerlukan waktu untuk menyesuaikan diri dengan kondisi lingkungan awal sebelum mengkonsumsi zat organik untuk

tumbuh. Metana yang dihasilkan pada degradasi secara anaerob pada POME sekitar 20 -28 m³-CH₄/m³- biogas (Ohimain, 2017).

Salah satu penelitian mengenai biogas dari POME ini adalah penelitian yang dilakukan oleh Hermanto dan Susanty (2015), menghasilkan biogas dari POME dengan menggunakan bioreaktor *up-flow anaerobic sludge blanket* (UASB) sebesar 22,8-26,4 liter biogas dengan masa inkubasi 16 hari, dengan penurunan kadar COD sebesar 98% (983 mg/L) dan penurunan kadar TSS sebesar 99,4% (331,6 mg/L).

Adapun penelitian yang dilakukan oleh Azri dkk. (2018) yang menggunakan POME yang diasamkan untuk produksi biometana pada kondisi termofilik dengan mengubah waktu retensi dalam rangkaian reaktor batch. Hasilnya adalah bahwa produksi metana tertinggi diperoleh 5,65L-CH₄/L/hari pada waktu retensi 2 hari. Sedangkan penelitian dari Trisakti dkk. (2015) adalah mengenai tahap asidogenesis pada POME untuk menghasilkan mikroorganisme yang banyak sehingga dihasilkan biogas yang banyak pula, dan diperoleh pertumbuhan mikroorganisme tertinggi pada waktu retensi 4 hari dengan konsentrasi mikroorganisme 20,62 mg VSS/L dan reduksi COD 15,7%. Produksi biogas juga dapat menggunakan hidrolisis dibantu dengan mikroorganisme seperti *Clostridium sp.* dan *Bacillus sp.* Seperti pada penelitian Prasertsan dkk. (2017) yang memproduksi biogas dengan bantuan hidrolisis enzim xylanase sebesar 914 CH₄/g VS. Hal tersebut juga mampu menurunkan COD pada POME sebesar 78-89%.

Kinerja degradasi komponen organik pada POME secara anaerobik dipengaruhi oleh penggunaan substrat dan pertumbuhan bakteri metanogenik dalam bioreaktor. Laju penggunaan substrat dan pertumbuhan bakteri metanogenik yang terjadi dapat dinyatakan dalam persamaan kinetika penggunaan substrat dan laju pertumbuhan bakteri. Seperti pada penelitian Kurniawan dan Effendi (2014) melakukan biodegradasi *total petroleum hidrokarbon* pada limbah minyak dengan bantuan bakteri diperoleh $\mu_{\max}=0,0945/\text{jam}$ (kultur tercampur), $K_s = 0,0182\%$ (*P.diminuta* AK.B), dan $q_{\max} = 0,76/\text{jam}$ (*P.putida* AKA). Penelitian dalam penentuan parameter kinetika penggunaan substrat dan laju pertumbuhan bakteri juga dapat terjadi pada proses nitrifikasi secara anaerob dengan

menggunakan bakteri *Paracoccus denitrificans* ISTOD1 menghasilkan $\mu_{\max}=106,71\text{g/g DCW/hari}$, $K_s= 1.13 \text{ gN/l}$ (Medhi dkk.,2017). Adapula penelitian yang dilakukan Sakimoto dkk. (2017) yang melakukan fermentasi etanol menggunakan mikroba *Saccharomyces cerevisiae tipe II* diperoleh nilai parameter kinetika yaitu $\mu_{\max} = 10^{-1}/\text{jam}$ dan $K_s = 8,96 \times 10^2 \text{ g/L}$.

1.2. Rumusan Masalah

Dengan mengacu pada penelitian sebelumnya, jadi permasalahan yang direkonstruksi dalam penelitian adalah :

1. Bagaimana pengaruh penggunaan bakteri (*Stenotrophomonas rhizophila strain e-p10*) dalam mendegradasi POME terhadap produksi biogas?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan bakteri (*Stenotrophomonas rhizophila strain e-p10*) terhadap penurunan COD, BOD₅, dan TSS pada POME serta kondisi pH dalam bioreaktor?
3. Bagaimana mendapatkan nilai parameter kinetika degradasi POME pada bakteri (*Stenotrophomonas rhizophila strain e-p10*) pada bioreaktor secara anaerob?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian meliputi :

1. Menentukan nilai parameter kinetika degradasi POME pada bakteri *Stenotrophomonas rhizophila strain e-p10* pada bioreaktor yang meliputi laju pertumbuhan maksimum, μ_{\max} (generasi/hari), konstanta kejemuhan, K_s (mg/L), *growth yield*, Y (mg MLVSS/mg COD atau mg MLVSS/mg BOD), dan penggunaan substrat maksimum (q_{\max}).
2. Mendapatkan kandungan metana dalam campuran biogas pada pengolahan POME dengan bantuan bakteri *Stenotrophomonas rhizophila strain e-p10* secara anaerob.
3. Mendapatkan kadar pH serta persentase penurunan nilai BOD, COD, dan TSS.

1.4. Hipotesa

Penelitian ini memiliki hipotesis yaitu :

1. Jumlah populasi bakteri berpengaruh pada produksi biogas.
2. Populasi bakteri berperan dalam menurunkan nilai BOD, COD, dan TSS pada POME.
3. Populasi bakteri berpengaruh pada nilai parameter kinetika degradasi COD dan BOD.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup pada penelitian, terdiri dari :

1. Air limbah atau *Palm Oil Mill Effluent* atau POME yang digunakan adalah air limbah yang diperoleh dari salah satu pabrik minyak sawit di Sumatera Selatan, PT. Agro Inderalaya Mandiri.
2. Bakteri yang digunakan adalah bakteri hasil isolat yang berasal dari kolam pendingin.
3. Penelitian ini dilakukan dengan bioreaktor kapasitas 20 liter dengan sistem *batch*.
4. Waktu proses yang digunakan untuk proses degradasi limbah di dalam bioreaktor 20 – 38 hari.
5. Parameter yang diukur pada penelitian meliputi COD,BOD, TSS, nilai pH, populasi bakteri, serta kadar biogas.

1.6. Manfaat Penelitian

Penelitian ini hendaknya mampu memberikan kontribusi untuk masyarakat ataupun industri.

1. Dengan adanya konversi POME menjadi biogas dapat mengurangi dampak lingkungan sekaligus menciptakan energi terbarukan.
2. Dengan mengetahui nilai parameter kinetika degradasi POME oleh bakteri metanogenik, maka kita dapat merancang bioreaktor dengan skala yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulrahman, N.H., Roslia, Y.M., dan Azhari, N.H. 2013. Ultrasonic membrane anaerobic system (UMAS) for wastewater treatment. *Proceedings Of The International Conference On Environmental Protection And Renewable Energy*. Sep 7, 2013 Pattaya; 2013 :161–168.
- Ahmad, A., 2019. Effect of Ozonation on Biodegradation and Methanogenesis of Palm Oil Mill Effluent Treatment for the Production of Biogas. *The Journal of the International Ozone Association* : 1- 11.
- Ahmed, Y., Yakoob, Z., Akhtar, P., dan Sopian, K., 2015. Production Of Biogas And Performance Evaluation of Existing Treatment Processes in Palm Oil Mill Effluent (POME). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42 : 1260 – 1278.
- Amin, G.A dan Vriens, L., 2014. Optimization of up-flow anaerobic sludge blanket reactor for treatment of composite fermentation and distillation wastewater. *African Journal Biotechnology*, 13(10) :1136–1142.
- Aryal,S. 2018. Lineweaver-Burk Plot. <https://microbenotes.com/lineweaver-burk-plot/>, diunduh pada tanggal 13 November 2019.
- Aznury, M., Amin, J.M., Hasan, A., dan Himmataliza, A., 2017. Production of Biomethane from Palm Oil Mill Effluent (POME) with Fed Batch System in Beam-Shaped Digester. *AIP Conference Proceedings* 1840, 110012 : 1 – 8.
- Cavaleiro, A.J., Alves, M.M., dan Mota, M., 2001. Microbial and operational response of an anaerobic fixed bed digester to oleic acid overloads. *Process Biochemistry*, 37 : 387–394.
- Chapter 6 : Microbial Growth,<https://www.lamission.edu/lifesciences/lecturenote/mic20/Chap06Growth.pdf>, diunduh pada tanggal 17 November 2019.
- Coulson,J.M, Ravi, R., Vinu,R., dan Gummadi, S.N., 2017. *Coulson and Richardson's Chemical Engineering, Volume 3A, Chemical and Biochemical Reactors and Reaction Engineering*. Butterworth-Heinemann, Oxford.

- Direktorat Jenderal Perkebunan. 2017. Statistik Perkebunan Indonesia 2015 – 2017, ditjenbun.pertanian.go.id, diunduh 30 Agustus 2018.
- Direktorat Jenderal Perkebunan. 2016. Statistik Perkebunan Indonesia Kelapa Sawit 2015 – 2017, ditjenbun.pertanian.go.id, diunduh 30 Agustus 2018.
- Doran, P.M., 2013. *Bioprocess Engineering Principles*. Edisi 2, Academic Press, San Diego.
- Egli, T., 2009. *Encyclopedia of Microbiology*. Elsevier, Oxford.
- Fang, C., O-Thong, S., Boe, K., dan Angelidaki, I., 2011. Comparison of UASB and EGSB reactors performance, for treatment of raw and deoiled palm oil mill effluent (POME). *Journal Hazardous Material*, 189:229–234.
- Ferraz, F.M., Bruni, A.T., dan Del Bianchi, V.L. 2009. Performance of an anaerobic baffled reactor (ABR) in treatment of Cassava wastewater. *Brazilian Journal Microbiology*, 40:48–53.
- Grangeiro, L.C., Almeida, S.G.C.D., Mello, B.S..D, Fuess, L.C.T., Sarti, A., Dussan, K.J., 2019. New Trends in Biogas Production and Utilization. *Sustainable Bioenergy Advances and Impacts* :199-223.
- Hermanto dan Susanty, A., 2015. Produksi Biogas dari Limbah Kelapa Sawit Menggunakan Bioreaktor Up-Flow Anaerobik Sludge Blanket (UASB). *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 9 (1): 56 – 63.
- Hidayati,Y.A., Kurnani,T.B.A., Marlina, E.T., Rahmah, K.N., Harlia,E., dan Joni, I.M., 2018. The production of anaerobic bacteria and biogas from dairy cattle waste in various growth mediums.*AIP Conference Proceedings* 1927, 030021:1- 4.
- Ibrahim, A., Yeoh, B.G., Cheah, S.C., Ma, A.N., Ahmad, S., Chew, T.Y., Raj, R., dan Wahid, M.J.A., 1984. Thermophilic anaerobic contact digestion of palm oil mill effluent. *Water Science Technology*, 17:155–65.
- Indonesian Palm Oil Association. 2018. Indonesia Palm Oil Statistics Data 2018, <https://gapki.id>, diunduh 30 Agustus 2018.
- Irvan, Trisakti, B., Wongistani, V., dan Tomiuchi, Y., 2012. Methane emission from digestion of palm oil mill effluent (POME) in a thermophilic anaerobic reactor. *International Journal Science Engineering*, 3(1) : 32–35.

- Izah, S.C., Ohimain, E.I., 2013. Microbiological quality of crude palm oil produced by smallholder processors in the Niger Delta, Nigeria. *Journal Microbiology Biotechnology Reviews*, 3(2):30 –36.
- Ji,C. M., Eong, P.P., Ti, T.B., Seng, C.E., dan Ling, C.K., 2013. Biogas from Palm Oil Mill Effluent (POME):Opportunities and Challenges from Malaysia's Perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26: 717- 726.
- Khalid, Z.B., Siddique, M.N.I., Nasrullah, M., Singh, L., Wahid, Z.B.A., dan Ahmad, M.F., 2019. Application of solar-assisted bioreactor for biogas production from palm oil mill effluent co-digested with cattle manure. *Environmental Technology and Innovation*, 16 , 100446 : 1- 12.
- Krishnan, S., Singh, L., Mishra, P., Nasrullah, M., Sakinah, M., Thakur, S., Siddique, N.I., dan Wahid, Z.A., 2017. Comparison of Process Stability in Methane Generation from Palm Oil Mill Effluent using Dairy Manure as Inoculum. *Environmental Technology & Innovation*, 17: 1 -22.
- Kurniawan, A. dan Effendi, A.J., 2014. Biodegradasi Residu Total Petroleum Hidrokarbon di bawah Konsentrasi 1% (w/w) Hasil Proses Bioremediasi. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, 21(3):286-294.
- Lerdrattranataywee, W., dan Kaosol, T., 2015. Effect of Mixing Time on Anaerobic Co-Digestion of Palm Oil Mill Waste and Block Rubber Wastewater. *Energy Procedia* 79 : 327 – 334.
- Luque, R., Lin, C.S.K., Wilson,K., dan Clark, J., 2016. *Handbook of Biofuels Production : Processes and Technologies*. Edisi 2. Woodhead Publishing, Cambridge.
- Machdar. I., 2018. *Pengantar Pengendalian Pencemaran Air, Pencemaran Udara, dan Kebisingan*. DeePublish, Sleman.
- Mahmuddin, R., 2019. Produksi CPO Sumsel Diprediksi Empat Juta Ton. <https://akurat.co>, diunduh pada tanggal 13 November 2019.
- Medhi, K., Singhal, A., Chauhan, D.K., dan Thakur, I.S., 2017. Investigating the nitrification and denitrification kinetics under aerobic and anaerobic conditions by *Paracoccus denitrificans* ISTOD1. *Bioresource Technology* : 1-38.

- Metcalf dan Eddy.,2004. *Wastewater Engineering 4th Edition.* McGraw Hill, New York.
- Moore, D., Robson,G.D., dan Trinci,A.P.J.,2019. 21st Century Guidebook to Fungi, Edisi2.http://www.davidmoore.org.uk/21st_Century_Guidebook_to_Fungi_PLATINUM/Ch17_06.htm, diunduh pada tanggal 1 November 2019.
- Najafpour, G.D., Zinatizadeh, A.A.L., Mohammed, A.R., Hasnain, I.M., dan Nasrollahzadeh, H. 2006. High-rate anaerobic digestion of palm oil mill effluent in an upflow anaerobic sludge-fixed film bioreactor. *Process Biochemistry*, 41: 370– 379.
- Nasir, M. A. A., Jahim, J.M., Abdul, P.M., Silvamany, H., Maaroff, R.M., dan Yunus, M.F.M., 2018. The Use of Acidified Palm Oil Mill Effluent for Thermophilic Biomethane Production by Changing The Hydraulic Retention Time in Anaerobic Sequencing Batch Reactor. *InternationalJournal of Hydrogen EnergyXXX* : 1 -9.
- Ohimain, E.I. dan Izah, S.C., 2017. A review of biogas production from palm oil mill effluents using different configurations of bioreactors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,70 : 242–253.
- Okechalu, J.N., Dashen, M.M., Lar, P.M., Okechalu, B., dan Gushop, T.,2012. Microbiological quality and chemical characteristics of palm oil sold within Jos Metropolis, Plateau State, Nigeria. *Journal Microbiology Biotechnology Reviews*, 1(2):107–112.
- Okpokwasili, G.C.,dan Nweke, C.O.,2005. Microbial growth and substrate utilization kinetics. *African Journal of Biotechnology*, 5 (4) : 305-317.
- Oshiki, M., Satoh, H., dan Okabe, S., 2016. Ecology and physiology of anaerobic ammonium oxidizing bacteria. *Environment Microbiology*, 18 : 2784–2796.
- Prasertsan, P., Khangkhacit, W., Duangsawan, W., Mamimin, C., dan O-Thong, S., 2017. Direct Hydrolysis of Palm Oil Mill Effluent by Xylanase Enzyme to Enhance Biogas Production Using Two-Steps Thermophilic Fermentation Under Non-Sterile Condition.*International Journal of Hydrogen Energy XXX* : 1-8.

- Poh, P.E. dan Chong, M.F., 2009. Development of anaerobic digestion methods for palm oil milleffluent (POME) treatment. *Bioresource Technology* 100:1–9.
- Provinsi Sumatera Selatan. 2012. Peraturan Gubernur No.8 Tahun 2012 tentang Baku Mutu Limbah Cair Bagi Kegiatan Industri, Hotel, Rumah Sakit, Domestik, dan Pertambangan Batubara.
- Rafiie, S.A.K., 2018. Indonesia's Palm Oil Market-Outlook and Future Trends. *Oil Palm Industry Economic Journal*, 18 (1) : 25 – 30.
- Rahayu, A. S, 2015. *Konversi POME Menjadi Biogas*. WinRock International, Jakarta.
- Rambe, S.M., 2015. Penentuan Model Kinetika Reaksi Hidrolisis pada Limbah Cair Kelapa Sawit dengan Anaerobic Baffle Reactor. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 26 (2) : 77 -84.
- Sakimoto, K., Kanna, M., dan Matsumara, Y., 2017. Kinetic model of cellulose degradation using simultaneous saccharification and fermentation. *Biomass and Bioenergy* , 99 : 116-121.
- Sari, Y.W., Listiani, E., Putri, S.Y., dan Abidin, Z., 2019. Prospective of Eggshell Nanocalcium in Improving Biogas Production from Palm Oil Mill Effluent. *Waste and Biomass Valorization* : 1 – 8.
- Seimahuira, L. M. 2016. Penurunan Nilai COD pada Pengolahan Limbah Lateks Secara Anaerobik. *Jurnal Industri Hasil Perkebunan*, 11 (1): 9-14.
- Speight, J.G., 2016. *Fuel Flexible Energy Generation : Solid, Liquid, and Gaseous Fuels*. Woodhead Publishing, USA.
- Suksong, W., Mamimin,C., Prasertsan, P., Kongjan, P., dan O-Thong,S., 2019. Effect of inoculum types and microbial community on thermophilic and mesophilic solid-state anaerobic digestion of empty fruit bunches for biogas production. *Industrial Crops & Products* 133 : 193–202.
- Syaichurrozi, I., Suhirman, S., dan Hidayat, T., 2018. Effect of Initial pH on Anaerobic Co-digestion of *Salvinia molesta* and Rice Straw for Biogas Production and Kinetics. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 18 : 1-33.

- Tijani, H., Abdullah, N., dan Yuzir, A., 2017. Enhancing Methane Production of Palm Oil Mill Effluent Using Two-Stage Domesticated Shear-Loop Anaerobic Contact Stabilization System. *Journal of Cleaner Production*, 18 : 1 – 34.
- Trisakti, B., Manalu, V., Taslim, I., dan Turmuzi, M., 2015. Acidogenesis of Palm Oil Mill Effluent to Produce Biogas: Effect of Hydraulic Retention Time and pH. *Procedia- Social and Behavioral Sciences*, 195 : 2466-2474.
- Tsurusaki, K., Mitamura, M., Goto, R., Kobayashi, E., Furuta, M., Fujii, S., Kitaura, S., Wahyudi, H., Hamonangan, E., Hidayati, Simajuntak, R., Sembiring, H., Pasaribu, P.H., dan Mustofa, S., 2013. *Panduan Penanganan Air Limbah di Pabrik PKS*. KLH Jepang/ KLH Indonesia.
- Ugoji, E.O. 1997. Anaerobic digestion of palm oil mill effluent and its utilization as fertilizer for environmental protection. *Renewable Energy*, 10 (2–3):291– 294.
- Volume produksi kelapa sawit (CPO), 2000-2018, <https://lokadata.beritagar.id/chart/preview/volume-produksi-kelapa-sawit-cpo-2000-2018-1550473390>, diunduh pada tanggal 13 November 2019.
- Wang, Z.W., dan Li, Y., 2014. A theoretical derivation of the Contois equation for kinetic modeling of the microbial degradation of insoluble substrates. *Biochemical Engineering Journal*, 82 : 134– 138.
- Wahyuni, S., 2013a. *Biogas : Energi Alternatif Pengganti BBM, Gas, dan Listrik*. PT.AgroMedia Pustaka, Ciganjur.
- Wahyuni, S., 2013b. *Panduan Praktis Biogas*. Penebar Swadaya, Cibubur.
- Woodard dan Curran, 2006. *Industrial Waste Treatment Handbook*. Edisi 2. Butterworth-Heinemann, UK.
- Wong, Y.S, Teng, T.T., Onga, S.A., Norhashimah, M., Rafatullah, M., dan Lee, H.C., 2013. Anaerobic acidogenesis biodegradation of palm oil mill effluent using suspended closed anaerobic bioreactor (SCABR) at mesophilic temperature. *Procedia Environment Science*, 18: 433 – 441.
- Wongfaed, N., Kongjan, P., dan O-Thang, S., 2015. Effect of Substrate and Intermediate Composition on Foaming in Palm Oil Mill Effluent Anaerobic Digestion System. *Energy Procedia*, 79 : 930-936.

- Yacoob,S., Hassan, M.A., Shirai,Y., Wakisaka, M., dan Subash, S., 2005. Baseline study of methane emission from open digesting tanks of palm oil mill effluent treatment. *Chemosphere*, 59 : 1575–1581.
- Yejian ,Z., Li, Y., Lina, C., Xiuhua, L., Zhijian, M., dan Zhenjia, Z., 2008. Startup and operation of anaerobic EGSB reactor treating palm oil mill effluent. *Journal Environment Science*, 20:658–663.
- Yuliani, H., Perdani, M.S., Manurung, M., Sahlan, M., Wijanarko, A., dan Hermansyah, H., 2018. Growth Kinetic of *Bacillus subtilis* for Pyrene Biodegradation. *Energy Procedia*, 159 : 248-252.
- Zhang, L., Narita, Y., Gao,L., Ali, M., Oshiki, M., dan Okabe, S., 2017. Maximum specific growth rate of anammox bacteria revisited. *Water Research* : 1- 39.