

**LAPORAN PENELITIAN**  
**PENGARUH PERLAKUAN AWAL KOAGULASI TERHADAP**  
**PRODUKSI BIOGAS DARI *PALM OIL MILL EFFLUENT***



Oleh

**Anellysha Putri Apriantika (3335190027)**

**Listiyani Nurwindya Sari (3335190046)**

**JURUSAN TEKNIK KIMIA – FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA**

**CILEGON – BANTEN**

**2023**

## PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

**NAMA** : 1. Anellysha Putri Apriantika

: 2. Listiyani Nurwindya Sari

**NIM** : 1. 3335190027

: 2. 3335190046

**JURUSAN** : TEKNIK KIMIA

**JUDUL** : Pengaruh Perlakuan Awal Koagulasi Terhadap Produksi Biogas  
dari *Palm Oil Mill Effluent*

Bersedia

Dengan ini menyatakan bahwa penelitian dengan judul tersebut di atas adalah benarkarya saya sendiri dengan arahan dari pembimbing dan tidak ada duplikasi dengan karya orang lain kecuali yang telah disebutkan sumbernya.

Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam penelitian ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan perundang-undangan yang berlaku.



(Anellysha Putri Apriantika)

Cilegon, 1 Agustus 2023

Handwritten signature of Listiyani Nurwindya Sari.

(Listiyani Nurwindya Sari)

## Laporan Penelitian

### PENGARUH PERLAKUAN AWAL KOAGULASI TERHADAP PRODUKSI BIOGAS DARI *PALM OIL MILL EFFLUENT*

Diajukan Oleh:

ANELLYSHA PUTRI APRIANTIKA      3335190027

LISTIYANI NURWINDYA SARI      3335190046

Telah disetujui oleh Dosen Pembimbing dan telah dipertahankan di hadapan

Dosen Penguji

pada Tanggal 12 Januari 2023

**Dosen Pembimbing**



**Dr. Iqbal Syaichurrozi, S.T., M.T.**

NIP. 199003202014041001

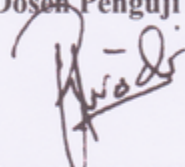
**Dosen Penguji I**



**Dr. Rahmayetty, S.T., M.T.**

NIP. 197410021999032000

**Dosen Penguji II**



**Rusdi, S.T., M.T.**

NIP. 196711252005011002

Mengetahui,  
**Ketua Jurusan Teknik Kimia**



**Dr. Javanudin, S.T., M.T.**  
NIP. 197808112005011003

## **ABSTRACT**

### **THE EFFECT OF INITIAL COAGULATION TREATMENT ON BIOGAS PRODUCTION FROM PALM OIL MILL EFFLUENT**

By:

Anellysha Putri Apriantika (3335190027)

Listiyani Nurwindya Sari (3335190046)

Palm Oil Mill Effluent (POME) is a by-product of the Crude Palm Oil (CPO) production process in the palm oil industry. POME has a high content of Chemical Oxygen Demand (COD), as well as oil and grease, and can disrupt aquatic biota ecosystems, so POME cannot be discharged directly into water bodies. This study combined the pre-treatment of coagulation and anaerobic digestion to obtain maximum methane. This study aims to study the effect of coagulant (alum) doses on changes in the characteristics of POME waste, study the effect of pre-coagulation treatment on the anaerobic digestion process in POME waste, and suppress cumulative methane production with the modified Gompertz model. The method used was coagulation using a 1 L beaker glass at room temperature with a stirring speed of 200 rpm for 2 hours and the precipitation process for 24 hours. The anaerobic digestion process was carried out using a digester with a volume of 500 mL in batch conditions at room temperature until the volume of biogas production was constant. The results of the study showed that the initial coagulation treatment with a coagulant dose of 6 g/L was able to reduce COD and TS levels to reach the optimal range of anaerobic digestion with COD values of 12,775 mg/L and TS 15,000 mg/L (15% w/v). This condition resulted in the highest biogas volume of 179.31 mL/g COD. In addition, the dose of 6 g/L also produced the highest cumulative prediction of methane using the Gompertz model, with kinetic parameters  $\lambda$  (2, 89 hari), A (185,23 mL/g COD), dan  $\mu$  (34,37 mL/g COD hari).

Keywords: CPO, Coagulation, Anaerobic digestion, POME, Gompertz

**ABSTRAK**  
**PENGARUH PERLAKUAN AWAL KOAGULASI TERHADAP**  
**PRODUKSI BIOGAS DARI *PALM OIL MILL EFFLUENT***

Oleh:

Anellysha Putri Apriantika (3335190027)

Listiyani Nurwindya Sari (3335190046)

*Palm Oil Mill Effluent* (POME) merupakan limbah cair hasil samping proses produksi *Crude Palm Oil* (CPO) pada industri kelapa sawit. POME memiliki kandungan *Chemical Oxygen Demand* (COD), serta minyak dan lemak yang tinggi dan dapat mengganggu ekosistem biota air, sehingga POME tidak dapat dibuang langsung ke badan air. Penelitian ini menggabungkan perlakuan awal koagulasi dan pencernaan anaerob untuk mendapatkan metana yang maksimal. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh dosis koagulan (alum) terhadap perubahan karakteristik limbah POME, mempelajari pengaruh perlakuan awal koagulasi terhadap proses pencernaan anaerob pada limbah POME, dan memprediksi produksi kumulatif metana dengan model modifikasi Gompertz. Metode yang dilakukan, yaitu koagulasi dengan menggunakan *beaker glass* bervolume 1 L pada suhu kamar dengan kecepatan pengadukan 200 rpm selama 2 jam dan proses pengendapan selama 24 jam. Proses pencernaan anaerob dilakukan menggunakan digester bervolume 500 mL kondisi *batch* pada suhu kamar hingga volume produksi biogas konstan. Hasil dari penelitian menunjukkan, perlakuan awal koagulasi dengan dosis koagulan 6 g/L mampu menurunkan kadar COD dan TS mencapai rentang optimum pencernaan anaerob dengan nilai COD 12.775 mg/L dan TS 15.000 mg/L (15% w/v). Kondisi ini menghasilkan volume biogas tertinggi sebesar 179,31 mL/g COD. Selain itu, dosis 6 g/L juga menghasilkan prediksi kumulatif metana tertinggi menggunakan model Gompertz, dengan parameter kinetik  $\lambda$  (2, 89 hari), A (185,23 mL/g COD), dan  $\mu$  (34,37 mL/g COD hari).

Kata kunci: CPO, Koagulasi, Pencernaan anaerob, POME, Gompertz

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa. Atas rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan proposal penelitian yang berjudul "Pengaruh Perlakuan Awal Koagulasi terhadap Produksi Biogas dari *Palm Oil Mill Effluent*". Penulis menyadari bahwa penyusunan laporan penelitian ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua dan keluarga penulis yang telah memberikan do'a dan dukungan, baik secara material maupun moral.
2. Dr. Jayanudin, S.T., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
3. Dr. Rahmayetty, S.T., M.T. selaku Koordinator Penelitian Jurusan Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
4. Dr. Iqbal Syaichurrozi, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam menyusun laporan penelitian.
5. Teman-teman Teknik Kimia 2019 yang telah memberikan dukungan selama proses penyusunan laporan penelitian.

Akhir kata, penulis berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga laporan penelitian ini dapat bermanfaat untuk penulis dan pembaca, serta dapat membawa manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Cilegon, 08 Januari 2023

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1. 1 Latar Belakang .....	1
1. 2 Rumusan Masalah .....	5
1. 3 Tujuan.....	5
1. 4 Ruang Lingkup .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2. 1 Industri Kelapa Sawit .....	7
2. 2 Proses Produksi CPO dan Pembentukan POME.....	7
2. 3 <i>Palm Oil Mill Effluent (POME)</i> .....	8
2. 3. 1 <i>Chemical Oxygen Demand (COD)</i> .....	9
2. 3. 2 <i>Biological Oxygen Demand (BOD)</i> .....	9
2. 3. 3 <i>Total Suspended Solid (TSS)</i> .....	9
2. 3. 4 Minyak dan Lemak .....	10
2. 4 Koagulasi.....	10
2. 4. 1 Pengertian Koagulasi .....	10
2. 4. 2 Mekanisme Koagulasi.....	10
2. 4. 3 Faktor yang Berpengaruh pada Koagulasi .....	12
2. 4. 4 Penelitian Terdahulu .....	14
2. 5 Pencernaan Anaerob .....	16
2. 5. 1 Pengertian Pencernaan Anaerob .....	16
2. 5. 2 Mekanisme Pencernaan Anaerob.....	16
2. 5. 3 Faktor yang Berpengaruh pada Pencernaan Anaerob .....	18
2. 5. 4 Penelitian Terdahulu .....	20
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3. 1 <i>Roadmap</i> Penelitian.....	25

3. 2	Alat dan Bahan .....	26
3. 3	Variabel Penelitian .....	27
3. 4	Prosedur Penelitian.....	28
3. 5	Analisis .....	29
3. 6	Model Produksi Metana .....	29
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>		
4.1	Proses Koagulasi .....	31
4.1.1	Profil TS.....	31
4.1.2	Profil Warna.....	32
4.1.3	Profil COD.....	34
4.1.4	Profil pH .....	36
4.2	Pengaruh Koagulasi terhadap Produksi Metana.....	37
4.2.1	Produksi Kumulatif Metana.....	37
4.2.2	Profil TS.....	41
4.2.3	Profil COD.....	42
4.2.4	Profil pH .....	43
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>		
5. 1	Kesimpulan.....	46
5. 2	Saran .....	46
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		
<b>LAMPIRAN</b>		



## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Karakteristik POME.....	2
Tabel 1. 2 Baku mutu limbah cair.....	3
Tabel 1. 3 Metode pengolahan limbah POME.....	3
Tabel 2. 1 Perbandingan koagulan $Al_2(SO_4)_3$ dan $FeCl_3$ .....	14
Tabel 2. 2 Penelitian terdahulu pengolahan POME dengan koagulasi .....	14
Tabel 2. 3 Penelitian terdahulu pengolahan POME dengan pencernaan anaerob. 20	
Tabel 3. 1 Alat.....	26
Tabel 3. 2 Bahan .....	27
Tabel 3. 3 Variabel Penelitian .....	27
Tabel 4. 1 Perbandingan karakteristik POME dengan baku mutu .....	30
Tabel 4. 2 Perbandingan karakteristik POME dan supernatan koagulasi .....	37
Tabel 4. 3 Parameter prediksi model modifikasi Gompertz .....	40
Tabel 4. 4 Perbandingan efluen koagulasi dan pencernaan anaerob.....	45

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Neraca massa produksi CPO (Supranto, et al., 2014).....	8
Gambar 2. 2 Mekanisme koagulasi (Suopajärvi, 2015).....	12
Gambar 2. 3 Diagram tahapan proses pencernaan anaerob (Darwin, 2018).....	17
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian .....	25
Gambar 3. 2 Rangkaian alat proses pencernaan anaerob .....	26
Gambar 4. 1 Profil TS dan Efisiensi Penyisihan TS .....	31
Gambar 4. 2 Efisiensi penyisihan warna pada variasi dosis koagulan.....	33
Gambar 4. 3 Efisiensi penyisihan COD pada variasi dosis koagulan .....	35
Gambar 4. 4 pH efluen terhadap dosis koagulan .....	36
Gambar 4. 5 Produksi metana (a) Harian (b) Kumulatif.....	38
Gambar 4. 6 Prediksi model modifikasi Gompertz terhadap produksi metana ....	39
Gambar 4. 7 Profil TS selama pencernaan anaerob .....	41
Gambar 4. 8 Kadar dan penyisihan COD pada variasi substrat.....	43
Gambar 4. 9 Profil pH pencernaan anaerob .....	44

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

*Crude Palm Oil* (CPO) merupakan salah satu minyak nabati yang banyak diproduksi dan dikonsumsi di Indonesia. CPO adalah produk utama dari industri kelapa sawit. Selain produk utama, industri kelapa sawit menghasilkan produk samping berupa limbah padat, seperti tandan kosong, cangkang dan serat buah, batang kelapa sawit, serta pelepah kelapa sawit dan limbah cair, seperti *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Produksi CPO di Indonesia dari tahun 2017-2021 mengalami peningkatan dengan jumlah produksi 37 juta, 42 juta, 47 juta, 48 juta, dan 49 juta ton (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2020). Diperkirakan jumlah produksi CPO akan mengalami peningkatan hingga 51,7 juta ton pada tahun 2025 (Qolbi, 2019). Oleh karena itu, seiring dengan meningkatnya produksi CPO, maka jumlah limbah padat maupun cair semakin meningkat. Pada produksi CPO dengan bahan baku 100 ton menghasilkan limbah padat 40 ton dan limbah cair 62,5 ton (Supranto, et al., 2014). Data ini menunjukkan bahwa limbah cair menjadi masalah yang lebih serius dibandingkan dengan limbah padat.

Pada umumnya, POME mengandung air 95 – 96% v/v, minyak dan lemak 4.000 – 9.065 mg/L, suhu keluaran proses berkisar 70 – 80 °C (Rahayu, et al., 2015), derajat keasaman (pH) sekitar 4,1 – 4,815, dan *Chemical Oxygen Demand* (COD) 49.100 – 58.700 mg/L. Karakteristik POME disajikan pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Karakteristik POME

<b>Parameter</b>	<b>[1]</b>	<b>[2]</b>	<b>[3]</b>	<b>[4]</b>	<b>[5]</b>	<b>Rentang</b>
BOD	25.000	25.020	29.000	40.000	30.100	25.000 -30.100
COD	50.000	59.700	64.000	65.000	70.000	50.000 – 70.000
TSS	18.000	17.460	23.000	-	28.900	17.460 – 28.900
Minyak dan Lemak	4.000	-	7.000	1500	10.540	4.000 – 10.540
Total Nitrogen	70	707	1.200	945	980	70 – 1.200
pH	4,7	3,7	4,5	4,5	4,5	3,7 – 4,7

Keterangan:

Semua dalam satuan mg/L, kecuali pH,

[1] (A.L. & C.Y., 2009), [2] (Krishnan, et al., 2006), [3] (Ahmed, et al., 2014), [4] (Ahmad, et al., 2011), [5] (Chan, et al., 2011)

POME mempunyai pengaruh buruk terhadap lingkungan jika dibuang langsung ke badan air. Kandungan COD yang tinggi pada limbah dapat menurunkan konsentrasi oksigen terlarut pada air, sehingga biota air akan mengalami kekurangan oksigen dan dapat menyebabkan kematian. Selain itu, pH POME yang asam dapat menurunkan level pH badan air, sehingga mengganggu kehidupan biota air. Kandungan minyak dan lemak akan membentuk lapisan di atas permukaan air, sehingga mengurangi konsentrasi oksigen terlarut dalam air karena fiksasi oksigen bebas menjadi terhambat (Hardiana S. & Mukimin, 2014). Lapisan minyak serta tingkat kekeruhan yang tinggi dapat menghambat penetrasi sinar matahari masuk ke dalam air sehingga mengganggu keseimbangan rantai makanan dan proses fotosintesis. Oleh karena itu, pengolahan limbah POME perlu dilakukan untuk memenuhi baku mutu limbah cair, sehingga aman untuk dibuang ke badan air. Baku mutu limbah cair berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 ditampilkan pada Tabel 1.2.

Tabel 1. 2 Baku mutu limbah cair

Parameter	Unit	Baku Mutu
pH		6-9
BOD	mg/L	30
COD	mg/L	100
TSS	mg/L	30
Minyak dan Lemak	mg/L	5
Amoniak	mg/L	10

Berdasarkan penelitian sebelumnya, pengolahan limbah POME dilakukan dengan metode *ponding system*, *biological treatment*, *physicochemical treatment*, dan *thermochemical treatment* (Mohammad, S., et al., 2021). Kelebihan dan kekurangan setiap metode ditampilkan pada Tabel 1.3.

Tabel 1. 3 Metode pengolahan limbah POME

Metode	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
<i>Ponding system</i>	Metode yang paling banyak digunakan untuk mengolah limbah POME karena lebih ekonomis dan prosesnya sederhana.	Membutuhkan waktu retensi hidrolis yang lama, sehingga membutuhkan area lahan yang luas	(Hayawin, et al., 2018)
<i>Thermochemical treatment</i>	Mengubah limbah POME menjadi gas sintesis atau <i>syngas</i>	Membutuhkan energi yang besar untuk menghasilkan <i>syngas</i> .	(Choong, et al., 2018)
<i>Physicochemical treatment</i>	Metode sederhana dengan menambahkan zat adsorben untuk mengurangi kandungan minyak, COD, BOD, dan TSS dari limbah POME.	Hanya mengubah polutan organik menjadi bentuk lain tanpa memineralsifikannya dan juga metode ini cenderung mahal karena penggunaan bahan kimia dan harus melakukan pengolahan lanjut untuk kelebihan lumpur	(Fujihira, et al., 2018)

<i>Biological treatment</i>	Proses anaerobik tidak membutuhkan energi untuk aerasi, sehingga mengurangi biaya pada proses pengolahannya, lumpur atau sludge yang dihasilkan lebih sedikit dari proses aerobik, Bahan pencemar berupa bahan organik yang dapat terbiodegradasi hampir semuanya dikonversi ke bentuk biogas (gas metana) yang mempunyai nilai kalor tinggi dan dapat digunakan sebagai substitusi sumber energi	Waktu yang lama untuk stabilisasi kultur mikroba di dalam reaktor, memerlukan pemantauan konstan terhadap parameter utama, seperti pH, suhu, laju umpan, dan produksi inhibitor, untuk bahan kompleks memerlukan perlakuan awal.	(G. Náthia, et al., 2018)
-----------------------------	---	--	---------------------------

Pada penelitian (Hamzah, et al., 2020) pengolahan POME dengan pencernaan anaerobik pada kondisi mesofilik menghasilkan biogas sebesar  $0,17 \pm 0,01$  LCH<sub>4</sub>/gCOD. Sedangkan jumlah biogas yang dihasilkan pada pencernaan anaerob secara teoritik sebesar  $0,35$  LCH<sub>4</sub>/gCOD (Zhang, et al., 2017). Kurangnya kadar biogas yang dihasilkan pada penelitian tersebut disebabkan oleh kandungan COD dan minyak yang tinggi sehingga menghambat pencernaan anaerobik. Batas maksimal COD 19.000 mg/L (Moujanni, et al., 2018), TS 5-15% (Wang et al, 2020), dan pH 7-7,5 (Cerón-Vivas et al, 2019), sehingga diperlukan perlakuan awal untuk mengurangi kadar COD dan minyak. Koagulasi dapat digunakan sebagai metode perlakuan awal karena prosesnya sederhana, serta mampu menurunkan kadar COD dan minyak. Pada penelitian (Jagaba, et al., 2020), koagulasi pada POME dapat menurunkan COD hingga 75,01% dan minyak hingga 98,32%. Oleh karena itu, dilakukan penelitian terhadap pengaruh perlakuan awal dan pencernaan anaerob pada limbah POME dengan variasi dosis koagulan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan Tabel 1.1, limbah POME berpotensi untuk menjadi bahan baku produksi biogas karena memiliki kandungan bahan organik, sehingga dapat dijadikan substrat. Namun, kandungan bahan organik pada POME masih terlalu tinggi dari kondisi optimalnya, kandungan COD lebih dari 19 g/L pada pencernaan anaerob menyebabkan *Volatile Fatty Acid* (VFA) mudah terbentuk. Akumulasi VFA yang terlalu tinggi dapat bersifat *toxic* bagi bakteri pembentuk VFA, sehingga produksi biogas tidak maksimal. Selain itu, kandungan minyak lebih dari 1,6 g/L akan menghambat pertumbuhan mikroba dalam *digester*. Oleh karena itu, diperlukan perlakuan awal pada limbah POME agar bisa menghasilkan biogas yang optimal. Untuk menurunkan kadar COD, minyak, dan padatan dalam limbah POME dilakukan perlakuan awal koagulasi. Proses koagulasi berpotensi sebagai metode perlakuan awal karena mampu menurunkan kadar COD, minyak, dan padatan tersuspensi dalam limbah POME (Huzir, et al., 2019; Yee Shak & Yeong Wu, 2015; Yang Teh, et al., 2014). Dengan demikian, dilakukan penelitian untuk mengolah limbah POME menjadi biogas dengan perlakuan awal koagulasi pada kondisi dosis koagulan yang divariasikan.

## 1.3 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mempelajari pengaruh dosis koagulan (alum) pada proses koagulasi terhadap perubahan karakteristik limbah POME.
2. Mempelajari pengaruh perlakuan awal koagulasi terhadap proses pencernaan anerob pada limbah POME.
3. Menentukan produksi kumulatif metana dengan model modifikasi Gompertz.

## 1.4 Ruang Lingkup

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Pengolahan dan Konversi Energi, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penelitian ini menggunakan bahan utama POME, alum, NaOH teknis, dan

inokulum. Limbah POME diperoleh dari PT Perkebunan Nusantara VIII (PTPN VIII), Pandeglang, Banten. Metode pengolahan limbah POME yang dipelajari pada penelitian ini adalah proses koagulasi dan pencernaan anaerobik.



## **BAB II**

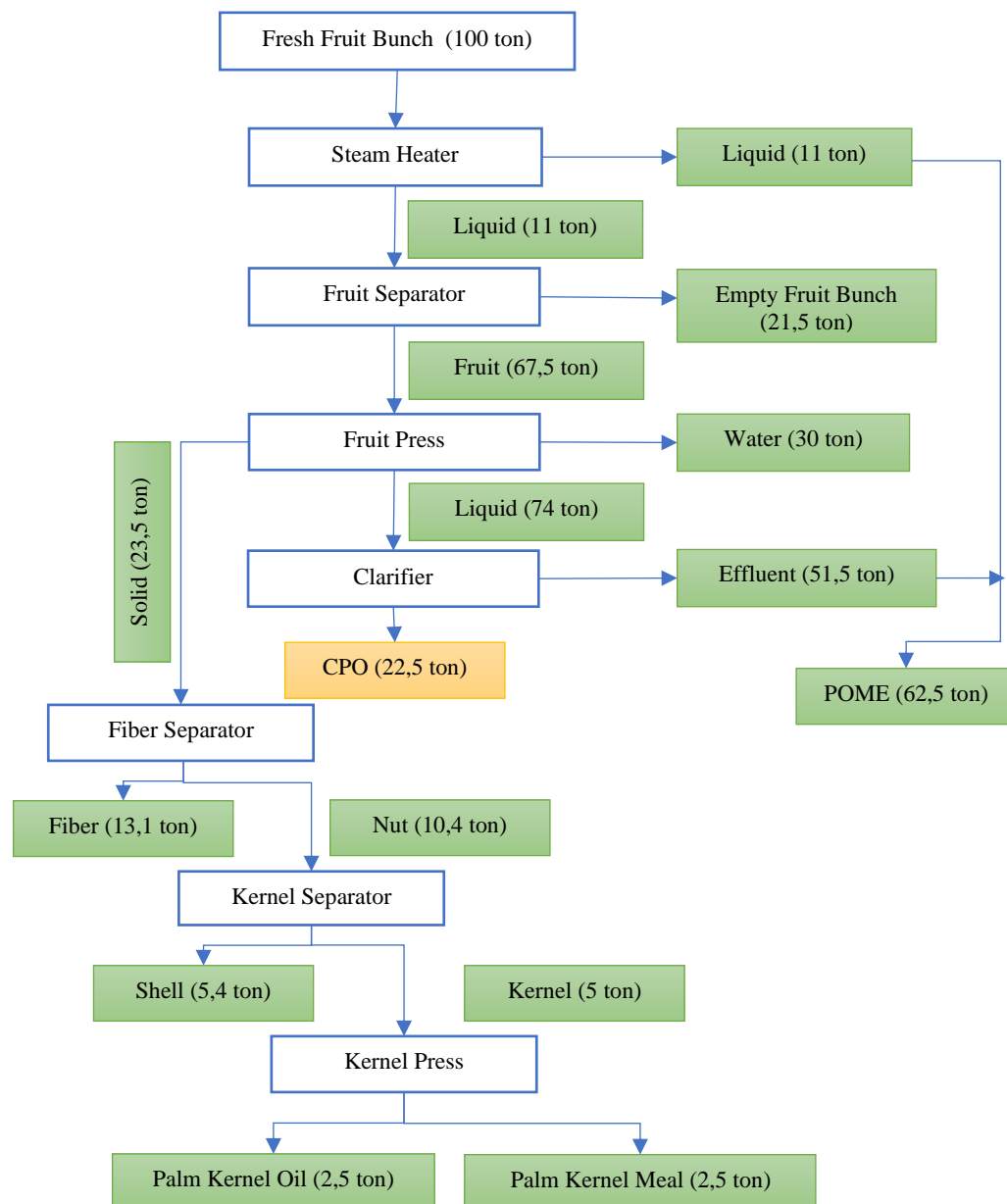
### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Industri Kelapa Sawit**

Kelapa sawit merupakan salah satu komoditas perkebunan yang ada di Indonesia. Produk utama dari industri kelapa sawit adalah minyak sawit (*crude palm oil*, CPO). Produksi CPO di Indonesia dari tahun 2017-2021 mengalami peningkatan dengan jumlah produksi 37 juta, 42 juta, 47 juta, 48 juta, dan 49 juta ton (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2020). Diperkirakan jumlah produksi CPO akan mengalami peningkatan hingga 51,7 juta ton pada tahun 2025 (Qolbi, 2019). Menurut data *Oil World 2021*, Indonesia telah mengekspor minyak sawit sejumlah 3,6 juta ton pada bulan Agustus 2021 di mana jumlah ekspor minyak kelapa sawit ini meningkat 1,6 juta ton dari bulan sebelumnya. Selain menghasilkan CPO, industri kelapa sawit juga menghasilkan limbah padat dan cair. Limbah padat tersebut meliputi tandan kosong, cangkang, dan sabut, serta limbah cairnya adalah *Palm Oil Mill Effluent* (POME).

#### **2.2 Proses Produksi CPO dan Pembentukan POME**

Rangkaian proses untuk mengubah minyak sawit menjadi CPO seperti pada Gambar 2.1 terdiri dari proses penampungan buah, sterilisasi, *tresher*, *digester*, *press*, pemurnian, serta pemisahan *nut* dan *kernel* (Kramanandita, et al., 2014). Produksi CPO dengan bahan baku kelapa sawit 100 ton akan menghasilkan total limbah POME sebesar 62,5 ton (Supranto, et al., 2014). Gambar 2.1 menampilkan neraca massa produksi CPO.



Gambar 2. 1 Neraca massa produksi CPO (modifikasi dari Supranto, et al., 2014)

### 2.3 *Palm Oil Mill Effluent (POME)*

POME merupakan limbah cair hasil samping proses produksi CPO pada industri kelapa sawit. POME dihasilkan pada keluaran *steam heater* dan *clarifier* (Gambar 2.2). POME yang dihasilkan dari industri minyak kelapa sawit umumnya memiliki suhu sekitar 70 – 80 °C (Tabel 1.1) dengan pH antara 3,7 – 4,7 (Tabel 1.1), bersifat kental, berwarna kecoklatan, mengandung padatan, minyak, lemak,

*Chemical Oxygen Demand (COD)*, dan *Biological Oxygen Demand (BOD)* yang tinggi (Rahayu et al., 2015). Pada data Tabel 1.1 dapat dilihat bahwa POME yang dihasilkan dari industri minyak kelapa sawit memiliki kandungan yang melebihi standar baku mutu (Tabel 1.2). Oleh karena itu, POME memiliki dampak buruk jika dibuang langsung ke badan air tanpa diolah terlebih dahulu.

### **2.3.1 *Chemical Oxygen Demand (COD)***

COD merupakan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk menguraikan zat-zat organik yang terkandung di dalam air secara kimiawi (Boyd, 1990). Kadar COD pada limbah POME pada Tabel 1.1, yaitu 50.000 – 70.000 mg/L. Semakin tinggi kandungan COD, maka akan semakin rendah kandungan oksigen di dalam air (Wicheisa, et al., 2018). Biota air dapat bertahan hidup jika kadar oksigen yang terlarut dalam air mencukupi. POME yang belum diolah memiliki kadar COD yang tinggi, sehingga dapat menyebabkan kematian biota air ketika POME dibuang langsung ke badan air.

### **2.3.2 *Biological Oxygen Demand (BOD)***

BOD merupakan jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh mikroorganisme (secara biologi) untuk menguraikan atau mendekomposisi zat-zat organik dalam keadaan aerobik (Metcalf & Eddy, 1991). Proses dekomposisi dari zat organik menandakan bahwa mikroorganisme memperoleh energi yang cukup dari proses oksidasi dan memakan zat organik yang terkandung dalam air (Daroini & Arisandi, 2020). Kadar BOD pada POME, yaitu 25.000 – 30.100 mg/L (Tabel 1.1). Kadar BOD yang tinggi menyebabkan mikroorganisme tidak dapat menguraikan zat organik dalam perairan, sehingga kondisinya menjadi anaerobik. Kondisi anaerobik ini menyebabkan biota air kekurangan oksigen dan kerusakan ekologi air.

### **2.3.3 *Total Suspended Solid (TSS)***

TSS merupakan bahan-bahan tersuspensi yang umumnya terdiri dari pertikel-partikel yang ukuran dan beratnya lebih kecil dari sedimen, seperti

lumpur, pasir halus, dan jasad renik. TSS juga merupakan parameter kualitas air (Maulana, et al., 2015). Kandungan TSS POME, yaitu 17.460 – 28.900 mg/L (Tabel 1.1).

### **2. 3. 4 Minyak dan Lemak**

Minyak dan lemak yang terkandung dalam POME berdasarkan Tabel 1.1, yaitu 4.000 – 10.540 mg/L. Konsentrasi minyak dan lemak pada limbah POME yang terlalu tinggi dapat menghambat proses pencernaan anaerob.

## **2. 4 Koagulasi**

### **2. 4. 1 Pengertian Koagulasi**

Koagulasi adalah suatu proses destabilisasi muatan koloid padatan tersuspensi dengan menggunakan suatu koagulan, sehingga akan terbentuk flok-flok halus yang dapat diendapkan. Pada proses koagulasi, koloid atau partikel dalam suspensi tidak stabil, menyebabkan pembentukan agregat kecil partikel. Agregat kecil ini kemudian membentuk partikel-partikel koloid yang bersatu dan menjadi besar (Bratby, 2006).

### **2. 4. 2 Mekanisme Koagulasi**

Proses mekanisme koagulasi dapat melalui beberapa proses (Gambar 2.2) yang akan dijelaskan pada poin-poin selanjutnya.

#### **1. Netralisasi**

Pada tahap ini, dilakukan penambahan ion ke dalam air untuk meningkatkan kekuatan ionik dan menurunkan gaya tolak antar partikel. Penambahan ion dilakukan dengan memasukkan koagulan bermuatan positif ke dalam koloid (Association American Water Works, 2011). Koagulan ini akan teradsorpsi pada permukaan koloid yang bermuatan negatif dan berdifusi dalam lapisan yang mengelilingi partikel. Proses ini membuat densitas partikel menjadi lebih padat dan volumenya menjadi lebih kecil, sehingga partikel akan bergerak lebih dekat antara satu dengan yang lain (Bratby, 2006).

## 2. *Sweep Coagulation*

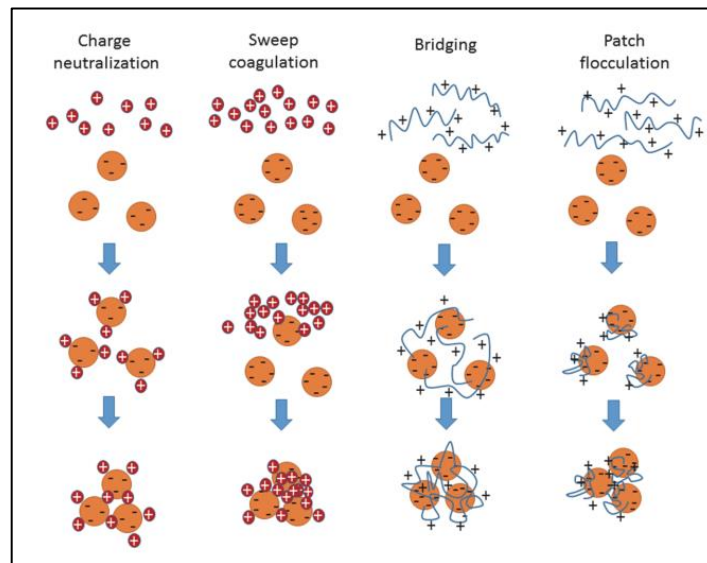
Ketika koagulan garam logam ditambahkan ke dalam air dengan konsentrasi yang cukup tinggi, maka akan menyebabkan partikel koloid terjerat dalam endapan (Li, et al., 2006).

## 3. *Bridging*

Pada tahap ini terjadi penggabungan partikel, di mana segmen rantai polimer menyerap lebih dari satu partikel, kemudian menghubungkan partikel bersama-sama (Li, et al., 2006). Salah satu persyaratan penting pada tahap *bridging*, yaitu harus terdapat cukup permukaan kosong pada partikel untuk pelekatan segmen rantai polimer yang sudah teradsorpsi pada partikel lain (Bolto & Gregory, 2007).

## 4. Penjebakan Oleh Flok

Penjebakan oleh flok terjadi saat polimer atau koagulan teradsorpsi ke permukaan partikel yang memiliki muatan berlawanan untuk memberikan distribusi muatan permukaan yang tidak seragam (Bolto & Gregory, 2007). Gaya tarik elektrostatik antar muatan yang berlawanan menyebabkan terbentuknya agregat dan partikel dengan potensi zeta negatif yang tinggi akan beragregasi akibat polielektrolit pada kerapatan muatan kationik tinggi ( $>0,15$ ), sedangkan pada kerapatan muatan kationik rendah ( $<0,15$ ) akan menyebabkan *bridging* (Tripathy & De, 2006).



Gambar 2. 2 Mekanisme koagulasi (Suopajarvi, 2015)

### 2. 4. 3 Faktor yang Berpengaruh pada Koagulasi

Berikut ini merupakan faktor-faktor yang memengaruhi efektivitas proses koagulasi.

#### 1. Derajat Keasaman (pH)

Derajat keasaman (pH) merupakan salah satu faktor penting yang berpengaruh pada proses koagulasi. Proses koagulasi akan berjalan dengan baik, jika dilakukan pada rentang pH yang optimal. Kondisi pH optimum pada proses koagulasi menggunakan alum adalah sekitar 6 dan koagulan ferri klorida memiliki rentang kondisi pH optimum 4 – 8 (Iswanto, et al., 2009)

#### 2. Pengadukan

Kecepatan pengadukan berpengaruh terhadap proses koagulasi. Kecepatan pengadukan mampu meningkatkan kontak, serta tumbukan antar partikel-partikel koloid dengan koagulan sehingga mempermudah penggumpalan flok dan membantu proses pengendapan (Lin, et al., 2013). Penelitian (Anggraini, et al., 2016) menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan pengadukan, proses koagulasi semakin baik. Hal ini disebabkan karena pengadukan membantu proses pencampuran koagulan di dalam air, proses destabilisasi partikel dan penggabungan partikel kecil menjadi flok-flok, sehingga semakin tinggi kecepatan pengadukan, maka pertumbuhan flok akan semakin besar

(Lin, et al., 2013). Akan tetapi kecepatan pengadukan yang berlebihan maupun yang kurang dapat menurunkan efisiensi penyisihan padatan. Kecepatan pengadukan yang melebihi kecepatan pengadukan maksimum tidak lagi memperbesar ukuran flok, karena flok sudah berada pada kondisi jenuh (Aktas, et al., 2012). Penambahan kecepatan pengadukan akan menurunkan persentase efektivitas koagulasi karena flok-flok akan terurai kembali menjadi partikel-partikel kecil yang sulit mengendap. Pada penelitian (Arum et al, 2004) kecepatan pengadukan optimum adalah 200 rpm dengan efisiensi penyisihan TS sebesar 94%.

### 3. Jumlah Koagulan

Berdasarkan penelitian (Yang Teh, et al., 2014), peningkatan dosis alum meningkatkan penghilangan TSS maupun COD pada limbah POME. Dosis yang lebih tinggi memberikan efek positif pada penghilangan TSS dan COD karena tingkat pembentukan flok menjadi lebih tinggi. Namun, jika penggunaan dosis koagulan yang berlebihan akan menyebabkan restabilisasi partikel karena pembalikan muatan, sedangkan penggunaan dosis koagulan yang lebih rendah dari kondisi optimal akan menurunkan efisiensi penghilangan homogen (Freitas, et al., 2015). Berdasarkan penelitian (Krishnan, et al., 2006) 1700 mg/L koagulan alum mampu menurunkan kadar COD sebesar 20035 mg/L, artinya 1 mg/L koagulan alum mampu mengikat 11,78 mgCOD/L.

### 4. Jenis Koagulan

Koagulan merupakan senyawa yang ditambahkan pada proses koagulasi untuk mendestabilisasi koloid dengan menetralkan muatan listrik pada bagian permukaan koloid, sehingga akan terbentuk flok. Koagulan yang umum digunakan, yaitu koagulan berbasis logam, seperti  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  dan  $\text{FeCl}_3$ . Dalam Tabel 2.1 dijelaskan perbedaan koagulan  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  dan  $\text{FeCl}_3$ .

Tabel 2. 1 Perbandingan koagulan  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  dan  $\text{FeCl}_3$ 

Karakteristik	Alum [ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ]	$\text{FeCl}_3$	Sumber
Rentang pH optimum	4,5 - 8,0	4 - 12	(Wardani, et al., 2009)
Kerapatan Flok	Membentuk flok yang lebih rapat dibandingkan dengan ferric chloride	Kurang rapat dibandingkan dengan alum	(Fargues & Turchiuli, 2003)
Pengamatan laju pengendapan	Laju pengendapan rata-rata meningkat ketika konsentrasi suspensi tanah liat awal menurun	Kurang jelas untuk diamati	
Ukuran flok dan agregat	Lebih kecil dan rapat, sehingga mengandung sedikit air	Lebih besar dibandingkan dengan koagulan alum dan mengandung banyak air	

#### 2. 4. 4 Penelitian Terdahulu

Beberapa peneliti telah melaporkan bahwa koagulasi dapat menurunkan limbah konsentrasi polutan pada limbah POME yang disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Penelitian terdahulu pengolahan POME dengan koagulasi

No	Penulis	Rangkuman
1	(Huzir, et al., 2019)	Pada penelitian ini dilakukan koagulasi untuk pengolahan POME menggunakan biokoagulan abu jerami padi dan alum. Penelitian dilakukan untuk mempelajari kondisi optimal koagulasi pada limbah POME dengan menggunakan koagulan alum dan jerami padi. Variasi yang dilakukan pada penelitian ini, yaitu dosis koagulan sebesar 2, 6, dan 10 g, pH umpan sebesar 3, 4,5, dan 6, serta waktu pengendapan selama 30, 45, dan 60 menit. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimal



		adalah dosis koagulan jerami padi 6 g dengan pH umpan 3,6 dan waktu pengendapan 57 menit mampu menurunkan 52,38% COD dan 83,88% TS. Sementara itu, kondisi optimal untuk koagulan alum adalah 6,5 g dengan pH umpan 6 dan waktu pengendapan 41,69 menit mampu menurunkan 52,36% COD dan 84,94% TS.
2	(Yee Shak & Yeong Wu, 2015)	Pada penelitian ini dilakukan koagulasi pada limbah POME menggunakan koagulan alum dan getah biji <i>Cassia obtusifolia</i> . Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dosis alum, dosis biji <i>Cassia obtusifolia</i> dan waktu pengendapan untuk menghilangkan <i>total suspended solid</i> dan <i>chemical oxygen demand</i> dari limbah POME. Kondisi optimal adalah dosis alum 1,15 g/L dan dosis getah biji <i>Cassia obtusifolia</i> 2,47 g/L dengan waktu pengendapan 35,16 menit. Kondisi optimal ini mampu menurunkan kadar COD sebesar 48,22% dan TSS sebesar 81,58%.
3	(Yang Teh, et al., 2014)	Dalam penelitian ini digunakan koagulan campuran alum dan tepung beras pada proses koagulasi untuk mengolah limbah POME. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari kinerja koagulan campuran alum dan tepung beras untuk mengolah limbah POME. Berdasarkan penelitian, diperoleh kondisi optimum dosis alum 0,38 g/L dan 0,28 g/L tepung beras dengan pH umpan 4,45 dalam waktu pengendapan 5,54 menit mampu menurunkan kadar COD hingga 49,23% dan TSS hingga 86,65%.
4	(Jagaba, et al., 2020)	Pada penelitian ini, dilakukan penelitian untuk menentukan kondisi optimum dari berbagai jenis koagulan, yaitu $\text{FeCl}_3$ , <i>moringa oleifera</i> , <i>aluminum sulphate</i> , <i>chitosan</i> , dan <i>zeolite</i> . Kondisi optimal untuk koagulan <i>aluminum sulphate</i> adalah dengan dosis 4000 mg/L di mana mampu menurunkan COD hingga 75,01% dan TSS hingga 98,72%. Koagulan <i>ferric chloride</i> mencapai kondisi optimal pada dosis 1000 mg/L dengan penurunan COD hingga 72,04% dan TSS hingga 99,09%. Selanjutnya, koagulan <i>chitosan</i> mencapai kondisi optimal pada dosis 400 mg/L yang mampu menurunkan COD sebesar 68,31% dan TSS sebesar 98,95%. Terakhir, yaitu koagulan <i>Moringa oleifera</i> mencapai kondisi optimal pada dosis 2000 mg/L dengan penurunan 51,21% COD dan 95,42% TSS.

5	(Saifuddin & Dinara, 2011)	Penelitian ini menggunakan chitosan-magnetite sebagai koagulan untuk mengolah POME. Dilakukan variasi pH antara 4-9 dan dosis koagulan antara 40-600 mg/L. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimal pada dosis 250 mg/L dengan pH 6. Kondisi ini mampu menurunkan kadar COD sebesar 62,5% dan TSS sebesar 97,6%.
6	(Ahmed H. Birima, 2015)	Pada penelitian ini, proses koagulasi dilakukan untuk mengolah limbah POME dengan koagulan ekstrak biji kacang. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas koagulan ekstrak biji kacang untuk menghilangkan TSS, COD, dan kekeruhan pada limbah POME. Kondisi optimal proses koagulasi adalah konsentrasi ekstrak biji kacang sebanyak 5000-7000 mg/L di mana mampu menurunkan COD hingga 66–73,5 % dan TSS hingga 90–94,7%.

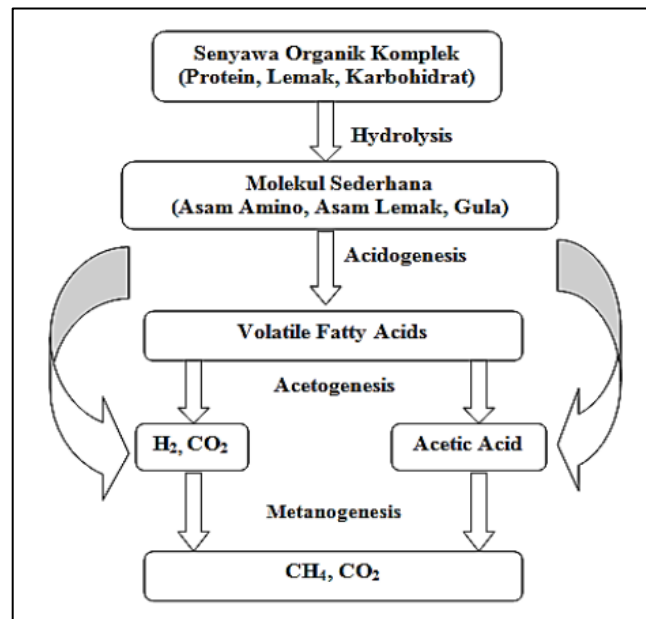
## 2.5 Pencernaan Anaerob

### 2.5.1 Pengertian Pencernaan Anaerob

Pencernaan anaerob merupakan proses dekomposisi mikroba dari zat *biodegradable* menjadi karbon dioksida dan gas metana tanpa bantuan oksigen (Singh, et al., 2018).

### 2.5.2 Mekanisme Pencernaan Anaerob

Tahapan yang terjadi pada proses pencernaan anaerob adalah hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis yang dijelaskan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 3 Diagram tahapan proses pencernaan anaerob (Darwin, 2018)

Mekanisme awal pada proses pencernaan anaerob, yaitu hidrolisis. Pada tahap ini terjadi pemecahan ikatan senyawa organik kompleks yang sukar larut, seperti polisakarida, lemak, dan protein menjadi molekul sederhana yang mudah larut, seperti gula, asam amino, dan asam lemak (*fatty acids*). Pada proses pencernaan anaerob, proses hidrolisis dilakukan oleh *obligate anaerobic bacteria* dan *facultative anaerobic bacteria*. *Obligate anaerobic bacteria* adalah bakteri yang hanya dapat tumbuh pada kondisi tanpa oksigen. Biasanya, proses metabolisme dalam organisme ini memiliki komponen yang sangat sensitif terhadap oksidasi atau inaktivasi oleh molekul oksigen. Kelompok *obligate anaerobic bacteria*, seperti *Bacteroides* dan *Clostridia*. *Facultative anaerobic bacteria*, yaitu bakteri yang dapat tumbuh dalam kondisi anaerobik atau aerobik. Selama pertumbuhan anaerobik, energi dihasilkan dari fermentasi atau respirasi anaerobik dengan akseptor elektron terminal selain oksigen, tergantung pada organisme dan kondisi pertumbuhan, seperti *Staphylococci*, *Corynebacterium*, dan *Listeria* (James & C. Jeffrey, 2007).

Asidogenesis merupakan proses konversi molekul sederhana yang mudah terlarut, seperti asam amino, gula, dan *fatty acids* menjadi asam organik rantai pendek atau *Short Chain Fatty Acids* (SCFA), seperti *butyric acid* dan *propionic*

*acid*. Pada tahap ini, bahan yang terbentuk pada tahap hidrolisis, seperti gula, asam lemak rantai panjang, dan asam amino dimanfaatkan sebagai substrat. Selain itu, jika kandungan gula terlarut yang tersedia di dalam *digester* memiliki konsentrasi yang tinggi, maka proses asidogenesis juga dapat menghasilkan alkohol (Darwin, 2018).

Asetogenesis merupakan proses pencernaan SCFA menjadi asam asetat. Pada proses ini, bakteri *acetogenic* juga menghasilkan hidrogen dan karbondioksida. Mikroorganisme yang digunakan pada tahap ini, yaitu *homoacetogens* yang memproduksi *acetate* menggunakan hidrogen dan karbondioksida sebagai substratnya dan *syntrophic acetogens* yang memproduksi asetat dan hidrogen melalui oksidasi *Volatile Fatty Acid* (VFA), seperti *propionate* dan *butyrate*.

Tahapan terakhir pada proses pencernaan anaerob, yaitu metanogenesis. Tahap metanogenesis mengkonversi produk tahap asetogenesis (asam asetat, karbondioksida, hidrogen) menjadi gas metana dan karbon dioksida. Pembentukan gas metana dengan hidrogen dan karbondioksida oleh mikroorganisme anaerobik disebut *hydrogen methanogenesis*. Parameter yang mempengaruhi pertumbuhan mikroorganisme metanogen, yaitu perubahan pH, temperatur, kontaminasi oksigen, serta senyawa kimia lain, seperti ammonia, kalsium, dan magnesium pada anaerobik *digester*. Bakteri metanogen hanya dapat tumbuh dan berkembang pada pH 6,5 – 8 (Cheng, 2010).

### **2. 5. 3 Faktor yang Berpengaruh pada Pencernaan Anaerob**

Untuk memproduksi biogas secara optimum, beberapa parameter yang perlu dikontrol adalah sebagai berikut.

#### **1. Temperatur**

Pencernaan anaerobik idealnya dapat dilakukan pada hampir semua kondisi suhu. Mikroorganisme anaerob idealnya tumbuh dan bekerja pada suhu 30 – 40 °C untuk mikroorganisme mesofilik dan 45 – 65 °C untuk mikroorganisme termofilik. Pencernaan anaerob pada suhu mesofilik lebih stabil, mikroorganisme memiliki toleransi lebih besar terhadap perubahan kondisi

lingkungan dengan konsumsi energi yang lebih sedikit. Sementara itu, pada kondisi termofilik, proses degradasi berlangsung lebih cepat dengan konsumsi energi besar. Akibatnya tingkat pertumbuhan yang tinggi, tetapi tingkat kematian juga lebih tinggi daripada kondisi mesofilik (Abdelgadir, et al., 2013)

## 2. Derajat Keasaman (pH)

Proses hidrolisis dan asidogenesis dapat berlangsung optimum pada pH 5,5 – 6,5 dan proses metanogenesis dapat berlangsung pada pH 6,5 – 8,2. Kapur atau natrium (bikarbonat atau hidroksida) sering ditambahkan ke dalam pencernaan untuk menaikkan pH, karena mikroorganisme metanogen tidak dapat tumbuh dan bekerja pada kondisi asam. pH optimum untuk pencernaan anaerob sekitar 7,2 dan 8,2 dapat menghasilkan gas metana yang stabil. (Abdelgadir, et al., 2013).

## 3. Konsentrasi COD

Kadar konsentrasi COD yang tinggi dapat mengakibatkan VFA mudah terbentuk. Akumulasi VFA yang terlalu tinggi dapat bersifat membahayakan bagi bakteri pembentuk VFA, sehingga produksi biogas tidak maksimal. Kadar maksimal konsentrasi COD yang disarankan adalah sebesar 19 g/L (Moujanni, et al., 2018)

## 4. Minyak dan Lemak

Minyak dan lemak dapat digunakan sebagai substrat untuk aktivitas mikroorganisme dalam sistem biogas. Namun, selama degradasi minyak dan lemak, produk sampingan seperti asam lemak dapat meningkat, kemudian menghambat produksi metana (Ji, et al., 2013). Kadar minyak dan lemak yang tinggi pada POME menyebabkan pencernaan anaerob terhambat seperti *washout of bacteria*, serta pembentukan busa dan buih, di mana produksi biogas yang dihasilkan tidak maksimal (Khadaroo, et al., 2020). Konsentrasi minyak dan lemak lebih dari 1,6 g/L dapat menyebabkan proses pencernaan anaerobik tidak berjalan dengan baik (Wongfaed, et al., 2019).

#### 5. Rasio COD/N

Rasio COD/N substrat merupakan parameter yang perlu diperhatikan agar proses pencernaan anaerob berjalan optimal. Rasio COD/N pada rentang 350/7 – 1.000/7 adalah kisaran optimal untuk pencernaan anaerobik (Speece, 1996). Jika kadar COD/N berlebih atau kurang dari kisaran tersebut, pertumbuhan mikroba dalam digester akan terhambat sehingga perlu dilakukan penyesuaian COD/N substrat. Protein, asam amino, dan urea merupakan sumber nitrogen yang dibutuhkan oleh mikroba untuk membangun struktur sel.

#### 6. Mikronutrien

Adanya peran logam atau mikronutrien terhadap anaerobik *digester*, seperti nikel, kobalt, besi, magnesium, dan kalsium dapat memicu pertumbuhan mikroorganisme dan meningkatkan metanogenesis (Abbasi, et al., 2012). Pada penelitian (Narra, et al., 2016), potensi residu biogas dapat dipercepat dengan penambahan mikronutrien. Produksi biogas dari jerami padi dengan penambahan mikronutrien (nikel, molibdenum, dan besi klorida) pada keadaan mesofilik dan termofilik menghasilkan biogas sebesar 241 dan 298 L/kg jerami padi. Sedangkan *digester* tanpa mikronutrien pada kondisi mesofilik dan termofilik menghasilkan biogas sebesar 210 dan 246 L/kg jerami padi.

### 2. 5. 4 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu terkait produksi biogas dari limbah POME disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Penelitian terdahulu pengolahan POME dengan pencernaan anaerob

No	Penulis	Ringkasan
1	(Liew, et al., 2015)	<i>Pretreatment</i> enzimatis menggunakan enzim lipase dari <i>Burkholderia cepacia</i> dilakukan untuk menurunkan konsentrasi minyak dan lemak pada POME. <i>Pretreatment</i>

		dilakukan secara enzimatik dalam erlenmeyer tertutup dengan 1% v/v larutan enzim ditambah ke dalam 200 mL sampel POME. kemudian dinkubasi pada suhu 30° dengan kecepatan pengadukan 100 rpm selama 48 jam berhasil meningkatkan penurunan COD dan produksi biogas sebesar 2,6% dan 10,61%.
2	(Chin Yap, et al., 2021)	<i>Pretreatment</i> koagulasi dengan koagulan ekstrak <i>M. Oleifera</i> sebelum POME diumpankan pada proses pencernaan anaerob. Dosis optimum ekstrak <i>M. oleifera</i> 500mg/L dapat menurunkan TSS dan minyak & lemak sebesar 92,24% dan 91,90%. Selanjutnya pada tahap AD, diperoleh penurunan BOD sebesar 2,59%, COD 6,70%, TSS 37,3%. Hasil metana yang didapat sebanyak 24,3 ml CH <sub>4</sub> /g COD yang hilang.
3	(Krishnan, et al., 2006)	Perlakuan koagulasi sebelum proses pencernaan anaerob untuk mengolah limbah POME dilakukan dengan koagulan alum terhadap efektivitas polielektrolit anionic dan kationik sebagai bantuan koagulan. Variasi dosis alum 100, 150, 200, 150, 300, 350 mg/L dengan COD <i>influent</i> 2000 mg/L pada pH 7. Dosis 300 dan 350 mg/L memiliki hasil yang baik sehingga dilakukan optimasi pH, didapatkan penurunan COD paling optimal di pH 7,5 selanjutnya sludge yang dihasilkan masuk ke dalam proses AD. Pengaruh konsentrasi COD <i>influent</i> sebesar 59700 mg/L dengan alum (1500-1800 mg/L @50mg/L) ditambah bantuan koagulan (1-4 mg/L @1 mg/L), menghasilkan penyisihan COD terbaik pada dosis alum 1600-1700 mg/L ditambah kationik 2 mg/L terhadap penyisihan COD, TSS, Sludge volume, pH sebesar 30.870 mg/L, 90%, 240 mL/L dan 6.2.

4	(Hamzah, et al., 2020)	<p>Perbandingan kinerja pencernaan anaerob termofilik dan mesofilik dengan variasi suhu 55 dan 37°C serta variasi <i>Organic Loading Rate</i> (OLR) 2,4:3,2:4,0 g COD/L hari terhadap pembentukan metana dan penurunan substrat (VS dan COD). Pada setiap OLR yang diuji, hasil metana untuk kondisi mesofilik jauh lebih rendah daripada kondisi termofilik. Misalnya, pada OLR 2,4 g COD/L hari, hasil metana untuk suhu termofilik adalah <math>0,15 \pm 0,07</math> L/g COD, sedangkan untuk suhu mesofilik, hasil metana adalah <math>0,12 \pm 0,05</math> L/g COD. Sedangkan pada OLR 3,2 g COD/L hari, yield metana untuk temperatur termofilik dan mesofilik berturut-turut adalah <math>0,25 \pm 0,01</math> dan <math>0,17 \pm 0,01</math> L/g COD. Digester termofilik mencatat hasil metana yang lebih tinggi daripada digester mesofilik pada setiap OLR. Pada keadaan mesofilik, penurunan <i>Volatile Solid</i> (VS) dan penyisihan COD terendah (masing-masing <math>39,4\% \pm 3,5\%</math> dan <math>49,7\% \pm 1,7\%</math>) diamati pada OLR 2,4 g COD/L hari. Saat OLR meningkat dari 2,4 hingga 4,0 g COD/L hari, penurunan VS dan penyisihan COD masing-masing naik sebesar 34,9% dan 26,3%. Kecenderungan yang sama terjadi pada kondisi termofilik dengan penurunan VS dan penyisihan COD pada kondisi termofilik, yang masing-masing meningkat sebesar 26,4% dan 24,1%, ketika OLR meningkat dari 2,4 menjadi 4,0 g COD/L hari.</p>
5	(Ramadhan, et al., 2018)	<p>Pembentukan biogas serta penurunan COD pada limbah POME dengan metode pencernaan anaerob (acidogenic dan methanogenic <i>Anaerobic Fluidized Bed Reactor</i> (AFBR)) selama 14 dan 21 hari menggunakan zeolite alam. Pada acidogenic AFBR lebih disukai pada kondisi asam pada hari ke 12, kadar COD yang terkandung <math>\pm 1100</math></p>



		mg/L dengan pembentukan $\text{CH}_4 \pm 15 \text{ ml/g COD}$ . Sedangkan pada methanogenic AFBR kadar COD pada hari ke 12 sebesar 1.300 mg/L dengan pembentukan $\text{CH}_4$ 21 mL/g COD.
6	(Jijai, et al., 2017)	POME diencerkan dengan air dengan variasi pengenceran 100, 80, 60, 40, dan 20 persen dari POME awal. Selanjutnya abu ditambahkan dengan variasi 0, 2, 4, 6, dan 8 g abu ke dalam 170 ml POME. Penambahkan abu pada rasio abu : POME sebesar 2 g: 170 ml memberikan hasil terbaik terhadap biogas kumulatif dan hasil metana (masing-masing 1.520 mL dan 218,79 mL $\text{CH}_4/\text{g COD}$ ). Sedangkan proses AD pada POME tanpa perlakuan menghasilkan 103,15 mL $\text{CH}_4/\text{g COD}$ . Konsentrasi COD awal yang terlalu tinggi menciptakan ketidakseimbangan konversi, sehingga terjadi akumulasi asam organik yang berlebihan, yang menyebabkan penurunan pH sehingga mengganggu aktivitas mikroba metanogen.
7	(Saifuddin & Fazlili, 2009)	Pengaruh iradiasi <i>microwave</i> dan ultasonik sebagai <i>pretreatment</i> pada pencernaan anaerobik pada limbah POME. Proses AD dengan <i>pretreatment</i> menghasilkan 98 mL $\text{CH}_4$ . Proses <i>pretreatment</i> dilakukan selama 3 menit oleh <i>microwave</i> dan 10 menit oleh iradiasi gelombang mikro, dengan laju konsumsi energi 372 kJ/L lumpur. Sedangkan proses AD tanpa <i>pretreatment</i> menghasilkan 37 L $\text{CH}_4/\text{kg COD}$ . Meskipun penggunaan <i>pretreatment</i> iradiasi gelombang mikro dan ultrasonik meningkatkan produksi biogas secara signifikan, tetapi membutuhkan biaya instrumentasi, proses, dan pemeliharaan yang cukup tinggi
8	(Khadaroo,	<i>Thermal pretreatment</i> sebagai metode perlakuan awal

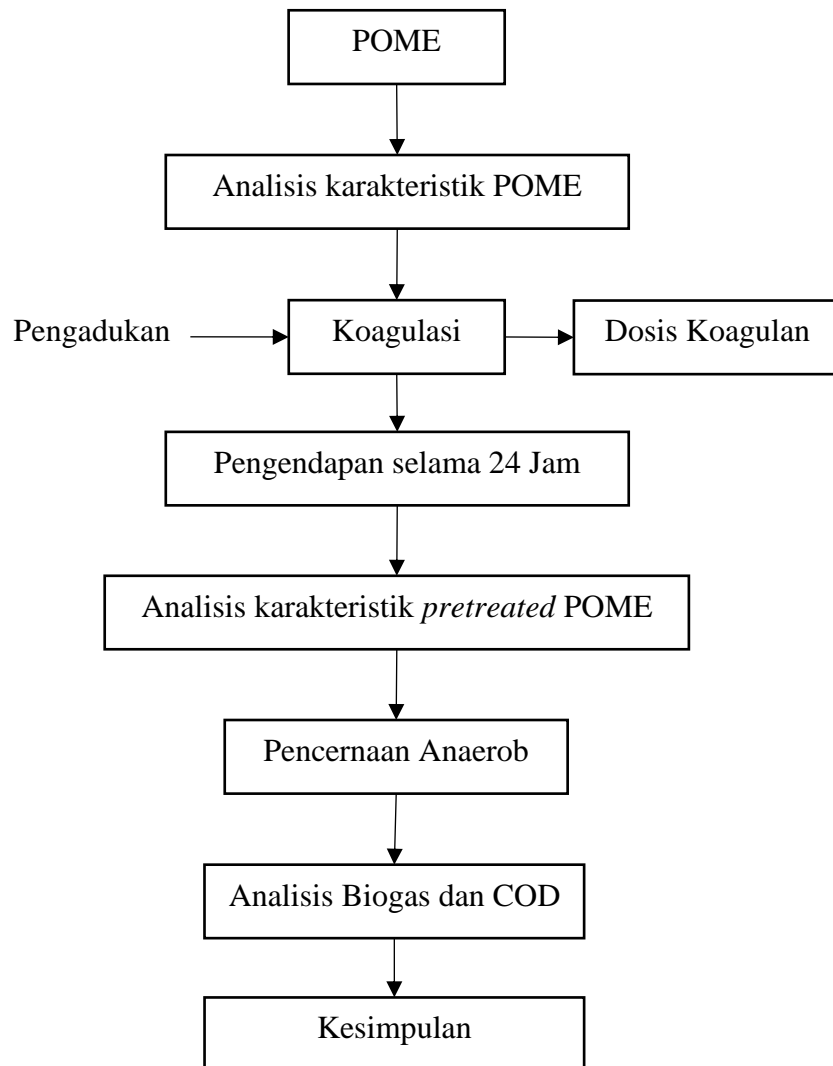
	et al., 2020)	sebelum POME diumpankan ke dalam digester anaerob. Proses AD tanpa <i>pretreatment</i> menghasilkan $294 \pm 25$ mLCH <sub>4</sub> /g COD <i>removal</i> per hari. Hasil metana harian yang dihitung untuk <i>thermal pretreatment</i> 40S:60L dan 50S:50L adalah $414 \pm 17$ dan $260 \pm 13$ mLCH <sub>4</sub> /g COD <i>removal</i> per hari. Hasil penyisihan COD pada kasus <i>thermal pretreatment</i> 40S:60L dengan OLR yang berkisar antara 11,55 hingga 16,05 g COD/L hari mencapai 97,5%.
--	---------------	---

# BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Roadmap Penelitian

Roadmap pada penelitian ini disajikan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

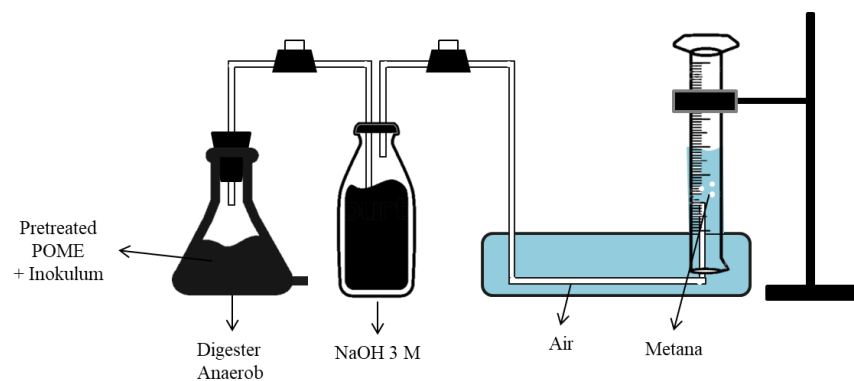
### 3.2 Alat dan Bahan

#### 3.2.1 Alat

Alat – alat yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 3.1. Adapun rangkaian alat pencernaan anaerob yang digunakan dalam penelitian ini dimodifikasi dari penelitian (Mahmoud Elsayed, 2016) dan ditampilkan pada Gambar 3.2.

Tabel 3. 1 Alat

No	Alat	Keterangan
1	Digester anaerob	Pencernaan anaerob
2	Gelas beaker 1000 mL	Reaktor koagulasi
3	Gelas ukur 100 mL	Gasometer untuk water displacement method
4	Gelas ukur 25 mL	Wadah settling koagulasi
5	Magnetic stirrer	Pengadukan proses koagulasi
6	pH meter	Analisis pH cairan
7	Pipet Volume 25 mL	Panen hasil settling koagulasi
8	Rangkaian alat analisis TS	Analisis TS



Gambar 3. 2 Rangkaian alat proses pencernaan anaerob

#### 3.2.2 Bahan

Bahan – bahan yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Bahan

No	Bahan	Keterangan
1	Aquades	Diperoleh dari toko kimia di Cilegon
2	Inokulum	Digunakan pada pencernaan anaerob dan diperoleh dari toko online
3	NaOH	Untuk mengatur pH, membuat larutan pada pencernaan anaerob, dan diperoleh dari toko kimia di Cilegon
4	POME	Limbah yang akan diolah dan diperoleh dari PTPN VIII Pandeglang
5	Alum	Sebagai koagulan proses koagulasi dan diperoleh dari toko kimia di Cilegon

### 3. 3 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan variasi pada proses koagulasi. Variabel dalam penelitian dijelaskan lebih lanjut pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Variabel Penelitian

Variabel	Proses Koagulasi	Proses Pencernaan Anaerob
Tetap	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Volume limbah 1 L</li> <li>– pH operasi <math>7 \pm 0,2</math></li> <li>– Kondisi operasi meliputi suhu dan tekanan kamar</li> <li>– Kecepatan pengadukan 200 rpm</li> <li>– Waktu proses 2 jam</li> <li>– Waktu pengendapan 24 jam</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Volume digester 500 mL</li> <li>– Volume aktif 300 mL</li> <li>– Volume inokulum 10%</li> <li>– Kondisi operasi meliputi suhu dan tekanan kamar</li> <li>– Waktu proses 12 hari</li> </ul>
Bebas	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Dosis koagulan (alum) 2, 4, 6, dan 8 g/L</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>Pretreated</i> POME keluaran proses Koagulasi</li> </ul>
Terikat	pH, konsentrasi COD, TS, dan warna	pH, konsentrasi COD, TS, dan volume metana

### 3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahap, yaitu

a. Persiapan limbah POME

POME didapat dari PT Perkebunan Nusantara VIII (PTPN VIII), Pandeglang, Banten disimpan pada suhu di bawah 4 °C agar tidak mengalami biodegradasi. Ketika POME akan digunakan, suhu POME dinaikkan kembali hingga mencapai suhu ruang. Selanjutnya, dilakukan analisis untuk mengetahui karakteristik awal POME, meliputi COD, BOD, TS, amoniak, minyak dan lemak, pH, dan VFA.

b. *Pretreatment* koagulasi POME

Pada proses koagulasi, koagulan yang digunakan adalah alum. Sebelum ditambahkan koagulan, kondisi pH pada POME diatur menjadi 7 dengan menambahkan NaOH teknis. Selanjutnya, dilakukan variasi dosis koagulan sebesar 2, 4, 6, dan 8 g/L. Koagulasi dilakukan dengan volume limbah 1 L (pada *beaker glass*) dan kecepatan pengadukan 200 rpm selama 2 jam. Setiap 20 menit, pH cairan diukur dan sampel cairan diambil  $\pm 25$  mL. Sampel cair tersebut ditempatkan pada gelas ukur dan diendapkan selama 24 jam. Selanjutnya, dilakukan analisis COD, TS, warna, dan VFA. Limbah yang tersisa di dalam reaktor koagulasi (*beaker*) juga diendapkan selama 24 jam kemudian diumpankan ke dalam *digester* anaerob (lihat poin c).

c. Pencernaan anaerob

Keluaran POME reaktor koagulasi poin b diumpankan ke dalam *digester* anaerob sebanyak 270 mL. Proses pencernaan anaerob dilakukan menggunakan *digester* anaerob volume 500 mL dengan volume aktif 300 mL. Selanjutnya, inokulum ditambahkan sebesar 10% volume aktif *digester*, yaitu 30 mL. Proses pencernaan anaerob dijalankan secara batch selama 12 hari. Setiap hari, volume metana diukur melalui *water displacement method*. Volume cairan  $\pm 10$  mL diambil setiap tiga hari untuk diukur pH, kemudian disimpan untuk dianalisis COD dan TS.

### 3.5 Analisis

Berikut ini merupakan beberapa metode yang digunakan dalam analisis data penelitian.

a. Analisis pH POME

Analisis pH POME dilakukan menggunakan pH meter elektronik berdasarkan SNI 06-6989.11-2004. Metode pengukuran pH didasarkan pada aktivitas ion hidrogen dengan menggunakan parameter larutan penyangga pH 6,86.

b. Analisis COD

Analisis dilakukan berdasarkan metode Standar Nasional Indonesia (SNI) terkait COD SNI 06-6989.2-2019.

c. Analisis Metana

Untuk menentukan volume metana yang terbentuk digunakan metode *water displacement method* (Chin Yap, et al., 2021). Pengukuran volume dilakukan setiap hari. Selanjutnya, analisis pengaruh COD terhadap metana dilakukan dengan metode pemodelan persamaan Gompertz. Kinetika produksi metana dalam kondisi *batch* diasumsikan sebanding dengan laju pertumbuhan bakteri metanogenik dalam *digester*.

d. Analisis TS

Analisis dilakukan dengan metode gravimetri berdasarkan SNI 06-6989.26-2005.

### 3.6 Model Produksi Metana

Berikut ini merupakan persamaan model modifikasi Gompertz.

$$y(t) = A \cdot \exp \left\{ - \exp \left[ \frac{\mu e}{A} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

Keterangan :

$y(t)$  = Kumulatif produksi metana (mL/g COD)

$A$  = Potensi produksi metana (mL/g COD)

$\mu$  = Maksimum laju produksi metana (mL/g COD.hari)

$\lambda$  = Waktu minimum produksi metana (hari)

$t$  = Waktu kumulatif produksi metana (hari)

$e$  = Konstanta matematika (2.718282)

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

*Palm Oil Mill Effluent* (POME) merupakan limbah cair sebagai hasil samping dalam proses produksi *Crude Palm Oil* (CPO) pada industri kelapa sawit. POME mengandung zat-zat organik, seperti *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biological Oxygen Demand* (BOD), *Volatile Fatty Acid* (VFA), minyak dan lemak, serta *Total Solid* (TS) yang berbahaya jika langsung dibuang ke badan air karena tidak memenuhi baku mutu limbah yang disajikan pada Tabel 4.1. Selain itu, bahan organik yang terkandung dalam POME berpotensi untuk menjadi substrat pada proses pencernaan anaerob. Pencernaan anaerob merupakan proses dekomposisi mikroba dari zat *biodegradable* menjadi karbon dioksida dan gas metana tanpa bantuan oksigen. Namun, kandungan bahan organik pada POME masih terlalu tinggi dari kondisi optimalnya, yaitu COD 19.000 mg/L (Moujanni, et al., 2018), TS 5-15% (Wang, et al., 2020), dan pH 7-7,5 (Ceron-Vivas, et al., 2019).

Tabel 4. 1 Perbandingan karakteristik POME dengan baku mutu

Parameter	Satuan	Nilai	Baku Mutu
pH	-	4,5	6 – 9
TS	mg/L	36.000	-
Minyak dan Lemak	mg/L	4,86	5
Amoniak	mg/L	50	10
BOD	mg/L	758	30
COD	mg/L	20.700	100
VFA	mg/L	5.232	-

Oleh karena itu, perlu dilakukan perlakuan awal pada POME sebelum dilakukan proses pencernaan anaerob. Metode perlakuan awal yang digunakan,

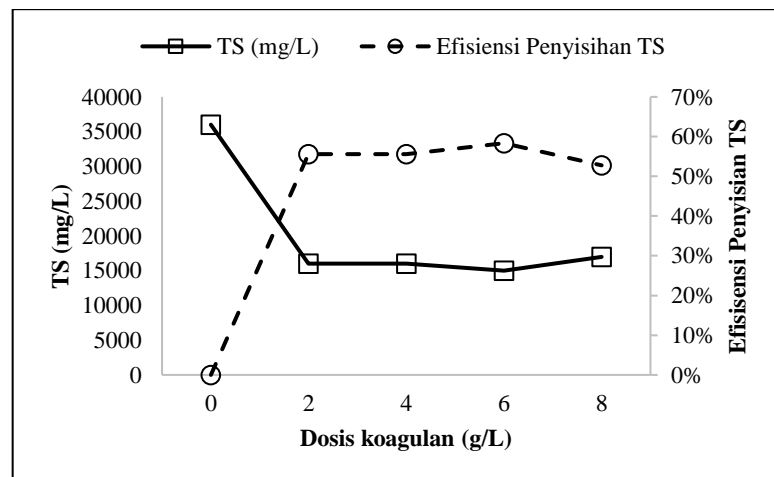


yaitu koagulasi karena proses koagulasi merupakan teknologi yang telah terbukti aman bagi lingkungan dan kesehatan manusia dengan pengaplikasian yang luas dalam bidang pengolahan air dan limbah (Menkiti, et al., 2011). Koagulasi merupakan suatu proses destabilisasi muatan koloid padatan tersuspensi dengan menggunakan suatu koagulan, sehingga akan terbentuk flok-flok halus yang dapat diendapkan.

## 4.1 Proses Koagulasi

### 4.1.1 Profil TS

Koagulasi adalah suatu proses destabilisasi muatan koloid padatan tersuspensi dengan menggunakan suatu koagulan, sehingga akan terbentuk flok-flok halus yang dapat diendapkan. Penambahan dosis koagulan dapat menyebabkan adanya peningkatan pembentukan presipitat, yang akan diikuti dengan peningkatan frekuensi tumbukan antar partikel sehingga dapat membentuk flok yang lebih besar (Wardani, et al., 2009). Profil penambahan koagulan terhadap kadar TS dan efisiensi penyisihan TS disajikan pada Gambar 4.1.



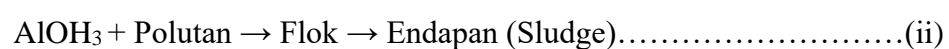
Gambar 4. 1 Profil TS dan Efisiensi Penyisihan TS

Penambahan koagulan 0 (POME mentah), 2, 4, 6, 8 g/L menghasilkan konsentrasi TS sebesar 36.000; 16.000; 16.000; 15.000; 17.000mg/L. Efisiensi penyisihan TS pada koagulasi terhadap dosis koagulan seperti Gambar 4.1

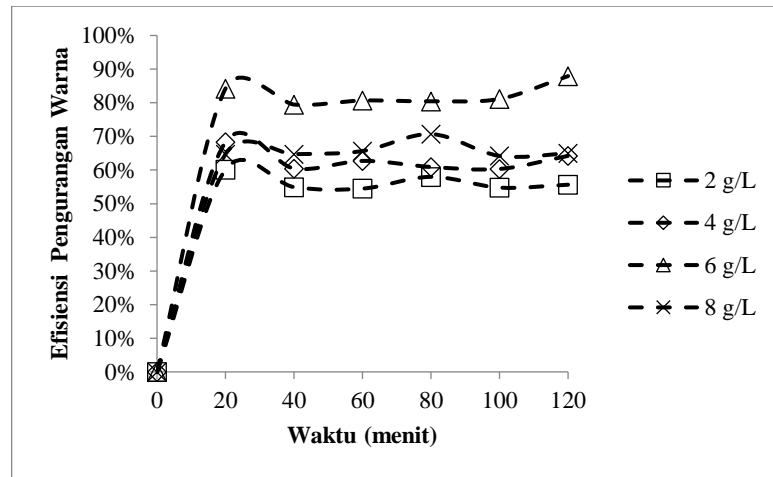
menunjukkan penambahan dosis koagulan 2, 4, 6, 8 g/L meningkatkan efisiensi penyisihan TS secara berturut-turut sebesar 56, 56, 58, dan 53 %. Berdasarkan data tersebut, penambahan koagulan dibawah 6 g/L mampu menurunkan kadar TS. Dosis 0-6 g/L meningkatkan efisiensi penyisihan TS dari 56 hingga 58%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan koagulan, meningkatkan pengikatan polutan. Peningkatan dosis akan memberi lebih banyak koagulan untuk berkontak dengan koloid POME dalam membentuk agregat, sehingga akan membentuk flok yang lebih banyak (Teh, et al., 2014). Dosis koagulan 6 g/L menghasilkan efisiensi penurunan kadar TS tertinggi (58%). Akan tetapi, pada koagulan 8 g/L terjadi kenaikan TS dan penurunan efisiensi penyisihan TS menjadi 53%. Penambahan dosis koagulan berlebih akan terjadi adsorpsi berlebih oleh polutan sehingga terjadi restabilisasi karena kelebihan muatan yang mengakibatkan koloid bermuatan sejenis membentuk gaya tolak menolak, sehingga pembentukan flok rendah yang menurunkan efisiensi penyisihan TS (Risdianto, 2007). Pada penelitian (Huzir, et al., 2019), dosis alum optimum pada 7 g/L dengan pH 3,5-5,5 meningkatkan efisiensi penyisihan TS sebesar 70-81%.

#### 4.1.2 Profil Warna

Warna pada POME disebabkan karena kandungan lignin, tanin, selulosa, asam humat, dan fenolik yang menyebabkan warnanya menjadi coklat. Selain itu, saat proses *steam extraction* pada Gambar 2.1, terjadi reaksi maillard yang membentuk senyawa melanoid berwarna coklat (Balavinayagamani, et al., 2018). Pada proses koagulasi, koagulan akan membentuk flok. Flok yang terbentuk memiliki karakteristik padatan yang mampu mengikat bahan organik pada limbah POME. Flok-flok kemudian saling berikatan dan membentuk endapan (*sludge*). Reaksi koagulasi dengan koagulan alum ditunjukkan pada persamaan (i) dan (ii).



Pada hasil penelitian diperoleh nilai efisiensi pengurangan warna pada penambahan dosis koagulan 2, 4, 6, dan 8 g/L yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.



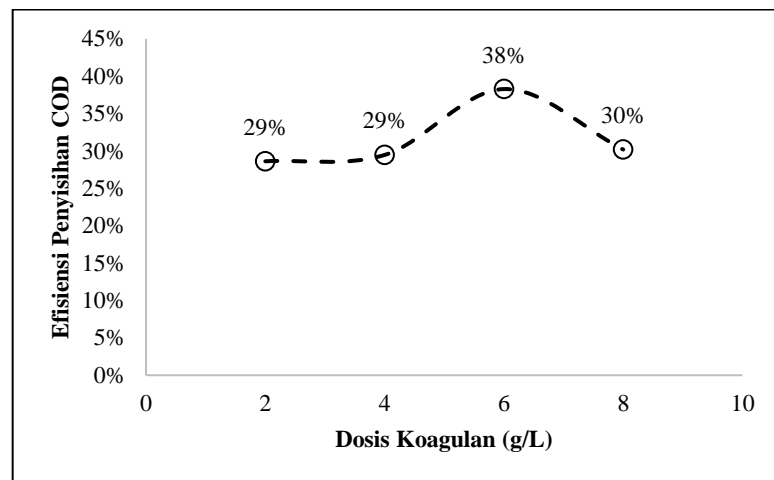
Gambar 4. 2 Efisiensi penyisihan warna pada variasi dosis koagulan

Dapat dilihat efisiensi penyisihan warna tertinggi dihasilkan pada penambahan dosis koagulan 6 g/L. Penambahan dosis dari 2 hingga 6 g/L mampu meningkatkan efisiensi penyisihan warna dari 56% menjadi 88%. Fenomena ini sesuai dengan proses koagulasi pada persamaan (i) dan (ii) yang menunjukkan bahwa semakin tinggi dosis koagulan, maka semakin banyak  $Al^{3+}$  yang mengikat  $OH^-$  membentuk  $Al(OH)_3$ . Di mana  $Al(OH)_3$  memiliki karakteristik seperti gelatin yang mampu mengikat polutan. Hal ini menyebabkan semakin tinggi dosis koagulan, maka semakin banyak polutan yang dihilangkan, sehingga efisiensi penyisihan warna juga meningkat. Namun, penambahan dosis koagulan hingga 8 g/L justru menurunkan efisiensi penyisihan warna pada limbah POME. Fenomena ini disebabkan karena koagulan berlebih akan membentuk lebih banyak logam hidroksida dan teradsorpsi oleh polutan, sehingga polutan akan bermuatan positif. Muatan positif pada polutan ini menyebabkan gaya tolak antara polutan dan menghambat pembentukan flok (Bahrodin, et al., 2021). Peristiwa ini menyebabkan warna larutan menjadi lebih keruh ketika dilakukan penambahan dosis hingga 8 g/L.

Pada penelitian (Wong et al, 2007), dilakukan koagulasi dengan koagulan alum pada limbah cair industri tekstil dengan karakteristik yang serupa dengan limbah POME. Dalam penelitiannya diperoleh dosis koagulan optimum 6 g/L untuk memperoleh efisiensi penyisihan warna tertinggi sebesar 78,5%. Hasil ini serupa dengan dosis koagulan alum optimum pada penyisihan warna tertinggi limbah POME sebesar 6 g/L. Dalam penelitian lain (Jagaba, et al., 2020), dilakukan analisis penyisihan warna POME dengan menggunakan koagulan alum. Pada penelitiannya, diperoleh penyisihan warna tertinggi 94,41% dengan dosis koagulan 3 g/L, serta pengadukan 250 rpm selama 3 menit dan 30 rpm selama 30 menit. Perbedaan dosis koagulan optimum, yaitu 6 g/L disebabkan karena perbedaan kecepatan pengadukan. Kecepatan pengadukan yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu 200 rpm selama 2 jam. Kecepatan pengadukan yang tinggi dapat mempercepat interaksi koagulan dengan koloid. Namun, kecepatan pengadukan tinggi dalam waktu lama akan menyebabkan flok yang terbentuk terurai kembali, sehingga membutuhkan lebih banyak koagulan untuk mengikat polutan warna (Park, et al., 2016). Oleh karena itu, dibutuhkan dosis 6 g/L untuk menghasilkan efisiensi penyisihan warna tertinggi.

#### **4.1.3 Profil COD**

COD merupakan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik larut dan tidak larut dalam air. Nilai COD yang tinggi menandakan semakin besar tingkat pencemaran air yang terjadi oleh bahan organik (Wirandani, et al., 2017). Penyisihan COD bertujuan untuk menurunkan zat organik yang menyebabkan berkurangnya oksigen terlarut dalam air. Efisiensi penyisihan COD pada variasi dosis koagulan ditunjukkan dalam Gambar 4.3.



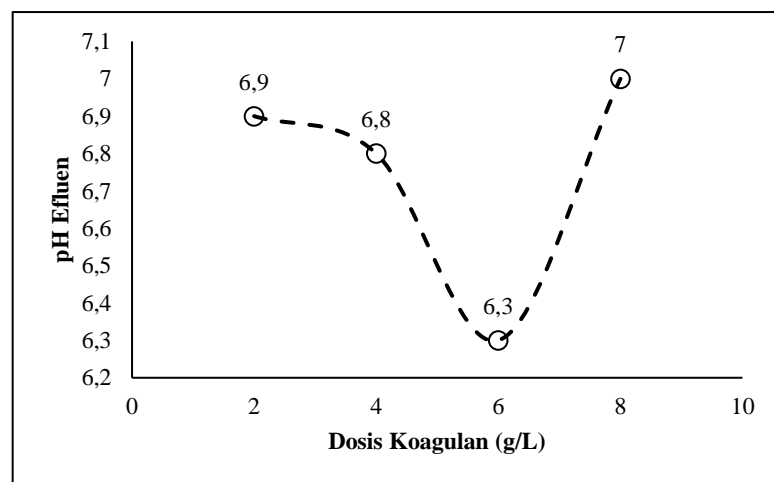
Gambar 4. 3 Efisiensi penyisihan COD pada variasi dosis koagulan

Pada variasi dosis koagulan 2-6 g/L, terjadi peningkatan penyisihan COD dari 29% menjadi 38%. Penambahan alum dengan dosis optimal pada proses koagulasi, menyebabkan pembentukan flok polimer yang berfungsi untuk menetralkan partikel koloid, menyebabkan flokulasi partikel, dan mengikat spesies yang berkontribusi terhadap COD (Pi, et al., 2015). Namun, efisiensi penyisihan COD menurun pada penambahan dosis koagulan 8 g/L menjadi 30%. Pada penambahan koagulan berlebih terjadi stabilisasi ulang flok yang terbentuk dalam sampel dan akumulasi koagulan dalam polutan. Akumulasi koagulan berlebih dalam polutan menyebabkan netralisasi muatan polutan menjadi positif, sehingga polutan tidak akan saling berikatan dan menghindari pembentukan flok.

Pada penelitian (Huzir, et al., 2019), diperoleh dosis koagulan alum optimum untuk penyisihan COD limbah POME sebesar 6,5 g/L dengan pH operasi 6. Perbedaan nilai dosis koagulan optimum pada penelitian ini, yaitu 6 g/L disebabkan karena kondisi pH operasi yang berbeda. Pada penelitian ini digunakan pH operasi 7, di mana pada pH ini terdapat lebih banyak logam hidroksida yang terbentuk dibandingkan dengan kondisi pH 6, sehingga lebih banyak polutan yang terikat bersama flok (Yang, et al., 2010). Oleh karena itu, dengan dosis koagulan 6 g/L mampu menghasilkan efisiensi penyisihan COD tertinggi.

#### 4.1.4 Profil pH

Derajat keasaman (pH) merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi proses koagulasi. Alum atau aluminium sulfat terbentuk dari reaksi netralisasi antara asam sulfat kuat dan basa lemah aluminium hidroksida, sehingga koagulan ini bersifat asam. Pengaruh penambahan dosis koagulan terhadap pH ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 pH efluen terhadap dosis koagulan

Penambahan dosis koagulan 2, 4, dan 6 g/L menghasilkan pH akhir 6,9; 6,8; 6,3 dari pH operasi 7. Penambahan alum dapat menurunkan pH cairan, hal ini disebabkan karena semakin besar dosis koagulan dalam suatu larutan, maka semakin besar juga kandungan ion  $H^+$  dalam larutan tersebut akibat adanya proses hidrolisa (Rusdi, et al., 2014). Selain itu, Alum yang bersifat asam apabila direaksikan dengan air akan membentuk  $H_2SO_4$  yang menurunkan pH (Aziz, et al., 2007). Namun, pada dosis koagulan 8 g/L dihasilkan pH akhir konstan yaitu 7. Hal ini terjadi karena penambahan dosis koagulan berlebih akan terjadi adsorpsi berlebih oleh polutan sehingga terjadi restabilisasi karena kelebihan muatan yang mengakibatkan koloid bermuatan sejenis membentuk gaya tolak menolak (Risdianto, 2007). Kenaikan pH ini terjadi karena pembentukan  $Al(OH)_3$  semakin banyak dan terjadinya restabilisasi mengakibatkan  $Al(OH)_3$  terurai menjadi  $Al^{3+}$  dan  $3OH^-$  (Makki, et al., 2010), sehingga pH yang terbentuk di lingkungan

menjadi netral. Hal ini selaras dengan (Tri, 2016), perlakuan koagulasi pada limbah rumah makan dengan penggunaan dosis alum 250, 500, dan 750 mg/L menurunkan pH awal 6,33 secara berturut-turut menjadi 6,11; 5,85; dan 4,6.

## 4.2 Pengaruh Koagulasi terhadap Produksi Metana

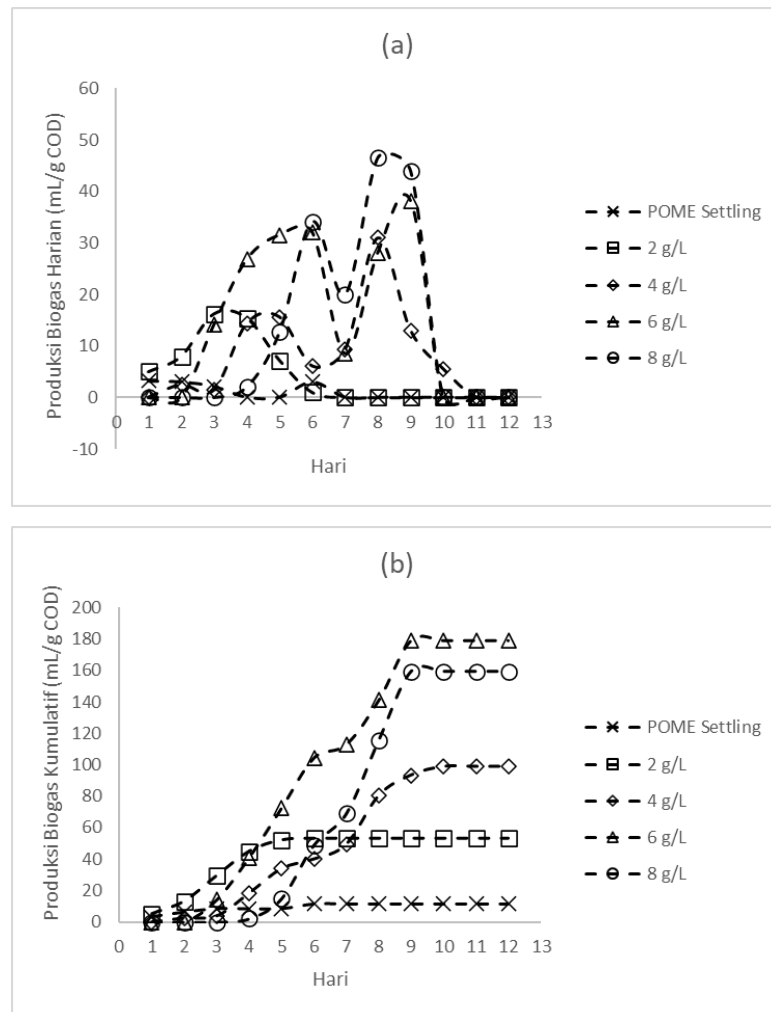
Supernatan hasil koagulasi digunakan sebagai substrat pada pencernaan anaerob. Perlakuan awal koagulasi pada POME mengubah karakteristik POME. Tabel 4.2 menunjukkan perbandingan karakteristik awal POME dan supernatan koagulasi dengan variasi dosis.

Tabel 4. 2 Perbandingan karakteristik POME dan supernatan koagulasi

Parameter	POME <i>Settling</i> 24 Jam	Supernatan Koagulasi dengan Dosis (g/L)			
		2	4	6	8
pH	4,5	6,9	6,8	6,3	7
TS (mg/L)	18.000	16.000	16.000	15.000	17.000
COD (mg/L)	16.950	14.775	14.600	12.775	14.450

### 4.2.1 Produksi Kumulatif Metana

Biogas merupakan gas yang terbentuk dari degradasi bahan organik dalam kondisi anaerobik. Degradasi terdiri dari empat fase utama yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis dan metanogenesis. Pada fase pertama bahan organik seperti karbohidrat, lemak dan protein bereaksi dengan air membentuk monomer dengan bantuan bakteri hidrolitik. Selama fase kedua, konversi monomer menjadi asam lemak volatil (VFA) dilakukan dengan bantuan bakteri fermentasi. Fase ketiga melibatkan transformasi VFA menjadi asam asetat, karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan hidrogen oleh bakteri asetogenik. Selama fase akhir, bakteri metanogen mengubah asam asetat dan hidrogen menjadi metana (CH<sub>4</sub>) dan CO<sub>2</sub> (Mao, et al., 2015). POME memiliki kandungan bahan organik (COD) yang cukup tinggi untuk membentuk metana. Produksi metana harian dan kumulatif pada dosis koagulan 2, 4, 6, 8 g/L dapat dilihat pada Gambar 4.5.



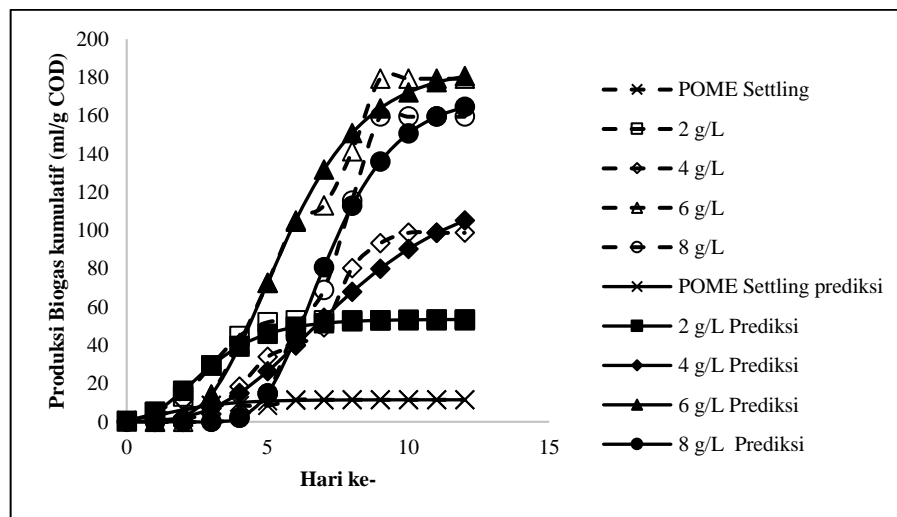
Gambar 4. 5 Produksi metana (a) Harian (b) Kumulatif

Produksi metana harian (mL/g COD) pada masing-masing sampel ditunjukkan pada Gambar 4.5 (a). Produksi metana maksimum pada dosis koagulan 2, 4, 6, dan 8 g/L terbentuk pada hari ke- 3, 8, 9 dan 8 secara berturut-turut sebesar 16,3; 31; 38; 46,6 mL/g COD. Sedangkan untuk POME *settling*, produksi metana maksimum terbentuk pada hari pertama sebesar 3,2 mL/g COD. Berdasarkan data tersebut bahwa perlakuan awal koagulasi dapat meningkatkan produksi metana. *Pretreatment* mengoptimalkan kandungan substrat sehingga produksi metana yang dihasilkan lebih maksimal. pada Gambar 4.5 (b) menunjukkan produksi metana kumulatif (mL/g COD) untuk masing-masing sampel. Produksi metana kumulatif maksimum, yaitu pada dosis 6 g/L sebesar



179,31 mL/g COD dibandingkan dengan dosis koagulan 2, 4, dan 8 g/L secara berturut-turut sebesar 53,02; 98,74; 159,46 mL/g COD. Produksi metana optimum pada dosis koagulan 6 g/L terjadi karena kandungan TS yang optimal pada substrat akan menyebabkan lebih banyak bahan organik yang dihidrolisis dan diubah menjadi VFA (Yi, et al., 2014). Sedangkan penurunan kadar metana pada dosis 8 g/L disebabkan oleh kandungan bahan organik yang melebihi kondisi optimum yang memengaruhi produksi metana menjadi tidak maksimal. Hal ini selaras pada penelitian (Achouri, et al., 2017), pada penggunaan dosis koagulan  $\text{FeCl}_3$  1000 mg/L menghasilkan penurunan produksi biogas (434 mL/g TVS *input*) terhadap dosis koagulan optimum 800 mg/L (837 mL/g TVS *input*).

Produksi metana kumulatif yang diperoleh digunakan untuk membuat model kinetika produksi biogas modifikasi Gompertz. Permodelan tersebut dapat memprediksi konstanta kinetik potensi produksi metana (A), laju pembentukan metana maksimum ( $\mu$ ), dan waktu produksi metana ( $\lambda$ ) dengan menggunakan regresi non-linier seperti pada Tabel 4.3. Perbandingan data metana terukur dan prediksi model modifikasi Gompertz dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Prediksi model modifikasi Gompertz terhadap produksi metana

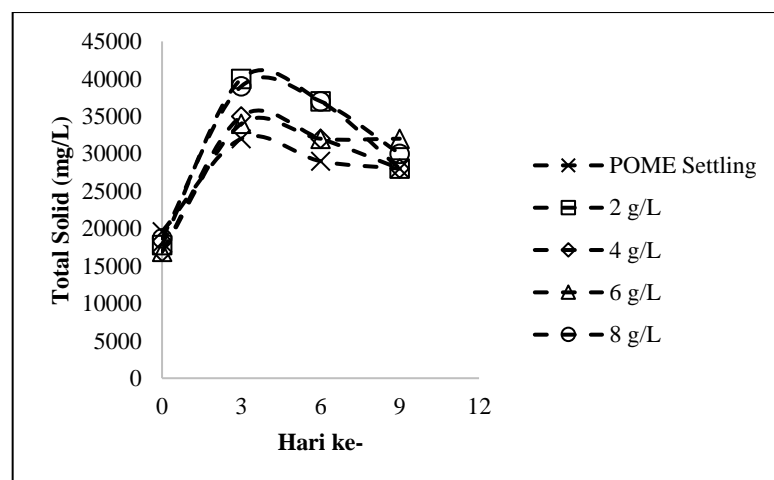
Tabel 4. 3 Parameter prediksi model modifikasi Gompertz

Sampel	Parameter		
	$\lambda$ (Hari)	A (mL/g COD)	$\mu$ (mL/g COD hari)
S	0,00	11,51	3,18
2 g/L	0,80	53,55	13,48
4 g/L	3,21	125,90	14,31
6 g/L	2,89	185,73	34,37
8 g/L	4,83	171,13	37,22

Nilai  $\lambda$  menunjukkan waktu yang dibutuhkan mikroorganisme untuk beradaptasi. Perlakuan koagulasi dengan dosis koagulan yang meningkat (2-8 g/L) memiliki parameter kinetik  $\lambda$  yang besar (0,8 – 4,83 hari) dibanding tanpa penambahan koagulan (0 hari). Hal ini dipengaruhi oleh kadar COD terlalu tinggi mengakibatkan konsumsi nutrisi pada substrat dilakukan dengan cepat oleh bakteri metanogen untuk memenuhi kebutuhan pertumbuhannya dan hanya sedikit yang bereaksi dengan karbon akibatnya gas yang dihasilkan menjadi sangat rendah (Luthfianto, et al., 2012). Nilai A merupakan potensi produksi metana yang menunjukkan besarnya metana yang dihasilkan dalam prediksi. Pengukuran produksi metana dilakukan sampai pembentukan metana berhenti, sehingga laju produksi metana maksimum prediksi tidak berbeda jauh dengan produksi metana terukur. Parameter kinetik  $\mu$  menunjukkan laju produksi metana maksimum (hari). Pada Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa peningkatan dosis koagulan meningkatkan laju produksi metana maksimum (hari). Perlakuan awal koagulasi menghasilkan COD yang lebih baik sehingga dapat di toleransi oleh bakteri pembentuk metana. Nilai  $\mu$  memiliki korelasi linier dengan A. Semakin besar nilai  $\mu$ , semakin besar pula nilai A. Perlakuan koagulasi pada dosis 6 g/L memiliki parameter A tertinggi (185,73 mL/g COD) dengan  $\mu$  (34,73 mL/g COD hari) yang lebih rendah dari dosis 8 g/L (37,22 mL/g COD hari).

#### 4.2.2 Profil TS

TS mengindikasikan banyaknya padatan dalam bahan organik. Pencernaan anaerob membutuhkan bahan organik cukup yang akan digunakan oleh mikroorganisme sebagai substrat dalam membentuk metana. Kadar TS selama pencernaan anaerob disajikan pada Gambar 4.7. Pada penelitian (Wang, et al., 2020) kadar optimum 5-15% TS untuk pencernaan anaerob limbah makanan menghasilkan metana yang maksimal. Pada penelitian ini, perlakuan koagulasi pada limbah pome dengan dosis koagulan 6 g/L menghasilkan kadar TS optimum untuk pencernaan anaerob. Seperti yang disajikan pada Tabel 4.2, perlakuan koagulasi dengan dosis koagulan 2, 4, 6, 8 g/L menghasilkan kadar TS sebesar 16.000; 16.000; 15.000;17.000 g/L (15-17%). Produksi metana pada perlakuan koagulasi dengan dosis 6 g/L dengan kadar TS paling optimum (15%) menghasilkan metana yang maksimum daripada perlakuan koagulasi dengan dosis lain yang memiliki kadar TS lebih tinggi dari batas optimumnya. Kadar TS yang melebihi kadar optimumnya mengakibatkan produksi metana lebih rendah, hal ini dapat terjadi karena kandungan padat yang tinggi, terjadi difusi produk antara (VFA) diperlambat karena resistansi perpindahan massa yang tinggi, sehingga tidak mudah diakses oleh mikroba anaerobik dan metanogen asetiklastik dihambat oleh kandungan padatan yang tinggi (Wang, et al., 2020).

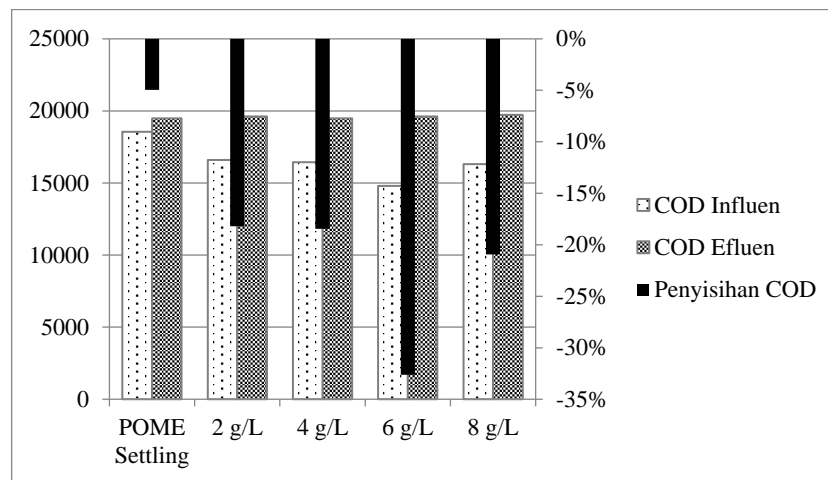


Gambar 4. 7 Profil TS selama pencernaan anaerob

Berdasarkan Gambar 4.7 pada hari ke- 0-3 mengalami kenaikan kadar TS pada dosis koagulan 0 (POME settling), 2, 4, 6, 8 g/L (19.600; 17.800; 16.900; 16.900; 18.700 mg/L) menjadi 32.000; 40.000; 35.000; 34.000; 39.000 mg/L. Efisiensi penyisihan TS pada hari ke-3 terhadap dosis koagulan 0, 2, 4, 6, 8 g/L secara berturut-turut sebesar -63; -125; -107; -101; -109 % diketahui bahwa peningkatan TS pada dosis koagulan 6 g/L paling banyak. Kenaikan kadar TS diduga karena jumlah mikroba meningkat. Mikroorganisme beradaptasi terhadap kondisi medium tempat tumbuhnya (pH dan nutrient) dan membelah diri sehingga populasi mikroorganisme meningkat. Peningkatan jumlah mikroorganisme berbanding lurus dengan kadar TS, sehingga kadar TS juga meningkat. Kandungan TS pada hari ke-3 terus menurun seiring dengan bertambahnya waktu pencernaan anaerob. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan TS didegradasi oleh mikroorganisme menjadi monosakarida, asam amino, alkohol, asam lemak, dan banyak senyawa organik sederhana lainnya (Tri, et al., 2016). Kandungan TS yang optimal pada substrat akan menyebabkan lebih banyak bahan organik yang dihidrolisis dan diubah menjadi VFA (Jing, et al., 2014), di mana VFA merupakan perantara metabolisme utama dalam pencernaan anaerob yang akan didegradasi menjadi metana (Wang, et al., 2020).

#### **4.2.3 Profil COD**

Prinsip pencernaan anaerob, yaitu pemanfaatan bakteri anaerob untuk mengubah polutan organik atau COD menjadi biogas tanpa membutuhkan oksigen. COD yang diubah menjadi Biogas, meliputi metana (CH<sub>4</sub>) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Kadar COD pada substrat memengaruhi pertumbuhan mikroba di dalam *digester*. Persentase penyisihan COD dengan variasi substrat hasil koagulasi dosis 2, 4, 6, dan 8 g/L ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Kadar dan penyisihan COD pada variasi substrat

Efisiensi penyisihan COD bernilai negatif menandakan bahwa COD efluen lebih tinggi dibandingkan dengan COD influen. Efisiensi penyisihan COD dengan substrat hasil koagulasi dosis koagulan 2-6 g/L menurun dari -18% hingga -33%. Sementara itu, pada substrat hasil koagulasi dosis 8 g/L, terjadi kenaikan persentase penyisihan COD kembali hingga -21%. Data ini berarti bahwa efluen pada dosis 6 g/L mengandung lebih banyak kadar COD dibandingkan dengan dosis 2, 4, dan 8 g/L. Fenomena ini disebabkan karena pada substrat hasil koagulasi 6 g/L mengandung bahan organik yang optimal pada Tabel 4.2, sehingga mikroorganisme mendegradasi lebih banyak senyawa organik kompleks menjadi molekul sederhana (Yi, et al., 2014), sehingga diduga terjadi pembentukan produk intermediet berlebih. Hal ini menyebabkan peningkatan kadar COD pada efluen.

#### 4.2.4 Profil pH

Salah satu faktor yang memengaruhi aktivitas mikroba pada pencernaan anaerob, yaitu pH. Terdapat empat tahap pada pencernaan anaerob, yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis yang mana masing-masing tahap dilakukan oleh jenis mikroorganisme yang berbeda. Pada penelitian terdahulu, disarankan kondisi pH *digester* selama fermentasi anaerob dalam kondisi netral atau sedikit basa agar mikroorganisme memproduksi biogas secara

efisien (Bahira et al, 2018). Profil pH untuk setiap variasi substrat ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 9 Profil pH pencernaan anaerob

Profil pH pada masing-masing substrat menunjukkan penurunan pada hari ke-0 hingga 9. Fenomena ini disebabkan karena produksi VFA yang meningkat akibat aktivitas mikroba yang mengubah senyawa COD menjadi VFA. Akumulasi VFA yang terbentuk sebagian besar berupa asam asetat, sehingga menurunkan kondisi pH substrat. Pada hari ke-12, substrat dengan variasi hasil koagulasi dosis koagulan 2-8 g/L kembali menunjukkan peningkatan pH. Fenomena ini menunjukkan bahwa VFA yang terbentuk sudah dikonversi menjadi metana, sehingga kandungan VFA berkurang dan pH kembali meningkat (Sitorus, et al., 2013).

Karakteristik yang dihasilkan dari perlakuan awal koagulasi terhadap pencernaan anaerob dengan parameter pH, TS, dan COD ditampilkan pada Tabel 4.4. Efluen pencernaan anaerob belum memenuhi baku mutu pembuangan limbah Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 pada Tabel 1.2, sehingga perlu dilakukan skenario pengolahan lain yang lebih efektif untuk menghasilkan produksi metana yang maksimal dan efluennya aman dibuang ke badan air.

Tabel 4. 4 Perbandingan efluen koagulasi dan pencernaan anaerob

Parameter	Baku mutu	Supernatan Koagulasi dengan Dosis Alum (g/L)				Efluen Pencernaan Anaerob dengan Dosis Alum (g/L)			
		2	4	6	8	2	4	6	8
pH	6 – 9	6,9	6,8	6,3	7	5,6	5,6	5,3	5,3
TS (mg/L)	-	16.000	16.000	15.000	17.000	28.000	28.000	32.000	30.000
COD (mg/L)	100	14.775	14.600	12.775	14.450	19.620	19.475	19.625	19.720

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Penggunaan koagulan alum pada proses koagulasi mampu menurunkan kadar COD sebesar 25%, warna sebesar 88%, dan TS hingga 15000 mg/L dengan dosis koagulan optimum sebesar 6 g/L. Penurunan kadar COD, warna, dan TS pada proses koagulasi pada POME masih belum memenuhi baku mutu limbah cair yang dapat dibuang ke badan air, sehingga perlu dilakukan skenario pengolahan lebih lanjut untuk limbah POME.
2. Perlakuan awal koagulasi dengan dosis koagulan 6 g/L mampu menurunkan kadar COD dan TS mencapai rentang optimum pencernaan anaerob dengan nilai COD 12.775 mg/L dan TS 15.000 mg/L (15% w/v). Kondisi ini menghasilkan volume metana tertinggi sebesar 179,31 mL/g COD.
3. Pencernaan anaerob dengan substrat hasil koagulasi dosis 6 g/L menghasilkan prediksi kumulatif metana tertinggi menggunakan model Gompertz, dengan parameter kinetik  $\lambda$  (2, 89 hari), A (185,23 mL/g COD), dan  $\mu$  (34,37 mL/g COD hari).

#### **5.2 Saran**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, adapun saran yang diberikan, diantaranya sebagai berikut.

1. Melakukan analisis kadar  $Al^{3+}$  dan  $SO_4^{2-}$  untuk mengetahui pengaruh dosis koagulan terhadap kadar tersebut.
2. Melakukan skenario *treatment* lain agar POME memenuhi baku mutu limbah cair dan dapat dibuang ke badan air.



## DAFTAR PUSTAKA

- A.L., A. & C.Y., C., 2009. Sustainability of palm oil industries. *J. Applied Sci*, Volume 9, pp. 3074-3079.
- A. A. W. W., 2011. *Water quality & treatment: a handbook on drinking water, 6th ed.*. New York: McGraw-Hill.
- Abbasi, t., Tauseef, S. & Abbasi, S., 2012. Anaerobic digestion for global warming control and energy generation—An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 16*, pp. 3228-3242.
- Abdelgadir, A. et al., 2013. Characteristics, Process Parameters, and Inner Components of Anaerobic Bioreactors. *BioMed Research International*.
- Achouri, O. et al., 2017. Effect of chemical coagulation pretreatment on anaerobic digestion of tannery wastewater. *Journal of environment engineering*.
- Ahmad, A., Ghufuran, R. & Wahid, Z. A., 2011. Role of calcium oxide in sludge granulation and methanogenesis for the treatment of palm oil mill effluent using UASB reactor. *Journal of Hazardous Materials*, pp. 40-48.
- Ahmed H. Birima, A. T. A. M. J. M. M. N. L. M. S. Z. C. M. & L. S. W., 2015. Application of salt extracted peanut seeds in the pretreatment of palm oil mill effluent (POME). *Desalination and Water Treatment*, p. 2196–2200.
- Ahmed, Y., Yakoob, Z., Akhtar, P. & Sopian, K., 2014. Production of biogas and performance evaluation of existing treatment processes in palm oil mill effluent (POME). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 1260–1278.
- Aktas, T. et al., 2012. Influence Of Velocity Gradient And Rapid Mixing Time On Floccs Formed By Polysilica Iron (PSI) And Polyaluminum Chloride (PACl).. *Journal Desalination And Water Treatment. Departement Of Civil And Environmental Engineering*.
- Al-Mutairi, N., Hamoda, M. & Al-Ghusain, I., 2004. Coagulant selection and sludge conditioning in a slaughterhouse wastewater treatment plant. *Biores Technol*, pp. 115-119.
- Anggraini, S., Armedi Pinem, J. & Saputra, E., 2016. PENGARUH KECEPATAN PENGADUKAN DAN TEKANAN PEMOMPAAN PADA KOMBINASI PROSES KOAGULASI DAN MEMBRAN ULTRAFILTRASI DALAM PENGOLAHAN LIMBAH CAIR INDUSTRI KARET. *Jom FTEKNIK*.

- Bagi, Z. et al., 2007. Intoksikasi bioteknologi produksi biogas. *Appl Mikrobiol Bioteknol*, pp. 473-482.
- Bahira, B. Y., Baki, A. S. & Bello, A., 2018. Effect of Varying pH on Biogas Generation using Cow Dung. *Direct Research Journal of Biology and Biotechnology*, pp. 28-33.
- Bahrodin, M. B. et al., 2021. Recent Advances on Coagulation-Based Treatment of Wastewater: Transition from Chemical to Natural Coagulant. *Springer Nature Switzerland AG*, pp. 1-14.
- Balavinayagamani, G., Inthurekha, C. & Paulraj, P., 2018. Decolorizing Palm Oil Mill Effluent (POME) Using Plant Polysaccharide Degrading Microorganisms Isolated from Soil. Decolorizing Palm Oil Mill Effluent (POME) Using Plant Polysaccharide Degrading Microorganisms Isolated from Soil. *Pol. J. Environ.*, pp. 629-636.
- Bolto, B. & Gregory, J., 2007. Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Res* 41, p. 2301– 2324.
- Boyd, C. E., 1990. Water Quality in Ponds for Aquaculture. *Alabama Agricultural Experiment Station*, p. 482.
- Bratby, J., 2006. *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment, Second edition*. London, UK: IWA Publishing.
- Ceron-Vivas, A., Cáceres-Cáceres, K. T., Rincón-Pérez, A. & Cajigas, A. A., 2019. Influence of pH and the C/N ratio on the biogas production of wastewater. *Revista Facultad de Ingeniería*, pp. 88-95.
- Chan, Y. et al., 2020. Pre-commercialized integrated anaerobic-aerobic bioreactor (IAAB) for. *J. Oil Palm Environ. Health*, pp. 57-66.
- Chan, Y. J., Chong, M. F. & Law, C. L., 2011. An integrated anaerobic–aerobic bioreactor (IAAB) for the treatment of palm oil mill effluent (POME): Start-up and steady state performance. *Process Biochemistry*, pp. 485-495.
- Cheng, J., 2010. *Biomass to Renewable Energy Process*. USA: CRC Press.
- Chin Yap, C. et al., 2021. Synergistic effect of anaerobic co-digestion of palm oil mill effluent (POME) with *Moringa oleifera* extract. *Biomass and Bioenergy*.
- Choong, Y. Y., Weng Chou, K. & Norli, I., 2018. Strategies for improving biogas production of palm oil mill effluent (POME) anaerobic digestion: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 2993-3006.

- Cordoba, V., Fernandez, M. & Santalla, E., 2016. The effect of different inoculums on anaerobic digestion of swine wastewater. *J Environ Chem Eng*, pp. 115-122.
- Daroini, T. A. & Arisandi, A., 2020. ANALISIS BOD (BIOLOGICAL OXYGEN DEMAND) DI PERAIRAN DESA PRANCAK KECAMATAN SEPULU, BANGKALAN. *Juvenil*, Volume 1, pp. 558-556.
- Darwin, 2018. *Prinsip dan Aplikasi Teknologi Anaerobik Digesti*. Yogyakarta: Deepublish.
- D. J. P., 2020. *STATISTIK PERKEBUNAN UNGGULAN NASIONAL 2019-2021*. s.l.:Direktorat Jenderal Perkebunan.
- Fargues, C. & Turchiuli, C., 2003. STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF FLOCS IN RELATION TO THEIR SETTLING PERFORMANCES. *Institution of Chemical Engineers*, Volume 81, pp. 1171-1178.
- Freitas, T. K. F. S. et al., 2015. Optimization of coagulation-flocculation process for treatment of industrial textile wastewater using okra (*A. esculentus*) mucilage as natural coagulant. *Industrial Crops and Products*, p. 538–544.
- Fujihira, T. et al., 2018. High-rate anaerobic treatment system for solid/lipid-rich. *Bioresour. Technol.* 2, p. 263.
- G. Náthia, N. et al., 2018. Anaerobic digestion process: technological aspects and recent developments. *International Journal of Environmental Science and Technology*, p. 2033–2046.
- Gebbie, P., 2005. A Dummy's Guide to Coagulants. *68th Annual Water Industry Engineers and Operators*.
- Halim, L., 2015. *Peningkatan Produksi Biogas dari Stillage dengan Imobilisasi Bakteri Anaerobik pada Media Padatan Berpori [Tesis]*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Hamzah, M. A. F. et al., 2020. Performance of Anaerobic Digestion of Acidified Palm Oil Mill Effluent under Various Organic Loading Rates and Temperatures. *Water*.
- Hardiana S., S. & Mukimin, A., 2014. PENGEMBANGAN METODE ANALISIS PARAMETER MINYAK DAN LEMAK PADA CONTOH UJI AIR.
- Hayawin, Z. et al., 2018. Reduction of POME final discharge residual using activated bioadsorbent from oil palm kernel shell.. *Journal Clean Prod.*, p. 182.

- Huzir, N. M. et al., 2019. Optimization of coagulation-flocculation process for the palm oil mill effluent treatment by using rice husk ash. *Industrial Crops & Product*, p. 111482.
- Iswanto, B., W., R. S. & Winarni, 2009. PENGARUH pH PADA PROSES KOAGULASI DENGAN KOAGULAN ALUMINUM SULFAT DAN FERRI KLORIDA. *Jurnal Teknik Lingkungan*, pp. Vol. 5 No. 2 (40-45).
- Jagaba, A. et al., 2020. Sustainable use of natural and chemical coagulants for contaminants removal from palm oil mill effluent: A comparative analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, p. 951–960.
- James, P. C. & C. Jeffrey, S., 2007. Microbial Classification. *xPharm: The Comprehensive Pharmacology Reference*, pp. 1-4.
- Ji, C. et al., 2013. Biogas from palm oil mill effluent (POME): opportunities and challenges from Malaysia's perspective. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, Volume 26, pp. 717-726.
- Jijai, S., Muleng, S. & Siripatana, C., 2017. Effect of Dilution and Ash Supplement on the Bio-methane Potential of Palm Oil Mill Effluent (POME). *The 4th International Conference on Research, Implementation, and Education of Mathematics and Science (4th ICRIEMS)*.
- Khadaroo, S. N. et al., 2020. Enhancing the biogas production and the treated effluent quality via an alternative Palm Oil Mill Effluent (POME) treatment process: Integration of thermal pretreatment and dewatering. *Biomass and Bioenergy*.
- Kramanandita, R., Bantacut, T., Romli, M. & Makmoen, M., 2014. Utilizations of Palm Oil Mills Wastes as Source of Energy and Water in the Production Process of Crude Palm Oil. *Chemistry and Materials Research*, Volume 6.
- Krishnan, V., Ahmad, D. & Endut, E. M., 2006. Effect of coagulation on palm oil mill effluent and subsequent treatment of coagulated sludge by anaerobic digestion. *Journal Of Chemical Biotechnol.*
- Lestari, T. & Siska, 2016. Keefektifan Penambahan Dosis Tawas Dalam Menurunkan Kadar TSS (Total Suspended Solid) Pada Limbah Cair Rumah Makan.. *Diss. Universitas Muhammadiyah Surakarta*.
- Liew, Y. X. et al., 2015. Enzymatic Pre-treatment of Palm Oil Mill Effluent (POME) For Enhanced Anaerobic Digestion. *APPCCChE Congress incorporating Chemeca*.
- Lin, J., J.R, P. & C, H., 2013. Enhanced Particle Destabilization And Aggregation By Flash-mixing Coagulation For Drinking Water Treatment. *Journal Separation and Purification Technology*.

- Li, T. et al., 2006. Characterization of floc size, strength and structure under various coagulation mechanisms. *Powder Technology* 168, pp. 104-110.
- Mahmoud Elsayed, Y. A. W. B. A. G. A. A., 2016. Effect of VS organic loads and buckwheat husk on methane production by anaerobic co-digestion of primary sludge and wheat straw. *Energy Conversion and Management*, p. 538–547.
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X. & Ren, G., 2015. REview on research achievement of biogas from anaerobic digestion. *Renew Sustain energy*, pp. 540-555.
- Mao, et al., 2017. Process performance and methane production optimizing of anaerobic co-digestion of swine manure and corn straw. *Scientific Reports*.
- Maulana, L., Suprayogi, A. & W., A. P., 2015. ANALISIS PENGARUH TOTAL SUSPENDED SOLID DALAM PENENTUAN KEDALAMAN LAUT DANGKAL DENGAN METODE ALGORITMA VAN HENGEL DAN SPITZER. *Jurnal Geodesi Undip*, pp. Volume 4, Nomor 2 (ISSN : 2337-845X).
- M. & E., 1991. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse, Third Edition*. New York: McGraw-Hill.
- Menkiti, M., Nwoye, C. I., Onyechi, C. A. & Onukwuli, O. D., 2011. Factorial Optimization and Kinetics of Coal Washery Effluent Coag-Flocculation by Moringa Oleifera Seed biomass. *Advances in Chemical Engineering and Science*, pp. 125-132.
- Mohammad, S. et al., 2021. Palm Oil Mill Effluent Treatment Processes—A Review. *Processes*, pp. 9, 739.
- Moujanni, A.-e., Qarraey, I. & Ouattmane, A., 2018. Anaerobic codigestion of urban solid waste fresh leachate and domestic wastewaters: Biogas production potential and kinetic. *Environmental Engineering Research*, pp. 38-44.
- Narra, M. et al., 2016. Enhanced biogas production from rice straw by selective micronutrients under solid state anaerobic digestion. *Biosource Technology*.
- Park, J., Park, S. & Kim, M., 2014. Anaerobic degradation of amino acids generated from the hydrolysis of sewage sludge. *Environ Technol*, Volume 35, pp. 9-12.
- Pi, K. X. M. Y., X., W. P., Chen, S. Y. M. & Gerson, A. R., 2015. Optimization of COD decrease from tobacco wastewater by Ca/Mg/Al coagulant using RSM. *Journal of Water Process Engineering*, pp. 166-171.

- Qolbi, N., 2019. *KONTAN.CO.ID.* [Online] Available at: <https://amp.kontan.co.id/news/cpo-diprediksi-oversupply-pada-2030-begini-cara-emiten-mengantisipasi> [Diakses Desember 2021].
- Quintero, M. et al., 2012. Enhancement of starting up anaerobic digestion of lignocellulosic substrate: fique's bagasse as an example. *Bioresour Technol*, pp. 8-13.
- Rahayu, A. S. et al., 2015. *Buku Panduan : Konversi POME Menjadi Biogas Pengembangan Proyek di Indonesia*. Jakarta: Winrock International.
- Ramadhan, L., Damayanti, S., Sudibyoy, H. & Budhijanto, W., 2018. Kinetics of Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent (POME) in Double-Stage Batch Bioreactor with Recirculation and Fluidization of Microbial Immobilization Media. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*.
- Risdianto, 2007. OPTIMISASI PROSES KOAGULASI FLOKULASI UNTUK PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI JAMU (STUDI KASUS PT. SIDO MUNCUL). *Tesis Universitas Diponegoro*.
- Rizal, T. A., Mahidin & Ayyub, M., 2015. Pengembangan Anaerobic Digester Untuk Produksi Biogas Dari Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Ilmiah JURUTERA*, pp. 008-019.
- Rusdi, Sidi, T. B. P. & Pratama, R., 2014. Pengaruh Konsentrasi dan Waktu Pengendapan Biji Kelor terhadap pH, Kekeruhan, dan Warna Air Waduk Krenceng.. *Jurnal Integrasi Proses*, pp. 46-50.
- Saifuddin, N. & Dinara, S., 2011. Pretreatment of Palm Oil Mill Effluent (POME) Using Magnetic Chitosan. *E-Journal of Chemistry*, pp. S67-S78.
- Saifuddin, N. & Fazlili, S. A., 2009. Effect of Microwave and Ultrasonic Pretreatments on Biogas Production from Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent. *American J. of Engineering and Applied Sciences* 2, Volume 1, pp. 139-146.
- Sangeetha, T., Rajneesh, C. P. & Yan, W.-M., 2020. Integration of microbial electrolysis cells with anaerobic digestion to treat beer industry wastewater. *Integrated Microbial Fuel Cells for Wastewater Treatment*, pp. 313-346.
- Saritha, V., Srinivas, N. & Srikanth Vuppala, N., 2017. Analysis and optimization of coagulation and flocculation process. *Appl Water Sci*, pp. 451-460.
- Sharma, B., Dhuldhoya, N. & Merchant, U. C., 2006. Flocculants—An Ecofriendly Approach. *J. Polym. Environ.*, pp. 195-202.

- Singh, S., Sai Kaushik, K., Prashanth, B. & Kumar Nayak, S., 2018. Factors affecting anaerobic digestion of organic. *International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering*, 3(2).
- Sitorus, B., Sukandar & Panjaitan, S. D., 2013. Biogas recovery from anaerobic digestion process of mixed fruit -vegetable wastes. *International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application*, pp. 176-182.
- Speece, R., 1996. *Anaerobic Tachnology for Industrial Wastewaters*. USA: Archae Press.
- Suopajarvi, T., 2015. *Functionalized nanocelluloses in wastewater treatment applications*. Oulu, Finlandia: JUVENES PRINT.
- Supranto, S., Tawfiequrrahman, A., Yunanto, D. E. & Kurniawan, I., 2014. Oil Palm Empty Fruit Bunch Fiber Conversion to High Refined Cellulose using Nitric Acid and Sodium Hydroxide as the Delignificating Agents. *AUN/SEED-Net Regional Conference on Chemical Engineering*, pp. 1-16.
- Teh, C., Wu, T. & Juan, J., 2014. Potential Use of Rice Starch in Coagulation-Flocculation Process of Agro-Industrial Wastewater: Treatment Performance and Flocs Characterization.. *Ecological Engineering 71*, pp. 509-519.
- Tri, W., Anwar, H., Prajitno, D. H. & Pujiastuti, L., 2016. Effect OFEM (Effective Microorganism) Addition on the Quality of Methane Production from Rice Straw. *International Journal of ChemTech Research*, pp. 520-528.
- T, T. & BR, D., 2006. Flocculation: a new way to treat the waste water. *J Phys Sci 10*, pp. 93-127.
- Wang, Z. et al., 2020. mpact of total solids content on anaerobic co-digestion of pig manure and food waste: Insights into shifting of the methanogenic pathway. *Waste Management*, pp. 96-106.
- Wardani, R. S., Iswanto, B. & W., 2009. PENGARUH pH PADA PROSES KOAGULASI DENGAN KOAGULAN ALUMINUM SULFAT DAN FERRI KLORIDA. *JTL*, Volume 5, pp. 40-45.
- Wardani, R. S., Iswanto, B. & Winarni, 2009. Pengaruh pH pada Proses Koagulasi dengan Koagulan Alumunium Sulfat dan Ferri Klorida. *JTL*, Volume 5, pp. 40-45.
- Wicheisa, F. V., H., Y. & A., N., 2018. PENURUNAN KADAR CHEMICAL OXYGEN DEMAND (COD) PADA LIMBAH CAIR LAUNDRY ORENS TEMBALANG DENGAN BERBAGAI VARIASI DOSIS KARBON

- AKTIF TEMPURUNG KELAPA. *JURNAL KESEHATAN MASYARAKAT*, pp. Volume 6, Nomor 6 (ISSN: 2356-3346).
- Wirandani, M. Y., Sudarno & Purwono, 2017. Pengolahan Lindi Menggunakan Metode Koagulasi Flokulasi Dengan Koagulan Fecl<sub>3</sub> (Ferric Chloride) Dan Aops (Advanced Oxidation Process) Dengan Fe-h<sub>2</sub>o<sub>2</sub> Studi Kasus : Tpa Jatibarang. *Jurnal Teknik Lingkungan*, pp. 1-17.
- Wongfaed, N., Kongjan, P., Prasertsan, P. & O-Thong, S., 2019. Effect of oil and derivative in palm oil mill effluent on the process imbalance of biogas. *Journal of Cleaner Production*.
- Wong, Pei, T. & T.T, N. N., 2007. Efficiency of the Coagulation-Flocculation Method for the Treatment of Dye Mixtures Containing Disperse and Reactive Dye.. *Water Quality Research Journal of Canada*, pp. 54-62.
- Yang Teh, C., Yeong Wu, T. & Juan, J. C., 2014. Optimization of agro-industrial wastewater treatment using unmodified rice starch as a natural coagulant. *Industrial Crops & Product*, p. 17–26.
- Yang, Z. L., G., B. Y., Y. & Q. Y., W. Y., 2010. Effect of pH on the coagulation performance of Al-based coagulants and residual aluminum speciation during the treatment of humic acid–kaolin synthetic water.. *Journal of Hazardous Materials*, pp. 596-603.
- Yee Shak, K. P. & Yeong Wu, T., 2015. Optimized use of alum together with unmodified *Cassia obtusifolia* seed gum as a coagulant aid in treatment of palm oil mill effluent under natural pH of wastewater. *Industrial Crops & Product*, p. 1169–1178.
- Yi, J., Bin, D., Jingwei, J. & Xiaohu, D., 2014. Effect of Increasing Total Solids Contents on Anaerobic Digestion of Food Waste under Mesophilic Conditions: Performance and Microbial Characteristics Analysis. *PLoS ONE* 9(7): e102548, pp. 1-10.
- Yi, J., Dong, B., Jin, J. & Dai, X., 2014. Effect of Increasing Total Solids Contents on Anaerobic Digestion of Food Waste under Mesophilic Conditions: Performance and Microbial Characteristics Analysis. *PLoS ONE*.
- Zhang, C. et al., 2017. Effect of Parameters on Anaerobic Digestion EGSB Reactor for Producing Biogas. *Procedia Engineering* 205, pp. 3749-3754.
- Zheng, H. et al., 2010. Investigations of coagulation–flocculation process by performance optimization, model prediction and fractal structure of flocs. *Desalination*, pp. 148-156.



Zinatizadeh, A. et al., 2005. Kinetic evaluation of palm oil mill effluent digestion in a high rate up-flow anaerobic sludge fixed film bioreactor. *Process Biochemistry*, pp. 1038-1046.

Zuliyana, 2015. *Peningkatan produksi biogas dari fraksi organik sampah kota dalam reaktor batch dengan pengaturan kadar total solid dan rasio C/N [Tesis]*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.

## LAMPIRAN

### A. Analisa Karakteristik Awal

Karakteristik awal POME dilakukan oleh pihak ketiga, UPTD Laboratorium DLH Serang. Hasil Analisa disajikan pada Tabel A.1.

Tabel A.1 Hasil Analisa Karakteristik awal POME

No	Parameter	Hasil (mg/L)	Kadar Maksimum (mg/L)	Metode
1	BOD	758	30	SNI 06-6989.72-2009
2	COD	20.362,5	100	SNI 06-6989.2-2019
3	Minyak & Lemak	4,86	5	SNI 6989.10-2011
4	Amoniak	50	10	SNI 06-6989.30-2005

\*kadar maksimum berdasarkan baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 Tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik Tersendiri

### B. Analisa pH

Analisa pH dilakukan menggunakan pH meter elektronik di Laboratorium Pengolahan dan Konversi Energi Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Hasil pengukuran pH disajikan pada Tabel B.1.

Tabel B.1 Hasil Analisa pH Koagulasi

Waktu	pH Operasi				pH Effluent			
	2 gr/L	4 g/L	6 g/L	8 g/L	2 gr/L	4 g/L	6 g/L	8 g/L
0	7	6,9	6,9	7	7	6,7	6,6	7
20	6,6	7	6,7	6,8	6,9	6,8	6,3	7,1
40	6,6	6,9	7	6,8	6,9	6,9	6,3	7,1
60	6,6	7	7	6,9	6,9	6,8	6,3	7,1
80	6,6	7	7,1	6,8	6,9	6,8	6,3	7
100	6,7	7	6,9	6,9	6,9	6,8	6,3	7
120	6,7	7	7	7	6,9	6,8	6,3	7

### C. Analisa Total Solid (TS)

Berdasarkan SNI 06-6989.26-2005, untuk menghitung TS dalam sampel dilakukan perhitungan menggunakan persamaan berikut. Sehingga didapatkan hasil pengukuran TS seperti pada Tabel C.1.

$$TS \text{ (mg/L)} = \frac{(W_3 - W_1)}{V \text{ sampel}}$$

Dimana,

$W_3$  : Berat krus + Sampel kering (mg)

$W_1$  : Berat krus kosong (mg)

V sampel : Volume sampel (L)

Tabel C.1 Hasil Analisa TS koagulasi

Sampel/ Dosis (g/L)	$W_1$ (g)	$W_1$ (mg)	$W_3$ (g)	$W_3$ (mg)	Volume sampel (mL)	Volume sampel (L)	TS (mg/L)
Pome Setling	62,98	62.980	63,07	63.070	5	0,005	18.000
Inokulum	60,97	60.990	62,66	61.160	5	0,005	34.000
2	63,66	63.660	63,82	63.820	10	0,01	16.000
4	66,7	66.700	66,85	66.850	10	0,01	15.000
6	63,87	63.870	64,02	64.020	10	0,01	15.000
8	60,99	60.990	61,16	61.160	10	0,01	17.000

### D. Analisa Warna

Analisa warna dilakukan dengan Spektrofotometer di Laboratorium Kimia Dasar Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Tabel D.1 dan D.2 merupakan hasil analisa warna pada masing-masing sampel. Persentase penyisihan warna masing-masing sampel terhadap POME murni pada panjang gelombang 295 nm dengan absorbansi 2,685 dilakukan berdasarkan perhitungan berikut:

$$\% \text{ Penyisihan} = \frac{\text{Absorbansi POME} - \text{Absorbansi sampel}}{\text{Absorbansi POME}}$$

Tabel D.1 Hasil Analisa Warna POME Murni

Panjang Gelombang Maksimum (nm)	Absorbansi
600	0,673
500	0,834
400	1,079
300	2,313
295	2,685
200	0,45

Tabel D.2 Hasil Analisa Warna *Effluent* Koagulasi

Waktu	Absorbansi POME	Absorbansi Akhir				% Penyisihan			
		2 gr/L	4 g/L	6 g/L	8 g/L	2 gr/L	4 g/L	6 g/L	8 g/L
0	2,685	1,118	0,764	0,456	0,784	58%	72%	83%	71%
20	2,685	1,070	0,851	0,423	0,947	60%	68%	84%	65%
40	2,685	1,210	1,062	0,551	0,947	55%	60%	79%	65%
60	2,685	1,222	1,001	0,519	0,922	54%	63%	81%	66%
80	2,685	1,128	1,049	0,525	0,787	58%	61%	80%	71%
100	2,685	1,214	1,065	0,506	0,961	55%	60%	81%	64%
120	2,685	1,191	0,961	0,324	0,941	56%	64%	88%	65%

#### E. Analisa COD

Analisa COD dilakukan oleh pihak ketiga, UPTD Laboratorium DLH Serang. Hasil yang diperoleh disajikan pada Tabel E.1. Persentase penyisihan COD masing-masing sampel terhadap POME murni sebesar 16950 mg/L dihitung berdasarkan rumus berikut.

$$\% \text{ Penyisihan} = \frac{\text{COD POME (mg/L)} - \text{COD sampel (mg/L)}}{\text{COD POME (mg/L)}}$$

Tabel E.1 Hasil Analisa COD proses koagulasi

Dosis koagulan (g/L)	Volume Awal (mL)	Volume Akhir (mL)	Faktor Pengenceran	UPTD DLH (mg/L)	COD (mg/L)	% Penyisihan
POME Setling	5	100	20	847,5	16950	13%
2	5	100	20	738,75	14775	14%
4	5	100	20	730	14600	25%
6	5	100	20	638,75	12775	15%
8	5	100	20	722,5	14450	13%

## F. Produksi Metana

Berikut ini merupakan volume metan harian dan kumulatif (mL)

Tabel F.1 Produksi metana harian dan kumulatif (mL)

VOLUME METANA HARIAN							
Hari ke-	hari/tgl	S	2 g/L	4 g/L	6 g/L	8 g/L	XS
1	30-08-22	18	25	0	0	0	0
2	31-08-22	17	40	12	0	0	1356
3	01-09-22	12	81	7	63	0	1293
4	02-09-22	0	77	71	119	10	1735
5	03-09-22	0	36	77	140	62	1930
6	04-09-22	17	5	30	142	167	0
7	05-09-22	0	0	46	38	98	6
8	06-09-22	0	0	153	125	228	0
9	07-09-22	0	0	64	169	215	0
10	08-09-22	0	0	27	0	0	0
11	09-09-22	0	0	0	0	0	0
12	10-09-22	0	0	0	0	0	0

VOLUME METANA KUMULATIF							
Hari ke-	hari/tgl	S	2 g/L	4 g/L	6 g/L	8 g/L	XS
1	30-08-22	18	25	0	0	0	0
2	31-08-22	35	65	12	0	0	1356
3	01-09-22	47	146	19	63	0	2649
4	02-09-22	47	223	90	182	10	4384
5	03-09-22	47	259	167	322	72	6314
6	04-09-22	64	264	197	464	239	6314
7	05-09-22	64	264	243	502	337	6320
8	06-09-22	64	264	396	627	565	6320
9	07-09-22	64	264	460	796	780	6320
10	08-09-22	64	264	487	796	780	6320
11	09-09-22	64	264	487	796	780	6320
12	10-09-22	64	264	487	796	780	6320

Perhitungan volume metan harian dan kumulatif (mL/g COD) berdasarkan persamaan berikut:

$$\text{COD influen (mg/L)} = \frac{\text{COD sampel (mg/L)} \times \text{vol. sampel (L)} - \text{COD inokulum (mg/L)} \times \text{vol. inokulum (L)}}{\text{Total Volume (L)}}$$

$$\text{COD influen (mg/L)} = \frac{\text{COD sampel (mg/L)} \times 0,27 \text{ L} - \text{COD inokulum (mg/L)} \times 0,03 \text{ L}}{0,3 \text{ L}}$$

$$\text{g COD} = \frac{\text{COD influen mg}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times 0,3 \text{ L}$$

Sampel	Volume (mL)	Volume (L)	COD (mg/L)	COD influen (mg/L)	COD influen (g/L)	g COD
POME Settling	270	0,27	16950	18555	18,555	5,5665
2	270	0,27	14775	16597,5	16,5975	4,97925
4	270	0,27	14600	16440	16,44	4,932
6	270	0,27	12775	14797,5	14,7975	4,43925
8	270	0,27	14450	16305	16,305	4,8915
Inokulum	30	0,03	33000			
Total substrat	300	0,3				

$$\text{Volume metana (ml/g COD)} = \frac{\text{volume metana (harian/kumulatif)}}{\text{g COD}}$$

Tabel F.2 Produksi metana harian dan kumulatif (mL/g COD)

VOLUME METANA HARIAN (mL/g COD)						
Hari ke-	hari/tgl	POME Settling	2 g/L	4 g/L	6 g/L	8 g/L
1	30-08-22	3,233629749	5,020836471	0	0	0
2	31-08-22	3,053983652	8,033338354	2,433090024	0	0
3	01-09-22	2,155753166	16,26751017	1,419302514	14,19158642	0
4	02-09-22	0	15,46417633	14,39578264	26,8063299	2,04436267
5	03-09-22	0	7,230004519	15,61232766	31,5368587	12,67504855
6	04-09-22	3,053983652	1,004167294	6,082725061	31,98738526	34,14085659
7	05-09-22	0	0	9,326845093	8,560004505	20,03475417
8	06-09-22	0	0	31,02189781	28,15790956	46,61146887
9	07-09-22	0	0	12,97648013	38,06949372	43,9537974
10	08-09-22	0	0	5,474452555	0	0
11	09-09-22	0	0	0	0	0
12	10-09-22	0	0	0	0	0

VOLUME METANA KUMULATIF (mL/g COD)						
Hari ke-	hari/tgl	POME Settling	2 g/L	4 g/L	6 g/L	8 g/L
1	30-08-22	3,233629749	5,020836471	0	0	0
2	31-08-22	6,287613402	13,05417483	2,433090024	0	0
3	01-09-22	8,443366568	29,32168499	3,852392539	14,19158642	0
4	02-09-22	8,443366568	44,78586132	18,24817518	40,99791631	2,04436267
5	03-09-22	8,443366568	52,01586584	33,86050284	72,53477502	14,71941122
6	04-09-22	11,49735022	53,02003314	39,9432279	104,5221603	48,86026781
7	05-09-22	11,49735022	53,02003314	49,27007299	113,0821648	68,89502198
8	06-09-22	11,49735022	53,02003314	80,2919708	141,2400743	115,5064909
9	07-09-22	11,49735022	53,02003314	93,26845093	179,3095681	159,4602883
10	08-09-22	11,49735022	53,02003314	98,74290349	179,3095681	159,4602883
11	09-09-22	11,49735022	53,02003314	98,74290349	179,3095681	159,4602883
12	10-09-22	11,49735022	53,02003314	98,74290349	179,31	159,4602883

### G. Kinetika Produksi metana model modifikasi Gompertz

Perhitungan kinetika produksi metana model Gompertz menggunakan data produksi metana kumulatif (ml/gCOD). Perhitungan kinetika produksi metana berdasarkan persamaan berikut.

$$y(t) = A \cdot \exp \left\{ - \exp \left[ \frac{\mu e}{A} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

Keterangan :

$y(t)$  = kumulatif produksi metana (mL/g COD)

$A$  = potensi produksi metana (mL/g COD)

$\mu$  = maksimum laju produksi metana (mL/g COD.hari)

$\lambda$  = waktu minimum produksi metana (hari)

$t$  = waktu kumulatif produksi metana (hari)

$e$  = konstanta matematika (2.718282)

Nilai  $A$ ,  $\mu$ , dan  $\lambda$  mulanya ditebak dengan angka bebas. Persentase error dihitung menggunakan Mean Absolut Percentage error (MAPE). Selanjutnya menggunakan data analysis solver untuk menghasilkan prediksi konstanta  $A$ ,  $\mu$ , dan  $\lambda$  dengan persentase error paling kecil (<5%).

Tabel G.1 Kinetika Produksi metana model modifikasi Gompertz

A	11.51
$\mu$	3.18
$\lambda$	0.00
e	2.71828

POME Settling			
Hari ke-	S Terukur	S Prediksi	Error
0	0	0.75981444	0
1	3.233629749	3.193687527	1.235213215
2	6.287613402	6.287613299	1.63823E-06
3	8.443366568	8.655251503	2.50948403
4	8.443366568	10.06374295	19.19111732
5	8.443366568	10.80566406	27.97814674
6	11.49735022	11.17443519	2.808603892
7	11.49735022	11.35275655	1.257626007
8	11.49735022	11.43786976	0.517340556
9	11.49735022	11.47824552	0.166166136
10	11.49735022	11.49734335	5.97889E-05
11	11.49735022	11.5063643	0.078401393
12	11.49735022	11.51062265	0.115438994
			4.296738439

A 53.55  
 $\mu$  13.48  
 $\lambda$  0.80  
e 2.71828

2 g/L			
Hari ke-	2 g/L Terukur	2 g/L Prediksi	Error
0	0	0.490717954	0
1	5.020836471	5.020836775	6.0399E-06
2	13.05417483	16.22614688	24.29852595
3	29.32168499	29.32165125	0.000115078
4	44.78586132	39.51951327	11.75895227
5	52.01586584	45.94058516	11.67966847
6	53.02003314	49.565353	6.515801551
7	53.02003314	51.50091318	2.865181081
8	53.02003314	52.50575177	0.969975569
9	53.02003314	53.02003087	4.27466E-06
10	53.02003314	53.28135341	0.492870814
11	53.02003314	53.41365888	0.742409454
12	53.02003314	53.48052143	0.868517558
			4.630156009

A 185.73  
 $\mu$  34.37  
 $\lambda$  2.89  
e 2.71828

6 g/L			
Hari ke-	6 g/L Terukur	6 g/L Prediksi	Error
0	0	0.00165002	0
1	0	0.163827907	0
2	0	2.641679061	0
3	14.19158642	14.19158643	1.28439E-07
4	40.99791631	39.22304682	4.329170013
5	72.53477502	72.5296327	0.007089455
6	104.5221603	105.184176	0.633373604
7	113.0821648	131.6944548	16.45908537
8	141.2400743	150.8672418	6.816172728
9	179.3095681	163.790194	8.65507304
10	179.3095681	172.1356573	4.000852193
11	179.3095681	177.386963	1.072226721
12	179.3095681	180.6397564	0.741838993
			3.285760173

A 125.90  
 $\mu$  14.31  
 $\lambda$  3.21  
e 2.71828

4 g/L			
Hari ke-	4 g/L Terukur	4 g/L Prediksi	Error
0	0	0.083349135	0
1	0	0.583178901	0
2	2.433090024	2.433090024	1.46272E-09
3	3.852392539	6.944581174	80.26670712
4	18.24817518	14.9996658	17.80183142
5	33.86050284	26.40195758	22.02727258
6	39.9432279	39.98812823	0.112410378
7	49.27007299	54.23880183	10.08467926
8	80.2919708	67.84338376	15.50414931
9	93.26845093	79.9600993	14.26886744
10	98.74290349	90.21373635	8.637752017
11	98.74290349	98.57031566	0.174785047
12	98.74290349	105.1949164	6.534153549
			13.49327755

A 171.13  
 $\mu$  37.22  
 $\lambda$  4.83  
e 2.71828

8 g/L			
Hari ke-	8 g/L Terukur	8 g/L Prediksi	Error
0	0	5.95705E-19	0
1	0	8.05078E-10	0
2	0	9.15051E-05	0
3	0	0.057632585	0
4	2.04436267	2.044376396	6.71422E-06
5	14.71941122	14.7474185	0.001902745
6	48.86026781	44.04181153	0.098617066
7	68.89502198	80.71402273	0.171550867
8	115.5064909	112.8794873	0.022743342
9	159.4602883	135.9153124	0.147654166
10	159.4602883	150.634721	0.05534649
11	159.4602883	159.4596888	3.759E-06
12	159.4602883	164.5664402	0.032021465
			4.07574318

## H. Dokumentasi

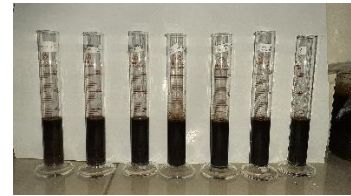
Berikut dokumentasi selama penelitian berlangsung.

### Perbandingan POME mentah dan POME Settling





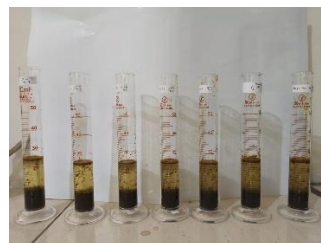
### Proses Koagulasi



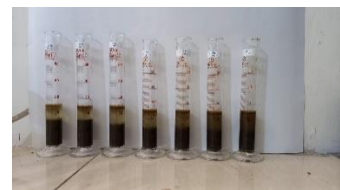
A2



A4



A6



A8

### Proses Pencernaan Anaerob



Hari ke-0



A6 hari ke-3



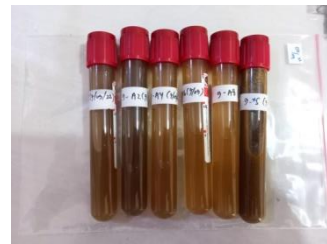
A6 hari ke-7



A6 hari ke-9



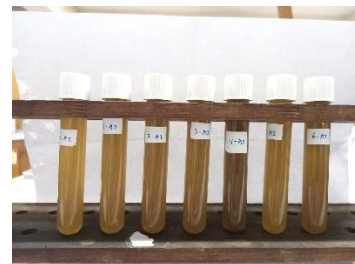
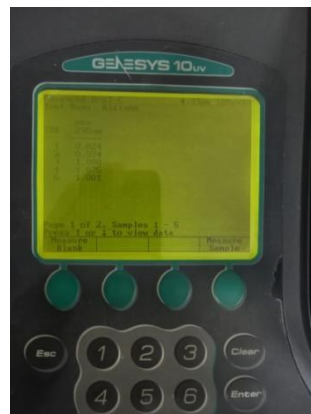
A6 hari ke-12



Analisa TS



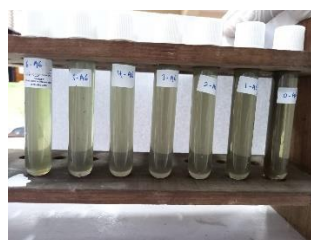
Analisa Warna



A2



A4



A6



A8

