

**PENINGKATAN POTENSI PRODUKSI BIOGAS
MELALUI *PRE-TREATMENT* PERENDAMAN
TANDAN KOSONG SAWIT
DALAM AIR LIMBAH PABRIK KELAPA SAWIT**

(Skripsi)

Oleh

Annisa Azzahra Aguzoen



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRACT

INCREASING BIOGAS PRODUCTION POTENTIAL THROUGH PRE-TREATMENT SOAKING EMPTY FRUIT BUNCHES (EFB) IN PALM OIL MILL EFFLUENT (POME)

By

ANNISA AZZAHRA AGUZAEN

Utilization of EFB to increase biogas production could be developed through mixing of organic materials used. Mixing the ingredients is done by soaking the EFB into the POME. Pre-treatment of EFB (shredding, grinding, and soaking) before it is utilized as a feedstock for biogas production is important to increase the biodegradability of EFB. The evaluation of the impact of EFB utilization on biogas production should be investigated to determine the optimum process conditions for biogas production from EFB and POME. This research consists of three steps: 1) Optimization of size of EFB and ratio of EFB-POME, 2) Optimization of soaking time, and 3) Optimization of biogas production potential. The research result shows that immersing EFB in POME has the potential to increase biogas and methane production. The optimal addition of EFB is the addition of 15% chopped EFB. The research results also show that adding a delay of 3 days provides an increase in methane production, but it is not very significant compared to a delay of 1 day. Therefore, the addition of EFB in POME with a chopped treatment concentration of 15% and a delay time of 1 day is recommended for implementation in palm oil mills to increase biogas production.

Keyword : Biogas, EFB, POME, Palm Oil

ABSTRAK

PENINGKATAN POTENSI PRODUKSI BIOGAS MELALUI *PRE-TREATMENT* PERENDAMAN TANDAN KOSONG SAWIT DALAM AIR LIMBAH PABRIK KELAPA SAWIT

Oleh

ANNISA AZZAHRA AGUZAEN

Pemanfaatan TKKS untuk meningkatkan produksi biogas dapat dikembangkan melalui pencampuran bahan organik yang digunakan. Pencampuran bahan dilakukan dengan cara perendaman TKKS kedalam ALPKS. Perlakuan awal TKKS (penghancuran, penggilingan, dan perendaman) sebelum digunakan sebagai bahan baku produksi biogas penting dilakukan untuk meningkatkan biodegradabilitas TKKS. Evaluasi dampak pemanfaatan TKKS terhadap produksi biogas harus dilakukan untuk menentukan kondisi proses optimal untuk produksi biogas dari TKKS dan ALPKS. Penelitian ini terdiri dari tiga langkah: 1) Optimalisasi ukuran TKKS dan rasio TKKS-ALPKS, 2) Optimasi waktu perendaman, dan 3) Optimasi potensi produksi biogas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perendaman TKKS dalam ALPKS berpotensi meningkatkan produksi biogas dan metana. Penambahan TKKS yang optimal yaitu pada penambahan TKKS perlakuan cacah sebanyak 15 %. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa penambahan waktu tunda selama 3 hari memberikan peningkatan terhadap produksi metana namun tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan waktu tunda 1 hari. Oleh sebab itu, penambahan TKKS dalam ALPKS dengan perlakuan cacah konsentrasi 15% dan waktu tunda 1 hari direkomendasikan untuk diterapkan di pabrik kelapa sawit untuk meningkatkan produksi biogas.

Kata kunci : Biogas, Tandan Kosong Kelapa Sawit, Air Limbah Pabrik Kelapa Sawit, Minyak Sawit

**PENINGKATAN POTENSI PRODUKSI BIOGAS
MELALUI *PRE-TREATMENT* PERENDAMAN
TANDAN KOSONG SAWIT
DALAM AIR LIMBAH PABRIK KELAPA SAWIT**

Oleh

Annisa Azzahra Aguzoen

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNOLOGI PERTANIAN**

Pada

**Jurusan Teknologi Hasil Pertanian
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

Judul : **PENINGKATAN POTENSI PRODUKSI BIOGAS
MELALUI *PRE-TREATMENT* PERENDAMAN
TANDAN KOSONG SAWIT
DALAM AIR LIMBAH PABRIK KELAPA SAWIT**

Nama Mahasiswa : *Annisa Azzahra Aguzoen*
NPM : 2014231037
Program Studi : Teknologi Industri Pertanian
Jurusan : Teknologi Hasil Pertanian
Fakultas : Pertanian

MENYETUJUI,

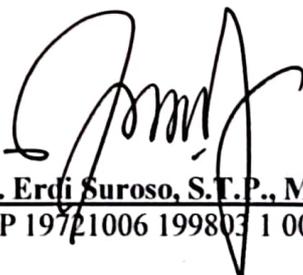
1. **Komisi Pembimbing**



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

Lathifa Indraningtyas, S.T.P., M.Sc.
NIP 19910918 201903 2 023

2. **Ketua Jurusan Teknologi Hasil Pertanian**



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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T.


.....

Sekretaris : Lathifa Indraningtyas, S.TP., M.Sc.


.....

**Penguji
Bukan Pembimbing : Prof. Dr. Sri Hidayati, S.T.P., M.P.**


.....

2. Dekan Fakultas Pertanian




Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.
NIP. 09641118 198902 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 03 Juni 2024

PERNYATAAN KEASLIAN HASIL KARYA

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Annisa Azzahra Aguzoen

NPM : 2014231037

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

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

Bandar Lampung, 03 Juni 2024
Yang membuat pernyataan



Annisa Azzahra Aguzoen
NPM. 2014231037

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Baturaja pada tanggal 17 Juni 2002 sebagai anak Pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Hendra Aguzoen dan Ibu Ratna Dewi.

Penulis menyelesaikan pendidikan sekolah dasar di SD N 43 OKU Kecamatan Baturaja Timur yang diselesaikan pada tahun 2014, Sekolah Menengah Pertama di SMP N 32 OKU Kecamatan Baturaja Timur yang diselesaikan pada tahun 2017, dan Sekolah Menengah Atas di SMA N 01 OKU Kecamatan Baturaja Timur yang diselesaikan pada tahun 2020.

Penulis diterima sebagai mahasiswa Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) pada tahun 2020. Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) pada Januari-Februari 2023 di Desa Sumber Agung Kecamatan Suoh Kabupaten Lampung Barat. Penulis melaksanakan Praktek Umum (PU) di PT. Sumber IndahPerkasa, dengan judul “Mempelajari Proses Pengolahan CPO (*Crude Palm Oil*) Menjadi RBDPO (*Refined Bleached Deodorized Palm Oil*) Pada *Refinery And Fractionation Plant 1* Di PT. Sumber IndahPerkasa”.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam kegiatan kemahasiswaan diantaranya Bendahara bidang *Fundraising and Marketing* Unit Kegiatan Mahasiswa Forum Studi Islam Fakultas Pertanian (FOSI FP) periode 2021/2022, Anggota Legislator Muda Kelembagaan Dan Pengawasan Unit Kegiatan mahasiswa Dewan Perwakilan Mahasiswa Universitas (DPM U) periode 2021/2022, Anggota Bidang Seni Tari Unit Kegiatan Mahasiswa Bidang Seni

(UKMBS). Selain itu, penulis dipercaya menjadi Asisten Dosen mata kuliah “Teknologi Pengelolaan Limbah Agroindustri” pada tahun 2024.

Dengan ketekunan, motivasi tinggi, untuk terus belajar dan berusaha penulis telah berhasil menyelesaikan pengerjaan skripsi ini. Semoga dengan penulisan tugas akhir ini mampu memberikan kontribusi positif bagi dunia pendidikan.

SANWACANA

Alhamdulillah robbil aalamiin, ucapan syukur penulis hanturkan kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan rahmat, pengetahuan, dan karunia serta kemudahan di dunia sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini yang berjudul **“Peningkatan Potensi Produksi Biogas Melalui *Pre-Treatment* Perendaman Tandan Kosong Sawit Dalam Air Limbah Pabrik Kelapa Sawit”**. Skripsi ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan Program Sarjana (S1) di Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari dukungan, bantuan, motivasi dan bimbingan dari berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P., selaku Dekan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Erdi Suroso, S.T.P., M.T.A., selaku Ketua Jurusan Teknologi Hasil Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
3. Bapak Ir. Harun Al Rasyid, M. T., selaku Ketua Program Studi Teknologi Industri Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
4. Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T. selaku pembimbing utama sekaligus pembimbing akademik (PA) penulis yang telah memberikan kesempatan, bimbingan, saran dan masukan kepada penulis selama menjalani perkuliahan hingga menyelesaikan skripsi ini.
5. Ibu Lathifa Indraningtyas, S.TP., M.Sc. selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan banyak sekali bimbingan, arahan, masukan dan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Prof. Dr. Sri Hidayati, S.T.P., M.P. selaku dosen pembahas yang telah memberikan saran serta masukan terhadap skripsi ini.

7. Seluruh Bapak dan Ibu dosen pengajar, staf dan karyawan di Jurusan Teknologi Hasil Pertanian Universitas Lampung, yang telah mengajar, membimbing dan juga membantu penulis dalam menyelesaikan administrasi akademik.
8. Ayah dan ibu penulis, Bapak Hendra Aguzaen dan Ibu Ratna Dewi yang selalu menjadi motivator terbaik bagi penulis serta selalu memberikan do'a terbaik kepada penulis.
9. Adik penulis, Alya Khansa Aguzaen yang selalu memberikan dukungan serta do'a agar penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan lancar.
10. Kakek, nenek, serta keluarga besar penulis yang telah memberikan dukungan agar penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan lancar.
11. Pak Joko dan mba/abang di Laboratorium Pengelolaan Limbah Agroindustri, Dr. Julfi Restu Amelia, M.Si., M. Teguh Angga Saputra, S.T.P., M.T.P., Rada Yoga Yogautami S.T.P., Nurbaiti S.T.P., M.T.P., Asha Aunaya S.T.P., dan Mario yang selalu membantu dan memberikan arahan kepada penulis selama penelitian.
12. Cevan Cantata Gurusinga yang telah selalu membantu, memberikan motivasi, serta memberikan semangat dan dukungan kepada penulis selama perkuliahan, penelitian hingga penulisan skripsi.
13. Sahabat seperjuangan Dona Elmira, Khofifah Tul Napsiyah, Ajeng Pramesti dan Intan Prastiani yang selalu memberikan doa dan semangat kepada penulis.
14. Teman-teman TIP angkatan 2020 yang telah memberikan dukungan dan semangat kepada penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dan kesalahan dalam penyusunan Skripsi. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun serta dapat memberikan manfaat bagi penulis dan bagi pembaca.

Bandar Lampung, 03 Juni 2024
Penulis,

Annisa Azzahra Aguzaen
NPM. 2014231037

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
I. PENDAHULUAN	1
1. 1 Latar Belakang.....	1
1. 2 Tujuan Penelitian.....	3
1. 3 Kerangka Pemikiran	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2. 1. Industri Kelapa Sawit	7
2. 2 Limbah Industri Kelapa Sawit.....	8
2. 2. 1 Air Limbah Pabrik Kelapa Sawit (ALPKS)	8
2. 2. 2 Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)	9
2. 2. 3 Cangkang	11
2. 2. 4 <i>Fiber</i> (serat)	11
2. 3 Biogas	12
2. 4 Perendaman TKKS – ALPKS	14
2. 5 Karakterisasi Filtrat Hasil Perendaman	15
2. 5. 1 pH.....	15
2. 5. 2 <i>Soluble Chemical Oxygen Demand</i> (S – COD)	16
2. 5. 3 <i>Total Volatile Acid</i> (TVA)	17
2. 5. 4 <i>Total Solid</i> (TS)	17
III. METODE PENELITIAN	19
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	19
3. 2 Alat dan Bahan Penelitian	19
3. 3 Metode Penelitian.....	19
3. 4 pelaksanaan Penelitian.....	21

	Halaman
3. 4. 1 Persiapan Bahan Baku	21
3. 4. 2 <i>Pre-Treatment</i>	21
3. 5 Pengujian	23
3. 5. 1 pH.....	23
3. 5. 2 <i>Total Solid (TS)</i>	23
3. 5. 3 <i>Total Volatile Acid (TVA)</i>	23
3. 5. 4 <i>Soluble Chemical Oxygen Demand (S-COD)</i>	24
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	26
4. 1 Karakterisasi <i>Pre-Treatment</i> Perendaman TKKS dan ALPKS.....	26
4. 1. 1 Analisis Parameter pH	26
4. 1. 2 Analisis Parameter <i>Total Solid (TS)</i>	28
4. 1. 3 Analisis Parameter <i>Total Volatile Acid (TVA)</i>	30
4. 1. 4 Analisis Parameter <i>Soluble Chemical Oxygen Demand</i> (S-COD)	32
4. 2 Potensi Peningkatan Produksi Biogas	35
V. KESIMPULAN DAN SARAN	38
5. 1 Kesimpulan.....	38
5. 2 Saran.....	38
DAFTAR PUSTAKA	40
LAMPIRAN.....	47

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Karakteristik Limbah Cair Kelapa Sawit.....	9
2. Karakteristik Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)	10
3. Perlakuan Komposisi TKKS dan ALPKS	20

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka Pemikiran Penelitian	6
2. Kontribusi produksi minyak kelapa sawit per-provinsi.....	7
3. Proses Pembentukan Biogas	13
4. Perendaman TKKS – ALPKS	15
5. Diagram alir <i>pre-treatment</i> produksi biogas.....	22
6. Perubahan nilai pH akibat <i>pre-treatment</i> perendaman TKKS-ALPKS dan waktu tunda	27
7. Perubahan nilai TS akibat <i>pre-treatment</i> perendaman TKKS-ALPKS dan waktu tunda	29
8. Perubahan nilai TVA akibat <i>pre-treatment</i> perendaman TKKS-ALPKS dan waktu tunda	31
9. Perubahan nilai S-COD akibat <i>pre-treatment</i> perendaman TKKS-ALPKS dan waktu tunda	33
10. Potensi peningkatan produksi biogas berdasarkan nilai S-COD	37

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri kelapa sawit mengalami pertumbuhan yang cukup pesat dengan produksi berupa minyak sawit nasional mencapai 51,2 juta ton. Produksi minyak sawit sebagai produk utama tersebut terdiri dari *Crude Palm Oil* (CPO) 46,7 juta ton dan *Crude Palm Kernel Oil* (CPKO) 4,5 juta ton (Gapki, 2022). Selain menghasilkan produk utama, industri kelapa sawit juga menghasilkan 2 jenis limbah berupa limbah padat yang didominasi oleh tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebanyak 20%-23% dan air limbah pabrik kelapa sawit (ALPKS) sebesar 55%-67% (Loekito., 2002). Menurut Shintawati dkk (2019), ALPKS merupakan limbah cair industri kelapa sawit yang paling utama dimana setiap satu ton tandan buah segar kelapa sawit akan menghasilkan sekitar $0,6 \text{ m}^3 - 0,7 \text{ m}^3$ air limbah. Air limbah yang dihasilkan dari proses pengolahan umumnya akan memiliki suhu yang tinggi berkisar $70^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C}$ dan bersifat asam dengan tingkat keasaman (pH) sekitar 4 – 5,5, serta kandungan COD (*Chemical Oxygen Demand*) yang tinggi berkisar antara 80.000 – 120.000 mg/ L (Sagala dkk., 2024).

ALPKS dapat memproduksi gas metan (CH_4) karena kandungan COD tinggi yang dimilikinya sehingga dapat dimanfaatkan menjadi biogas sebagai sumber energi. Namun, pertumbuhan dan perkembangan biogas dari ALPKS masih belum optimal dan merata, hal itu dapat terjadi karena ALPKS yang dihasilkan oleh industri kelapa sawit tergolong fluktuatif sehingga bergantung dengan banyaknya Tandan Buah Segar (TBS) yang diolah oleh setiap perusahaan. Produksi ALPKS yang tergolong fluktuatif tersebut yang menjadi penyebab produksi biogas dari ALPKS masih belum optimal, sehingga diperlukan adanya bahan tambahan (*feed-*

stock) yang berfungsi sebagai substrat untuk menopang produksi biogas agar terus seimbang.

TKKS merupakan salah satu substrat yang dapat diolah menjadi biogas karena kandungan zat organik yang tinggi berupa selulosa sebesar 23,7% – 65,0% dan hemiselulosa sebesar 20,58% – 33,52% yang dimilikinya (Sanjaya dkk., 2023). Kandungan bahan organik tersebut sangat berpotensi besar untuk menghasilkan biogas. Selulosa dan hemiselulosa merupakan sumber karbon organik, sehingga bahan tersebut dapat menjadi bahan baku potensial untuk pembuatan biogas. Zat organik yang terkandung didalam substrat (TKKS) akan diuraikan menjadi gula sederhana sehingga akan mempercepat reaksi hidrolisis dan meningkatkan ketersediaan substrat untuk mikroorganisme mengurainya menjadi gas metan pada saat proses anaerobik berlangsung (Amelia dkk., 2024).

Menurut Pangarso dan Kusdiyantini (2022), secara umum, proses pengolahan ALPKS menjadi biogas terdiri dari 3 tahapan besar yaitu sistem *bio-digester*, pengolahan biogas dan pemanfaatan biogas. Sistem *bio-digester* sendiri menjadi sistem yang paling penting dalam proses pembentukan biogas. Oleh sebab itu, tercatat ada beberapa strategi untuk meningkatkan produksi biogas dalam *digester* mengingat pentingnya proses di *bio-digester* dalam pembentukan biogas. Salah satu strategi untuk meningkatkan produksi biogas tersebut diantaranya adalah pencampuran bahan organik yang digunakan. Pencampuran bahan dilakukan dengan cara perendaman TKKS kedalam ALPKS. Proses perendaman tersebut mengakibatkan bahan organik yang terkandung didalam TKKS tersebut nantinya akan terekstrak sehingga komponen terlarut dari padatan yang berasal dari substrat terdifusi kedalam pelarutnya (Supaya, 2019). Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian untuk mengevaluasi dampak dari penambahan TKKS sebagai *pre-treatment* pada perendaman TKKS dalam ALPKS terhadap produksi biogas.

Berdasarkan penelitian Kahar (2014), limbah padat berupa TKKS memiliki potensi besar untuk dikembangkan dan sangat sesuai untuk digunakan sebagai bahan baku di dalam reaktor biogas. Hal itu dapat terjadi karena TKKS mengandung zat organik berupa selulosa dan hemiselulosa yang dapat

terdegradasi menjadi gas metan. Berdasarkan hasil pengukuran volume biogas TKKS dan ALPKS, pada penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa produksi biogas tertinggi adalah produksi biogas dengan penambahan TKKS sebanyak 5% dimana konsentrasi TKKS sebanyak 5% tersebut merupakan konsentrasi TKKS tertinggi yang digunakan (Kahar, 2014). Saputra (2023), pula menyatakan bahwa pemberian waktu tunda sebagai *pre-treatment* juga dapat meningkatkan produksi gas metana hingga 51%. Namun, nilai optimal waktu tunda dalam produksi biogas dapat bervariasi tergantung pada jenis substrat dan kondisi fermentasi yang digunakan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui potensi peningkatan produksi biogas akibat penambahan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dengan memberikan waktu tunda dan memvariasikan ukuran TKKS sebagai substrat yang digunakan.

1. 2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui karakteristik terbaik (pH, TS, TVA dan S-COD) berdasarkan perlakuan pengecilan ukuran, konsentrasi TKKS dan waktu tunda pada *pre-treatment* perendaman TKKS dalam ALPKS.
2. Untuk mengetahui potensi produksi biogas dan persentase peningkatan biogas berdasarkan nilai S-COD terbaik pada *pre-treatment* perendaman TKKS dalam ALPKS.

1. 3 Kerangka Pemikiran

Biogas sebagai sumber energi terbarukan bukan merupakan hal yang baru di Indonesia, teknologi biogas ini sudah dikenal sejak beberapa tahun terakhir. Namun, pertumbuhan dan perkembangan biogas masih belum optimal dan merata. Umumnya, proses pembuatan biogas dilakukan dengan cara mengolah ALPKS sehingga nantinya akan menjadi biogas. Namun, ALPKS yang dihasilkan pada industri kelapa sawit masih belum stabil tergantung dengan banyaknya kelapa

sawit yang diolah. Hal tersebut yang menyebabkan produksi biogas dari ALPKS masih tergolong fluktuatif.

Selain ALPKS, industri kelapa sawit juga menghasilkan limbah padat salah satunya adalah TKKS. TKKS sebagai limbah padat dari industri kelapa sawit juga memiliki potensi besar dalam pembuatan biogas yang masih belum dimanfaatkan secara optimal. Penelitian terdahulu menyatakan bahwa limbah padat berupa TKKS memiliki potensi besar untuk dikembangkan dan sangat sesuai untuk digunakan sebagai bahan baku di dalam reaktor biogas. Hal tersebut disebabkan karena TKKS mengandung zat organik berupa selulosa dan hemiselulosa yang dapat terdegradasi menjadi gas metan. Selain itu, limbah padat berupa TKKS belum banyak dimanfaatkan sehingga TKKS akan lebih mudah untuk didapatkan.

Menurut Heryadi dan Chaiprasert (2020), TKKS sebagai limbah padat dapat membantu peningkatan produksi biogas. Hal tersebut terjadi karena jika dibandingkan efektivitas penggunaan bahan baku untuk pengolahan biogas antar limbah cair dan limbah padat, limbah padat memiliki potensi yang sangat besar dikarenakan kandungan *solid* (TS) bahan baku padat lebih besar jika dibandingkan dengan limbah cair, yaitu berkisar 30% – 60% TS untuk limbah padat dan hanya < 5% untuk limbah cair. TS menjadi salah satu parameter penting untuk mengukur jumlah padatan berupa zat organik yang berfungsi sebagai bahan baku bagi mikroorganisme untuk memproduksi biogas. Tingginya nilai TS dari *feed-stock* akan membantu dalam meningkatkan produksi biogas.

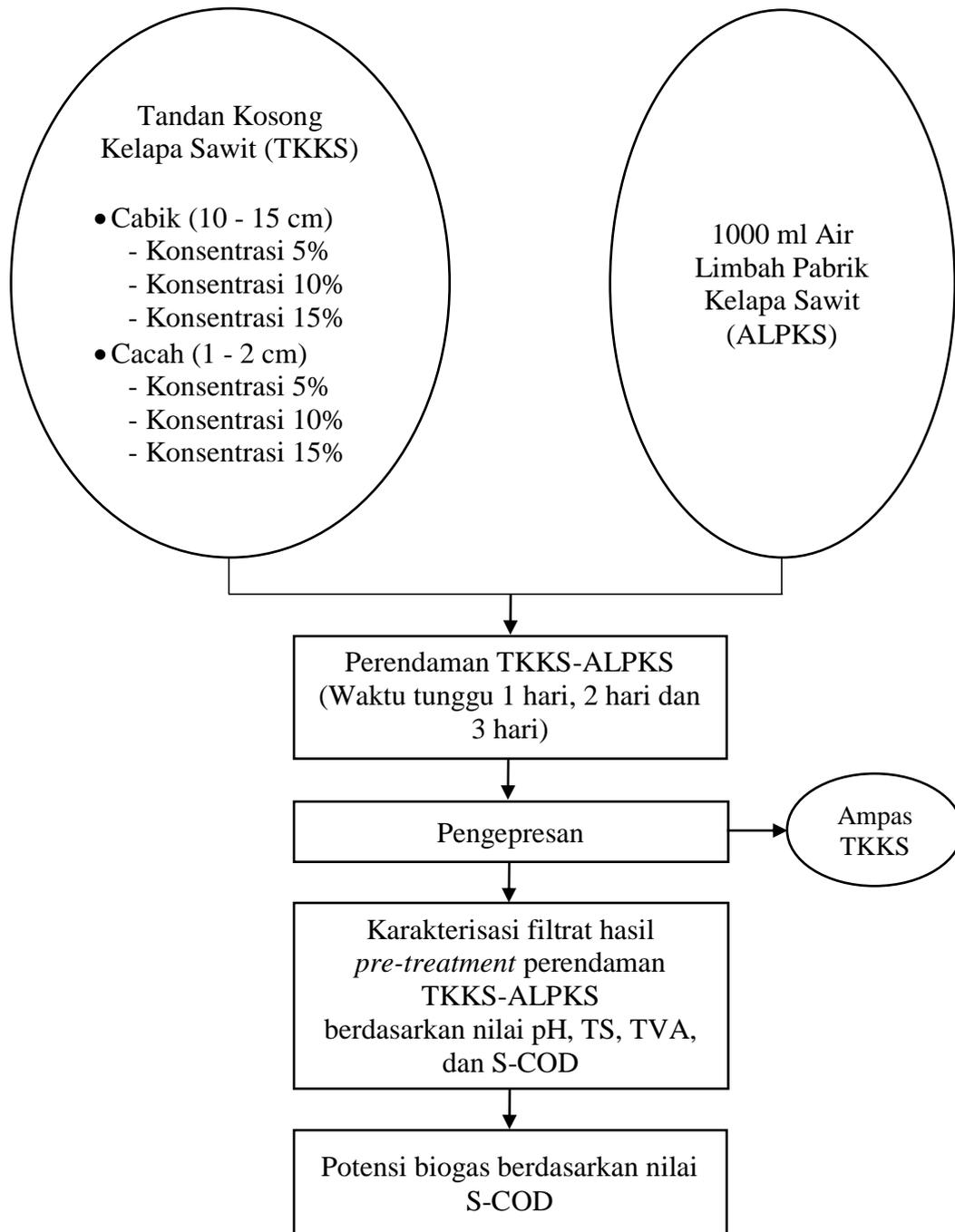
Namun, untuk memaksimalkan potensi biogas yang dihasilkan, maka perlu adanya *pre-treatment* yang dilakukan terhadap TKKS sebelum dimanfaatkan sebagai *feed-stock* pada produksi biogas dengan tujuan untuk memaksimalkan biogas yang dihasilkan dari proses produksi. TKKS yang digunakan akan diberikan *pre-treatment* terlebih dahulu berupa pengecilan ukuran dengan cara di cabik dengan ukuran 10 cm – 15 cm dan juga di cacah dengan ukuran 1 cm - 2 cm. Perlakuan pengecilan ukuran dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan luas permukaan sehingga akan memudahkan proses ekstraksi bahan organik yang

terkandung didalam substrat yang digunakan. TKKS yang telah diberikan perlakuan awal selanjutnya akan ditambahkan dengan 1000 ml ALPKS dengan masing-masing konsentrasi TKKS yang diberikan adalah 5%, 10% dan 15% dari jumlah ALPKS yang digunakan.

Pencampuran dan perendaman TKKS dan ALPKS sebagai *pre-treatment* dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan biodegradabilitas bahan organik serta membantu mengurangi beban yang terjadi ketika proses produksi biogas secara anaerobik berlangsung. Saputra (2023), menyatakan bahwa pemberian waktu tunda pada proses perendaman dapat meningkatkan produksi gas metana hingga 51%. Hal tersebut dapat terjadi karena mikroba pengurai membutuhkan waktu untuk mengurai struktur kompleks yang terkandung didalam zat organik yang berasal dari *feed-stock*. Oleh sebab itu, waktu tunda yang diberikan bertujuan untuk membantu memecahkan ikatan kimia dan struktur kompleks zat organik yang sulit diurai oleh mikroorganisme, sehingga meningkatkan kemampuan mikroorganisme untuk mencernanya menjadi biogas. Namun, nilai optimal waktu tunda yang dilakukan pada proses perendaman dapat bervariasi tergantung pada jenis substrat dan kondisi fermentasi yang digunakan.

Perendaman TKKS – ALPKS yang telah memenuhi waktu tunda kemudian akan di *press* dengan tujuan memisahkan ampas TKKS dari larutan. Larutan yang dihasilkan kemudian akan dikarakterisasi berdasarkan nilai pH, TS, TVA, dan S-COD dengan tujuan untuk mengetahui komposisi dari air limbah serta mengoptimalkan potensi produksi biogas yang dihasilkan.

Berdasarkan uraian diatas, maka kerangka pikir peneliti disajikan pada Gambar 1.

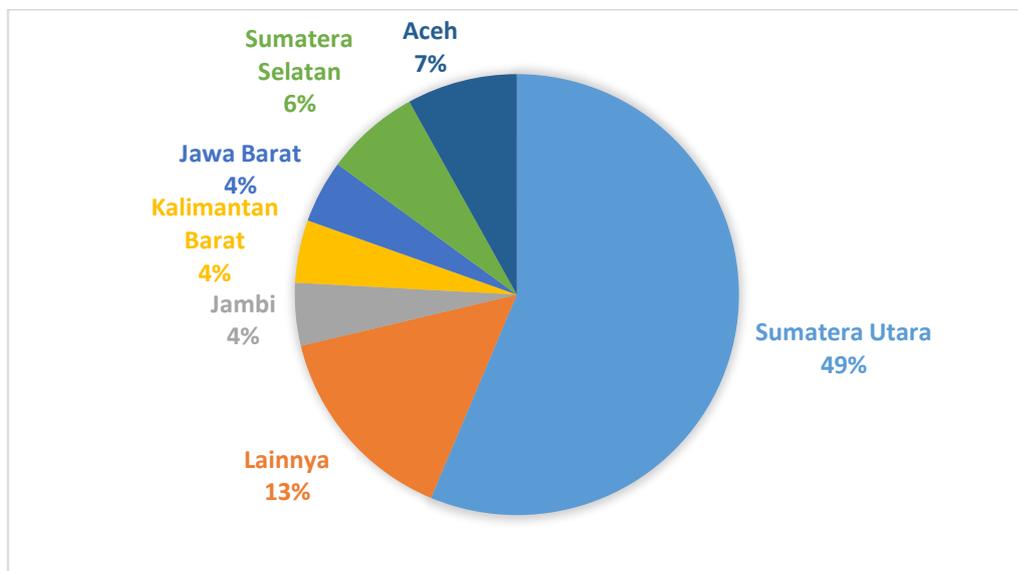


Gambar 1. Kerangka Pikir Penelitian

II. TINJAUAN PUSTAKA

2. 1. Industri Kelapa Sawit

Indonesia menjadi salah satu negara produsen minyak kelapa sawit terbesar di dunia. Minyak sawit disinyalir akan menjadi produk perkebunan yang mempunyai prospek yang cerah di masa yang akan datang karena banyaknya manfaat yang dapat diperoleh dari minyak sawit (Nugrahini dan Pasaribu, 2020). Minyak sawit tersebut dapat dimanfaatkan sebagai bahan mentah industri pangan dan bahan mentah industri Non-pangan (Giraldo et al., 2022). Berdasarkan data produksi rata-rata kelapa sawit per-provinsi di Indonesia sejak tahun 2015 - 2020, diketahui bahwa terdapat sembilan provinsi penghasil kelapa sawit terbesar di Indonesia. Persentase rata-rata kontribusi produksi minyak sawit per-provinsi dari tahun 2015 hingga tahun 2020 berdasarkan data Direktorat Jenderal Perkebunan 2019 ditampilkan pada Gambar berikut :



Gambar 2. Kontribusi produksi minyak kelapa sawit per-provinsi
(Sumber : Sanjaya et al., 2023)

Berdasarkan data yang ditampilkan pada Gambar 2, posisi teratas untuk produsen minyak kelapa sawit di Indonesia diduduki oleh Pulau Sumatera dengan kontribusi mencapai 52,9% yang disusul oleh Provinsi Riau dengan produksi CPO tertinggi di Indonesia mencapai 21,47% atau lebih dari 8 juta ton per tahun (Sanjaya et al., 2023). Tingginya jumlah produksi minyak kelapa sawit ini tentunya akan berbanding lurus terhadap jumlah limbah yang dihasilkan (Mahmod *et al.*, 2022).

2. 2 Limbah Industri Kelapa Sawit

Industri kelapa sawit menghasilkan dua jenis limbah yaitu limbah padat dan limbah cair, adapun limbah yang dihasilkan dari industri kelapa sawit adalah sebagai berikut :

2. 2. 1 Air Limbah Pabrik Kelapa Sawit (ALPKS)

Era ini, Indonesia berhasil menjadi produsen minyak sawit (*crude palm oil*) terbesar di dunia. Namun, dalam proses pengolahannya menghasilkan limbah cair yang sering disebut dengan Air Limbah Pabrik Kelapa Sawit (ALPKS). ALPKS dihasilkan pada tahapan sterilisasi yang bersumber dari kondensat *steam* bercampur dengan kotoran (Abdullah and Sulaim, 2013). Sel-sel yang mengandung minyak akan dipecah didalam alat *digester* yang kemudian terjadilah pelepasan minyak sawit yang masih terkandung di dalam buah. Selanjutnya, minyak akan diekstraksi dengan cara melumat dan menekan buah sawit yang berada dalam *digester*. Tahap tersebut yang akan mengeluarkan hasil samping berupa ALPKS dan serat.

Umumnya, ALPKS akan diuraikan di kolam limbah dan dibiarkan membusuk secara alami. Proses pembusukan biomassa ini nantinya akan menghasilkan biogas dengan gas methana (CH_4) hingga 62% sebagai kandungan utama. Gas methana ini dapat muncul akibat dari proses perombakan senyawa-senyawa organik secara anaerobik. Menurut Mirnandaulia dkk (2019), ALPKS dapat disebut sebagai limbah kompleks karena mengandung molekul organik dengan konsentrasi yang sangat tinggi. Molekul organik yang terkandung didalam

ALPKS berupa asam lemak bebas, karbohidrat, senyawa nitrogen, protein, lemak (termasuk triasilgliserol) dan mineral. Meskipun tidak beracun, namun senyawa organik yang terkandung didalam ALPKS dapat meningkat sehingga dapat menyebabkan pencemaran yang cukup ekstrim. Adapun karakteristik dari limbah cair kelapa cair disajikan dalam tabel 1 :

Tabel 1. Karakteristik Limbah Cair Kelapa Sawit

Parameter	Satuan	Hasil Kolam I
pH	-	4,49
BOD-5	mg/L	10.191,44
COD	mg/L	19.940
Nitrogen	mg/L	500,87
Phosphor	mg/L	89,77
Pottassium	mg/L	7.486,18
Oil and Grease	mg/L	9,78
Nitrate	mg/L	15,66
TOC	mg/L	11.431,60
C/N Ratio	mg/L	23,65

Sumber : Kahar, dkk (2014)

Menurut Maryani dan Umar (2021), ALPKS merupakan limbah sawit yang memiliki karakteristik berwarna kecoklatan dan memiliki kekeruhan yang tinggi karena adanya bahan organik dan padatan tersuspensi yang terkandung didalamnya. Namun, Karakteristik dari ALPKS juga dapat tergantung dari proses produksi dan bahan baku yang digunakan. ALPKS dapat mencemari air karena mengandung *Chemical oxygen demand* (COD) yang tinggi apabila tidak dikelola dengan baik. Oleh sebab itu, pengelolaan ALPKS menjadi penting agar dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan ekosistem perairan karena besarnya kadar COD yang terkandung didalamnya.

2. 2. 2 Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) merupakan salah satu limbah padat yang berasal dari proses pengolahan kelapa sawit. Limbah padat yang dihasilkan dari proses pengolahan kelapa sawit ini berbanding lurus dari jumlah tandan buah segar (TBS) yang dihasilkan. Pada proses pengolahan kelapa sawit, TKKS sendiri merupakan limbah utama yang jumlahnya mampu mencapai 23% dimana setiap pengolahan 1 ton TBS dapat dihasilkan TKKS sebanyak 22%–23% atau

setara dengan 220 kg–230 kg. Namun, pengelolaan limbah TKKS ini masih sangat terbatas sehingga belum banyak dimanfaatkan. Oleh sebab itu, limbah padat berupa TKKS dari proses pengolahan kelapa sawit ini perlu dikelola untuk menghindari timbulnya pencemaran terhadap lingkungan (Warsito dkk., 2016).

Menurut Sreekala, Kumaran and Thomas (1997) dalam Chang (2014), sebagian besar komposisi kimia serat TKKS berupa lignin, selulosa dan hemiselulosa.

Karakteristik lengkap TKKS disajikan dalam tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

Parameter	Nilai (% kering)
Kadar air	2,40 – 14,28
Analisis proksimat	
Volatile matter	70,03 – 83,36
Karbon tetap	8,97 – 18,30
Abu	1,30 – 13,65
Analisis ultimasi	
Karbon (C)	43,80 – 54,76
Hidrogen (H)	4,37 – 7,42
Nitrogen (N)	0,25 – 1,21
Oksigen (O)	38,29 – 47,76
Sulfur (S)	0,035 – 1,10
Komposisi kimia	
Selulosa	23,7 – 65,0
Hemiselulosa	20,58 – 33,52
Lignin	14,1 – 30,45

Sumber : Sanjaya dkk 2023

Namun, menurut Sanjaya dkk (2023), karakteristik dari TKKS dapat berbeda dari satu sumber dengan sumber lainnya. Hal tersebut tergantung pada ukuran, fase pertumbuhan, usia, lokasi geografis, pengaruh iklim untuk pertumbuhan kelapa sawit di lapangan, kondisi tanah, serta metode pengujian yang digunakan.

Berdasarkan komponen kimia yang terdapat dalam TKKS, kandungan selulosa, lignin, dan hemiselulosa dapat dikonversi menjadi produk-produk bernilai tinggi seperti biofuel, asam laktat, biogas, bio-komposit, selulosa asetat, selulosa mikro-kristal, biopolimer, dan sebagainya. Tingginya kandungan selulosa pada TKKS menjadi salah satu alasan TKKS terpilih untuk dijadikan sebagai komponen biomassa yang banyak dieksplorasi untuk dimanfaatkan salah satunya yaitu sebagai substrat dalam pembuatan biogas.

2. 2. 3 Cangkang

Cangkang merupakan bagian terdalam pada buah kelapa sawit. Limbah cangkang adalah limbah yang diperoleh dari pemrosesan kernel inti sawit. Limbah cangkang yang dihasilkan dari industri kelapa sawit ini memiliki bentuk seperti tempurung kelapa dan mempunyai nilai kalor sebesar 3.500 kkal/kg - 4.100 kkal/kg (Susanto dkk., 2017). Cangkang sawit merupakan bagian paling keras dari semua komponen yang terdapat pada tanaman kelapa sawit, karena tekstur yang keras yang dimiliki oleh limbah cangkang itulah yang menyebabkan limbah cangkang tidak dapat diolah menjadi minyak pada saat pengolahan buah kelapa sawit (Arbi dan Irsad, 2018).

Namun, cangkang sawit berpotensi untuk digunakan sebagai bahan arang bahkan bahan bakar untuk boiler. Apabila dibandingkan dengan batu bara, limbah cangkang kelapa sawit memiliki kelebihan karena menjadi bahan bakar yang ramah terhadap lingkungan. Selain itu, limbah cangkang juga tidak mengandung sulfur sehingga tidak akan menghasilkan SO₂ yang berlaku sebagai gas pencemar yang dapat menyebabkan polusi udara. Saat ini, limbah cangkang sawit telah dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler diberbagai industri pengolahan minyak sawit. Selain itu, limbah cangkang sawit ini juga dapat diolah lebih lanjut menjadi briket arang yang berfungsi sebagai bahan bakar alternatif sehingga dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya hasil pertanian dan mengurangi penggunaan bahan bakar fosil (Arbi dan Irsad, 2018).

2. 2. 4 *Fiber* (serat)

Fiber menjadi salah satu jenis limbah padat yang dihasilkan dari proses produksi kelapa sawit selain TKKS dan limbah cangkang. Menurut Susanto dkk (2017), pengolahan satu ton tandan buah segar kelapa sawit menjadi CPO dapat menghasilkan limbah *fiber* sebanyak $\pm 13\%$. Limbah *fiber* berasal dari hasil sisa perasan buah sawit yang berbentuk serabut seperti benang. Limbah *fiber* ini mengandung protein sebesar 4% dan serat kasar sebanyak 36% dengan kandungan lignin sebanyak 26% didalamnya. Selain itu, *fiber* ini juga mempunyai nilai kalor berkisar 2.637 – 3.998 kkal/kg (Susanto dkk., 2017). Tidak hanya itu, menurut

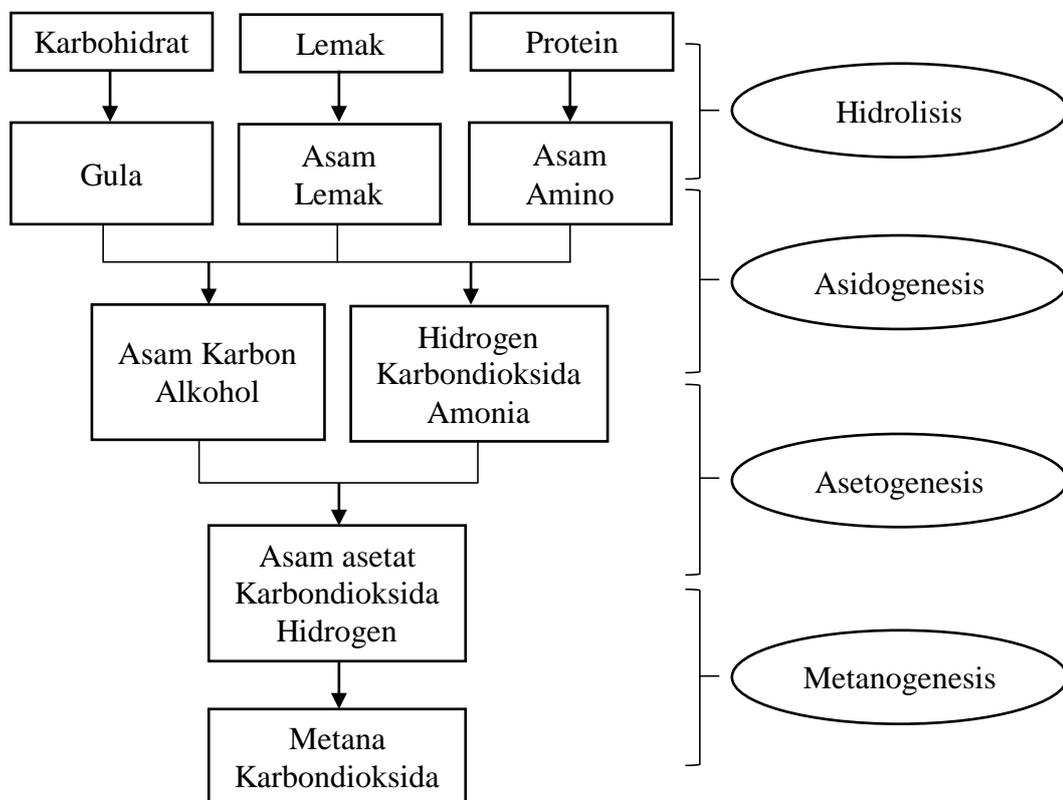
Haryanti dkk (2014), limbah *fiber* kelapa sawit juga mengandung nutrient, fosfor (P), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan karbon (C), sehingga limbah ini dapat menjadi sumber pertumbuhan bakteri, dimana bakteri dapat juga digunakan dalam proses pengolahan limbah.

Dalam pemanfaatan *fiber* kelapa sawit sebagai bahan pengolah limbah cair, limbah *fiber* kelapa sawit akan digunakan sebagai mediator pertumbuhan mikrobiologi berupa Bakteri hidrolis. Mikrobiologi inilah yang nantinya akan sangat berperan aktif dalam menurunkan kadar BOD, COD dan TSS pada limbah kelapa sawit. Semakin tebal limbah *fiber* yang digunakan maka semakin tinggi persentase penurunan BOD, COD dan TSS yang terkandung di dalam limbah cair pada proses pengolahan kelapa sawit. Selain berfungsi untuk menurunkan kandungan negatif pada limbah cair, Hutabarat (2014) dalam penelitiannya juga menyatakan bahwa limbah *fiber* ini juga sudah banyak digunakan pada industri-industri seperti industri otomotif, mebel dan kerajinan rumah tangga.

2.3 Biogas

Biogas merupakan gas yang dihasilkan melalui proses penguraian bahan-bahan organik oleh mikroorganisme yang umumnya dilakukan pada kondisi tanpa oksigen (anaerob). Pada prinsipnya, teknologi yang akan membantu proses fermentasi secara anaerobik oleh bakteri metana sehingga nantinya akan menghasilkan gas metana (CH_4) (Kurniawan dan Auliyah, 2016). Dengan kata lain, Biogas merupakan produk akhir dari proses anaerobik yang terjadi secara alami yang terdiri dari gas metana sebagai komponen utama dan gas karbondioksida serta hidrogen sulfida dan air sebagai komponen ikutannya. Besarnya energi dalam biogas juga tergantung dari konsentrasi metana (CH_4) yang ada dalam biogas tersebut. Semakin tinggi konsentrasi metana, maka akan semakin besar pula kandungan energi pada biogas. Namun, sebaliknya, semakin kecil konsentrasi metana maka akan semakin kecil pula nilai kalor yang dihasilkan dari biogas.

Biogas sendiri merupakan jenis gas yang mudah terbakar yang sifatnya hampir sama dengan gas alam sehingga disinyalir dapat digunakan sebagai sumber energi (Heryadi & Chaiprasert, 2017). Oleh sebab itu, Biogas dapat dikatakan sebagai sumber *renewable energy* yang mampu menyumbangkan andil dalam usaha memenuhi kebutuhan bahan bakar namun dengan menggunakan bahan baku non-fosil sebagai sumber energi. Pembuatan biogas biasanya dilakukan dengan cara fermentasi anaerobik didalam tanki tertutup yang disebut sebagai *bio-digester*. Proses fermentasi tersebut yang nantinya akan mengurai bahan organik yang masih terkandung didalam limbah menjadi biogas yang dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan dan memiliki potensi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca serta menjaga kelestarian lingkungan. Proses pembentukan biogas disajikan pada gambar 3 :



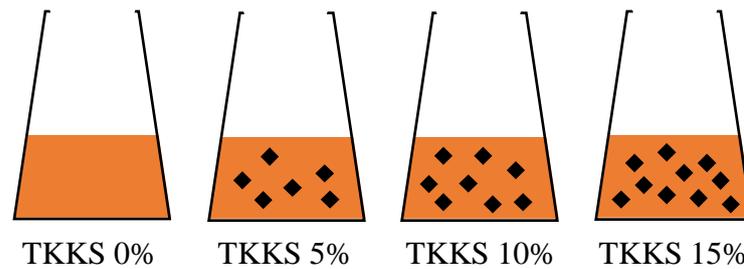
Gambar 3. Proses Pembentukan Biogas
(Sumber : Aji dan Megawati, 2015)

Pada dasarnya, pengolahan biogas pada industri kelapa sawit diintegrasikan dengan pengolahan air limbahnya. Tingginya produksi air limbah pada industri kelapa sawit akan berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak ditanggapi dengan serius. Oleh sebab itu, salah satu olahan ALPKS yang menjanjikan adalah pengolahan ALPKS menjadi biogas. Biogas yang dihasilkan dari ALPKS dapat dijadikan sebagai *alternative bioenergy* terbarukan sehingga nantinya akan dapat meningkatkan keberlanjutan pengolahan minyak sawit (Liew at al., 2021).

Biogas sebagai sumber energi terbarukan akan sangat membantu dalam permasalahan krisis energi. Seperti yang telah diketahui, era ini sumber energi yang berasal dari energi fosil semakin menipis sehingga dapat menimbulkan masalah baru berupa kelangkaan energi. Sumber energi yang tidak dapat diperbaharui telah menimbulkan krisis energi dan membawa dampak buruk bagi bumi. Dengan demikian, sumber energi selain energi fosil berupa *bioenergy* salah satunya biogas benar-benar sangat diperlukan. Biogas ini dapat digunakan sebagai bahan bakar serta sebagai sumber energi alternatif untuk penggerak generator pembangkit tenaga listrik yang nantinya juga akan menghasilkan energi panas (Ermawati dkk., 2023).

2. 4 Perendaman TKKS – ALPKS

Perendaman TKKS - ALPKS dilakukan sebagai *pre-treatment* sebelum proses anaerobik dalam produksi biogas berlangsung. Proses perendaman dilakukan dengan pencampuran 2 bahan organik berupa TKKS dan ALPKS. Proses perendaman dilakukan dengan tujuan untuk memaksimalkan produksi biogas yang dapat digunakan sebagai sumber energi. Hal itu dapat terjadi karena komponen zat terlarut yang berasal dari substrat akan terekstraksi kedalam pelarutnya sehingga akan membantu meningkatkan kandungan bahan organik pada filtrat yang kemudian akan diurai menjadi gas metan pada saat produksi biogas berlangsung (Supaya., 2019).



Gambar 4. Perendaman TKKS – ALPKS

Ketika kedua bahan organik ini dicerna secara bersamaan didalam sebuah wadah, kedua bahan organik tersebut akan memberikan keuntungan tambahan berupa membantu peningkatan gas yang dihasilkan. Hal itu dapat terjadi karena beragamnya bahan organik dalam campuran akan memberikan nutrisi yang berbeda bagi mikroorganismenya sehingga dapat menghasilkan biogas yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan pencernaan bahan tunggal (Juhana dkk., 2020).

2. 5 Karakterisasi Filtrat Hasil Perendaman

Adapun karakteristik filtrat yang harus diperhatikan adalah sebagai berikut :

2. 5. 1 pH

pH merupakan derajat keasaman yang umumnya digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau tingkat kebasaan dari suatu larutan. Menurut Rozaq dkk (2018), pH meter adalah alat yang digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan dari suatu larutan dan sensor pH adalah sensor yang digunakan untuk mengetahui derajat keasamannya. Skala pH berkisar dari 0 – 14 dimana semakin rendah pH suatu larutan menandakan bahwa semakin asam larutan tersebut. Sebaliknya, ketika pH suatu larutan semakin tinggi maka menandakan bahwa basa merupakan sifat dari larutan tersebut. Adapun prinsip utama kerja pH meter terletak pada sensor *probe* berupa elektroda kaca (*glass electrode*) dengan jalan mengukur jumlah ion H_3O^+ di dalam larutan (Mujadin dkk., 2017).

pH merupakan komponen utama yang sangat berpengaruh pada saat proses fermentasi dalam produksi biogas berlangsung. pH memiliki pengaruh besar pada tahap hidrolisis dalam proses fermentasi. Tahap hidrolisis merupakan tahap pemecahan protein pertama yang dilakukan dengan tujuan untuk menghasilkan senyawa organik kompleks yang sederhana seperti asam amino. Umumnya, pH yang dimiliki oleh limbah bebas atau limbah domestik kurang dari 7 yang menandakan limbah tersebut bersifat asam. Sedangkan rentang pH yang baik pada saat pertumbuhan bakteri adalah 6,8 – 7,2 atau bersifat netral. Penggunaan pH di bawah pH netral ini nantinya akan memberikan hasil yang tidak jelas pada proses hidrolisis (Anugrah dkk., 2017). Oleh sebab itu, pH harus selalu dijaga agar tetap netral agar perkembangbiakan bakteri akan tetap optimal sehingga biogas yang dihasilkan akan tetap stabil (Kurniawan dkk., 2017).

2. 5. 2 Soluble Chemical Oxygen Demand (S – COD)

Limbah cair menjadi limbah yang paling banyak dihasilkan dalam suatu industri dan memiliki potensi yang tinggi dalam pencemaran lingkungan. Umumnya, limbah dari suatu industri akan mengandung *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang tinggi. COD merupakan salah satu jenis parameter yang digunakan dalam analisis kimia dengan tujuan untuk mengukur jumlah zat-zat kimia dalam suatu larutan yang dapat dioksidasi. Umumnya, COD digunakan untuk mengukur jumlah oksigen yang diperlukan ketika hendak mengoksidasi zat organik maupun anorganik dalam suatu larutan menjadi senyawa-senyawa oksida dengan memanfaatkan suatu oksidator yaitu kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) sebagai sumber oksigen.

Soluble Chemical Oxygen Demand atau yang biasa dikenal sebagai COD Terlarut mengacu pada zat kimia yang menjadi salah satu bagian dari COD yang terdapat di dalam suatu larutan. S – COD merupakan bagian dari COD yang berasal dari bahan yang benar-benar larut dalam air. Nilai COD merupakan besaran untuk pencemaran air oleh zat organik maupun zat anorganik yang secara alami dapat dioksidasi melalui proses biologis dan nantinya dapat menyebabkan berkurangnya oksigen terlarut dalam air. Oleh karena itu, mengukur COD menjadi salah satu

hal yang penting dalam pengelolaan air limbah karena dapat memberikan informasi tentang tingkat polusi organik dalam suatu larutan (Putra dkk, 2020).

2. 5. 3 Total Volatile Acid (TVA)

TVA merupakan senyawa intermediate yang dihasilkan selama proses asidogenesis. Menurut Friatnanto (2022), ada tiga tahap dalam proses terbentuknya TVA. Tahap pertama yaitu terhidrolisisnya karbohidrat menjadi monosakarida, seperti glukosa, fruktosa dan pentosa. Tahap kedua adalah proses glikolisis, yaitu proses pencernaan hasil dari tahap pertama sehingga akan menghasilkan piruvat. Tahap terakhir yaitu adalah perubahan piruvat menjadi TVA yang umumnya terdiri dari asam asetat, asam butirat dan asam propionat.

Menurut Safira (2022), *Total Volatile Acid* (TVA) merupakan produk antara dari proses pencernaan anaerobik yang nantinya akan dikonversi menjadi asam volatile pada tahap asidogenesis. TVA ini dihasilkan dari dua langkah pertama pada proses pencernaan anaerobik, yaitu hidrolisis dan asidogenesis. TVA menjadi salah satu kondisi proses yang paling sering digunakan sebagai indikator pemantauan. Hal itu dilakukan karena TVA merupakan produk antara utama sebelum produksi metana. Selain itu, akumulasi TVA dalam reaktor dapat menunjukkan ketidakseimbangan proses serta dapat menyebabkan penurunan pH. Oleh sebab itu, Rasio TVA sering dijadikan sebagai tanda peringatan awal dari stabilitas proses anaerobik yang lebih baik dibandingkan dengan pH karena TVA dinilai lebih sensitif terhadap perubahan kondisi proses pencernaan anaerobik apabila dibandingkan dengan uji pH.

2. 5. 4 Total Solid (TS)

Total Solid (TS) merupakan jumlah padatan yang tertinggal yang terdapat pada substrat baik padatan terlarut maupun tidak larut. Menurut Friatnanto (2022), *Total solid* dapat mengindikasikan laju penghancuran atau pembusukan material padatan limbah organik yang terdapat pada biodigester. Padatan (*solid*) umumnya akan terbentuk pada suhu 103°C - 105°C saat proses penguapan berlangsung. *Total Solid* menjadi salah satu parameter terjadinya proses pendegradasian karena

padatan ini akan dirombak oleh mikroorganisme pada saat terjadinya pendekomposisi bahan (Loughrin et al., 2009).

Total Solid biasanya diukur dalam satuan berat atau *volume* tergantung pada metode analisis yang digunakan. Umumnya, nilai TS akan direpresentasikan dalam % bahan baku (Sulistyo, 2012). Nilai *total solid* yang didapat akan menunjukkan aktivitas mikroorganisme dalam menguraikan limbah selama proses fermentasi berlangsung. Ketika proses fermentasi berlangsung, mikroorganisme akan memanfaatkan karbohidrat sebagai sumber energi sehingga nantinya akan menghasilkan molekul air dan karbondioksida. Sebagian besar air akan tertinggal dalam produk dan sebagian lagi akan keluar dari produk (Friatnanto, 2022). Air yang tertinggal dalam produk inilah yang akan menyebabkan kadar air menjadi tinggi dan bahan kering menjadi rendah (Gatot dkk., 2019).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan di Laboratorium Pengelolaan Limbah Agroindustri, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung pada bulan November sampai dengan bulan Desember 2023.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari alat gelas yaitu Erlenmeyer, *beaker glass*, gelas ukur, labu takar, buret, corong kaca, pipet ukur, desikator, cawan porselen, pipet tetes, *rubber bulb*, statif, rak tabung reaksi, penjepit cawan, timbangan digital, neraca analitik, botol semprot, pH meter, *centrifuge*, tabung *centrifuge*, tabung COD, COD reactor DRB 200, multiparameter photometer HI83399, oven, hot plate magnetic stirrer, *laminary airflow*, lemari pendingin sebagai tempat penyimpanan sampel, kertas tabel dan peralatan keselamatan laboratorium

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Air Limbah Pabrik Kelapa Sawit (ALPKS) sebanyak 1000 ml dan *feed-stock* yang berasal dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) sebanyak 5%, 10% dan 15%, serta bahan kimia untuk analisis berupa NaOH 0,1N, H₂SO₄ 0,1N, *Aquadest*, dan *Reagen COD*.

3.3 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan merancang perendaman TKKS dan ALPKS dengan jumlah ALPKS yang ditambahkan sebanyak 1000 ml untuk setiap

perlakuan. Penambahan TKKS berfungsi sebagai *feed-stock* dengan persentase yang dihitung berdasarkan jumlah ALPKS yang digunakan. Perlakuan yang diberikan pada TKKS yaitu pengecilan ukuran partikel dengan pencacahan 10 – 20 *mesh* atau kurang lebih 1 cm – 2 cm dan cabik dengan ukuran 10 cm – 15 cm.

Adapun analisis yang dilakukan pada penelitian ini antara lain :

1. pH
2. *Total Solid* (TS)
3. *Total Volatile Acid* (TVA)
4. *Soluble Chemycal Oxygen Demand* (S-COD)

Metode yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah metode deskriptif menggunakan rata-rata dan standar deviasi yang kemudian akan dianalisis secara deskriptif. Pengamatan dilakukan dengan 2 kali ulangan dimana hasil pengamatan yang telah dilakukan selama penelitian akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Adapun komposisi TKKS dan ALPKS pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3 berikut :

Tabel 3. Perlakuan Komposisi TKKS dan ALPKS

Komposisi TKKS-ALPKS	Perlakuan TKKS		Ulangan
	Cabik (10 cm-15 cm)	Cacah (1 cm - 2 cm)	
0%	0 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	0 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	1
5%	50 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	50 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	
10%	100 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	100 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	
15%	150 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	150 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	
0%	0 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	0 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	2
5%	50 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	50 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	
10%	100 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	100 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	
15%	150 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	150 gr TKKS + 1000 ml ALPKS	

Tabel diatas merupakan kombinasi perlakuan penambahan TKKS kedalam 1000 ml ALPKS dengan kondisi *pre-treatment* TKKS yang berbeda.

3. 4 pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan dengan beberapa tahapan diantaranya adalah persiapan bahan baku berupa Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) yang kemudian akan dilakukan pengecilan ukuran dengan cara di cabik dan di cacah hingga analisis potensi biogas yang dihasilkan dari perendaman TKKS-ALPKS.

3. 4. 1 Persiapan Bahan Baku

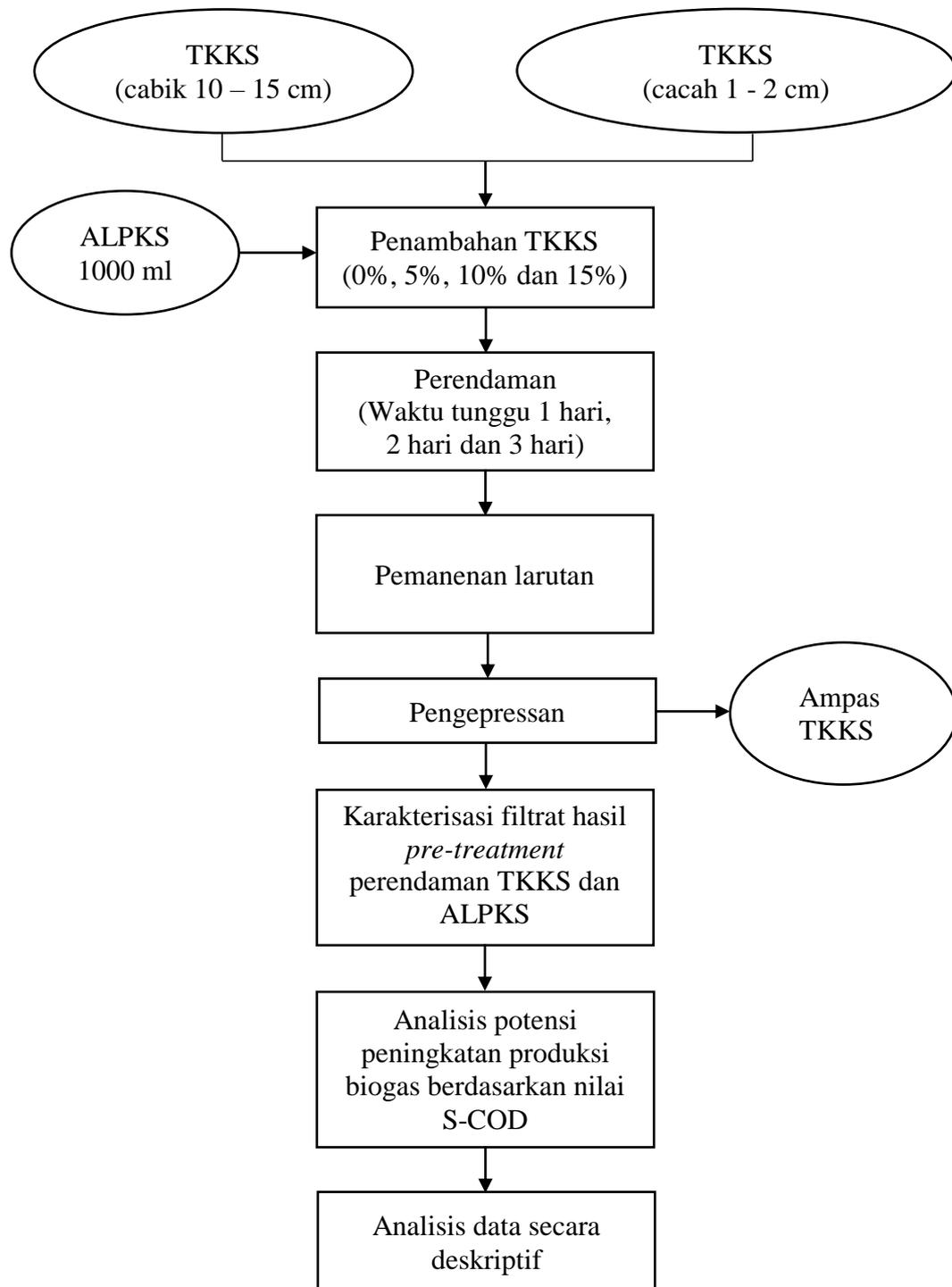
Persiapan bahan baku dimulai dengan mempersiapkan TKKS dan ALPKS yang digunakan. TKKS dan ALPKS yang digunakan pada penelitian ini didapatkan dari perkebunan kelapa sawit milik PTPN VII, Bekri – Lampung Tengah.

3. 4. 2 *Pre-Treatment*

TKKS yang telah ada selanjutnya dilakukan pengecilan ukuran sebagai perlakuan awal dengan cara dicabik dan dicacah. Proses cacah pada penelitian ini dibantu dengan mesin *crusher*. Pada perlakuan cacah ini selanjutnya diayak dengan saringan 10 mesh – 20 mesh sehingga TKKS yang dihasilkan berukuran 1 cm – 2 cm dengan tujuan untuk memastikan TKKS yang digunakan memiliki ukuran yang seragam. Perbedaan perlakuan yang digunakan pada *pre-treatment* TKKS ini dilakukan untuk mencari perlakuan terbaik yang dapat memaksimalkan produksi biogas.

TKKS yang telah diberikan perlakuan berbeda selanjutnya direndam dengan menggunakan ALPKS sebanyak 1000 ml. Perendaman TKKS dilakukan dengan persentase 5%, 10% dan 15% pada masing-masing perlakuan sehingga akan mendapatkan 6 sampel dengan masing-masing sampel akan diulang sebanyak 2 kali. Perendaman dilakukan dengan waktu tunda 1 hari, 2 hari dan 3 hari untuk masing-masing sampel. Rendaman yang telah dipanen selanjutnya dilakukan

pengamatan terhadap nilai pH, TS, TVA dan S-COD untuk mengetahui perlakuan mana yang berpotensi memaksimalkan produksi biogas. Diagram alir *pre-treatment* yang dilakukan pada produksi biogas disajikan pada gambar 5 :



Gambar 5. Diagram alir *pre-treatment* produksi biogas

3.5 Pengujian

3.5.1 pH

Pengukuran pH dilakukan dengan bantuan pH Meter HI 2550 pH/ORP dan EC/TDS/NaCl Meter Hanna instruments. Pengujian pH ini dilakukan dengan metode APHA AWWA WEF *23rd edition* 2017 part 4500 - H + B. Tahap awal yang dilakukan dalam pengujian pH ini ialah mempersiapkan instrument pH. Selanjutnya, elektroda pH dibilas terlebih dahulu dengan menggunakan *aquadest* lalu dikeringkan menggunakan tissue. Kemudian, elektroda pH direndam kedalam sampel hingga bacaan yang tertera pada pH meter stabil. Setelah itu, pH meter kemudian dibilas kembali dengan menggunakan *aquadest* dan dikeringkan kembali menggunakan tissue. Apabila sampel yang akan diuji lebih dari 1, maka tahapan pengujian sampel berikutnya mengikuti tahapan pengujian sampel sebelumnya. Angka pH stabil yang tertera pada layar pH meter pada saat pengujian sampel merupakan nilai pH dari sampel yang diuji. Angka hasil pengukuran tersebut kemudian dicatat pada lembar pengamatan.

3.5.2 Total Solid (TS)

Total solid (TS) merupakan semua padatan yang tertinggal setelah proses pengeringan berlangsung. TS dapat dihitung dengan cara mengurangkan berat cawan + sample dengan cawan kosong yang telah dipanaskan pada suhu 103 - 105°C selama 24 jam sehingga akan didapatkan berat *solid* yang terkandung didalam sampel. Perhitungan TS sesuai dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{TS (g/mL)} = \frac{\text{berat cawan sample setelah dioven (g)} - \text{berat cawan kosong (g)}}{\text{berat sample (mL)}}$$

(SNI 06-6989.26-2005)

3.5.3 Total Volatile Acid (TVA)

Analisis TVA dilakukan bertujuan untuk mengukur padatan yang menguap pada bahan. Hal pertama yang dilakukan pada analisis TVA ini yaitu mempersiapkan bahan pengasam dan basa yang akan digunakan. Bahan pengasam yang

digunakan adalah H_2SO_4 0,1N sehingga H_2SO_4 yang digunakan adalah sebanyak 2,77 mL yang kemudian akan dimasukkan kedalam labu takar 1000 mL. selanjutnya, H_2SO_4 akan diencerkan dengan cara menambahkan *aquadest* hingga batas tera pada labu ukur. Adapun larutan basa yang dibutuhkan untuk proses titrasi pada penelitian ini menggunakan NaOH 0,1N sehingga NaOH yang dibutuhkan adalah sebanyak 4 gr yang kemudian akan dimasukkan ke labu takar 1000 mL untuk diencerkan. Sama halnya dengan pengenceran pada H_2SO_4 , pengenceran yang dilakukan pada NaOH ini pula dilakukan dengan menambahkan *aquadest* hingga batas tera pada labu ukur.

Proses analisis TVA ini dilakukan dengan cara mengukur sampel sebanyak 50 mL yang kemudian akan dimasukkan kedalam Erlenmeyer 250 mL untuk selanjutnya dilakukan pengasaman menggunakan H_2SO_4 0,1 N hingga pH sampel menuju 4. Setelah itu, larutan dipanaskan dengan menggunakan *hotplate and magnetic stirrer fisher scientific* hingga mendidih selama 3 menit dan kemudian sampel didinginkan hingga suhu ruang. Selanjutnya, larutan yang telah dingin kemudian di titrasi menggunakan NaOH 0,1 N hingga pH larutan menjadi netral. Banyak titar yang terpakai pada setiap sampel dicatat pada lembar pengamatan. Adapun rumus perhitungan TVA adalah sebagai berikut :

$$\text{TVA (mg/L)} = \frac{\sum \text{titar NaOH } 0,1 \text{ N} \times 0,1 \times 60}{50} \times 1000$$

3. 5. 4 Soluble Chemical Oxygen Demand (S-COD)

Analisis S-COD dilakukan dengan cara menimbang sampel sebanyak ± 50 gr larutan yang kemudian akan dimasukkan kedalam tabung *centrifuge*. Proses *centrifuge* pada penelitian ini dilakukan selama 10 menit dengan kecepatan 3.500 rpm dengan tujuan untuk memisahkan padatan terlarut yang terdapat di dalam larutan sampel. Larutan yang telah terpisah selanjutnya diambil sebanyak 10 ml dengan menggunakan pipet tetes yang kemudian dimasukkan kedalam labu ukur 100 ml untuk dilakukan pengenceran. Pengenceran dilakukan sebanyak 10 kali dengan cara menambahkan *aquabidest* kedalam labu ukur 100 ml hingga batas tera. Selanjutnya, sampel yang telah diencerkan diambil sebanyak 0,2 ml

menggunakan pipet ukur dan dimasukkan kedalam vial yang telah berisi *reagent COD* untuk kemudian dipanaskan dengan suhu 150°C selama 2 jam. Pemanasan dilakukan dengan menggunakan *reactor DBR200*. Vial yang telah dipanaskan selanjutnya didinginkan terlebih dahulu hingga suhu ruang kemudian diukur nilai COD nya dengan menggunakan multiparameter photometer HI83399. Hasil analisis S-COD yang didapatkan kemudian dicatat pada lembar pengamatan.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Karakteristik terbaik yaitu nilai pH sebesar 5,07, nilai TS sebesar 4,11%, nilai TVA sebesar 7.920 mg/L dan nilai S-COD sebesar 32.820 mg/L diperoleh dari *pre-treatment* perendaman TKKS dalam ALPKS perlakuan cacah, konsentrasi 15% dan waktu tunda 3 hari.
2. Potensi peningkatan produksi biogas pada pabrik kelapa sawit dengan kapasitas produksi TBS 30 ton/jam dengan jam kerja selama 20 jam/hari adalah sebesar 15.768 m³/hari dan persentase peningkatan sebesar 77,34% diperoleh dari *pre-treatment* perendaman TKKS dalam ALPKS perlakuan cacah, konsentrasi 15% dan waktu tunda 3 hari.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, diketahui nilai S-COD tertinggi diperoleh dari penambahan TKKS perlakuan cacah konsentrasi 15% dengan waktu tunda 3 hari yaitu sebesar 32.820 mg/L berpotensi menghasilkan biogas sebesar 15.768 m³/hari. Namun, peningkatan nilai S-COD tertinggi diperoleh pada penambahan TKKS perlakuan cacah 15% dan waktu tunda 1 hari yaitu mencapai 73,18% dibandingkan kontrol dengan nilai S-COD sebesar 32.055 mg/L yang berpotensi menghasilkan biogas sebesar 15.400 m³/hari. Dengan demikian, penggunaan TKKS perlakuan cacah konsentrasi 15% dengan waktu tunda 3 hari tidak berubah signifikan dibandingkan dengan TKKS perlakuan cacah konsentrasi 15% dengan waktu tunda 1 hari. Oleh sebab itu, penambahan TKKS perlakuan

cacah konsentrasi 15% dengan waktu tunda 1 hari sebagai *pre-treatment* perendamam TKKS-ALPKS dinilai lebih menguntungkan untuk produksi biogas dibandingkan dengan penambahan TKKS perlakuan cacah konsentrasi 15% dengan waktu tunda 3 hari.

DAFTAR PUSTAKA

- Aji, K. W. dan Megawati. 2015. Pengaruh Penambahan EM4 (*Effective Microorganism-4*) pada pembuatan biogas dari eceng gondok dan rumen sapi. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 4 (2) : 42 – 49.
- Amelia, J. R., Indraningtyas, L., Aguzoen, A. A., Hasanudin, U. 2024. Study on Co-Digestion of Palm Oil Mill Effluent and Empty Fruit Bunches to Improve Biogas Production in Palm Oil Mill. *Journal of Ecological Engineering*, 25 (6) : 334 – 349.
- Anugrah, E. T., Nurhasanah., dan Nurhanisa, M. 2017. Pengaruh pH dalam produksi biogas dari limbah kecambah kacang hijau. *PRISMA FISIKA*, 5 (2) : 72 – 76.
- Anwar, H., Widjaja, T., dan Prajitno, D. H. 2021. Produksi biogas dari jerami padi menggunakan cairan rumen dan kotoran sapi. *CHEESA*, 4 (1) : 1 – 10.
- Arbi, Y dan Irsad, M. 2018. Pemanfaatan limbah cangkang kelapa sawit menjadi briket arang sebagai bahan bakar alternatif. *Journal of Civil Engineering and Vocational Education*, 5 (4) : 2622 – 6774.
- Chang, S. H. 2014. An overview of empty fruit bunch from oil palm as feedstock for bio-oil production. *Biomass and Bioenergy*, 62 : 174 – 181.
- Fatichuddin, M., dan sinaga, N. 2016. Pengaruh komposisi air terhadap kebutuhan daya kompresor pada sistem pembangkit listrik biogas dari limbah tandan kosong kelapa sawit. *Momentum*, 12 (2) : 1 – 7.
- Fitriani, Kurniawan, E., dan jalaluddin. 2021. Pemanfaatan limbah cair industri kelapa sawit sebagai pupuk organik cair dengan penambahan abu tandan kosong kelapa sawit. [*Prosiding SNST*] : 39 – 44.
- Friatnanto, M. 2022. Peningkatan biodegradability campuran onggok pada limbah cair effluent anaerobik land digester untuk meningkatkan potensi biogas di industri tapioka. [*Skripsi*]. Lampung : Universitas Lampung.

- Gatot, Yulianto., Andareswari, N., dan Hariyadi, S. 2019. Karakteristik dan strategi pengelolaan limbah cair usaha tapioka di bogor utara. *Ecolab*, 13 (2) : 84 – 95.
- Giraldo, D. G., Hernandez, C. Z., Santa, J. F., and Sierra, R. B. 2022. Palm oil as a biolubricant: Literature review of processing parameters and tribological performance. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 107 : 31 – 44.
- Haryanti, A., Norsamsi., Sholiha, P, S, F., dan Putri, N. P. 2014. Studi pemanfaatan limbah padat kelapa sawit. *Konversi*, 3 (2) : 57 – 66.
- Heryadi, E., and Chaiprasert, P. 2017. Potential of Methane Production of Oil Palm Decanter Cake (OPDC) under Various Inoculum Seeds and Pretreatments. *Biotechnology International Congress (BIC)* (1): 1–6.
- Heryadi, E., and Chaiprasert, P. 2020. Enhancement of Methane Production from High Solid Anaerobic Digestion of Pretreated Palm Oil Decanter Cake Using a Modified Solid Inclined Reactor. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 95 (3): 781 – 90.
- Hutabarat, U. 1. J. 2014. Sifat mekanik komposit *fiber glass* dengan penguat serat sabut buah kelapa sawit berorientasi presentase jumlah serat secara random. *Jurnal Poliprofesi*, 8 (2) : 18 – 27.
- IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2019. *Chapter 6: Wastewater Treatment and Discharge*. Vol 5: Waste. IPCC, Switzerland.
- Juhana, S., Hermawan, P., Winata, W. F., Wresta, A., dan Yanti, I. 2020. Pembuatan biogas dari limbah BHO penyamakan kulit dengan starter effluent digester aktif dan co-digestion dengan kotoran sapi. *Majalah Kulit Politeknik ATK Yogyakarta*, 19 (2) : 35 – 43.
- Kahar, A., Aisya, I., dan Sari W. W. 2014. Penambahan tandan kosong kelapa sawit untuk meningkatkan produksi biogas pada pengolahan air limbah secara anaerobik. *Jurnal Purifikasi*, 14 (1) : 11-20.
- Kahar, A., Warmadewanthi, I., Hermana, J. 2018. *Effect of pH on liquid-phase mass transfer and diffusivity coefficient at leachate treatment of municipal waste landfill in anaerobic bioreactor*. *Journal Eksergi*, 15 (2) : 24 – 33.

- Kurniawan, A. R., dan Auliyah, H. 2016. Pembuatan biogas dari vinasse : limbah industri biogas. [*Tugas Akhir*]. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Kurniawan, M. I., Kirom, M. R., dan Suhendi, A. 2017. Pengaruh pH terhadap produksi biogas dengan campuran substrat kotoran hewan dan limbah kulit pisang pada reaktor anaerob. *e – Proceeding of Engineering*, 4 (3) : 3977 – 3984.
- Kusuma, G. P. A. W., Nocianitri, K. A., Pratiwi, I. D. P. K. 2020. Pengaruh lama fermentasi terhadap karakteristik *fermented rice drink* sebagai minuman probiotik dengan isolat *Lactobacillus sp.* F213. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Pangan*, 9 (2) : 182 – 193.
- Levia, D., dan Mhubaligh. 2023. Analisis proses produksi CPO untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas mutu CPO. *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan*, 2 (2) : 82 – 89.
- Liew, Z. K., Chan, Y. J., Ho, Z. T., Yip, Y. H., Teng, M. C., Bin, A. I. T. A. A., Chong, S., and Show, P. L. 2021. Biogas production enhancement by co-digestion of empty fruit bunch (EFB) with palm oil mill effluent (POME): Performance and kinetic evaluation. *Renewable Energy* 179 : 766 – 777.
- Loekito, H. 2002. Teknologi pengelolaan limbah industri kelapa sawit. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 3 (3) : 242 – 250.
- Loughrin, J. H., M. B. Vanotti., A. A. Szogi, and N. Lovanh. 2009. Evaluation of Second-Generation Multistage Wastewater Treatment System for the Removal of Malodors from Liquid Swine Waste. *Journal of Environmental Quality*, 38 : 1739 – 1748.
- Mahmod, S. S., Arisht, S. N., Jahim, J. M., Takriff, M. S., Tan, J. P., Luthfi, A. M. I., and Abdul, P. M. 2022. Enhancement of biohydrogen production from palm oil mill effluent (POME): A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (96) : 40637 – 40655.
- Maryani, D. dan Umar, L. 2021. Identifikasi limbah palm oil mill effluent (POME) menggunakan biosensor berbasis alga. *JoP*, 7 (1) : 1 – 6.
- Melinda, E., Andrio, D., dan Yenie, E. 2020. Karakterisasi dan potensi pemanfaatan *palm oil mill effluent* (POME) menjadi biogas. *JOM FTEKNIK*, 7 (1) : 1 – 4.

- Mirnandaulia, M., Rachmiadji, I., dan Exadius, G. 2019. Pemanfaatan *palm oil mill effluent* (POME) sebagai alternatif energi terbarukan di salah satu perusahaan kelapa sawit sumatera utara. *Regional Development Industry & Health Science, Technology and Art of Life* : 25 – 29.
- Mujadin, A., Astharini, D., & Octarina, N. S. 2017. Prototipe Pengendalian pH dan Elektro Konduktivitas Pada Cairan Nutrisi Tanaman Hidroponik. *Jurnal Alazhar Indonesia Seri Sains Dan Teknologi*, 4 (1) : 2 – 7.
- Nugrahini, P., dan Pasaribu, R. P. 2020. Pengaruh Penambahan Npk Dalam Pendegradasian Limbah Cair Kelapa Sawit Menggunakan Anaerobic Baffled Reactor. *Jurnal Kelitbangan*, 8 (03) : 281 – 296.
- Nursanti, I. 2013. Karakteristik limbah cair pabrik kelapa sawit pada proses pengolahan anaerob dan aerob. *Jurnal Ilmiah universitas Batanghari Jambi*, 13 (4) : 67 – 73.
- Oktaria, W. 2023. *Pre-treatment Ampas Tahu Menggunakan Ragi Tempe Untuk Meningkatkan Biodegradability Ampas Tahu. [Skripsi]*. Lampung : Universitas Lampung.
- Pangarso, S. S., dan Kusdiyantini, E. 2022. Review potensi pemanfaatan biogas dari limbah cair pabrik kelapa sawit PTPN 5. *JMEMME*, 6 (1) : 18 – 31.
- Pahan, I. 2012. *Panduan Lengkap Kelapa Sawit, Manajemen Agribisnis dari Hulu ke Hilir*. Penebar Swadaya. Jakarta.
- Permadi, D. M. I., Ahmad, A., dan Shinta, E. 2015. Efisiensi penyisihan COD dan pembentukan biogas dalam pengolahan sludge IPAL Industri Pulp And Paper dengan menggunakan Bioreactor Hybrid Anaerobic. *Jom FTEKNIK*, 2 (1) : 1 – 15.
- Putra, V. G. V., Mohamad, J. N., dan Yusuf, Y. 2020. Penerapan Gelombang Plasma dalam Mengurangi Kadar Chemical Oxygen Demand (COD) pada Limbah Batik Melalui Corona Plasma dan Elektrokoagulasi dengan Metode Variasi. *Jurnal Ilmu Fisika*, 12 (2) : 60 – 69.
- Rahman. 2011. Uji keragaman biopellet dari biomassa limbah sekam padi (*Oryza Sativa Sp.*) sebagai bahan bakar alternatif terbarukan. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 4 (3) : 199 – 203.

- Rambe, S. M. 2013. Perancangan dan evaluasi kinerja reaktor hidrolisis-acidogenesis pada pembuatan biogas dari limbah cair pabrik kelapa sawit. [Tesis]. Medan : Universitas Sumatera Utara.
- Rambe, S. M., Iriany dan Irvan. 2014. Pengaruh waktu tinggal terhadap reaksi hidrolisis pada pra-pembuatan biogas dari limbah cair pabrik kelapa sawit. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 25 (1) : 23 – 30.
- Rovita, E. 2018. Produksi biogas dari limbah tandan kosong kelapa sawit (tkks) bekas media tumbuh jamur merang dengan bioaktivator kotoran sapi. [Skripsi]. Lampung : Universitas Lampung.
- Rozaq, I. A., Setyaningsih, N. Y. D. 2018. Karakterisasi dan kalibrasi sensor ph menggunakan arduino uno. [Prosiding] : 244 – 247.
- Rusdiyono, A. P., Kirom, M. R., dan Qurthobi, A. 2017. Perancangan alat ukur konsentrasi gas metana dari Anaerobic Buffled Reactor (ABR) semi-kontinyu dengan substrat susu basi. *E-Proceeding Of Engineering*, 4 (1) : 580 – 588.
- Safira, N. D. 2022. Penambahan onggok untuk meningkatkan produksi biogas di industri tapioka. [Skripsi]. Lampung : Universitas Lampung.
- Sagala, D., Frimawaty, E., dan Sodri, A. 2024. Potensi energi terbarukan dari pemanfaatan energi biogas POME (*Palm oil Mill Effluent*) sebagai sumber energi terbarukan di Provinsi Jambi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22 (1) : 205 – 214
- Sanjaya, A., Saputri, D. R., Damayanti, Yuniarti, R., Yusupandi, F. 2023. Studi potensi asam lemak volatil dari tandan kosong kelapa sawit dengan fermentasi anaerob. *Jurnal Kalitbangan*, 11 (1) : 45 – 61.
- Saputra, M. T. A. 2023. Peningkatan produksi biogas dari air limbah industri tapioka menggunakan onggok. [Tesis]. Lampung : Universitas Lampung.
- Saputra, N. T., Kalsum, L., dan Junaidi, R. 2023. Pemurnian biogas dari co-digestion limbah cair industri tahu dengan kotoran sapi menggunakan absorben MEA pada kolam isian. *Jurnal Serambi Engineering*, 8 (3) : 6608 – 6614.
- Saragih, B. R. 2010. Analisis potensi biogas untuk menghasilkan energi listrik dan termal pada gedung komersil di daerah perkotaan (studi kasus pada mal metropolitan bekasi). [Tesis]. Depok : Universitas Indonesia.

- Sembiring, S. D., Irvan, Trisakti, B., dan Sihombing, D. N. S. 2019. Stabilitas Reaktor Uplow Anaerobic Sludge Blanket-Hollow Centered Packed Bed dalam Produksi Biogas pada Kondisi Ruang. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 8 (2) : 67 – 71.
- Shintawati, Hasanudin, U., dan Haryanto, A. 2017. Karakteristik pengolahan limbah cair pabrik minyak kelapa sawit dalam bioreactor cigar semi kontinu. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 6 (2) : 81 – 88.
- Sipayung, R. F. 2015. *Pendugaan cadangan karbon pada tanaman karet (Hevea Brasiliensis Muell. Arg) di Perkebunan Rakyat Desa Tarean Kecamatan Silandak, Kabupaten Serdang Bedagai*. Medan : Universitas Sumatera Utara.
- Soetopo, S. R., Sri, P., Yusup, S., dan Krisna, A. W. 2011. Efektivitas proses kontinyu digestasi anaerobik dua tahap pada pengolahan lumpur biologi industri kertas. *Jurnal Riset Industri*, 5 (2) : 131 – 142.
- Suksong, W., Tukanghan, W., Promnuan, K., Kongjan, P., Reungsang, A., Isnam, H., dan O – Thong, S. 2020. Biogas production from palm oil mill effluent and empty fruit bunches by coupled liquid and solid-state anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 296.
- Sulistyo, H., Syamsiah, S., Herawati, D. A., dan Wibawa, A. A.. 2012. Biogas production from traditional market waste to generate renewable energy. *In 2012 7th International forum on strategic technology (IFOST)* (pp. 1-4). IEEE.
- Supaya. 2019. Refdes kombinasi alat refluks dan distilasi, upaya efisiensi proses refluks dan distilasi untuk praktikum kimia organik. *Indonesian Journal Of Laboratory*, 2 (1) : 41 – 46.
- Susanto, J. P., Santoso, A. D., dan Suwedi, N. 2017. Perhitungan potensi limbah padat kelapa sawit untuk sumber energi terbarukan dengan metode LCA. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 18 (2) : 165 – 172.
- Wahab., Anshari, E., Mili., M. Z., Nafiu, W. R. A., Khaq., M. N., Deniyatno., Firdaus., dan Supriyatna, Y. I. 2021. Studi pengaruh variabel proses dan kinetika ekstraksi nikel dari bijih nikel laterit menggunakan larutan asam sulfat pada tekanan atmosferik. *Jurnal Rekayasa Proses*, 15 (1) : 37 – 48.

Warsito, J., Sabang, S. M., dan Mustapa, K. 2016. Pembuatan pupuk organik dari limbah tandan kosong kelapa sawit. *J. Akademika Kim*, 5(1): 8 – 15.

Winanti, W. S., Prasetyadi., dan Wiharja. 2019. Pengolahan palm oil mill effluent (pome) menjadi biogas dengan sistem anaerobik tipe fixed bed tanpa proses netralisasi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 20 (1) : 143 – 150.