

**STUDI POTENSI ASAM LEMAK VOLATIL DARI TANDAN
KOSONG KELAPA SAWIT DENGAN FERMENTASI ANAEROB*****STUDY OF VOLATILE FATTY ACID POTENTIAL FROM OIL PALM
EMPTY FRUIT BUNCHES BY ANAEROBIC FERMENTATION*****Andri Sanjaya¹, Desi Riana Saputri², Damayanti Damayanti³, Reni Yuniarti⁴, Fauzi Yusupandi⁵**¹ Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Sumatera, Jalan Terusan Ryacudu, Lampung Selatan, 35365, Indonesia. E-mail address: andri.sanjaya@tk.itera.ac.id

Dikirim 2 Januari 2023, Direvisi 12 Februari 2023, Disetujui 28 Maret 2023

Abstrak: Minyak sawit merupakan salah satu komoditas unggulan, dan Indonesia merupakan salah satu produsen kelapa sawit terbesar di dunia. Limbah padat yang dihasilkan dari aktivitas industri kelapa sawit adalah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). Kandungan selulosa di dalam TKKS dapat dimanfaatkan sebagai substrat fermentasi anaerob (FA) untuk menghasilkan *volatile fatty acids* (VFAs). Pada penelitian ini digunakan pengolahan awal secara kimia (NaOH 8% w/V) untuk *delignifikasi* TKKS sebelum diproses dalam FA. *Digested cow manure* (DCM) digunakan sebagai inokulum. Pengoptimalan proses untuk menghasilkan VFAs merupakan tantangan karena VFAs merupakan produk intermediet di jalur metabolik FA menuju pembentukan metana. Penelitian ini mengkaji potensi VFAs dari TKKS dengan bervariasi suhu terhadap proses FA TKKS untuk memproduksi VFAs di reaktor *batch*. Variasi suhu yang dikaji adalah kondisi mesofilik (29 °C) dan termofilik (55 °C). Prediksi potensi VFA dapat dihitung dengan rumus molekul empiris dengan pendekatan stoikiometri reaksi. Hasil perhitungan, potensi VFA dari TKKS adalah sebesar $44,5 \times 10^{-2} \text{ mg.mgTS}^{-1}$. Eksperimen menunjukkan kondisi termofilik menghasilkan VFAs 60% lebih tinggi dibandingkan mesofilik, terlihat dari *percent completion* RT mencapai 59% dan lebih mendekati potensi teoritis.

Kata kunci: VFA, Stoikiometri Reaksi, dan TKKS

Abstract: Palm oil is one of the leading commodities, and Indonesia is one of the largest palm oil producers in the world. Oil Palm Empty Fruit Bunches (OPEFB) are the solid waste from palm oil industry activities. The cellulose content in EFB can be used as a substrate for anaerobic fermentation (AF) to produce volatile fatty acids (VFAs). In this study, chemical pre-processing (NaOH 8% w / V) was used for the delignification of EFB before being processed in AF. Digested cow manure (DCM) is used as an inoculum. Process optimization to produce VFAs is a challenge because VFAs are intermediate products in the metabolic pathway of AF towards methane formation. This study examines the potential of VFAs from EFB by varying the temperature against the EFB-AF process to produce VFAs in batch reactors. The temperature variations studied were mesophilic (29 °C) and thermophilic (55 °C) conditions. Empirical molecular formulas can predict VFA potential with a reaction stoichiometric approach. As a result of the calculation, the VFA potential of EFB is $44.5 \times 10^{-2} \text{ mg.mgTS}^{-1}$. Experiments showed that thermophilic conditions resulted in VFAs 60% higher than mesophilic, as seen from the percent completion of RT reaching 59% and closer to the theoretical potential.

Keywords: OPEFB, VFA, and Stoichiometric Reactions**PENDAHULUAN**

Indonesia adalah salah satu negara produsen kelapa sawit terbesar di dunia (Sulaiman *et al.*, 2022). Kelapa sawit merupakan salah satu komoditas hasil perkebunan yang memiliki peran cukup penting dalam kegiatan perekonomian di Indonesia (Yaman, 2021; Savarese *et al.*, 2022) Produksi minyak kelapa sawit di Indonesia terus meningkat dari 31 juta ton

pada tahun 2015 hingga mencapai 37,9 juta ton pada tahun 2017. Pada tahun 2025, Indonesia diperkirakan akan memproduksi minyak kelapa sawit lebih dari 42,8 juta ton (BPS, 2022).

Meningkatnya produksi minyak kelapa sawit tentunya akan berbanding lurus terhadap jumlah limbah yang dihasilkan. Dari total 23,8 juta ton limbah padat biomasa yang dihasilkan pabrik minyak kelapa sawit, terkandung limbah tandan

kosong kelapa sawit (TKKS) sebanyak 54% (Perera *et al.*, 2022).

Pengolahan TKKS yang sering dijumpai hanya dijadikan pupuk kompos. Sistem ini memerlukan waktu pengolahan yang cukup lama untuk menyimpan limbah sampai menjadi pupuk kompos (N. Abdullah and Sulaiman, 2013; Loke, Dzulkafly and A. Rashid, 2022). Selain itu, potensi kandungan selulosa dalam TKKS menjadi tidak dimanfaatkan dengan baik. Diperlukan inovasi baru sehingga limbah TKKS dapat dimanfaatkan dan menjadi produk yang memiliki nilai ekonomi.

Menurut Chiew and Shimada, 2013 Limbah TKKS memiliki kandungan selulosa tinggi, yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan dasar pembuatan produk turunan seperti bioetanol (Suhartini *et al.*, 2022), biogas (Nieves, Karimi and Horváth, 2011), maupun asam lemak volatil atau *volatile fatty acids* (VFAs) (Mondylaksita *et al.*, 2021). Produksi VFAs dari TKKS dapat dilakukan dengan menggunakan fermentasi anaerobik (FA) (Bermúdez-Penabad, Kennes and Veiga, 2017; Li *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020).

Substrat yang dapat digunakan pada FA untuk memproduksi VFAs antara lain limbah lumpur aktif (Liang *et al.*, 2021), limbah makanan (K. Wang *et al.*, 2014), limbah jeruk (Eryildiz, Lukitawesa and Taherzadeh, 2020), limbah tuna (Bermúdez-Penabad, Kennes and Veiga, 2017), dan limbah sayuran (Zhang *et al.*, 2020). VFA banyak kegunaannya sebagai bahan dasar pembuatan bioplastik (Babel, Fukushi and Sitanrassamee, 2004), dan *biodiesel* (Christophe *et al.*, 2012). Tidak hanya itu VFAs juga dapat dimanfaatkan sebagai substrat untuk produksi *biohydrogen* via *photo-fermentation* (Nayak, Pandit and Das, 2013).

Pengolahan awal TKKS untuk proses delignifikasi perlu dilakukan sebelum digunakan sebagai substrat di reaktor anaerob, agar komponen pengotor seperti lignin yang berpotensi mengganggu proses dapat dihilangkan (Purwandari *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2020). Pada penelitian ini

digunakan metode *delignifikasi* secara kimia (NaOH 8% w/v) dengan mengadopsi parameter yang telah diteliti oleh (Nieves, Karimi and Horváth, 2011), metode ini dinilai lebih efisien karena dapat berpengaruh besar terhadap performa reaktor anaerob. Tetapi metode pengoptimalan dalam produksi VFAs dan menghentikan tahap lanjutan berupa metanogenesis pada fermentasi secara anaerob merupakan tantangan tersendiri.

Parameter-parameter yang mempengaruhi performa reaktor anaerob menjadi dasar pertimbangan dalam metode pengoptimalan proses produksi VFAs. Proses FA dapat dioperasikan dengan kondisi mesofilik ataupun termofilik (Hidaka *et al.*, 2013). Kondisi mesofilik banyak dipilih dikarenakan tidak membutuhkan energi untuk menjaga kondisi operasi tetap tinggi (54-56 °C) (Hidaka *et al.*, 2022). Namun, kondisi termofilik memiliki potensi akumulasi VFAs yang lebih besar jika dibandingkan dengan kondisi mesofilik (Cho *et al.*, 2015).

Pada penelitian ini akan dikaji potensi penggunaan TKKS sebagai substrat pada fermentasi anaerob, dengan perhitungan potensi VFA teoritis dan aktual eksperimen di laboratorium. Potensi produksi VFA dari suatu substrat dapat didekati dengan kandungan elemen pada substrat (Achinas and Euverink, 2016). Dengan menggunakan rumus kimia secara umum dari karbohidrat ($C_6H_{10}O_5$), protein ($C_5H_7O_2N$), dan lemak ($C_{57}H_{104}O_6$) (Rigolot *et al.*, 2010). Untuk mengetahui pengaruh variasi suhu terhadap produk VFA, fermentasi anaerob pada penelitian ini akan dilakukan pada suhu mesofilik dan termofilik.

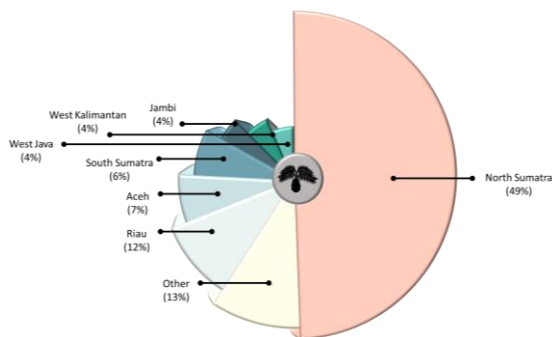
LANDASAN TEORI

A. Industri Kelapa Sawit

Saat ini Indonesia merupakan salah satu negara produsen minyak kelapa sawit terbesar di dunia. Minyak sawit ialah produk perkebunan yang mempunyai prospek yang cerah di masa yang akan

datang (Pasaribu, 2020). Potensi tersebut terletak pada aneka macam kegunaan dari minyak kelapa sawit. Manfaat dari minyak sawit tersebut dapat dipergunakan sebagai bahan mentah industri pangan, dapat juga dipergunakan sebagai bahan mentah industri non pangan (Durango-Giraldo *et al.*, 2022).

Berdasarkan data produksi rata-rata kelapa sawit per provinsi di Indonesia sejak tahun 2015 hingga 2020, terdapat sembilan provinsi penghasil kelapa sawit terbesar di Indonesia dengan total kontribusi sebesar 87,46% terhadap total produksi kelapa sawit Indonesia. Persentase kontribusi produksi minyak sawit rerata per-provinsi dari tahun 2015-2020 berdasarkan data Direktorat Jenderal Perkebunan 2019 ditampilkan pada Gambar 1. (Direktorat Jendral Perkebunan, 2019).



Gambar 1. Kontribusi produksi minyak kelapa sawit per-provinsi

Dari data yang ditampilkan pada Gambar 1, Pulau Sumatera menduduki posisi teratas sebagai produsen minyak kelapa sawit terbesar di Indonesia dengan kontribusi 52,9%. Provinsi Riau menjadi provinsi yang memproduksi CPO tertinggi di Indonesia yaitu lebih dari 8 juta ton per tahun atau sebesar 21,47% disusul oleh Provinsi Sumatera Utara dengan persentase 13,7%. Tingginya jumlah produksi minyak kelapa sawit ini tentunya akan berbanding lurus terhadap jumlah limbah yang dihasilkan (Mahmod *et al.*, 2021).

B. Limbah Industri Kelapa Sawit

Produksi minyak sawit yang sangat besar untuk memenuhi permintaan pasar, menghasilkan berton-ton limbah (Lee *et al.*, 2019). Umumnya, limbah industri minyak sawit diklasifikasikan menjadi limbah padat dan cair (Goncarenco *et al.*, 2015). Pabrik kelapa sawit menghasilkan sebagian besar limbah biomassa, termasuk tandan buah kosong, cangkang sawit, dan serat kelapa sawit (Mahidin *et al.*, 2020). Secara statistik, POME merupakan limbah terbanyak yang dihasilkan selama ekstraksi tandan buah segar (TBS), dengan kuantitas hingga 28% dari persentase berat TBS (Husain, Zainac and Abdullah, 2002; A. A. Abdullah and Sulaiman, 2013).

Tahapan pertama pengolahan tandan buah segar kelapa sawit di pabrik pengolahan adalah sterilisasi (Mahlia *et al.*, 2001). Selanjutnya, buah dan tandan kosong kelapa sawit dipisahkan pada tahapan *stripping* menggunakan *drum thresher*. *Palm oil mill effluent* (POME) dihasilkan pada tahapan sterilisasi yang bersumber dari kondensat *steam* bercampur dengan kotoran (Abdullah and Sulaim, 2013). *Collector* akan mengumpulkan TKKS, yang kemudian diangkut ke area pembakaran sebagai bahan bakar (Abdullah and Sulaim, 2013). Pada alat *digester*, sel-sel yang mengandung minyak dipecah, dan minyak sawit dalam buah dilepaskan (Poku, 2002). Minyak mentah diekstraksi dengan melumat dan menekan buah sawit dari *digester*, dan pada tahapan ini dihasilkan POME serat serta *cake* (Abdullah and Sulaim, 2013), (Poku, 2002).

C. Tandan Kosong Kelapa Sawit

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah yang dihasilkan dari pabrik pengolahan kelapa sawit (Suhartini *et al.*, 2022). Limbah TKKS merupakan sekumpulan serat yang tebal berwarna coklat yang dihasilkan dari proses sterilisasi buah kelapa sawit menggunakan *rotary drum thresher* di pabrik pengolahan kelapa sawit (Chang, 2014).

Komposisi kimia serat TKKS sebagian besar terdiri dari lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Karakteristik TKKS secara lengkap ditampilkan pada Tabel 1. (Sreekala, Kumaran and Thomas, 1997; Chang, 2014).

Tabel 1. Karakteristik Tandan Kosong Kelapa Sawit

Parameter	Nilai (% kering)
Kadar air	2,40–14,28
Analisis Proksimat	
<i>Volatile matter</i>	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

Karakteristik TKKS yang disajikan dapat berbeda dari satu sumber dengan sumber lainnya tergantung pada usia, ukuran, fase pertumbuhan, lokasi geografis, kondisi tanah, pengaruh iklim untuk pertumbuhan kelapa sawit di lapangan 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, bio-komposit, selulosa asetat, selulosa mikro-kristal, biopolimer, dan lain-lain. Tingginya kandungan selulosa pada TKKS menyebabkan TKKS dijadikan komponen biomassa yang banyak dieksplorasi untuk dimanfaatkan salah satunya yaitu sebagai bahan baku untuk VFAs.

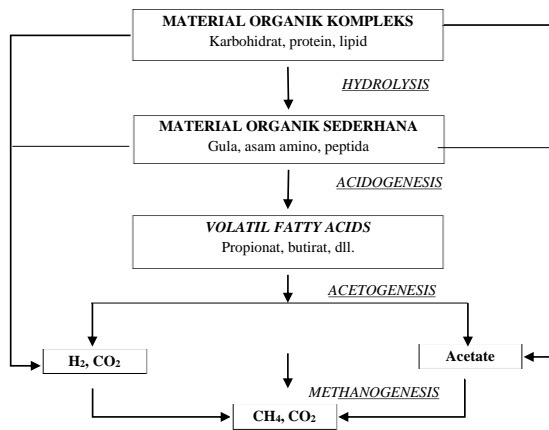
D. Volatile Fatty Acids

Volatile fatty acids (VFAs) merupakan produk asam yang dihasilkan dari senyawa-senyawa organik dengan bantuan mikroorganisme asidogen pada proses peruraian anaerobik (Feng *et al.*, 2022). Tujuh senyawa VFAs paling umum ditemukan dalam bioreaktor anaerobik adalah asam format, asam asetat, asam propionat, asam butirat, asam valerat, asam iso-valerat dan asam kaproat (Possente *et al.*, 2022). Kehadiran VFAs dalam reaktor anaerob mengindikasikan adanya aktivitas mikroorganisme asidogen (Strazzera *et al.*, 2021).

Peningkatan konsentrasi VFAs dalam bioreaktor sistem *batch*, memberi pengaruh yang berbeda pada tahap hidrolisis, asidogenesis, dan metanogenesis. Konsentrasi VFAs yang terlalu tinggi, sebagai *intermediate product* akan menghambat hidrolisis, asidogenesis dan metanogenesis (Fang *et al.*, 2022). Oleh karena itu, diperlukan adanya evaluasi mengenai parameter yang memadai dalam bioreaktor anaerobik untuk meningkatkan konsentrasi VFAs dalam reaktor.

E. Fermentasi Anaerobik

Proses fermentasi anaerobik adalah proses biokimia yang melibatkan sejumlah tahap di mana bahan organik kompleks dipecah dengan bantuan mikroorganisme dalam keadaan tanpa oksigen. Umumnya proses fermentasi anaerobik menghasilkan produk berupa biogas dengan VFAs sebagai produk tengah (Atasoy *et al.*, 2019). Proses fermentasi anaerobik terdiri dari 4 tahapan seperti ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema proses fermentasi anaerobik

Tahapan awal pada fermentasi anaerobik adalah hidrolisis, di mana substrat yang berupa senyawa organik dengan berbagai komposisi pertama-tama dihidrolisis menjadi asam-asam amino penyusunnya. Hidrolisis dari lemak akan membentuk dua senyawa utama, yaitu gliserol dan asam lemak rantai panjang. Sementara itu, hidrolisis karbohidrat akan membentuk senyawa gula dan alkohol (Rasit *et al.*, 2015). Tahap kedua dari proses fermentasi anaerobik adalah proses asidogenesis. Proses ini akan menghasilkan senyawa VFAs, dimana mikroorganisme pembentuk asam atau asidogenik menguraikan produk hidrolisis. Asam lemak, asam amino, dan gula sederhana diubah menjadi asam butirat, asam propionat, asam asetat, alkohol, hidrogen, dan karbon dioksida (Saravanan *et al.*, 2023). Senyawa hasil proses asidogenesis berupa VFAs (terutama asam propionat dan asam butirat) dikonversi menjadi asam asetat, karbon dioksida, dan hidrogen pada tahapan asetogenesis (Ajayi-Banji and Rahman, 2022). Tahap terakhir adalah metanogenesis. Asam asetat dan hidrogen dari proses asetogenesis akan terdegradasi menjadi gas metana dan karbon dioksida yang merupakan produk akhir dari rangkaian panjang proses peruraian anaerobik (Fu *et al.*, 2022).

F. Parameter yang Berpengaruh pada Proses Peruraian Anaerobik

Beberapa faktor yang memengaruhi proses peruraian anaerobik antara lain suhu, pH, nutrisi, dan inokulum.

1. Suhu

Suhu merupakan parameter yang cukup berpengaruh dalam proses peruraian anaerobik. Ada tiga rentang temperatur yang sering digunakan pada proses peruraian anaerobik, yaitu: *psychrophilic* (<20 °C), *mesofilik* (35-37 °C), dan *termofilik* (50-60 °C) (Nie *et al.*, 2021).

Penelitian sebelumnya (Madigou *et al.*, 2019) mengenai pengaruh temperatur dalam rentang proses termofilik (variasi 55 °C - 70 °C) *yield* biogas yang dihasilkan lebih besar dibandingkan pada temperatur mesofilik 37 °C. Hal yang sama terjadi pada tahapan asidogen, *yield* terbesar terjadi dalam rentang proses termofilik dan akumulasi asam didominasi oleh Asam Asetat (Zhuo *et al.*, 2012).

Pengaruh suhu terhadap performa fermentasi anaerob sudah banyak diteliti. Suhu operasi pada FA mempengaruhi pertumbuhan mikroorganisme dan aktivitas enzim sehingga memberikan respon yang berbeda pada komposisi dan produktivitas VFA (Nie *et al.*, 2021). Penelitian terdahulu mengenai pengaruh suhu pada FA ditampilkan pada Tabel 2. Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa produktivitas VFA meningkat seiring meningkatnya suhu. Hal ini disebabkan oleh peningkatan hidrolisis komponen organik seperti protein dan karbohidrat pada suhu yang tinggi (Zhang *et al.*, 2009).

Tabel 2. Perbandingan efek suhu terhadap produksi VFA

Substrat	Suhu Operasi	VFAs	Referensi
Lumpur aktif	15 °C, 20 °C, 30 °C, dan 35 °C	Produktifitas VFA meningkat pada 35 °C	(Zhang <i>et al.</i> , 2009)

Substrat	Suhu Operasi	VFAs	Referensi
Lumpur aktif	10 °C, 20 °C, 37 °C, dan 55 °C	Produkti vitas VFA tertinggi pada 55 °C	(Kim <i>et al.</i> , 2006)
Air limbah rumah ptong hewan	20 °C, 25 °C, 30 °C, 37 °C, 45 °C, 50 °C, dan 55 °C	Peningka tan produkti vitas VFA pada kisaran 56,4 % pada 20°C dan 72,6% pada 55°C	(Yu and Fang, 2003)
Air limbah susu	37 °C dan 55 °C	Produkti vitas VFA tertinggi pada 55 °C	(Yu, Fang and Gu, 2002)

Peningkatan suhu dari mesofilik ke termofilik dan pengaruhnya ke produktivitas VFA masih menjadi hal yang menarik untuk diteliti. Penelitian (Mengmeng *et al.*, 2009) dan (Kim *et al.*, 2006) menjelaskan bahwa suhu yang lebih tinggi dapat memungkinkan bio-adaptasi yang lebih cepat dan asidogenesis yang lebih optimal. Perlu dilakukan pengoptimalan antara *yield* VFAs dan biogas dengan konsumsi energi yang dibutuhkan untuk menjaga temperatur operasi agar dihasilkan kondisi operasi yang paling menguntungkan.

2. Derajat Keasaman (pH)

Derajat keasaman (pH) merupakan salah satu parameter yang sangat berpengaruh terhadap kestabilan proses peruraian anaerobik. Mikroorganisme yang terlibat pada keempat tahapan proses peruraian anaerobik masing-masing memiliki rentang pH optimum agar mereka bisa memiliki performa yang baik. Mayoritas mikroorganisme pada umumnya memiliki nilai pH optimum untuk tumbuh dengan baik pada rentang pH 6,8-7,2 (Gerardi, 2003; Tang *et al.*, 2017). Beberapa faktor

yang berpengaruh pada proses pengontrolan pH adalah CO₂ terlarut yang berbentuk asam karbonat, keberadaan amoniak di dalam sistem, kapasitas *buffer*, dan akumulasi VFAs (Seadi *et al.*, 2008).

Investigasi pada efek pH pada FA sudah banyak dilakukan. Pada penelitian Wang *et al* mengenai pengaruh pH pada fermentasi anaerob limbah makanan dengan lumpur aktif sebagai inokulum, menunjukkan tingkat hasil butirair yang tinggi pada pH 5,0 (K. Wang *et al.*, 2014). Peningkatan produktivitas VFA pada tingkat pH yang rendah dikarenakan terjadi peningkatan hidrolisis dan asidogenesis (Bengtsson *et al.*, 2008).

3. Nutrisi

Salah satu parameter nutrisi yang diperlukan oleh mikroorganisme anaerob adalah rasio C/N. Rasio C/N menjelaskan hubungan antara jumlah karbon dan nitrogen yang terdapat dalam substrat yang digunakan. Nilai C/N yang optimum diperlukan untuk menjalankan proses fermentasi anaerob yang efektif (X. Wang *et al.*, 2014).

Rasio C/N mempengaruhi kestabilan dari proses peruraian anaerob. Hal tersebut disebabkan karena rasio C/N yang optimal dapat mempertahankan lingkungan yang sesuai sekaligus mengontrol nutrisi yang seimbang untuk mikroorganisme (Wu *et al.*, 2010). Populasi mikroorganisme dapat meningkat secara drastis dengan kadar nitrogen yang rendah dalam substrat. Hal tersebut dapat menyebabkan waktu untuk mendekomposisi substrat menjadi lebih lama dan hasil yang diperoleh menjadi lebih sedikit. Namun apabila konsentrasi nitrogen berlebih, inhibitor ammonia dapat terbentuk dan menghambat pertumbuhan mikroorganisme. Nilai C/N yang optimum yaitu 25-30 (Yen and Brune, 2007).

G. Prediksi Potensi VFAs Maksimum

Reaksi kimia pada dasarnya memiliki nilai konversi kesetimbangan tertentu. Ada reaksi-reaksi yang konversi

kesetimbangannya hampir mencapai 100% sehingga dapat dianggap reaksi searah. Untuk reaksi searah, evaluasi nilai kesetimbangan dapat dilihat dari stoikiometrinya (Achinas and Euverink, 2016). Proses yang terjadi dalam FA sebetulnya merupakan rangkaian banyak sekali reaksi biokimia yang rata-rata merupakan reaksi bolak-balik. Untuk estimasi potensi VFAs, dianggap seluruh reaktan akan berubah menjadi VFAs (dianggap reaksi searah).

Akan tetapi, untuk limbah yang berupa campuran berbagai senyawa dan rumus molekulnya tidak diketahui secara pasti, menentukan stoikiometri reaksi merupakan suatu kendala tersendiri. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, substrat yang digunakan didefinisikan rumus molekul empirisnya terlebih dahulu agar stoikiometrinya dapat dianalisis.

Rumus molekul empiris yang digunakan sebagai representasi dari limbah TKKS adalah $C_nH_aO_b$. Perhitungan koefisien n, a, b, dan c dilakukan dengan Persamaan (1) sampai (4).

$$n = \sum \frac{n_i}{Mr_i}(m_i); \quad (1)$$

$i = \text{lemak, protein, karbohidrat}$

$$a = \sum \frac{a_i}{Mr_i}(m_i); \quad (2)$$

$i = \text{lemak, protein, karbohidrat}$

$$b = \sum \frac{b_i}{Mr_i}(m_i); \quad (3)$$

$i = \text{lemak, protein, karbohidrat}$

$$c = \sum \frac{c_i}{Mr_i}(m_i); \quad (4)$$

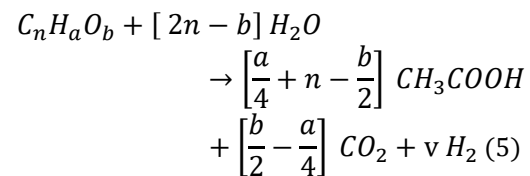
$i = \text{lemak, protein, karbohidrat}$

Tabel 3 menampilkan rumus molekul lemak, protein, dan karbohidrat yang akan digunakan untuk perhitungan rumus molekul empiris pada Persamaan (1) sampai (4) sesuai dengan bentuk umum $C_nH_aO_b$ (Rigolot *et al.*, 2010).

Tabel 3. Rumus molekul lemak, protein dan karbohidrat

Konstanta	Lemak ($C_{57}H_{104}O_6$)	Protein ($C_5H_7O_2N$)	Karbohidrat ($C_6H_{10}O_5$)
n_i	57	5	6
a_i	104	7	10
b_i	6	2	5

Nilai koefisien rumus molekul yang dihasilkan dari perhitungan menggunakan Persamaan (2) sampai (5) perlu dibagi dengan nilai koefisien terkecil yang didapatkan agar menjadi rumus molekul yang standar. *Yield* maksimum VFAs dari rumus molekul empiris yang sudah didapatkan dihitung dengan stoikiometri pada Persamaan (5).



Asumsi koefisien $v = 0$, dikarenakan produksi hidrogen sangat rendah. Berdasarkan Persamaan (2.6) potensi VFAs maksimum yang dapat dihasilkan dari 1 mol $C_nH_aO_b$ adalah sebanyak $\left[\frac{a}{4} + n - \frac{b}{2} \right]$ mol. Dengan menggunakan angka ini sebagai acuan, tingkat keberhasilan fermentasi anaerobik akan dapat dinilai secara kuantitatif sebagai persentase dari potensi VFAs maksimumnya dan dapat dipilih variasi mana yang memberikan hasil terbaik pada reaksi pembentukan VFAs.

METODOLOGI

A. Bahan

1. Substrat dan Inokulum

Bahan utama dari penelitian ini adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang diperoleh dari industri minyak kelapa sawit yang berlokasi di Medan, Provinsi Sumatera Utara. Tahap awal TKKS dikeringkan dengan cara dijemur sampai kadar airnya $<7\%$, lalu direduksi ukurannya hingga lebih kecil dari 0,42 mm. Selanjutnya proses pengolahan awal TKKS

dilakukan menggunakan metode secara kimia (NaOH 8% w/v).

Inokulum (mikroorganisme) pada penelitian ini diperoleh dari *effluent biodigester* limbah kotoran sapi peternakan di Turgo.

2. Bahan Kimia

Bahan yang digunakan untuk pengolahan awal TKKS yaitu NaOH *pellet* p.a (Merck). Sedangkan untuk analisis parameter uji sCOD menggunakan Hach kit (DR 900, Loveland, Colorado, USA).

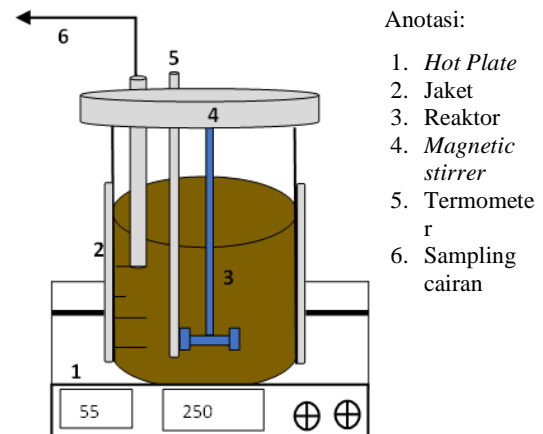
B. Pengolahan Awal TKKS

Proses pengolahan awal TKKS menggunakan metode secara kimia dengan mengadopsi parameter yang telah diteliti dan dioptimalisasi oleh Carrillo, Karimi and Sárvári (Nieves, Karimi and Horváth, 2011). Proses pengolahan awal TKKS dilakukan menggunakan NaOH 8% (w/v), 32,5 g TKKS dan 617,5 ml larutan NaOH (8% w/v) diaduk di labu leher tiga 1000 ml selama 10 menit di suhu kamar. Kemudian dipanaskan hingga suhu 100 °C selama 60 menit. Setelah itu campuran disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan campuran padatan (fraksi selulosa) dan cairan (fraksi pelarut, lignin, dan hemiselulosa). Padatan dicuci hingga pH netral untuk membersihkan pengotor yang terikut. Kemudian untuk penyimpanan TKKS menggunakan lemari pendingin sebelum selanjutnya digunakan untuk proses pengoptimalan di fermentasi anaerob.

C. Rancangan Fermentasi Anaerob (FA)

Campuran substrat selulosa dari TKKS dan inokulum dengan rasio 1:1 (VS/VS) dicampur di *beaker glass* kemudian dimasukkan ke dalam reaktor (Wheaton Spinner Flask, DWK Life Sciences, USA). Campuran substrat dan inokulum yang digunakan adalah sebanyak 75% dari volume reaktor, dalam percobaan ini sebanyak 1 L. Inokulum yang digunakan adalah DCM. Selanjutnya untuk mengatur pH awal 5,5 digunakan 1 M NaOH dan 1 M HCl. Gas nitrogen (N₂) untuk *flushing*

digelembungkan ke dalam cairan sebelum selang direaktor tersambung dengan gasometer. Eksperimen ini dihentikan ketika nilai sCOD sudah sangat rendah dan konstan. Rangkaian alat yang akan digunakan pada tahapan ini seperti yang ditampilkan pada Gambar 3. Ekperimen dijalankan pada suhu mesofilik ($\pm 27\text{ }^{\circ}\text{C}$) di Reaktor 1 (R1) dan termofilik ($\pm 55\text{ }^{\circ}\text{C}$) di Reaktor 2 (R2).



Gambar 3. Rangkaian fermentor anaerobik

D. Analisis Data

Sampel diambil setiap dua hari sekali selama eksperimen berlangsung melalui saluran *output* dan dianalisis untuk nilai komposisi kimia, *total solid* (TS), *volatile solids* (VS), *volatile fatty acids* (VFA), dan *soluble chemical oxygen semand* (CODs). Nilai CODs dianalisis menggunakan metode *reflux* tertutup 5220 D (APHA-AWWA-WEF, 2017), Total VFAs dianalisis menggunakan gas chromatograph (Perkin-Elmer, Shelton, CT, USA) dengan *capillary column* (Elite-WAX ETR, Perkin-Elmer, Shelton, CT, USA) dan *flame-ionized detector* (PerkinElmer, Shelton, CT, USA). *Total solids* (TS) dan *volatile solids* (VS) dari inokulum dan *effluent* reaktor dianalisis menggunakan *standard analytical procedures* dari APHA-AWWA-WEF (APHA-AWWA-WEF, 2017).

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perlakuan Awal Delignifikasi TKKS

Hasil analisis proksimat dan komposisi kimia TKKS dicantumkan pada Tabel 4, disertakan juga hasil analisis proksimat DCM.

Tabel 4. Hasil analisis komposisi kimia TKKS dan DCM

Parameter	Nilai (%-w)	
	OPEFB (%-w)	DCM (%-w)
Analisis Proksimat		
Air	85,465 ± 0,135	95.760 ± 0.113
Abu	0,030	0.625 ± 0.021
Lemak	0,100	0.073 ± 0.020
Protein	0,240	0.540 ± 0.014
Karbohidrat	14,255 ± 0,135	3.001 ± 0.168
Komposisi Kimia		
Selulosa	12,967 ± 0,072	-
Hemiselulosa	1,483 ± 0,023	-
Lignin	3,444 ± 0,081	-

Langkah awal delignifikasi dari penelitian ini diharapkan dapat memodifikasi struktur selulosa dan menghilangkan lignin sehingga selulosa lebih mudah diakses oleh mikrobial hidrolitik.

B. Prediksi Potensi VFAs Maksimum dari TKKS

Perhitungan prediksi potensi VFAs maksimum yang dapat dihasilkan dari sejumlah kandungan organik dari TKKS. Asumsi *pseudo-single substrate* digunakan dalam merepresentasikan senyawa organik kompleks sebagai senyawa yang memiliki satu rumus molekul empiris. Rumus molekul empiris dapat dihitung berdasarkan hasil analisis proksimat limbah organik yang digunakan. Analisis proksimat menggunakan sampel TKKS yang telah mengalami *pretreatment* dan ditampilkan pada Tabel 4.

Dari hasil analisis proksimat tersebut, perhitungan dilakukan menggunakan Persamaan (2) sampai (5). Perlu diketahui massa limbah yang digunakan pada persamaan (2) sampai (6) hanya massa kandungan organiknya saja, sehingga kadar abu dan air menjadi nilai pengurang untuk

massa total yang digunakan. Dari hasil perhitungan tersebut didapatkan rumus molekul empiris untuk limbah TKKS yang digunakan pada penelitian ini adalah $C_{255}H_{424}O_{214}N$, dan DCM didefinisikan sebagai $C_{29}H_{48}O_{24}N$. Dengan Persamaan (6) dapat dilakukan perhitungan potensi VFAs maksimum yang dapat dihasilkan tiap satu kg limbah TKKS yang digunakan. Dasar perhitungan potensi maksimum VFAs yang dapat dihasilkan oleh setiap reaktor ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Dasar perhitungan potensi maksimum VFAs

Parameter	Nilai
Total <i>volatile solid</i> TKKS masuk reaktor	21 %
Densitas DCM	1,017 g.ml ⁻¹
Massa TKKS masuk reaktor	87,452 g
Massa DCM masuk reaktor	855,924 g

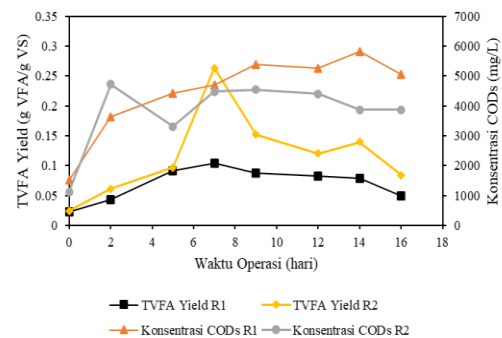
Hasil prediksi potensi VFAs maksimum per kg kadar organik TKKS ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Jumlah produksi VFAs maksimum secara stoikiometri

Komponen	TKKS (mg.mgTS ⁻¹)	DCM (mg.mgTS ⁻¹)
VFA	44,500 x 10 ⁻²	39,900 x 10 ⁻²
Karbon dioksida (CO ₂)	14.560 x 10 ⁻²	10.750 x 10 ⁻²

C. Produksi VFA

Pada penelitian ini nilai sCOD merepresentasikan kandungan organik yang sudah terlarut. Profil nilai konsentrasi sCOD dari kedua reaktor ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Perubahan konsentrasi CODs dan Yield VFA

Nilai konsentrasi sCOD awal dari masing-masing reaktor relatif sama, pada reaktor mesofilik (R1) yaitu $1215,50 \pm 470$ mg.L⁻¹ dan pada reaktor termofilik (R2) yaitu 1117 ± 260 mg.L⁻¹. Nilai konsentrasi sCOD awal yang terbaca masih merupakan nilai sCOD yang berasal dari DCM, hal ini dikarenakan TKKS yang berupa padatan belum terhidrolisis.

Dapat dilihat pada Gambar 3 bahwa nilai sCOD pada hari kedua mulai meningkat untuk masing-masing reaktor, hal ini dikarenakan hasil hidrolisis dari kandungan organik kompleks seperti protein, lemak, dan karbohidrat menjadi senyawa-senyawa terlarut yang lebih sederhana terukur sebagai nilai sCOD. Oleh karena itu, pada Gambar 4 kenaikan konsentrasi sCOD terukur terus meningkat disebabkan adanya tambahan input sCOD karena hidrolisis kandungan organik kompleks dan masih terus terjadi selama percobaan berlangsung. Pada hari kedua nilai sCOD R2 adalah yang paling tinggi, dan mengalami penurunan secara signifikan pada hari kelima. Tingginya nilai sCOD mengindikasikan kondisi termofilik meningkatkan hidrolisis, dan penurunan pada hari kelima mengindikasikan kandungan senyawa organik terlarut mulai terkonsumsi dan terkonversi menjadi produk (VFAs).

Selama penelitian berlangsung, konsentrasi VFAs kedua reaktor terus mengalami kenaikan yang cukup signifikan sampai hari ketujuh. Akumulasi VFAs tertinggi dari kedua reaktor terjadi pada hari ketujuh yaitu 1307 ± 425 mg.L⁻¹ untuk R1, sedangkan R2 lebih tinggi 3 kali lipat yaitu 3311 ± 891 mg.L⁻¹. Dari awal hingga akhir penelitian, terlihat bahwa nilai konsentrasi VFAs dari reaktor R2 adalah yang paling tinggi dibandingkan R1. Korelasi profil konsentrasi sCOD pada Gambar 3, kenaikan konsentrasi VFAs dari awal penelitian ini sesuai dengan grafik kenaikan konsentrasi sCOD akibat adanya hidrolisis TKKS.

Pada kasus kali ini, konsentrasi sCOD dari R1 relatif terus meningkat

dibandingkan reaktor R2. Dari kesesuaian data tersebut, dapat dikatakan bahwa rendahnya akumulasi VFAs dari reaktor R1 cenderung disebabkan oleh laju konversi sCOD menjadi VFA yang cukup rendah dibandingkan dengan laju konversi pada R2. Rendahnya laju konversi sCOD menjadi VFA dari reaktor R1 dibandingkan dengan reaktor R2 diduga disebabkan oleh kenaikan sCOD yang tidak diiringi dengan kenaikan keberadaan mikroorganisme asidogen yang mengakibatkan keberadaan sCOD tidak terkonversi menjadi VFAs.

Kuantitas produk VFAs aktual hasil eksperimen perlu dibandingkan terhadap potensi VFAs teoritis untuk mengetahui efisiensi metode optimalisasi yang digunakan seperti yang ditampilkan pada Tabel 6. Adapun total produk VFAs yang dibandingkan yaitu maksimum produksi berdasarkan stoikiometri TKKS (Tabel 5) dan VFA eksperimen dari kedua reaktor.

Adapun yang menjadi catatan bahwa potensi produksi VFAs dihitung dengan asumsi bahwa seluruh komponen organik dalam reaktor berubah menjadi VFAs dan produk samping. Meskipun pada keadaan sesungguhnya tidak mungkin seluruh TKKS bisa terkonversi. Oleh karena ini, perlu disadari bahwa nilai estimasi yang dilakukan sebetulnya akan lebih besar dari potensi produktivitas sesungguhnya. Hal ini menyebabkan rendahnya presentase *completion* yang ditampilkan dalam Tabel 7. Nilai *%completion* digunakan sebagai pendekatan objektif untuk komparasi data yield VFAs aktual eksperimen terhadap yield VFAs teoritis (secara stoikiometri).

Tabel 7. Perbandingan produksi VFAs dengan potensinya untuk percobaan variasi suhu

Reaktor	Total VFAs aktual (mg.mgTS _{remo} val ⁻¹)	Potensi VFAs teoritis (mg.mgTS _{remo} val ⁻¹)	Completion (%)
R1	$14,1 \times 10^{-2}$	$44,5 \times 10^{-2}$	31,461
R2	$26,4 \times 10^{-2}$	$44,5 \times 10^{-2}$	59,326

Pada Tabel 7, terlihat bahwa R2 menghasilkan jumlah VFAs yang lebih banyak dibandingkan R1. *Percent completion* RT mencapai 59% dan lebih mendekati potensi teoritis. Sementara itu, rendahnya nilai % *completion* reaktor RM diakibatkan rendahnya metabolisme mikroorganisme yang berperan, sehingga *TS removal* dan konsentrasi VFAs yang dihasilkan rendah. Masih rendahnya % *completion* dari masing-masing reaktor mengindikasikan masih perlunya metode lain dalam meningkatkan performa reaktor anaerob untuk pembentukan VFAs.

KESIMPULAN

Adapun kesimpulan pada penelitian ini diketahui bahwa kondisi termofilik (55 °C) meningkatkan aktivitas bakteri hidrolitik. Hal ini dibuktikan dengan *TS removal* dari reaktor R2 (37,855%) yang lebih tinggi dibandingkan dengan reaktor R1 (27,933 %). Kondisi termofilik juga menghasilkan VFAs dengan akumulasi yang lebih tinggi. Pernyataan ini diperkuat dengan nilai % *completion* yang menunjukkan bahwa reaktor RT lebih mendekati VFAs prediksi dari perhitungan potensi maksimum stoikiometri.

Dalam penelitian dengan substrat padat semacam TKKS ini, pengaruh *pretreatment* sangat besar dalam menentukan kesuksesan proses anaerob. Oleh karena itu, perlu dicoba teknik *pretreatment* yang lain dalam rangka mendapatkan hasil terbaik pada proses anaerobnya. Selain itu, Eksperimen yang dilakukan secara *batch* biasanya dilakukan untuk mendapatkan data eksperimen dalam modifikasi model. Namun, untuk menyelidiki potensi nyata VFAs dari reaktor anaerob dalam kondisi proses aktual, percobaan secara *batch* tidak cukup mewakili. Diperlukan eksperimen lanjutan menggunakan reaktor kontinyu. Dengan demikian dapat diselidiki juga pengaruh *organic loading rates* terhadap stabilitas reaktor anaerobik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A. A. and Sulaiman, N. N. (2013) 'Factors that influence the interest of youths in agricultural entrepreneurship', *International Journal of Business and Social Science*, 4(3), pp. 288–302.
- Abdullah, N. and Sulaim, F. (2013) 'The Oil Palm Wastes in Malaysia', *Biomass Now - Sustainable Growth and Use*, (December). doi: 10.5772/55302.
- Abdullah, N. and Sulaiman, F. (2013) 'The Oil Palm Wastes in Malaysia, Biomass Now-Sustainable Growth and Use', *Biomass Now - Sustainable Growth and Use*, pp. 75–100.
- Achinas, S. and Euverink, G. J. W. (2016) 'Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste', *Resource-Efficient Technologies*, 2(3), pp. 143–147. doi: 10.1016/j.refit.2016.08.001.
- Ajayi-Banji, A. and Rahman, S. (2022) 'A review of process parameters influence in solid-state anaerobic digestion: Focus on performance stability thresholds', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167(June), p. 112756. doi: 10.1016/j.rser.2022.112756.
- APHA-AWWA-WEF (2017) 'Standard Methods', in *Encyclopedia of Forensic Sciences: Second Edition*. 23rd ed. Washington, DC, pp. 522–527. doi: 10.1016/B978-0-12-382165-2.00237-3.
- Atasoy, M. et al. (2019) 'Volatile fatty acids production via mixed culture fermentation: Revealing the link between pH, inoculum type and

- bacterial composition', *Bioresource Technology*, 292(July), p. 121889. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121889.
- Babel, S., Fukushi, K. and Sitanrassamee, B. (2004) 'Effect of acid speciation on solid waste liquefaction in an anaerobic acid digester', *Water Research*, 38(9), pp. 2417–2423. doi: 10.1016/j.watres.2004.02.005.
- Bengtsson, S. et al. (2008) 'Acidogenic fermentation of industrial wastewaters: Effects of chemostat retention time and pH on volatile fatty acids production', *Biochemical Engineering Journal*, 40(3), pp. 492–499. doi: 10.1016/j.bej.2008.02.004.
- Bermúdez-Penabad, N., Kennes, C. and Veiga, M. C. (2017) 'Anaerobic digestion of tuna waste for the production of volatile fatty acids', *Waste Management*, 68, pp. 96–102. doi: 10.1016/j.wasman.2017.06.010.
- BPS (2022) *Statistik Kelapa Sawit Indonesia*, Available Online. (n.d.). Badan Pusat Statistik (bps.go.id) (accessed August 14, 2022). Available at: Badan Pusat Statistik (bps.go.id) (Accessed: 14 August 2022).
- Chang, S. H. (2014) 'An overview of empty fruit bunch from oil palm as feedstock for bio-oil production', *Biomass and Bioenergy*, 62, pp. 174–181. doi: 10.1016/j.biombioe.2014.01.002.
- Chiew, Y. L. and Shimada, S. (2013) 'Current state and environmental impact assessment for utilizing oil palm empty fruit bunches for fuel, fiber and fertilizer - A case study of Malaysia', *Biomass and Bioenergy*, 51, pp. 109–124. doi: 10.1016/j.biombioe.2013.01.012.
- Cho, H. U. et al. (2015) 'Influence of temperature on volatile fatty acid production and microbial community structure during anaerobic fermentation of microalgae', *Bioresource Technology*, 191, pp. 475–480. doi: 10.1016/j.biortech.2015.03.009.
- Christophe, G. et al. (2012) 'Production of oils from acetic acid by the oleaginous yeast *Cryptococcus curvatus*', *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 167(5), pp. 1270–1279. doi: 10.1007/s12010-011-9507-5.
- Direktorat Jendral Perkebunan (2019) 'Statistik Perkebunan Indonesia 2018-2020', Secretariate of Directorate General of Estates, pp. 1–82.
- Durango-Giraldo, G. et al. (2022) 'Palm oil as a biolubricant: Literature review of processing parameters and tribological performance', *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, (xxxx). doi: 10.1016/j.jiec.2021.12.018.
- Eryildiz, B., Lukitawesa and Taherzadeh, M. J. (2020) 'Effect of pH, substrate loading, oxygen, and methanogens inhibitors on volatile fatty acid (VFA) production from citrus waste by anaerobic digestion', *Bioresource Technology*, 302(January), p. 122800. doi: 10.1016/j.biortech.2020.122800.
- Fang, W. et al. (2022) 'Enhanced volatile fatty acid production from anaerobic fermentation of waste activated sludge by combined

- sodium citrate and heat pretreatment’, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), p. 108518. doi: 10.1016/j.jece.2022.108518.
- Feng, S. et al. (2022) ‘Volatile fatty acids production from waste streams by anaerobic digestion: A critical review of the roles and application of enzymes’, *Bioresource Technology*, 359(June), p. 127420. doi: 10.1016/j.biortech.2022.127420.
- Fu, S. et al. (2022) ‘Micro-aeration: an attractive strategy to facilitate anaerobic digestion’, *Trends in Biotechnology*, pp. 1–13. doi: 10.1016/j.tibtech.2022.09.008.
- Gerardi, M. H. (2003) *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. doi: 10.1002/0471468967.
- Goncarenco, A. et al. (2015) ‘Structural Perspectives on the Evolutionary Expansion of Unique Protein-Protein Binding Sites’, *Biophysical Journal*, 109(6), pp. 1295–1306. doi: 10.1016/j.bpj.2015.06.056.
- Hidaka, T. et al. (2013) ‘Comparative performance of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion for high-solid sewage sludge’, *Bioresource Technology*, 149, pp. 177–183. doi: 10.1016/j.biortech.2013.09.033.
- Hidaka, T. et al. (2022) ‘Comparative anaerobic digestion of sewage sludge at different temperatures with and without heat pretreatment’, *Chemosphere*, 307(P3), p. 135808. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135808.
- Husain, Z., Zainac, Z. and Abdullah, Z. (2002) ‘Briquetting-of-palm-fibre-and-shell-from-the-processing-of-palm-nuts-to-palm-oil_2002_Biomass-and-Bioenergy’, *Biomass and Bioenergy*, 22, pp. 505–509.
- Kim, J. K. et al. (2006) ‘Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste’, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 102(4), pp. 328–332. doi: 10.1263/jbb.102.328.
- Lee, Z. S. et al. (2019) ‘Treatment technologies of palm oil mill effluent (POME) and olive mill wastewater (OMW): A brief review’, *Environmental Technology & Innovation*, 15, p. 100377. doi: 10.1016/J.ETI.2019.100377.
- Li, Z. et al. (2018) ‘Anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste for hydrogen and VFA production with microbial community analysis’, *Waste Management*, 78, pp. 789–799. doi: 10.1016/j.wasman.2018.06.046.
- Liang, T. et al. (2021) ‘Anaerobic fermentation of waste activated sludge for volatile fatty acid production: Recent updates of pretreatment methods and the potential effect of humic and nutrients substances’, *Process Safety and Environmental Protection*, 145, pp. 321–339. doi: 10.1016/j.psep.2020.08.010.
- Loke, A. T. T., Dzulkafly, N. S. and A. Rashid, A. (2022) ‘Oil palm empty fruit bunch cellulose fillers as alternative fillers for carboxylated nitrile butadiene rubber latex films’, *Materials Today: Proceedings*, 66,

- pp. 3092–3096. doi: 10.1016/j.matpr.2022.08.009.
- Madigou, C. et al. (2019) ‘Ecological consequences of abrupt temperature changes in anaerobic digesters’, *Chemical Engineering Journal*, 361(November 2018), pp. 266–277. doi: 10.1016/j.cej.2018.12.003.
- Mahidin et al. (2020) ‘Analysis of power from palm oil solid waste for biomass power plants: A case study in Aceh Province’, *Chemosphere*, 253, p. 126714. doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.126714.
- Mahlia, T. M. I. et al. (2001) ‘An alternative energy source from palm wastes industry for Malaysia and Indonesia’, *Energy Conversion and Management*, 42(18), pp. 2109–2118. doi: 10.1016/S0196-8904(00)00166-7.
- Mahmod, S. S. et al. (2021) ‘Enhancement of biohydrogen production from palm oil mill effluent (POME): A review’, *International Journal of Hydrogen Energy*, (xxxx). doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.225.
- Mengmeng, C. et al. (2009) ‘Optimal production of polyhydroxyalkanoates (PHA) in activated sludge fed by volatile fatty acids (VFAs) generated from alkaline excess sludge fermentation’, *Bioresource Technology*, 100(3), pp. 1399–1405. doi: 10.1016/j.biortech.2008.09.014.
- Mondylaksita, K. et al. (2021) ‘Enhanced volatile fatty acid production from oil palm empty fruit bunch through acidogenic fermentation—A novel resource recovery strategy for oil palm empty fruit bunch’, *Fermentation*, 7(4). doi: 10.3390/fermentation7040263.
- Nayak, B. K., Pandit, S. and Das, D. (2013) ‘Biohydrogen’, in. *Air Pollution Prevention and Control: Bioreactors and Bioenergy*. J. Wiley Sons, Chichester, pp. 341–381. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118523360.ch15>.
- Nie, E. et al. (2021) ‘How does temperature regulate anaerobic digestion?’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150(July 2020), p. 111453. doi: 10.1016/j.rser.2021.111453.
- Nieves, D. C., Karimi, K. and Horváth, I. S. (2011) ‘Improvement of biogas production from oil palm empty fruit bunches (OPEFB)’, *Industrial Crops and Products*, 34(1), pp. 1097–1101. doi: 10.1016/j.indcrop.2011.03.022.
- Pasaribu, R. P. (2020) ‘Pengaruh Penambahan Npk Dalam Pendegradasian Limbah Cair Kelapa Sawit Menggunakan Anaerobic Baffled Reactor’, *Inovasi Pembangunan : Jurnal Kelitbangan*, 8(03), p. 281. doi: 10.35450/jip.v8i03.201.
- Perera, U. P. et al. (2022) ‘Synthesis and characterization of lignin nanoparticles isolated from oil palm empty fruit bunch and application in biocomposites . Valorisation of industrial biomass wastes , such as oil palm empty fruit bunch (EFB)’, *Sustainable Chemistry for Climate Action*, p. 100011. doi: 10.1016/j.scca.2022.100011.
- Poku, K. (2002) ‘Origin of oil palm’, *Small-Scale Palm Oil Processing in*

- Africa, pp. 1–46. Available at: https://books.google.com.co/books?id=cET5PdWGbIQC&pg=PT8&lpg=PT8&dq=92-5-104859-2+isbn&source=bl&ots=yeyYhz_pj&sig=ACfU3U0MVgFfHALTYAbKVg0kPGH_QGFTLQ&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiX29eHz8b5AhVnsIQIHRVrD4YQ6AF6BAGDEAM#v=onepage&q=92-5-104859-2+isbn&f=false (Accessed: 27 November 2022).
- Possente, S. et al. (2022) ‘Volatile fatty acids production from waste rich in carbohydrates: optimization of dark fermentation of pasta by products’, *Biochemical Engineering Journal*, 189(September), p. 108710. doi: 10.1016/j.bej.2022.108710.
- Purwandari, F. A. et al. (2013) ‘Pretreatment of oil palm empty fruit bunch (OPEFB) by N-methylmorpholine-N-oxide (NMMO) for biogas production: Structural changes and digestion improvement’, *Bioresource Technology*, 128, pp. 461–466. doi: 10.1016/j.biortech.2012.10.088.
- Rasit, N. et al. (2015) ‘Effects of lipid inhibition on biogas production of anaerobic digestion from oily effluents and sludges: An overview’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, pp. 351–358. doi: 10.1016/j.rser.2015.01.066.
- Rigolot, C. et al. (2010) ‘Modelling of manure production by pigs and NH₃, N₂O and CH₄ emissions. Part II: Effect of animal housing, manure storage and treatment practices’, *Animal*, 4(8), pp. 1413–1424. doi: 10.1017/S1751731110000509.
- Saravanan, A. et al. (2023) ‘Strategies for enhancing the efficacy of anaerobic digestion of food industry wastewater: An insight into bioreactor types, challenges, and future scope’, *Chemosphere*, 310(September 2022), p. 136856. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136856.
- Savarese, M. et al. (2022) ‘Determinants of palm oil consumption in food products: A systematic review’, *Journal of Functional Foods*, 96(May), p. 105207. doi: 10.1016/j.jff.2022.105207.
- Seadi, T. A. et al. (2008) *Biogas Handbook*, Igarss 2014. doi: 10.1533/9780857097415.1.85.
- Sreekala, M. S., Kumaran, M. G. and Thomas, S. (1997) ‘Oil palm fibers: Morphology, chemical composition, surface modification, and mechanical properties’, *Journal of Applied Polymer Science*, 66(5), pp. 821–835. doi: 10.1002/(sici)1097-4628(19971031)66:5<821::aid-app2>3.0.co;2-x.
- Strazzera, G. et al. (2021) ‘Influence of different household Food Wastes Fractions on Volatile Fatty Acids production by anaerobic fermentation’, *Bioresource Technology*, 335(April), p. 125289. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125289.
- Suhartini, S. et al. (2022) ‘Biorefining of oil palm empty fruit bunches for bioethanol and xylitol production in Indonesia: A review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154(October 2021), p. 111817. doi: 10.1016/j.rser.2021.111817.

- Sulaiman, N. S. et al. (2022) 'Balancing functional and health benefits of food products formulated with palm oil as oil sources', *Heliyon*, 8(10), p. e11041. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11041.
- Tang, J. et al. (2017) 'Effect of pH on lactic acid production from acidogenic fermentation of food waste with different types of inocula', *Bioresource Technology*, 224, pp. 544–552. doi: 10.1016/j.biortech.2016.11.111.
- Wang, K. et al. (2014) 'Anaerobic digestion of food waste for volatile fatty acids (VFAs) production with different types of inoculum: Effect of pH', *Bioresource Technology*, 161, pp. 395–401. doi: 10.1016/j.biortech.2014.03.088.
- Wang, X. et al. (2014) 'Effects of temperature and Carbon-Nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: Focusing on ammonia inhibition', *PLoS ONE*, 9(5), pp. 1–7. doi: 10.1371/journal.pone.0097265.
- Wu, X. et al. (2010) 'Biogas and CH₄ productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source', *Bioresource Technology*, 101(11), pp. 4042–4047. doi: 10.1016/j.biortech.2010.01.052.
- Yaman, W. (2021) 'Efikasi Herbisida Isopropilamina Glifosat 240 g l-1 Terhadap Pertumbuhan Gulma di Perkebunan Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) Tanaman Menghasilkan', *Inovasi Pembangunan : Jurnal Kelitbangan*, 9(02), p. 189. doi: 10.35450/jip.v9i02.228.
- Yen, H. W. and Brune, D. E. (2007) 'Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane', *Bioresource Technology*, 98(1), pp. 130–134. doi: 10.1016/j.biortech.2005.11.010.
- Yu, H. Q. and Fang, H. H. P. (2003) 'Acidogenesis of gelatin-rich wastewater in an upflow anaerobic reactor: Influence of pH and temperature', *Water Research*, 37(1), pp. 55–66. doi: 10.1016/S0043-1354(02)00256-7.
- Yu, H. Q., Fang, H. H. P. and Gu, G. W. (2002) 'Comparative performance of mesophilic and thermophilic acidogenic upflow reactors', *Process Biochemistry*, 38(3), pp. 447–454. doi: 10.1016/S0032-9592(02)00161-9.
- Zhang, P. et al. (2009) 'Waste activated sludge hydrolysis and short-chain fatty acids accumulation in the presence of SDBS in semi-continuous flow reactors: Effect of solids retention time and temperature', *Chemical Engineering Journal*, 148(2–3), pp. 348–353. doi: 10.1016/j.cej.2008.09.007.
- Zhang, Q. et al. (2020) 'Effect of different vegetable wastes on the performance of volatile fatty acids production by anaerobic fermentation', *Science of the Total Environment*, 748. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142390.

Halaman Kosong