

POTENSI LIMBAH CAIR KELAPA SAWIT SEBAGAI BIOENERGI BERDASARKAN KARAKTERISTIK DAN KOMPOSISI MIKROORGANISME

RAIHANNISA RIZQI MEUTIA¹, MINDRIANY SYAFILA¹, ANDRI GUMILAR¹

1. Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Email: rrmeutia@gmail.com

ABSTRAK

Pemanfaatan biomassa sebagai bahan baku bioenergi menjadi fokus utama dalam mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan mengatasi masalah lingkungan. Kandungan organik POME yang tinggi dan jumlahnya yang berlimpah menjadikannya sebagai bahan baku potensial untuk bioenergi, sekaligus menggantikan posisi tanaman pangan. Produksi bioenergi dari limbah POME dapat dilakukan dengan biokonversi anaerobik menghasilkan produk bioetanol, biohidrogen, serta asam lemak volatil yang dihasilkan pada fase asidogenesis. Karakterisasi limbah POME menunjukkan nilai COD dan VSS sebesar 16.934 dan 4.622,13 mg/L yang menunjukkan tingginya kandungan organik dan makromolekul, sehingga POME berpotensi sebagai bahan baku produksi bioenergi. Hasil identifikasi mikroorganisme pada mixed culture pendegradasi POME menggunakan metode nanopore sequencing menunjukkan dominasi Lactobacillaceae, Acetobacteraceae, Prevotellaceae, dan Clostridiceae yang merupakan bakteri pendegradasi senyawa organik menghasilkan produk etanol, hidrogen, dan asam lemak volatil sehingga POME berpotensi sebagai bahan baku bagi produksi bioenergi.

Kata kunci: biomassa, karakterisasi, mikroorganisme, POME

ABSTRACT

The utilization of biomass as an alternative energy feedstock has become a key strategy in reducing reliance on fossil fuels. With its high organic content and abundant supply, POME is a promising raw material for bioenergy production and can serve as a substitute for food crops. Bioenergy production from POME can be achieved through anaerobic bioconversion, yielding products such as bioethanol, biohydrogen, and volatile fatty acids as by-products of the acidogenesis phase. Characterization of POME waste indicates a COD value of 16,934 mg/L and a VSS value of 4,622.13 mg/L indicating its rich organic and macromolecular content, making it suitable for bioenergy production. Microbial analysis of mixed cultures degrading POME using nanopore sequencing method shows a dominance of the families Lactobacillaceae, Acetobacteraceae, Prevotellaceae, and Clostridiceae, which are organic compound-degrading bacteria that produce ethanol, hydrogen, and VFA. This highlights POME's potential as an effective feedstock for bioenergy production.

Keywords: biomass, characterization, microorganisms, POME

1. PENDAHULUAN

Dalam upaya mitigasi perubahan iklim, Indonesia berkomitmen untuk menurunkan emisi GRK dan mencegah kenaikan suhu rata-rata global. Salah satu strategi penting dalam mencapai target ini adalah pemanfaatan energi nol karbon. Biomassa dan hidrogen menjadi perhatian khusus karena pasokan energi yang berkelanjutan dan emisi GRK yang rendah (Gökçek dan Erdoğan, 2023). Gas hidrogen yang diproduksi secara biologis (biohidrogen) merupakan alternatif pengganti bahan bakar fosil yang paling menjanjikan karena dapat menghasilkan energi bersih dalam jumlah besar dan hasil pembakarannya tergolong ramah lingkungan. Nilai kalor yang dihasilkan oleh hidrogen sebesar 142,35 kJ/g, yaitu 2,75 kali lebih tinggi dibandingkan senyawa hidrokarbon lain (Gondi dkk., 2023).

Salah satu faktor penting dalam produksi bioenergi adalah struktur dan ketersediaan substrat (Wang dan Yin, 2018). Penelitian yang dilakukan oleh Gondi dkk. (2022) menunjukkan biomassa yang kaya akan makromolekul layak digunakan sebagai bahan baku biohidrogen. Diperlukan bahan baku non pangan dengan harga yang relatif rendah dan ketersediaan yang melimpah agar industri bioenergi yang berkelanjutan dapat terwujud. Alternatif yang dapat digunakan sebagai substrat pembentukan bioenergi adalah limbah dengan kandungan organik tinggi. Penggunaan limbah biomassa dapat memberikan manfaat ganda, yaitu pembangkitan energi ramah lingkungan dan pengelolaan limbah (Wang dan Yin, 2018). Salah satu limbah yang potensial sebagai substrat pembentukan biohidrogen adalah *palm oil mill effluent* (POME) yang kaya akan kandungan organik. Menurut Badan Pusat Statistik, pada tahun 2022 Indonesia memiliki perkebunan sawit seluas 14,9 juta hektar (ha). Dalam satu hektar lahan sawit, akan dihasilkan 2,1 ton tandan buah segar per bulan, yang terdiri atas 7% cangkang, 13% serabut, 23% tandan kosong, dan 60% limbah cair. Total limbah cair yang dihasilkan industri sawit berkisar antara 700-800 L/ton TBS (Ermawati dkk., 2023). Ketersediaan yang melimpah ini menunjukkan potensi POME sebagai bahan baku bioenergi yang berkelanjutan.

Limbah POME dengan jumlah yang berlimpah dan kandungan organik yang tinggi menjadikannya sebagai salah satu bahan baku biomassa potensial dalam produksi bioenergi. Pembuangan POME yang tidak tepat seringkali menjadi masalah karena kandungan organik yang tinggi dan nilai pH yang rendah, menyebabkan berbagai permasalahan lingkungan. Karakterisasi POME penting dilakukan untuk melihat opsi pengolahan limbah dan potensi pembentukan produk dari proses biodegradasi limbah. Bentuk akhir produk yang dihasilkan bergantung pada keragaman mikroorganisme penyusun limbah.

Proses biokonversi limbah POME menjadi bioenergi dapat dilakukan secara anaerob melalui *dark fermentation*. Degradasi anaerob terbagi menjadi empat tahap yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetonogenesis, dan metanogenesis (Demirel dan Scherer, 2008). Produk bioenergi berupa bioetanol, biohidrogen, serta asam lemak volatil terbentuk pada tahap asetonogenesis (Anggamulia dkk., 2020). Jumlah bioetanol dan biohidrogen yang dihasilkan bergantung pada tipe fermentasi dan produk akhir yang dihasilkan. Berbagai penelitian terdahulu terkait eksplorasi POME sebagai substrat produksi bioenergi telah dilakukan. Penelitian yang dilakukan oleh Andri dkk. (2014) yang melakukan degradasi limbah artifisial POME dengan penambahan mikronutrien berupa Fe^{2+} sebanyak 40 mg/L dan Zn^{2+} sebanyak 0,5 mg/L serta *flushing* gas N_2 menghasilkan perolehan etanol maksimum sebesar 2.267,3 mg/L. Penelitian serupa yang dilakukan oleh Puteri dan Syafila (2018) yang melakukan degradasi limbah artifisial POME dengan penambahan mikronutrien berupa logam Mg^{2+} , Mn^{2+} , dan Cu^{2+} menghasilkan perolehan etanol maksimum sebesar 3.100 mg/L. Penelitian lain terkait konversi POME secara anaerobik dilakukan oleh (Gumilar dkk., 2023) dengan

penambahan logam Fe, Ni, dan Mo sebanyak 15; 1; dan 0,5 mg/L menghasilkan produk berupa etanol dan hidrogen dengan perolehan maksimum masing-masing sebesar 589,4 mg/L dan 7,57%v/v. Tipe fermentasi yang terjadi pada proses anaerobik bergantung pada keragaman mikroorganismen yang terkandung dalam sistem pengolahan limbah. Spesies mikroorganismen yang terkandung akan menentukan jalur metabolismen yang terjadi dan produk akhir yang dihasilkan (Cyprowski dkk., 2018; Ni dkk., 2022).

Karakterisasi limbah POME dan keragaman mikroorganismen yang terkandung dalam limbah menjadi penting untuk mengoptimalkan kondisi operasi dalam pembentukan produk target. Dengan melakukan analisis keragaman mikroorganismen, kondisi operasi yang sesuai dapat diciptakan dan disesuaikan dengan karakteristik mikroorganismen yang mendominasi limbah POME, sehingga proses biodegradasi dapat berjalan secara optimum. Penelitian terdahulu terkait analisis mikroorganismen dalam proses *dark fermentation* menunjukkan dominasi kelompok mikroorganismen *Clostridium*, *Enterobacter*, dan *Bacillus* yang erupakan kelompok mikroorganismen pengurai senyawa organik menghasilkan produk akhir berupa etanol, H₂, CO₂, asetat, butirat, dan sejumlah kecil propionat (Chen dkk., 2021; Qu dkk., 2022).

2. METODOLOGI

2.1 Sampel air limbah industri kelapa sawit

Limbah cair yang digunakan dalam penelitian ini merupakan limbah cair industri kelapa sawit yang diperoleh dari instalasi pengolahan air limbah (IPAL) PT X. Pengambilan sampel POME dilakukan pada aliran limbah di antara kolam pengendapan dan kolam anaerob I dengan metode *grab sampling*. Lokasi pengambilan sampel POME ditunjukkan oleh Gambar 1. Pemilihan titik lokasi pengambilan sampel bertujuan untuk memastikan karakteristik sampel yang diambil dapat merepresentasikan kondisi sampel sebelum dilakukan pengolahan lebih lanjut, sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai karakteristik sampel yang dihasilkan langsung dari aktivitas industri pengolahan kelapa sawit.



Gambar 1. Titik pengambilan sampel POME

2.2 Pengujian parameter fisik dan kimia air limbah

Pengujian karakteristik sampel dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dan kimia dari sampel air. Pengujian parameter fisik dan kimia meliputi pengukuran beberapa parameter diantaranya suhu, densitas, warna, kekeruhan, konduktivitas, viskositas, *total suspended solids* (TSS), *volatile suspended solids* (VSS), pH, *dissolved oxygen* (DO), *chemical oxygen demand* (COD), *biochemical oxygen demand* (BOD), total fosfat, amonia, total nitrogen, dan asam lemak volatil. Pengujian parameter sampel dilakukan sebanyak dua kali (duplo) dan menggunakan metode standar yang mengacu pada standar, baik nasional maupun internasional. Rincian lengkap terkait metode analisis dan acuan yang digunakan untuk setiap parameter dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Metode pengujian sampel dan metode acuan yang digunakan

Parameter Pengujian	Metode Analisis	Metode Acuan
pH	Multiparameter Probe	SNI 6989.11:2019 dan APHA 4500
Konduktivitas	Multiparameter Probe	SNI 6989.1:2019 dan APHA 2510
Turbiditas	Multiparameter Probe	SNI-06-6989.25-2005 dan APHA 2130
TSS	Gravimetri	SNI 6989.3:2019 dan APHA 2540-D
VSS	Gravimetri	SNI 6989.27:2019 dan APHA 2540-C
COD total	Refluks tertutup	APHA 5220-C
COD terlarut	Penyaringan dan Refluks tertutup	APHA 5220-C
BOD	BOD ₅ hari	APHA5210-B
Minyak dan Lemak	Ekstraksi Soxhlet	APHA 5520-B
Total Asam Volatil	Distilasi-titrasi	APHA 5560-C
Total Fosfat	<i>Stannous chloride</i>	APHA 4500-P D
Total Nitrogen	Kjedahl	APHA 4500-N
Amonia	Distilasi-titrasi	APHA 4500-NH ₃
Etanol dan asam lemak volatil	<i>Gas Chromatography – Flame Ionization Detector (GC-FID)</i>	APHA 5560-D
Biohidrogen	<i>Gas Chromatography – Thermal Conductivity Detector (GC-TCD)</i>	APHA 2720-C

2.3 Identifikasi konsorsium bakteri

Pada penelitian ini, dilakukan analisis keragaman mikroorganisme dari sampel *mixed culture* yang digunakan sebagai agen pendegradasi limbah artifisial. *Mixed culture* yang digunakan terdiri dari campuran kolam IPAL industri kelapa sawit dan rumen sapi serta POME sebagai substrat. Identifikasi konsorsium bakteri yang berada pada kolam IPAL dilakukan menggunakan metode *nanopore sequencing*. Metode ini digunakan karena dapat mengidentifikasi koloni multi-spesies secara akurat dan menghasilkan keluaran taksonomi hingga tingkat spesies melalui analisis gen 16S rRNA secara penuh. Metode ini juga mendukung *long-read sequencing*, yang meningkatkan akurasi dalam membedakan spesies hingga tingkat *strain* (Marshall dkk., 2024). *Nanopore sequencing* dimulai dengan mempersiapkan sampel DNA atau RNA yang akan diurutkan. Molekul DNA atau RNA dilewatkan melalui nanopori, yaitu lubang berukuran nano yang terdapat pada membran tipis. Sebelum proses dimulai, aliran listrik diterapkan melintasi membran untuk menciptakan arus listrik yang stabil. Ketika molekul melewati nanopori, setiap basa nukleotida (A, T/U, C, G) menyebabkan gangguan unik pada arus listrik. Perubahan arus ini kemudian dideteksi dan diterjemahkan menjadi urutan basa dengan bantuan perangkat lunak analisis. Identifikasi mikroorganisme dilakukan di Sekolah Ilmu dan Teknologi Hayati ITB.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakterisasi limbah cair industri kelapa sawit

Karakterisasi air limbah dilakukan untuk melihat beberapa parameter penting, khususnya yang dapat menggambarkan kondisi air limbah dan potensi pencemaran yang akan ditimbulkan oleh limbah. Limbah cair yang dihasilkan merupakan limbah campuran dari proses konversi tandan buah segar kelapa sawit menjadi *crude palm oil* yang terdiri atas proses pencucian, perebusan, dan ekstraksi minyak. Karakteristik fisika dan kimia awal POME ditunjukkan pada Tabel 2.

POME berupa cairan kental dan kecoklatan yang tersusun atas 95-96% air, 0,6-0,7% minyak dan lemak, serta 2-4% padatan tersuspensi yang berasal dari sisa buah (Mohammed dan Chong, 2014). Pengukuran parameter temperatur, konduktivitas, derajat keasaman (pH), serta pengamatan warna sampel POME dilakukan secara langsung pada titik pengambilan

Potensi Limbah Cair Kelapa Sawit Sebagai Bioenergi Berdasarkan Karakteristik dan Komposisi Mikroorganisme

sampel. Temperatur limbah POME cenderung tinggi dibandingkan limbah cair pada umumnya, disebabkan oleh tahapan perebusan pada proses pengolahan kelapa sawit (Mohammad dkk., 2021). Pengukuran konduktivitas dapat menggambarkan kandungan ion terlarut dalam sampel POME yang berasal dari bahan organik, logam, dan garam-garam mineral yang terlarut selama proses pengolahan kelapa sawit (Isaiah dan Blessing, 2020).

Tabel 2. Karakteristik fisika dan kimia air limbah industri kelapa sawit

Parameter	Satuan	Hasil Analisis	Standar Regulasi ^a
Parameter Fisik			
Temperatur	°C	48	
Warna	-	Kuning kecoklatan	
TSS	mg/L	4.870,13	250
VSS	mg/L	4.622,13	
Konduktivitas	µS/cm	5.130	
Densitas	kg/m ³	1,003	
Viskositas	Pa.s	1.159,04	
Turbiditas	NTU	1.710	
Parameter Kimia			
pH	-	2,86	6,0-9,0
Oksigen terlarut	mg/L	2,70	
COD total	mg/L	28.032,4	350
COD terlarut	mg/L	16.933,9	
BOD ₅	mg/L	10.963	100
Minyak dan Lemak	mg/L	15.852	25
Total Asam Volatil	mg/L	367,59	
Total P	mg/L	162,41	
Total N	mg/L	210	50
Ammonia	mg/L	76,5	

^aPeraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Minyak Sawit

Sampel POME bersifat asam, umumnya memiliki nilai pH pada rentang 4-5 (Dominic dan Baidurah, 2022). Hasil pengukuran pH pada sampel POME menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan rentang nilai pH pada umumnya. Nilai pH 2,86 menunjukkan sifat POME yang sangat asam, hal ini dapat disebabkan oleh beberapa hal diantaranya adalah proses ekstraksi kelapa sawit, bahan kimia yang digunakan pada pengolahan dan pemurnian kelapa sawit, serta pembentukan asam organik. Pada proses ekstraksi kelapa sawit, terjadi hidrolisis atau penguraian struktur selulosa dan hemiselulosa pada serat buah menghasilkan produk asam berupa asam asetat dan asam formiat yang berkontribusi dalam penurunan pH limbah (Abd Rahim dkk., 2022). Proses pengolahan kelapa sawit, khususnya pemurnian minyak, seringkali melibatkan penggunaan bahan kimia berupa asam seperti asam fosfat dan asam sulfat yang turut berperan dalam menurunkan pH limbah (Saputra dkk., 2024). Aktivitas mikroorganisme yang terkandung dalam POME juga memungkinkan pembentukan produk asam lemak volatil yang juga berperan dalam penurunan pH (Imam dkk., 2024).

POME memiliki warna kuning kecoklatan akibat kandungan pigmen dalam buah, diantaranya karoten, pektin, tanin, fenolik, dan lignin (Mohammed dan Chong, 2014). Selain menjadikannya berwarna, kandungan senyawa ini menjadikan POME sebagai limbah yang kaya akan nutrisi bagi pertumbuhan mikroorganisme. Hasil analisis karakteristik POME

menunjukkan kandungan COD total POME sebesar 28.032 mg/L, dengan kandungan COD terlarut sebesar 16.933 mg/L. Konsentrasi BOD₅ POME sebesar 10.963, dengan kandungan padatan tersuspensi sebesar 4.870 mg/L yang tersusun atas 94% padatan organik. POME memiliki kandungan minyak dan lemak yang cukup tinggi, yaitu mencapai 15.852 mg/L. Selain itu, dilakukan pengukuran konsentrasi fosfat total dan nitrogen total sebagai sumber nutrisi bagi mikroorganisme, dengan hasil pengukuran fosfat total dan nitrogen total secara berturut-turut sebesar 162,41 mg/L dan 210 mg/L (Tabel 2).

Hasil karakterisasi limbah POME bersesuaian dengan karakteristik limbah POME pada umumnya, dimana konsentrasi COD berada pada rentang 15.600-53.600 mg/L; BOD₅ pada rentang 10.300-47.500; TSS pada rentang 4.100-60.400 mg/L; minyak dan lemak pada rentang 200-8.600 mg/L, total P pada rentang 0-110 mg/L; dan total N pada rentang 80-1.820 mg/L (Ngatirah, 2017). Perbedaan karakteristik limbah cair POME dapat terjadi karena adanya perbedaan proses pengolahan kelapa sawit, perbedaan kualitas buah sawit, serta perbedaan kondisi dan letak geografis perkebunan sawit. Perbedaan tahapan proses pengolahan kelapa sawit dapat berpengaruh besar terhadap perbedaan karakteristik limbah yang dihasilkan (Gumilar dkk., 2023). Dari seluruh karakteristik POME yang disajikan pada Tabel 2, parameter BOD₅, COD, total N, total P, serta VSS menjadi parameter yang penting untuk diperhatikan dalam konversi POME menjadi bioenergi. Rasio BOD₅ dan COD menunjukkan tingkat bidegradabilitas limbah dan menentukan apakah limbah dapat diolah menggunakan proses biologis atau tidak. Parameter COD, total N, dan total P menunjukkan ketersediaan nutrisi bagi mikroorganisme melalui rasio C:N:P limbah. Parameter VSS menunjukkan kandungan mikroorganisme atau lumpur pendegradasi dalam limbah. Selain parameter tersebut, parameter lain juga perlu diperhatikan untuk menciptakan kondisi lingkungan yang baik untuk pertumbuhan mikroorganisme pendegradasi limbah. Oleh karena itu, karakterisasi limbah penting untuk dilakukan (Poh dkk., 2010; Seng dan Madaki, 2013).

POME dihasilkan dalam jumlah yang berlimpah, dibutuhkan sekitar 5-7,5 ton air untuk memproduksi 1 ton *Crude Palm Oil* (CPO), dengan lebih dari 50% air berakhir sebagai POME (Mohammad dkk., 2021). Konsentrasi COD yang tinggi pada POME menunjukkan potensi pencemaran yang besar dan dapat menimbulkan dampak buruk terhadap lingkungan. POME dikenal sebagai masalah utama di setiap pabrik kelapa sawit karena jumlahnya yang melimpah dan penanganan limbah yang tergolong sulit. Pembuangan POME secara langsung ke lingkungan dapat mengakibatkan penyumbatan, genangan air pada tanah, dan membunuh organisme di tanah dan perairan. Oleh karena itu, teknik yang efektif untuk pengolahan POME menjadi sangat penting untuk diperhatikan.

Berbagai jenis pengolahan seperti pengolahan secara fisik, kimia, biologis, dan kombinasi dari ketiganya telah diaplikasikan untuk mengolah POME dengan metode biologi sebagai metode yang paling umum digunakan. Hasil karakterisasi limbah POME menunjukkan rasio BOD/COD POME bernilai 0,65. Rasio BOD/COD dapat digunakan sebagai indikator bodegradabilitas suatu sampel air (Badder dkk., 2022). Rasio BOD/COD sebesar 0,65 menunjukkan POME bersifat *biodegradable* dan dapat diolah menggunakan pengolahan biologi, khususnya secara anaerob akibat tingginya kandungan senyawa organik dalam limbah. Pengolahan limbah secara anaerob tidak hanya berperan dalam penguraian senyawa organik kompleks dalam limbah, tetapi juga dapat menghasilkan produk sebagai hasil konversi senyawa organik dalam limbah oleh mikroorganisme.

3.2 Rasio C:N:P Limbah

Mikroorganisme yang terlibat dalam penyisihan kontaminan organik (karbon) pada air limbah memerlukan kandungan nitrogen dan fosfor untuk proses pertumbuhan dan reproduksinya. Rasio C/N menunjukkan jumlah karbon dan nitrogen dalam substrat dan merupakan

Potensi Limbah Cair Kelapa Sawit Sebagai Bioenergi Berdasarkan Karakteristik dan Komposisi Mikroorganisme

parameter proses penting untuk proses anaerobik. Karbon dan nitrogen memiliki peranan yang sangat penting untuk pertumbuhan dan fungsi sel mikroorganisme. Mikroorganisme memerlukan nitrogen untuk membentuk protein, komponen dinding sel, dan asam nukleat (Henze, 2002). Nitrogen yang ada dalam substrat dapat memfasilitasi sintesis asam amino, protein, dan asam nukleat, sementara karbon bertindak sebagai unit struktural sekaligus sumber energi bagi mikroba (Maier dkk., 1999).

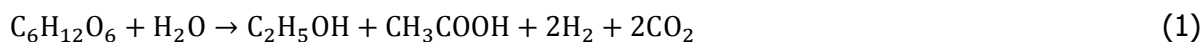
Dalam pengolahan air limbah, rasio C:N:P umumnya bernilai 100:5:1 untuk pengolahan aerobik dan bernilai 250:5:1 untuk pengolahan anaerobik (Henze, 2002; Maier dkk., 1999; Metcalf dan Eddy, 2017). Pengolahan anaerobik membutuhkan konsentrasi nitrogen dan fosfor yang lebih rendah dibandingkan pengolahan aerobik karena hanya menghasilkan lumpur sebanyak 20% dibandingkan pengolahan aerobik (Ammary, 2004). Pada proses anaerobik, sebagian nitrogen organik yang ada dalam substrat akan diubah menjadi amonia. Amonia yang diproduksi dalam reaktor juga membantu menetralkan asam volatil yang diproduksi oleh bakteri fermentasi dan membantu menjaga pH dalam kisaran netral (Khanal dkk., 2019). Secara umum, mikroorganisme anaerobik memanfaatkan karbon 25–30 kali lebih cepat daripada nitrogen. Keberadaan karbon berlebih dapat mengakibatkan akumulasi CO₂ dalam biogas. Sedangkan substrat yang kaya akan nitrogen dapat menyebabkan akumulasi amonia dalam sistem.

POME memiliki kandungan organik yang tinggi, sehingga berpotensi digunakan sebagai bahan baku dalam produksi etanol, hidrogen, dan asam lemak volatil. Kondisi operasi yang diperlukan dalam mengoptimalkan pembentukan produk hidrogen, etanol, dan asam lemak volatil berbeda dengan kondisi operasi dalam pembentukan biogas dari proses anaerobik pada umumnya. Oleh karena itu, penggunaan rasio C:N:P 250:5:1 dalam penelitian kurang tepat untuk dilakukan. Penelitian terdahulu tentang pengaruh rasio C/N dan C/P terhadap perolehan dan laju pembentukan hidrogen telah dilakukan oleh Argun dkk. (2008). Hasil penelitian menunjukkan pada rasio C/N yang rendah, perolehan hidrogen meningkat dengan penurunan C/P atau diperlukan kandungan fosfor yang tinggi pada konsentrasi nitrogen yang tinggi. Sedangkan, pada rasio C/N tinggi, perolehan hidrogen meningkat dengan peningkatan C/P atau diperlukan kebutuhan fosfor yang rendah pada kandungan nitrogen yang rendah (Argun dkk., 2008; Chen dkk., 2017; Mulligan dkk., 2024).

Perolehan hidrogen tertinggi (pada kondisi *standard temperature and pressure*, STP) diperoleh pada rasio C/N dan C/P tertinggi yaitu 200 dan 1000, dimana rasio C:N:P yang dapat menghasilkan perolehan hidrogen maksimum adalah 1000:5:1. Konsentrasi nitrogen dan fosfor yang tinggi dapat menghambat pembentukan hidrogen melalui *dark fermentation*, hal ini terjadi karena adanya pergeseran jalur metabolisme. Hasil pengukuran karakteristik POME pada Tabel 2 menunjukkan rasio C:N:P pada POME sebesar 172,6:1,3:1 dengan rasio C/N sebesar 132,8 dan rasio C/P sebesar 172,6. Hal ini menunjukkan limbah POME memerlukan tambahan sumber karbon agar dihasilkan kondisi operasi optimum yang memungkinkan produksi hidrogen pada laju pembentukan maksimumnya. Penambahan sumber karbon dapat dilakukan dengan menambahkan sumber karbon yang mudah terdegradasi seperti molase atau limbah gula. Jika nitrogen terlalu rendah, dapat dilakukan penambahan senyawa kaya nitrogen seperti urea atau amonium sulfat. Jika kandungan fosfor dalam limbah rendah, dapat dilakukan penambahan asam fosfat atau fosfat monoamonium dan dilakukan pemantauan secara berkala untuk menyesuaikan bahan tambahan agar proses anaerobik berjalan optimal, menghasilkan produk secara efisien, dan mengurangi beban limbah (Hussain dkk., 2015).

3.3 Potensi Pembentukan Produk

Proses konversi limbah pada kondisi anaerob (*dark fermentation*) secara umum dapat digambarkan oleh reaksi berikut (Anzola-Rojas dkk., 2016; Zhu dkk., 2022).



Berdasarkan kesetaraan stoikiometri reaksi tersebut, degradasi 1 mol glukosa (substrat) dapat menghasilkan 1 mol etanol, 1 mol asetat, 2 mol hidrogen, dan 2 mol CO₂. Dalam hal ini, konsentrasi COD seluruhnya diasumsikan sebagai glukosa dan proses biodegradasi terjadi pada kondisi paling optimum. Namun, pendekatan stoikiometri tidak dapat sepenuhnya digunakan dalam menentukan jumlah produk yang dihasilkan melalui proses degradasi anaerob. Hal ini dikarenakan proses anaerob terdiri atas serangkaian proses konversi yang kompleks dan dapat terjadi melalui beragam jalur metabolisme yang berpengaruh pada kuantitas produk akhir yang dihasilkan. Pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Gumilar dll., (2023), pengolahan POME secara anaerob menghasilkan perolehan biohidrogen maksimum sebesar 7,57 %v/v dan konsentrasi bioetanol sebesar 589,40 mg/L. Konsentrasi produk yang dihasilkan bergantung pada keragaman mikroorganisme pendegradasi limbah.

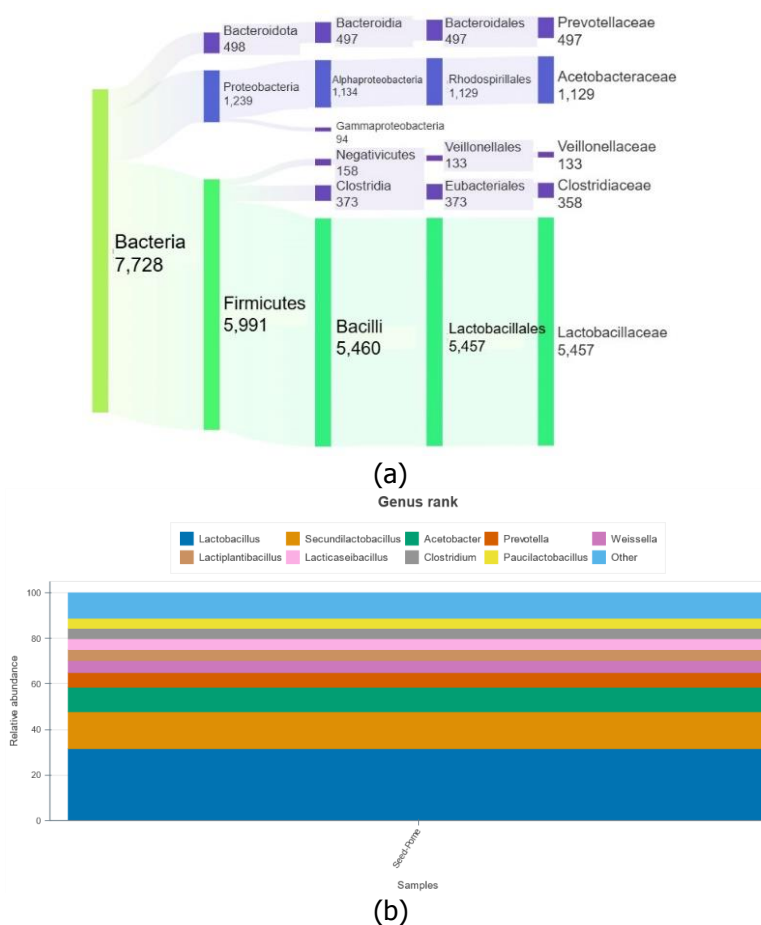
Konversi senyawa organik pada POME menjadi produk berupa hidrogen, etanol, dan asam lemak volatil dapat terjadi karena adanya aktivitas enzim dari konsorsium mikroorganisme yang terkandung pada limbah. Keragaman mikroorganisme dalam suatu limbah memengaruhi produk akhir yang dihasilkan. Pada penelitian ini, dilakukan analisis keragaman mikroorganisme dari sampel *mixed culture* yang digunakan sebagai agen pendegradasi limbah artifisial. *Mixed culture* yang digunakan terdiri dari campuran kolam IPAL industri kelapa sawit dan rumen sapi serta POME sebagai substrat. Hasil analisis keragaman mikroorganisme yang terkandung dalam *mixed culture* ditunjukkan oleh Gambar 2.

Dari hasil analisis, diperoleh famili *Lactobacillaceae* sebagai famili yang dominan, kemudian diikuti dengan famili *Acetobacteraceae*, *Prevotellaceae*, *Clostridiceae*, dan *Veillonelaceae*. *Lactobacillaceae* merupakan kelompok bakteri fermentasi dengan produk utama berupa laktat. Namun, beberapa spesies bakteri ini memiliki kemampuan dan potensi dalam menghasilkan produk berupa hidrogen, etanol, dan laktat. Beberapa spesies *Lactobacillus* dan bakteri lain dalam famili *Lactobacillaceae* dapat menghasilkan hidrogen melalui proses *dark fermentation* dengan bantuan enzim hidrogenase yang memungkinkan reduksi proton (H⁺) menjadi gas hidrogen (H₂). Kelompok bakteri pada genus *Lactobacillus* dapat memproduksi etanol melalui fermentasi homolaktat atau heterolaktat, dimana glukosa sebagai sumber karbon akan dikonversi menjadi laktat, etanol, dan CO₂ bergantung pada jalur metabolisme yang tersedia (Kacaribu dan Darwin, 2024). Bakteri asam laktat juga dapat memproduksi propionat dan suksinat, serta dapat berperan sebagai prekursor dalam produksi butirat (Sydney dkk., 2018).

Acetobacteraceae berperan dalam mereduksi etanol menghasilkan asetat yang kemudian menjadi produk intermediet dalam produksi hidrogen. Dalam sistem anaerobik yang lebih kompleks, *Acetobacteria* dapat berperan dalam siklus konversi bahan organik dengan menyediakan produk fermentasi berupa asetat yang dapat digunakan oleh bakteri lain untuk menghasilkan hidrogen. Kelompok bakteri *Clostridiaceae*, khususnya genus *Clostridium*, berperan penting dalam produksi hidrogen, etanol, dan asam lemak volatil karena kemampuannya dalam mendegradasi berbagai jenis substrat organik (Wells dan Wilkins, 1996). Produk berupa hidrogen dihasilkan sebagai produk samping dari proses *dark fermentation* melalui jalur Embden-Meyerhof-Parnas (EMP) dan jalur bifurcasi elektron, dimana molekul glukosa dipecah menjadi asam organik (asetat dan butirat) serta hidrogen

Potensi Limbah Cair Kelapa Sawit Sebagai Bioenergi Berdasarkan Karakteristik dan Komposisi Mikroorganisme

(Wiegel dkk., 2006). *Clostridium butyricum* dan *Clostridium pasteurianum* sebagai spesies utama dalam menghasilkan hidrogen, bersamaan dengan produksi asetat dan butirir. Pada produksi etanol, *Clostridium* menghasilkan etanol melalui jalur fermentasi campuran dimana etanol dihasilkan bersama dengan produk lain seperti asetat, butirir, dan hidrogen (Williams dkk., 2012). Salah satu spesies yang dapat menghasilkan etanol dalam jumlah signifikan adalah *Clostridium acetobutylicum* melalui jalur fermentasi ABE (aseton-butanol-etanol) (Xia dkk., 2016). Keragaman kelompok bakteri dalam *mixed culture* ini berperan dalam menentukan jenis dan jumlah produk akhir yang dihasilkan dari proses biodegradasi secara anaerobik dan menunjukkan bahwa POME berpotensi dalam produksi bioetanol dan biohidrogen yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi baru terbarukan.



Gambar 2. Keragaman pada *mixed culture* yang digunakan dalam penelitian: (a) famili dan (b) genus

4. KESIMPULAN

Limbah cair kelapa sawit memiliki potensi besar sebagai bahan baku bioenergi, khususnya untuk produksi bioetanol dan biohidrogen, melalui proses anaerobik. Karakterisasi POME yang berasal dari PT Condong Garut menunjukkan kandungan organik yang sangat tinggi, dengan nilai COD 16.933,9 mg/L dan VSS sebesar 4.622,13 mg/L serta dominasi mikroorganisme dari famili *Lactobacillaceae*, *Acetobacteraceae*, *Prevotellaceae*, dan *Clostridiceae*. Mikroorganisme ini berperan dalam degradasi senyawa organik untuk menghasilkan etanol, hidrogen, dan asam lemak volatil. Dengan sifat *biodegradable* yang kuat dan ketersediaan POME yang melimpah, pemanfaatannya tidak hanya menawarkan solusi pengelolaan limbah, tetapi juga menjadi alternatif energi terbarukan yang mendukung keberlanjutan lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kelompok Keahlian Rekayasa Air dan Limbah Cair serta Program Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat ITB (P2MI) 2024 yang telah mendukung keberlangsungan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abd Rahim, N., Indera Luthf, A. A., Mohamed Abdul, P., Md Jahim, J., & Bukhari, N. A. (2022). Oil Palm Biomass Pretreatment and Hydrolysis: A Recent Biotechnological Venture Towards Bio-Based Lactic Acid Production. *Jurnal Kejuruteraan*, 34(6), 1287–1302. [https://doi.org/10.17576/JKUKM-2022-34\(6\)-29](https://doi.org/10.17576/JKUKM-2022-34(6)-29)
- Ammary, B. Y. (2004). Nutrients requirements in biological industrial wastewater treatment. *African Journal of Biotechnology*, 3(4), 236–238. <http://www.academicjournals.org/AJB>
- Andrio, D., Syafila, M., & Handajani, M. (2014). *Mekanisme dan Strategi Kontrol Pembentukan Etanol dari Limbah Cair yang Mengandung Senyawa Organik Konsentrasi Tinggi* [Institut Teknologi Bandung]. https://digilib.itb.ac.id/gdl/view/80718/andrio?rows=2&per_page=3
- Anggamulia, M. I., Syafila, M., Handajani, M., & Gumilar, A. (2020). The potential bio-conversion of Palm Oil Mill Effluent (POME) as Bioethanol by steady-state anaerobic processes. *E3S Web of Conferences*, 148, 02001. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202014802001>
- Anzola-Rojas, Zaiat, M., & De Wever, H. (2016). Improvement of hydrogen production via ethanol-type fermentation in an anaerobic down-flow structured bed reactor. *Bioresource Technology*, 202, 42–49. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2015.11.084>
- Argun, H., Kargi, F., Kapdan, I., & Oztekin, R. (2008). Biohydrogen production by dark fermentation of wheat powder solution: Effects of C/N and C/P ratio on hydrogen yield and formation rate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(7), 1813–1819. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.01.038>
- Badder, A. Ch., Hussein, H. J., & Jabar, M. T. (2022). BOD: COD Ratio as Indicator for Wastewater and Industrial Water Pollution. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SPECIAL EDUCATION*, 37(3). https://www.researchgate.net/publication/362053527_BOD_COD_Ratio_as_Indicator_for_Wastewater_and_Industrial_Water_Pollution
- Chen, Y., Liu, H., Zheng, X., Wang, X., & Wu, J. (2017). New method for enhancement of bioenergy production from municipal organic wastes via regulation of anaerobic fermentation process. *Applied Energy*, 196, 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.100>
- Chen, Y., Zhang, X., & Chen, Y. (2021). Propionic acid-rich fermentation (PARF) production from organic wastes: A review. Dalam *Bioresource Technology* (Vol. 339). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125569>
- Cyprowski, M., Stobnicka-Kupiec, A., Ławniczek-Wałczyk, A., Bakal-Kijek, A., Gołofit-Szymczak, M., & Górny, R. L. (2018). Anaerobic bacteria in wastewater treatment plant. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 91(5), 571–579. <https://doi.org/10.1007/S00420-018-1307-6>
- Demirel, B., & Scherer, P. (2008). The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: A review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(2), 173–190. <https://doi.org/10.1007/S11157-008-9131-1>
- Dominic, D., & Baidurah, S. (2022). Recent Developments in Biological Processing Technology for Palm Oil Mill Effluent Treatment—A Review. *Biology*, 11(4), 525. <https://doi.org/10.3390/BIOLOGY11040525>

Potensi Limbah Cair Kelapa Sawit Sebagai Bioenergi Berdasarkan Karakteristik dan Komposisi Mikroorganisme

- Ermawati, Y., Yulistia, E., & Alamsyah, P. (2023). Prospek dan Potensi Biogas sebagai Energi Alternatif Menghadapi Krisis Energi. *UNBARA Environmental Engineering Journal (UEEJ)*, 3(02), 21–26. <https://doi.org/10.15282/IJAME.14.3.2017.1.0348>
- Gökçek, Ö. B., & Erdoğan, Ş. N. (2023). The effect of adding zero-valent iron nanoparticles on biohydrogen production from refractory waste. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.08.120>
- Gondi, R., Kavitha, S., Yukesh Kannah, R., Parthiba Karthikeyan, O., Kumar, G., Kumar Tyagi, V., & Rajesh Banu, J. (2022). Algal-based system for removal of emerging pollutants from wastewater: A review. *Bioresource Technology*, 344, 126245. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.126245>
- Gondi, R., Ramachandran, S., S, K., Ravi, Y. K., Kumar, G., Al-Qaradawi, S. Y., & Rajesh Banu, J. (2023). Surfactant-mediated sonic hydrolysis of marine macroalgae *Ulva fasciata* for biohydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.07.244>
- Gumilar, A., Syafila, M., Handajani, M., & Hidayat, S. (2023). *Pemanfaatan Limbah Cair Industri Minyak Sawit sebagai Substrat pada Pembentukan Etanol dan Hidrogen secara Anaerob*. Institut Teknologi Bandung.
- Henze, M. (2002). *Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes (Livre numérique Google)*. 430. https://books.google.com/books/about/Wastewater_Treatment.html?id=Ja4AxcKIvQUC
- Hussain, A., Kumar, P., & Mehrotra, I. (2015). Nitrogen and phosphorus requirement in anaerobic process: A review. *Environmental Engineering and Management Journal*, 14(4), 769–780. <https://doi.org/10.30638/EEMJ.2015.086>
- Imam, S. S., Sani, S., Mujahid, M., & Adnan, R. (2024). Valuable resources recovery from palm oil mill effluent (POME): A short review on sustainable wealth reclamation. *Waste Management Bulletin*, 3(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/J.WMB.2024.12.002>
- Isaiah, O. O., & Blessing, A. G. (2020). Environmental Pollutant of Palm Oil Effluent and Its Management in Okitipupa Area of Ondo State, Nigeria. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*, 6.
- Kacaribu, A. A., & Darwin. (2024). Biotechnological lactic acid production from low-cost renewable sources via anaerobic microbial processes. *BioTechnologia*, 105(2), 179–194. <https://doi.org/10.5114/BTA.2024.139757>
- Khanal, S. K., Nindhia, T. G. T., & Nitayavardhana, S. (2019). Biogas From Wastes: Processes and Applications. *Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches*, 165–174. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64200-4.00011-6>
- Madaki, Y. S., & Seng, L. (2013). Palm oil mill effluent (POME) from Malaysia palm oil mills: Waste or resource. *International Journal of Science, Environment*, 2(6). www.ijset.net
- Maier, R. M., Pepper, I. L., & Gerba, C. P. (1999). *Environmental Microbiology*. Academic Press.
- Marshall, A., Fuller, D. T., Dougall, P., Kumaragama, K., Dhaniyala, S., & Sur, S. (2024). Application of nanopore sequencing for accurate identification of bioaerosol-derived bacterial colonies. *Environmental Science: Atmospheres*, 4(7), 754–766. <https://doi.org/10.1039/D3EA00175J>
- Matsumoto, M., & Nishimura, Y. (2007). Hydrogen production by fermentation using acetic acid and lactic acid. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 103(3), 236–241. <https://doi.org/10.1263/JBB.103.236>
- Metcalf, & Eddy. (2017). *Wastewater Engineering: Treatment And Reuse 4th Edition*. Dalam *Mc.Graw Hills*. Mc.Graw Hills. <https://www.amazon.com/Wastewater-Engineering-Treatment-Reuse-Metcalf/dp/0070495394>

- Mohammad, S., Baidurah, S., Kobayashi, T., Ismail, N., & Leh, C. P. (2021). Palm Oil Mill Effluent Treatment Processes—A Review. *Processes* 2021, Vol. 9, Page 739, 9(5), 739. <https://doi.org/10.3390/PR9050739>
- Mohammed, R. R., & Chong, M. F. (2014). Treatment and decolorization of biologically treated Palm Oil Mill Effluent (POME) using banana peel as novel biosorbent. *Journal of Environmental Management*, 132, 237–249. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.031>
- Mulligan, N., Ribes, J., Zheng, X., & Li, R. (2024). Critical Review on Two-Stage Anaerobic Digestion with H₂ and CH₄ Production from Various Wastes. *Water* 2024, Vol. 16, Page 1608, 16(11), 1608. <https://doi.org/10.3390/W16111608>
- Ngatirah, SP. M. (2017). Teknologi Penanganan dan Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit. *Ungaran Trubus Agriwidya*, 49.
- Ni, J., Ji, J., Li, Y. Y., & Kubota, K. (2022). Microbial characteristics in anaerobic membrane bioreactor treating domestic sewage: Effects of HRT and process performance. *Journal of Environmental Sciences*, 111, 392–399. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2021.04.022>
- Poh, P. E., Yong, W. J., & Chong, M. F. (2010). Palm Oil Mill Effluent (POME) Characteristic in High Crop Season and the Applicability of High-Rate Anaerobic Bioreactors for the Treatment of POME. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49(22), 11732–11740. <https://doi.org/10.1021/IE101486W>
- Puteri, T. W., & Syafila, M. (2018). *PENGARUH PENAMBAHAN LOGAM TERHADAP PEMBENTUKAN ETANOL DARI PALM OIL MILL EFFLUENT (POME) DALAM PROSES ANAEROB*. Institut Teknologi Bandung.
- Qu, X., Zeng, H., Gao, Y., Mo, T., & Li, Y. (2022). Bio-hydrogen production by dark anaerobic fermentation of organic wastewater. *Catalytic Reactions and Chemistry*, 10. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.978907>
- Saputra, H., Rantawi, A. B., Siregar, A. L., Rahardjan, I. B., & Simatupang, D. F. (2024). Red Palm Oil from Crude Palm Oil Refinement Using The Acid Degumming Method. *Article in International Journal of Applied Research and Sustainable Sciences*. <https://doi.org/10.59890/ijarss.v2i6.1957>
- Sung, S., Raskin, L., Duangmanee, T., Padmasiri, S., & Simmons, J. J. (2002). HYDROGEN PRODUCTION BY ANAEROBIC MICROBIAL COMMUNITIES EXPOSED TO REPEATED HEAT TREATMENTS. *Proceedings of the 2002 U.S. DOE Hydrogen Program Review*.
- Sydney, E. B., Novak, A. C., Rosa, D., Pedroni Medeiros, A. B., Brar, S. K., Larroche, C., & Soccol, C. R. (2018). Screening and bioprospecting of anaerobic consortia for biohydrogen and volatile fatty acid production in a vinasse based medium through dark fermentation. *Process Biochemistry*, 67, 1–7. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2018.01.012>
- Wang, J., & Yin, Y. (2018). Fermentative hydrogen production using various biomass-based materials as feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 284–306. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.04.033>
- Wells, C. L., & Wilkins, T. D. (1996). Clostridia: Sporeforming Anaerobic Bacilli. *Medical Microbiology*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK8219/>
- Wiegel, J., Tanner, R., & Rainey, F. A. (2006). An Introduction to the Family Clostridiaceae. *The Prokaryotes*, 654–678. https://doi.org/10.1007/0-387-30744-3_20
- Williams, K., Zheng, Y., McGarvey, J., Fan, Z., & Zhang, R. (2012). Ethanol and Volatile Fatty Acid Production from Lignocellulose by *Clostridium cellulolyticum*. *ISRN Biotechnology*, 2013, 137835. <https://doi.org/10.5402/2013/137835>
- Xia, A., Jacob, A., Tabassum, M. R., Herrmann, C., & Murphy, J. D. (2016). Production of hydrogen, ethanol and volatile fatty acids through co-fermentation of macro- and micro-algae. *Bioresource Technology*, 205, 118–125. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.01.025>

Potensi Limbah Cair Kelapa Sawit Sebagai Bioenergi Berdasarkan Karakteristik dan Komposisi Mikroorganismen

Zhu, X., Yellezuome, D., Liu, R., Wang, Z., & Liu, X. (2022). Effects of co-digestion of food waste, corn straw and chicken manure in two-stage anaerobic digestion on trace element bioavailability and microbial community composition. *Bioresource Technology*, 346, 126625. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.126625>