

Potensi Energi Terbarukan dari Pemanfaatan Energi Biogas POME (*Palm Oil Mill Effluent*) sebagai Sumber Energi Terbarukan di Provinsi Jambi

Donar Sagala¹, Evi Frimawaty^{1*}, dan Ahyahudin Sodri¹

¹Sekolah Ilmu Lingkungan, Universitas Indonesia, Jakarta; e-mail: evi.frimawaty11@ui.ac.id

ABSTRAK

Energi berperan penting dalam mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan. Ketersediaan dan akses yang merata terhadap energi bersih merupakan suatu tantangan yang dihadapi saat ini. Indonesia sebagai negara produsen minyak sawit mentah *Crude Palm Oil* (CPO) di dunia dengan produksi mencapai 45.12 juta ton pada tahun 2021. Seiring dengan peningkatan volume produksi yang besar tersebut akan menghasilkan sejumlah besar limbah cair pabrik sawit atau *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Penguraian POME secara anaerobik akan menghasilkan biogas yang dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan. POME yang tidak dikelola dengan baik akan berdampak negatif terhadap lingkungan dikarenakan kandungan *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang tinggi, apabila langsung dibuang ke kolam terbuka maka akan melepas gas metana ke atmosfer sebagai emisi gas rumah kaca (GRK). Namun jika dikelola dengan tepat akan memberikan nilai tambah secara ekonomi, sosial dan lingkungan terutama dalam hal pengurangan GRK dan pencemaran sumber daya air. Di provinsi Jambi terdapat sekitar 80 Pabrik Kelapa Sawit (PKS), namun hanya sedikit yang belum memanfaatkan POME sebagai sumber energi terbarukan. Tujuan dari studi ini adalah untuk membahas potensi energi terbarukan dari pemanfaatan energi biogas POME. Penelitian ini menggunakan metode deskriptif dengan melakukan survey. Hasil penelitian menunjukkan karakteristik POME memiliki suhu 70 - 90°C, bersifat asam dengan pH 4 - 5,5 dan kandungan COD tinggi yaitu 80.000 - 120.000 mg/L, dengan proses anaerobik sistem tangki reaktor menghasilkan biogas dengan rasio sekitar 30 - 40 Nm³/ton POME. Biometana sebagai komponen utama biogas yang dihasilkan dari penguraian POME dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan pengganti fosil. Potensi energi terbarukan dari POME di Provinsi Jambi cukup besar dengan total kapasitas pabrik pakai sebesar 3.026 ton TBS/jam, berpotensi menghasilkan energi listrik sebesar 969 GWH/tahun.

Kata kunci: Biogas, metana, energi terbarukan, POME, sawit, potensi energi

ABSTRACT

Energy is an important role in achieving sustainable development goals. Availability and equitable access to clean energy are challenges we are currently facing. Indonesia is a Crude Palm Oil (CPO) producing country in the world with production reaching 45.12 million tons in 2021. Along with a large increase in production volume, this will produce large amounts of palm oil mill effluent (POME). The anaerobic decomposition of POME will produce biogas which can be used as a renewable energy source. POME that is not managed properly will harm the environment due to its high Chemical Oxygen Demand (COD) content, if it is directly discharged into lagoon it will release methane gas into the atmosphere as greenhouse gas (GHG) emissions. However, if managed properly, it will provide added value economically, socially, and environmentally, especially in terms of GHG reduction and pollution of water resources. In Jambi province, there are about 80 Palm Oil Mills (POM), but only a few have not utilized POME as a renewable energy source. The purpose of this study is to discuss the renewable energy potential of POME biogas energy utilization. This study used a descriptive method by conducting a survey. The results showed that the characteristics of POME have a temperature of 70 - 90°C, acidic with a pH of 4 - 5.5, and a high COD content of 80,000 - 120,000 mg/L, with the anaerobic process of the reactor tank system producing biogas with a ratio of about 30 - 40 Nm³/ton POME. Biomethane as the main component of biogas produced from the decomposition of POME can be used as a renewable energy source to replace fossil fuels. The potential for renewable energy from POME in Jambi Province is quite large with a total mill capacity of 3,026 tons of FFB/hour, potentially producing 969 GWH/year of electrical energy.

Keywords: Biogas, Methane, Renewable energy, POME, Palm oil, energy potential

Citation: 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, doi:10.14710/jil.22.1.205-214

1. Pendahuluan

Industri kelapa sawit merupakan salah satu industri utama di dunia sebagai penghasil minyak nabati paling efisien secara global, dengan produksi sekitar lima kali lebih produktif per area dibandingkan tanaman penghasil minyak terbesar kedua minyak biji rape (Woittiez et al., 2017). Produktivitas per hektar jauh lebih tinggi dibandingkan dengan tanaman minyak lainnya seperti minyak bunga matahari, minyak kedelai dan tanaman penghasil minyak lainnya, hal ini menjadi keuntungan utama dari kelapa sawit (Khatun et al., 2017). Indonesia adalah negara penghasil dan pengeksport minyak sawit terbesar di dunia disusul Malaysia, dan Thailand menempati urutan teratas negara dengan produksi minyak sawit terbesar di dunia (Iskandar et al., 2018). Meningkatnya permintaan akan minyak kelapa sawit berdampak terhadap peningkatan produksi limbah cair atau *palm oil mill effluent* (POME). POME yang tidak dikelola dengan baik akan berdampak buruk bagi lingkungan. Diperlukan teknologi pengolahan POME yang ramah lingkungan, dengan teknologi pengolahan POME yang tepat memiliki potensi sebagai sumber energi terbarukan yang akan dapat mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) (Nasution et al., 2020). Dengan demikian pengolahan minyak kelapa sawit dapat berkelanjutan.

Menurut data Statistik Kelapa Sawit Indonesia pada tahun 2021, luas areal perkebunan kelapa sawit mencapai sekitar 14,62 juta hektar yang tersebar di 26 provinsi. Hal ini menjadikan kelapa sawit sebagai tanaman yang memiliki potensi dan peluang untuk meningkatkan perekonomian dan kesejahteraan sosial masyarakat. Meskipun hal ini menawarkan peluang untuk pengembangan industri kelapa sawit yang berkelanjutan, namun diperlukan pengembangan produksi minyak sawit yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan yang lebih signifikan, jika pengelolaan yang dilakukan masih konvensional dapat menimbulkan dampak negatif seperti tekanan terhadap alih fungsi lahan dan peningkatan emisi gas rumah kaca (GRK) (Ramdani & Hino, 2013; Uusitalo et al., 2014). Faktanya, ekspansi produksi minyak sawit di Indonesia sebelumnya menunjukkan sebagai faktor penyebab utama deforestasi dan emisi GRK (Ramdani & Hino, 2013).

Energi memiliki peranan penting dalam pencapaian tujuan Pembangunan Berkelanjutan (PB) yaitu pembangunan yang selaras antara pencapaian peningkatan ekonomi, sosial dan lingkungan. Kebutuhan akan energi di Indonesia meningkat sangat signifikan. Peningkatan permintaan energi global dan juga akan kesadaran ekologi telah menyebabkan tekanan yang signifikan dalam penerapan energi berkelanjutan (Dincer, 2000), dimana ada kekhawatiran akan menipisnya bahan bakar fosil sehingga perlu peningkatan kegiatan penelitian tentang pengembangan energi terbarukan seperti produksi biogas dari limbah untuk pembangkit listrik yang berkelanjutan.

Indonesia dan negara-negara di Asia Tenggara lainnya memiliki potensi besar untuk sumber energi berkelanjutan (Erdiwansyah et al., 2019), sumber energi terbarukan seperti bioenergi dan biofuel dari bahan baku terbarukan telah dieksplorasi secara ekstensif untuk menggantikan bahan bakar fosil yang terbatas dan memiliki dampak negatif terhadap lingkungan. Bioenergi di Indonesia, Malaysia dan China terkait erat dengan kebijakan pertanian dan pedesaan (Junginger et al., 2020).

Pengembangan dan pemanfaatan bioenergi berbasis kelapa sawit merupakan salah satu solusi yang dapat diterapkan untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat pedesaan di Indonesia (Pilloni et al., 2020). Bioenergi dari limbah pengolahan kelapa sawit merupakan alternatif yang ekonomis untuk mengganti bahan bakar fosil. Selama ini, penanganan pengolahan POME masih hanya terbatas pada pemenuhan terhadap kepatuhan pada peraturan pemerintah tanpa mempertimbangkan potensi nilai tambah yang dapat diperoleh dari pengolahan POME sebagai sumber energi alternatif. Potensi pemanfaatan POME sebagai sumber energi untuk pembangkit listrik tenaga biogas yang merupakan energi terbarukan telah terabaikan. POME memiliki kandungan *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang tinggi berupa karbohidrat, protein dan lemak serta diproduksi dalam jumlah besar di semua pabrik kelapa sawit, sehingga memiliki posisi yang baik sebagai sumber potensial yang besar untuk produksi bioenergi seperti gas metana (Chin et al., 2013). Biogas menghasilkan api biru dan memiliki nilai panas antara 4500 dan 5000 * 4,184 kJ / m³ dengan kandungan metana 60-70% (Babel et al., 2009). Biometana dapat dimanfaatkan dengan cara dibakar langsung untuk menghasilkan panas, bahan bakar pembangkit listrik serta sebagai bahan bakar kendaraan.

Indonesia telah meratifikasi Perjanjian Paris melalui Undang-Undang No. 16 tahun 2016 tentang Pengesahan Persetujuan Paris atas Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa mengenai Perubahan Iklim. Indonesia telah mengambil langkah penting dalam kebijakan perubahan iklim, yaitu dengan telah menetapkan sasaran untuk meningkatkan kapasitas listrik sebesar 35 GW, dengan 25% dari sumber energi terbarukan, dan untuk meningkatkan elektrifikasi nasional menjadi 97% pada tahun 2019. Sasaran ini mendukung investasi dalam proyek energi terbarukan seperti pemanfaatan POME untuk energi (IRENA, 2017). Indonesia berkomitmen untuk melaksanakan Perjanjian Paris sebagaimana dinyatakan dalam *Nationally Determined Contribution* (NDC) bahwa target pengurangan emisi gas rumah kaca Indonesia sebesar 29% pada tahun 2030. Perjanjian Paris merupakan pengganti Protokol Kyoto yang menekankan pentingnya pembatasan kenaikan suhu global di bawah 2°C. NDC menyatakan komitmen kuat Indonesia untuk melaksanakan kegiatan mitigasi dan adaptasi perubahan iklim yang

direncanakan untuk dipimpin dan dikoordinasikan diantara berbagai pemangku kepentingan termasuk lembaga pemerintah dan Direktorat Jenderal Perubahan Iklim yang baru dibentuk, di bawah Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (IRENA, 2017).

Provinsi Jambi memiliki area perkebunan kelapa sawit sekitar 1.084.700 ha pada tahun 2021 yang dikuasai oleh Badan Usaha Milik Negara, swasta dan masyarakat (BPS, 2022). Hal ini menjadikan perkebunan sawit memiliki potensi energi terbarukan yang cukup besar, berdasarkan data dari Dinas Lingkungan Hidup Prov. Jambi tahun 2022 di provinsi Jambi terdapat sejumlah perusahaan perkebunan besar BUMN/swasta mencapai 80 unit pabrik kelapa sawit (PKS) dengan kapasitas pakai 3.026 ton TBS/jam. Namun dari 80 unit pabrik kelapa sawit yang beroperasi di provinsi Jambi masih sedikit yang memanfaatkan limbah cair kelapa sawit untuk energi, hanya ada 6 unit PKS yang memanfaatkan POME untuk energi namun belum dimanfaatkan secara optimal untuk digunakan sebagai sumber pembangkit energi alternatif, apabila potensi ini dikembangkan dapat dimanfaatkan untuk supply kebutuhan energi di daerah sekitar perkebunan dan juga untuk daerah pedesaan di sekitar perkebunan yang belum terjangkau jaringan listrik negara.

Dalam studi ini, bertujuan untuk menganalisis potensi energi terbarukan dari energi biogas dari pemanfaatan limbah cair pabrik kelapa sawit atau *Palm Oil Mill Effluent* (POME), bagaimana potensinya dapat berkontribusi dalam peningkatan pemanfaatan energi terbarukan di Jambi untuk dimaksimalkan penggunaannya terkait dengan kemandirian energi dari sumber energi baru terbarukan.

2. Metode Penelitian

Lokasi penelitian dilaksanakan di Provinsi Jambi, dengan mengambil sampel penelitian di PT. Dasa Anugrah Sejati (PT. DAS) yang berlokasi di desa Badang kecamatan Batu Asam kabupaten Tanjung Jabung Barat Jambi. Data dalam penelitian ini menggunakan data primer dan data sekunder.

Metode analisis untuk menghitung potensi energi yang dapat dihasilkan dari POME dengan rumus persamaan berikut.

$$\text{COD Loading} \left(\frac{\text{Kg COD}}{\text{hari}} \right) = \text{COD} \times \text{Jumlah POME} \times \frac{\text{kg}}{1000.000 \text{ mg}} \times \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \quad (1)$$

$$\text{Produksi } \text{CH}_4 \left(\frac{\text{Nm}^3 \text{CH}_4}{\text{hari}} \right) = \text{COD Loading} \times \text{COD}_{\text{eff}} \times \frac{\text{CH}_4}{\text{COD}} \quad (2)$$

$$\text{Kapasitas Pembangkitan (MWe)} = \frac{\text{Produksi } \text{CH}_4 \times \text{CH}_{4,\text{ev}} \times \text{Gen}_{\text{eff}}}{24 \times 60 \times 60} \quad (3)$$

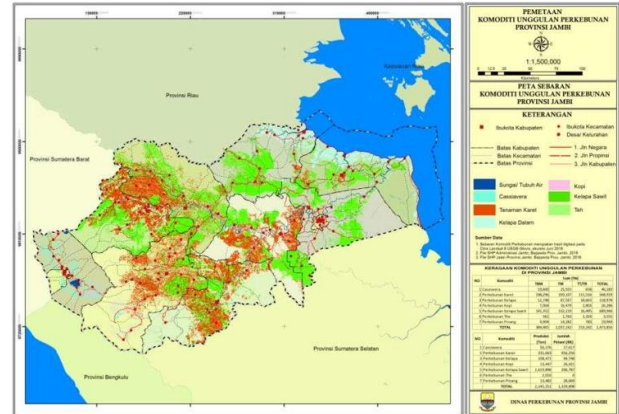
Dimana:

COD_{eff}: Persentase COD yang akan diubah menjadi metana (80 – 95%)

CH₄/COD: Volume metana yang dihasilkan per kg COD yang dihilangkan dari air limbah secara teoritis (0,35 Nm³ CH₄ /kg COD removal)

CH_{4, ev}: kandungan energi metana (MJ/m³)

Gen_{eff}: Efisiensi gas engine dalam mengkonversi nilai energi metana menjadi energi listrik (38 – 42%) data dikumpulkan dari lokasi penelitian dan beberapa data sekunder yang berasal dari pemerintah, lembaga riset, organisasi, atau penelitian akan digunakan dalam perhitungan potensi energi biogas dari POME.



Gambar 1 Peta Lokasi Penelitian dan Sebaran Area Perkebunan di Jambi

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Palm Oil Mill Effluent (POME)

Kegiatan produksi tandan buah segar menghasilkan CPO dan *palm kernel* sebagai produk utama, selain itu juga menghasilkan limbah padat dan limbah cair. Limbah cair pabrik kelapa sawit atau sering disebut *Palm Oil Mill Effluent* (POME) memiliki kandungan bahan organik yang tinggi, karakteristik limbah cair yang dihasilkan oleh PT DAS memiliki suhu 70 – 90°C, bersifat asam dengan pH 4 - 5,5 dan kandungan COD tinggi yaitu 80.000 – 120.000 mg/L, mengandung padatan tersuspensi (TSS) dalam jumlah tinggi, berwarna kecoklatan. Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian Mahmod et al., (2017), tentang karakteristik POME.

Hasil pengamatan lapangan di PT. DAS menunjukkan data rasio produksi POME yang dihasilkan dari proses produksi CPO dari tandan buah segar (TBS) seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Provinsi jambi memiliki sekitar 80 unit pabrik kelapa sawit dengan izin total kapasitas olah PKS sebesar 3.437 ton TBS/jam dan total kapasitas pakai sebesar 3.026 ton TBS/jam. Untuk perhitungan total potensi produksi POME di Jambi menggunakan asumsi dengan perkalian dari kapasitas pakai.

Pengolahan kelapa sawit umumnya menghasilkan limbah cair sebanyak 0,7 m³ untuk setiap ton tandan buah segar (TBS) yang diproses di pabrik kelapa sawit. Jumlah produksi CPO yang semakin meningkat, akan berpengaruh terhadap peningkatan jumlah POME sehingga diperlukan pengolahan POME yang efektif selain dapat meningkatkan nilai tambah dari POME tersebut juga untuk mencegah kerusakan lingkungan yang parah.

Pengolahan POME dapat menghasilkan biometana dengan bakteri pengurai sebagaimana dua kelompok mikroba berikut yaitu mikroba asidogenik dan metanogenik (Ramadhani et al., 2020).

Pengolahan kelapa sawit umumnya menghasilkan limbah cair sebanyak 0,7 m³ untuk setiap ton tandan buah segar (TBS) yang diproses di pabrik kelapa sawit. Jumlah produksi CPO yang semakin meningkat, akan berpengaruh terhadap peningkatan jumlah POME sehingga diperlukan pengolahan POME yang efektif selain dapat meningkatkan nilai tambah dari POME tersebut juga untuk mencegah kerusakan lingkungan yang parah. Pengolahan POME dapat menghasilkan biometana dengan bakteri pengurai sebagaimana dua kelompok mikroba berikut yaitu mikroba asidogenik dan metanogenik (Ramadhani et al., 2020).

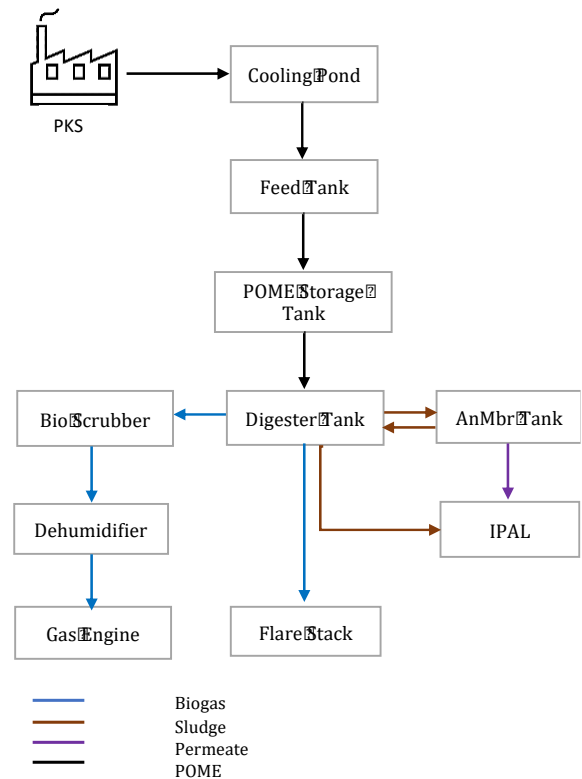
Penguraian secara anaerobik untuk produksi biogas adalah salah satu teknologi yang paling efisien untuk menyediakan energi bersih dan terbarukan dari limbah organik (Moraes et al., 2017). POME adalah limbah yang sangat mencemari karena kandungan bahan organiknya yang tinggi dinyatakan sebagai COD dan BOD, yang dapat menimbulkan efek berbahaya bagi lingkungan, apabila POME mencemari sumber daya air. Dalam beberapa tahun terakhir, POME telah dikenal sebagai sumber energi terbarukan yang prospektif. Dengan demikian, produksi bioenergi akan lebih berkelanjutan dan lebih bersih jika beroperasi bersamaan dengan pengolahan air limbah. Ada berbagai proses yang ada untuk pengolahan POME dan konversi POME menjadi bioenergi, seperti penguraian secara aerobik dan anaerobik, pengolahan fisika-kimiawi dan pemisahan membran (Ahmed et al., 2015). Fermentasi anaerobik dianggap sebagai cara yang efektif untuk mengolah dan mendaur ulang sampah organik hewan dan menghasilkan biogas, sehingga mengurangi emisi CH₄ langsung ke atmosfer.

3.2. Produksi Biogas

Proses produksi biogas di PT. DAS menggunakan *Kubota Anaerobic Membrane Bioreactor System* dengan menggunakan reaktor tangki secara ringkas ditunjukkan pada flowchart pembangkit listrik tenaga biogas seperti pada Gambar 2. POME dari pabrik dialirkan ke *cooling pond* kemudian POME dipompakan ke *feed tank* yang berfungsi sebagai tempat penampungan POME sementara sebelum dialirkan ke POME Storage Tank (MST) untuk selanjutnya dialirkan ke *Digester tank* untuk proses produksi biogas, biogas yang dihasilkan kemudian dilakukan pemurnian untuk mengurangi kadar H₂S nya dengan media *Bio Scrubber* selanjutnya dialirkan pada *dehumidifier* untuk mengurangi kandungan air pada biogas untuk selanjutnya digunakan sebagai bahan bakar pada *gas engine*.

Sistem *Kubota Anaerobic Membrane Bioreactor System* yang digunakan di PT. DAS ini dioperasikan dengan operasi termofilik dan konsentrasi tinggi, dimana sistem ini dapat meningkatkan hasil biogas secara signifikan (20% atau lebih tinggi dari sistem

lain). Sistem operasi termofilik yaitu dengan mempertahankan suhu operasional pada 50 – 70°C dimana pada kondisi ini bakteri pengurai bahan – bahan organik pada POME dapat berfungsi dengan baik. Unit reaktor di PT. DAS ini dapat memproses POME hingga 800 m³ per hari.



Gambar 2 Flowchart pembangkit listrik tenaga biogas PT. DAS

POME yang dihasilkan di PT. DAS seluruhnya dimasukkan ke proses produksi biogas dengan sistem reaktor tangki, dalam reaktor tersebut akan terjadi pengurangan kandungan COD pada POME sebelum dibuang ke kolam konvensional seperti pada Tabel 2.

Dengan menggunakan persamaan perhitungan potensi energi yang dapat dihasilkan dari produksi POME pada tempat penelitian di PT. DAS maka diperoleh hasil potensi energi yang dapat diperlihatkan pada Tabel 3. Dengan kapasitas pabrik 60 ton TBS/jam dapat membangkitkan sekitar 2 MWe.

Hasil penguraian bahan organik yang ada pada POME dengan sistem tangki reaktor menghasilkan biogas dengan rasio sekitar 30 – 40 Nm³/ton POME seperti disajikan pada Tabel 4.

Pengamatan di lapangan reaktor yang digunakan adalah sistem reaktor tangki kondisi termofilik. Penguraian anaerobik POME umumnya menggunakan dua teknologi pengolahan, yaitu bio-digester laguna tertutup dan sistem reaktor tangki berpengaduk kontinu (Sharvini et al., 2020). Hasil penguraian anaerobik meningkat seiring dengan peningkatan kandungan organik, kondisi termofilik menunjukkan hasil metan dan penurunan kandungan COD lebih tinggi dari pada kondisi mesofilik (Fikri Hamzah et al., 2020).

Biogas yang berasal dari limbah dapat menghasilkan sumber energi yang terbarukan, berkelanjutan, dan hijau. Biogas adalah gas tidak berwarna dan tidak berbau yang terdiri dari gas metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂) sebagai komponen utama, dan sejumlah kecil hidrogen sulfida (H₂S), dan sejumlah kecil karbon monoksida (CO) dan oksigen (O₂) (Lönnqvist et al., 2015). Proses produksi biogas melibatkan sintesis mikroba yang meliputi hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis dan metanogenesis (Ohimain & Izah, 2017).

Biogas yang diproduksi dari limbah cair pengolahan sawit setelah dilakukan pemurnian dengan bio scrubber Sebagian besar dimanfaatkan untuk bahan bakar pembangkit listrik tenaga biogas. Energi listrik yang dihasilkan digunakan untuk pemenuhan kebutuhan energi untuk proses pengolahan inti sawit di *Kernel Crushing Plant* (KCP) dan sebagian untuk operasional pabrik. Produksi biogas dan penggunaannya untuk bahan bakar ke gas engine serta jumlah energi listrik yang dihasilkan ditunjukkan pada Tabel 5.

Limbah yang kandungan COD nya telah berkurang selanjutnya dialirkan ke IPAL atau kolam konvensional dan selanjutnya akan dimanfaatkan ke lahan aplikasi sebagai pengairan lahan kebun kelapa sawit. Hal ini sejalan dengan konsep alternatif sistem pengolahan nol pembuangan limbah yang dikatakan sebagai teknologi berkelanjutan yang menjanjikan karena dapat menghasilkan biogas dengan daur ulang dan penggunaan kembali air yang maksimal (Aziz et al., 2020). Selain meningkatkan mutu air limbah yang dibuang, pengolahan POME dalam reaktor anaerobik tertutup menggantikan kolam laguna terbuka sistem aerobik berperan dalam produksi yang lebih bersih (Ahmad & Ghufuran, 2018). POME dimanfaatkan menjadi produk ramah lingkungan yang memiliki nilai ekonomis, nilai eko-efisiensi produk biogas menyatakan tingkat efisiensi produk sebesar 99,76% (Lestari et al., 2021)

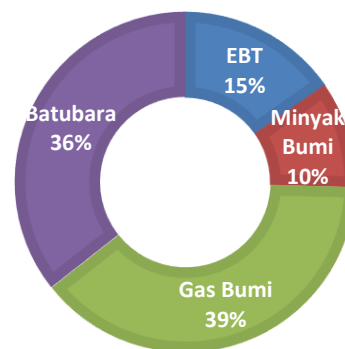
Dengan pemanfaatan energi biogas dari POME ini perusahaan bisa menghemat penggunaan bahan bakar fosil untuk diesel genset yang biasanya digunakan untuk pemenuhan kebutuhan energi untuk KCP dan juga penerangan perumahan. Juga dapat mengurangi pemakaian cangkang untuk bahan bakar boiler, karena Sebagian energi disupply dari gas engine. Sesuai dengan penelitian sebelumnya tentang biogas yang dihasilkan dari penguraian POME secara anaerobik dapat menggantikan penggunaan cangkang sawit dan serat mesocarp yang memiliki nilai ekonomis lebih tinggi sebagai bahan bakar boiler; biogas juga digunakan sebagai bahan bakar pada mesin gas untuk pembangkit listrik (Chin et al., 2013), biogas juga dapat diperbarui dan ditingkatkan seperti biometana dan biohydrogen, jika secara bersamaan mengoperasikan pengolahan air limbah dan menghasilkan bioenergi terbarukan di industri kelapa sawit, maka industri ini dapat berwawasan lingkungan yang lebih bersih dan keberlanjutan (Ahmed et al., 2015).

3.3. Analisis Potensi energi Biogas

Provinsi Jambi secara geografis terletak antara 0° 45' sampai 2° 45' lintang selatan dan antara 101° 10' sampai 104° 55' bujur timur, dengan luas wilayah 53.435 Km². Provinsi Jambi terdiri dari 11 kabupaten/kota dimana sebagian besar wilayah kabupaten memiliki area perkebunan kelapa sawit sebagai produk pertanian unggulan. Provinsi Jambi memiliki area perkebunan kelapa sawit sekitar 1.084.700 ha pada tahun 2021 yang dikuasai oleh Badan Usaha Milik Negara, swasta dan masyarakat. Hal ini menjadikan perkebunan memiliki potensi yang cukup besar sebagai sumber energi terbarukan dari limbah cair kelapa sawit, dengan jumlah perusahaan perkebunan besar BUMN/swasta mencapai 80 unit pabrik kelapa sawit (DLH Prov. Jambi, 2022) energi yang dominan digunakan masih bersumber.

Potensi sumber energi yang dimiliki provinsi Jambi yaitu dari sumber minyak bumi, gas bumi, batubara dan sumber EBT, namun saat ini sumber energi yang dimanfaatkan masih didominasi dari energi yang bersumber dari fosil. Bauran energi provinsi Jambi masih didominasi dari gas bumi dan batubara seperti ditunjukkan pada Tabel 6. Capaian untuk bauran energi dari EBT masih rendah yaitu sekitar 15,29% dimana target untuk capaian bauran energi provinsi Jambi untuk tahun 2025 energi yang bersumber dari EBT sebesar 25%.

Capaian bauran energi provinsi Jambi tahun 2021 menunjukkan bahwa sumber dari energi fosil dimana gas bumi dan batubara masih menjadi sumber energi primer yang digunakan. disajikan dalam bentuk chart seperti pada Gambar 3. Bauran energi Sebagian besar masih bersumber dari bahan fosil.



Gambar 3 Bauran Energi Daerah Provinsi Jambi 2021
Sumber data Dinas ESDM Prov. Jambi (2022)

Potensi yang dimiliki provinsi Jambi dari industri kelapa sawit belum dimanfaatkan secara maksimal. Dari sekitar 80 unit PKS yang berada di provinsi Jambi hanya ada sekitar 6 unit PKS yang memanfaatkan POME untuk sumber energi terbarukan, dimana sebagian besar lainnya hanya diolah secara konvensional dengan kolam terbuka. Pemanfaatan EBT yang masih rendah dikarenakan ketergantungan terhadap energi fosil masih tinggi, masih terbatasnya

kebutuhan energi, infrastruktur energi yang masih belum merata di daerah – daerah yang terpencil, serta nilai investasi untuk EBT masih dianggap relatif tinggi.

Banyaknya perusahaan perkebunan kelapa sawit yang tersebar di hampir semua kabupaten di provinsi Jambi dengan total kapasitas olah pabrik sebesar 3.026 ton TBS/jam, hal ini merupakan suatu potensi yang besar untuk pengembangan sumber energi terbarukan dari POME, energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan operasional pabrik dan juga daerah pedesaan di sekitar area perusahaan. Total potensi POME di provinsi Jambi dihitung berdasarkan asumsi produksi POME yaitu sebesar 0,7 m³/ton TBS olah, dimana untuk TBS olah dihitung dari total kapasitas PKS terpakai, dengan asumsi proses pengolahan TBS selama 16 jam per hari dengan jumlah hari proses 300 hari selama setahun. Maka potensi sumber energi biogas terbarukan yang dapat dikembangkan di Provinsi Jambi yang bersumber dari POME disajikan dalam Tabel 7. Potensi Produksi POME dan Energi Listrik di Provinsi Jambi.

Produksi POME ini dapat diproses untuk menghasilkan biogas. Biogas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk gas engine, selain itu potensi pemanfaatan biogas, dapat ditingkatkan efisiensinya menjadi biogas alam terkompresi (bio-CNG) untuk memudahkan sistem pemanfaatan dan penyimpanan (Ullah Khan et al., 2017), dengan proses pemurnian dan kompresi konsentrasi biometana menjadi (95–96 %vol) (Maršálek et al., 2020). Peningkatan kemurnian biogas dari proses penguraian anaerob POME dapat dilakukan dengan metode water scrubbing dan amine scrubbing. Kemurnian biometana mencapai 97,23% dengan menggunakan water scrubbing, dan 99,93% dengan menggunakan amine scrubbing (Saputro & Sudibandriyo, 2020). Sistem kompresi ini dapat mengoptimalkan pemakaian biogas sehingga tidak perlu ada biogas yang terbuang di flare.

Pemanfaatan POME untuk sumber energi selain meningkatkan nilai tambah dari limbah tersebut juga berperan dalam pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) dimana emisi GRK dapat mengakibatkan kenaikan suhu rata-rata global sebesar 3,7 - 4,8°C pada akhir abad ke-21 (IPCC, 2014).

Studi mengenai potensi pemanfaatan POME untuk energi sudah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya, limbah yang dimanfaatkan secara efisien dapat digunakan untuk menghasilkan produk yang memiliki nilai tambah, memanfaatkan residu minyak sawit seperti tandan buah kosong, cangkang inti, serat, dan limbah pabrik untuk efisiensi energi dapat memenuhi supply energi bagi negara hingga 50% dari target bioenergi nasionalnya pada tahun 2025, dan pengurangan emisi hingga 40 MtCO₂eq / tahun (Harahap et al., 2019), teknologi biogas dapat memberi Indonesia sumber energi yang menjanjikan, biometana dapat disuntikkan ke jalur pipa jaringan gas alam, dan teknologi biogas dapat mempercepat transisi energi di Indonesia (Rianawati et al., 2021).

Pemerintah Indonesia ikut serta dalam komitmen global untuk menurunkan emisi gas rumah kaca, sehingga pemerintah terus mendorong peningkatan energi baru terbarukan untuk menjaga ketahanan dan kemandirian energi. Sebagai komitmen pemerintah menuangkan dalam Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, target bauran energi baru dan terbarukan minimal 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 (IEA, 2019).. Indonesia memiliki potensi energi baru terbarukan yang cukup besar untuk memenuhi target bauran energi primer. Dengan target ini pada akhirnya akan membantu mengurangi emisi GRK sebesar 29% pada tahun 2030. Sektor biogas memiliki potensi besar untuk menurunkan emisi GRK, di Inggris sektor biogas mampu mengurangi emisi gas rumah kaca (Styles et al., 2016). Biogas yang terbentuk terdiri dari beberapa gas seperti metana, karbon dioksida, karbon monooksida, dan gas sulfur dioksida, dimana dari biogas tersebut kandungan utamanya adalah gas metana berkisar 55% - 65% dan karbon dioksida berkisar 30% -40% dan sisanya gas lainnya. Implementasi pengembangan energi terbarukan di Indonesia masih banyak mengalami tantangan terutama dari segi aspek permodalan dan keseriusan dunia usaha dalam mengembangkan energi terbarukan. Integrasi sistem bioenergi dari pertanian dan hutan dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air dan lahan serta membantu mengatasi kekhawatiran tentang dampak lingkungan (Creutzig et al., 2015). Dengan menangkap dan memanfaatkan biogas dari POME untuk energi, hal ini juga berperan dalam pengurangan pembuangan emisi gas rumah kaca ke atmosfer. Apabila semua PKS yang ada di provinsi Jambi memanfaatkan POME untuk energi maka berpotensi menurunkan pembuangan gas metana ke atmosfer sebanyak 257.145.351 Nm³/tahun.

Teknologi konversi limbah menjadi energi, Secara umum ada dua jenis teknologi yang dapat digunakan untuk mengubah limbah menjadi energi yaitu dengan konversi termal dan konversi kimiawi. Teknologi limbah menjadi energi melalui pendekatan konversi kimiawi melibatkan produksi biogas dari penguraian biokimiawi bahan organik dalam limbah, yang selanjutnya dapat digunakan untuk pemanas dan pembangkit listrik. Proses ini disebut juga dengan methanasi karena sebagian besar gas yang dihasilkan berupa metana (CH₄). Berbagai penelitian mengungkapkan bahwa sekitar 80% limbah sawit dibuang sebagian di laguna terbuka. Pemanfaatan energi limbah di pabrik kelapa sawit dapat meningkatkan efisiensi energi dan surplus produksi daya. Peningkatan efisiensi energi dengan memanfaatkan energi limbah mendorong keberlanjutan dan daya saing ekonomi dan industri (Booneimsri et al., 2018).

Potensi sumber daya energi terbarukan di Indonesia sangat besar sesuai dengan penilaian teknis oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), salah satunya produksi minyak sawit dan

pemanfaatan POME. Dalam pengembangan dan pemanfaatan POME sebagai sumber energi terbarukan mengalami berbagai tantangan dan hambatan. Pengembangan proyek Mekanisme Pembangunan Bersih (CDM) di Indonesia adalah karena margin keuntungan yang kecil, margin keuntungan proyek CDM di Indonesia berkisar 10 hingga 15%. Tantangan lain untuk pemanfaatan

biogas POME sebagai sumber energi terbarukan adalah menyalurkan dan menyuntikkan listrik dari pabrik ke jaringan nasional. Hal ini dikarenakan lokasi pabrik seringkali terletak jauh dari jaringan utama (IEA, 2017). Oleh karena itu, investasi menjadi bagian besar dari tantangan untuk menerapkan fasilitas biogas di pabrik kelapa sawit.

Tabel 1. TBS proses dengan produksi CPO dan POME

Tahun	TBS Proses (ton)	CPO Poduksi (ton)	POME (m ³ /ton TBS)
2019	327.373,367	69.248,830	0,52
2020	305.216,931	64.060,000	0,50
2021	271.190,512	58.407,720	0,53

Sumber data primer diolah (2022)

Tabel 2. Produksi POME dan COD Removal

Tahun	POME (ton)	COD In (mg/L)	COD Out (mg/L)	COD Removal (%)
2019	169.739	88.461	8.775	90,08
2020	151.329	99.419	23.592	76,27
2021	142.917	104.319	22.364	78,56

Sumber data primer diolah (2022)

Tabel 3. Potensi Produksi Biogas PT. DAS

Tahun	POME (m ³)	COD (Mg/L)	Kapasitas Pembangkit (MWe)	Potensi Energi (MWh)
2019	169.739	88.461	2,48	17.839
2020	151.329	99.419	2,10	15.134
2021	142.917	104.319	2,15	15.448

Sumber data primer diolah (2022)

Tabel 4. Produksi Biogas PT. DAS

Tahun	POME (ton)	COD (mg/L)	Biogas (Nm ³)	Rasio Biogas (Nm ³ /ton POME)
2019	169.739	88.461	5.701.241	33,59
2020	151.329	99.419	5.468.751	36,14
2021	142.917	104.319	5.489.584	38,41

Sumber data primer diolah (2022)

Tabel 5. Produksi Biogas dan Listrik dari Gas Engine

Tahun	Biogas ke Engine (Nm ³)	Biogas ke Flare (Nm ³)	Total Biogas (Nm ³)	Gas Engine (KWH)
2019	4.502.031	1.199.210	5.701.241	9.066.232
2020	4.432.242	1.036.509	5.468.751	8.625.713
2021	4.800.762	668.123	5.489.584	8.644.560

Sumber data primer diolah (2022)

Tabel 6. Bauran Energi Daerah Provinsi Jambi 2021

No	SUMBER ENERGI	BOE	TOE	%
1	EBT	642.859,94	90.000,39	15,29
2	Minyak Bumi	426.304,51	59.682,63	10,14
3	Gas Bumi	1.637.305,63	229.222,79	38,95
4	Batubara	1.496.949,68	209.572,95	35,61
	Total	4.203.419,76	588.478,76	100

Sumber data Dinas ESDM Prov. Jambi (2022)

Faktor penyebab pengembangan industri energi terbarukan masih minim karena kebijakan yang ada belum sempurna, terutama saat kondisi harga minyak bumi turun. Untuk kasus di daerah penelitian menunjukkan bahwa selain harga energi energi terbarukan dari POME masih dianggap mahal, juga disebabkan rendahnya serapan energi yang dihasilkan dari energi biogas POME. Perlu adanya

terobosan kebijakan untuk memperbaiki kebijakan yang ada, dengan memberikan kemudahan bagi investor di bidang energi terbarukan, termasuk pengelolaan rantai pasokan energi terbarukan yang efektif dan efisien (Widya Yudha & Tjahjono, 2019), serta kebijakan yang mendukung pengembangan energi terbarukan dengan pola kemitraan (Mustikaningsih et al., 2019).

Tabel 7 Potensi Produksi POME dan Energi Listrik di Provinsi Jambi

Kabupaten	Jml Perusahaan	Produksi CPO (ton)	POME (M ³)	Produksi CH ₄ (M ³)	Listrik (KWH)
Batang Hari	11	648.960	1.135.680	28.718.508	108.220.911
Muaro Jambi	21	1.675.104	2.931.432	74.128.587	279.341.224
Bungo	10	806.400	1.411.200	35.685.720	134.475.688
Tebo	9	576.000	1.008.000	25.489.800	96.054.063
Merangin	8	412.800	722.400	18.267.690	68.838.745
Sarolangun	5	483.840	846.720	21.411.432	80.685.413
Tanjab Barat	13	1.006.080	1.760.640	44.522.184	167.774.430
Tanjab Timur	3	201.600	352.800	8.921.430	33.618.922
Prov. Jambi	80	5.810.784	10.168.872	257.145.351	969.009.397

4. Kesimpulan

Peningkatan kebutuhan akan energi di Provinsi Jambi akan terus meningkat sejalan dengan berkembangnya perekonomian daerah terutama dari pertanian sektor perkebunan, Jambi memiliki area perkebunan kelapa sawit yang luas tersebar di sebagian besar kabupaten/kota, keberadaan perusahaan sawit ini memiliki potensi yang besar untuk dikembangkan sebagai sumber energi alternatif yaitu energi biogas dari POME. Mengingat lokasi perkebunan berapa pada daerah pedesaan dengan kondisi pembangunan energi listrik yang belum merata, maka kebutuhan pasokan energi listrik bagi daerah terpencil ini bisa dipenuhi dengan keberadaan sumber energi biogas tersebut.

Potensi energi listrik yang dapat dibangkitkan dari PKS dengan kapasitas 60 ton TBS/jam yaitu sebesar 2 MWe/jam. Secara keseluruhan pabrik kelapa sawit (PKS) di Provinsi Jambi dengan total kapasitas pabrik sebesar 3.026 ton TBS/jam, berpotensi menghasilkan produksi CPO sebesar 5.810.784 ton/tahun, dengan demikian maka potensi limbah cair kelapa sawit (POME) yang dapat dimanfaatkan sebesar 10.168.872 ton/tahun yang apabila diolah dengan sistem biogas akan menghasilkan metana sebanyak 257.145.351 Nm³/tahun yang mampu menghasilkan energi listrik sebesar 969 GWH/tahun.

Pengembangan sumber energi terbarukan dari POME di Provinsi Jambi masih rendah, perlu adanya sinergi antara pemerintah daerah, distributor energi, pengusaha sawit dan dukungan investor agar potensi energi ini bisa bermanfaat untuk kemandirian energi dan keberlanjutan lingkungan. Tantangan dalam pengembangan energi terbarukan dari POME dikarenakan biaya investasi yang tinggi dan juga kebijakan yang ada belum memudahkan investor untuk pengembangan energi terbarukan di pabrik kelapa sawit.

Daftar Pustaka

Ahmad, A., & Ghufran, R. (2018). Review on industrial wastewater energy sources and carbon emission

reduction: Towards a clean production. *International Journal of Sustainable Engineering*, 12(1), 47-57. <https://doi.org/10.1080/19397038.2018.1423647>

Ahmed, Y., Yaakob, Z., Akhtar, P., & Sopian, K. (2015). Production of biogas and performance evaluation of existing treatment processes in palm oil mill effluent (POME). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1260-1278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.073>

Aziz, N. I. H. A., Hanafiah, M. M., Gheewala, S. H., & Ismail, H. (2020). Bioenergy for a Cleaner Future: A Case Study of Sustainable Biogas Supply Chain in the Malaysian Energy Sector. *Sustainability*, 12(8), 3213. <https://doi.org/10.3390/su12083213>

Babel, S., Sae-Tang, J., & Pecharaply, A. (2009). Anaerobic co-digestion of sewage and brewery sludge for biogas production and land application. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 6(1), 131-140. <https://doi.org/10.1007/BF03326067>

Booneimsri, P., Kubaha, K., & Chullabodhi, C. (2018). Increasing power generation with enhanced cogeneration using waste energy in palm oil mills. *Energy Science & Engineering*, 6(3), 154-173. <https://doi.org/10.1002/ese3.196>

Chin, M. J., Poh, P. E., Tey, B. T., Chan, E. S., & Chin, K. L. (2013). Biogas from palm oil mill effluent (POME): Opportunities and challenges from Malaysia's perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 717-726. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.008>

Creutzig, F., Ravindranath, N. H., Berndes, G., Bolwig, S., Bright, R., Cherubini, F., Chum, H., Corbera, E., Delucchi, M., Faaij, A., Fargione, J., Haberl, H., Heath, G., Lucon, O., Plevin, R., Popp, A., Robledo-Abad, C., Rose, S., Smith, P., ... Masera, O. (2015). Bioenergy and climate change mitigation: An assessment. *GCB Bioenergy*, 7(5), 916-944. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12205>

Dincer, I. (2000). Renewable energy and sustainable development: A crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(2), 157-175. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00011-8)

Erdiwansyah, Mamat, R., Sani, M. S. M., & Sudhakar, K. (2019). Renewable energy in Southeast Asia:

- Policies and recommendations. *Science of The Total Environment*, 670, 1095–1102. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.273>
- Fikri Hamzah, M. A., Abdul, P. M., Mahmud, S. S., Azahar, A. M., & Jahim, J. Md. (2020). Performance of Anaerobic Digestion of Acidified Palm Oil Mill Effluent under Various Organic Loading Rates and Temperatures. *Water*, 12(9), 2432. <https://doi.org/10.3390/w12092432>
- Harahap, F., Leduc, S., Mesfun, S., Khatiwada, D., Kraxner, F., & Silveira, S. (2019). Opportunities to Optimize the Palm Oil Supply Chain in Sumatra, Indonesia. *Energies*, 12(3), 420. <https://doi.org/10.3390/en12030420>
- IEA. (2019). *Southeast Asia Energy Outlook 2019*. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/southeast-asia-energy-outlook-2019>
- IPCC. (2014). *Summary for Policymakers* (In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (Eds.)], p. 34). Cambridge University Press.
- IRENA. (2017). *Renewable Energy Prospects: Indonesia, a REmap analysis*. International Renewable Energy Agency (IRENA). www.irena.org/remap
- Iskandar, M. J., Baharum, A., Anuar, F. H., & Othaman, R. (2018). Palm oil industry in South East Asia and the effluent treatment technology—A review. *Environmental Technology & Innovation*, 9, 169–185. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.11.003>
- Junginger, M., Koppejan, J., & Goh, C. S. (2020). Sustainable bioenergy deployment in East and South East Asia: Notes on recent trends. *Sustainability Science*, 15(5), 1455–1459. <https://doi.org/10.1007/s11625-019-00712-w>
- Khatun, R., Reza, M. I. H., Moniruzzaman, M., & Yaakob, Z. (2017). Sustainable oil palm industry: The possibilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 608–619. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.077>
- Lestari, D., Matondang, R., & Matondang, N. (2021). Green manufacturing design in palm oil mills Sei Mangkei PTPN III. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1122(1), 012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1122/1/012046>
- Lönnqvist, T., Sanches-Pereira, A., & Sandberg, T. (2015). Biogas potential for sustainable transport – a Swedish regional case. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1105–1114. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.036>
- Mahmod, S. S., Jahim, J. M., & Abdul, P. M. (2017). Pretreatment conditions of palm oil mill effluent (POME) for thermophilic biohydrogen production by mixed culture. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(45), 27512–27522. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.178>
- Maršálek, J., Brož, P., & Bobák, M. (2020). Complex biogas membrane upgrading to BioCNG at agriculture biogas plant. *Chemical Papers*, 74(12), 4227–4239. <https://doi.org/10.1007/s11696-020-01238-7>
- Moraes, B. S., Petersen, S. O., Zaiat, M., Sommer, S. G., & Triolo, J. M. (2017). Reduction in greenhouse gas emissions from vinasse through anaerobic digestion. *Applied Energy*, 189, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.009>
- Mustikaningsih, D., Primiana, I., Sucherly, & Febrian, E. (2019). Partnership Strategy Model in Developing Renewable Power Plant: Case Study in Indonesia. *EUROPEAN RESEARCH STUDIES JOURNAL*, XXII(Issue 2), 41–63. <https://doi.org/10.35808/ersj/1425>
- Nasution, M. A., Wulandari, A., Ahamed, T., & Noguchi, R. (2020). Alternative POME Treatment Technology in the Implementation of Roundtable on Sustainable Palm Oil, Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO), and Malaysian Sustainable Palm Oil (MSPO) Standards Using LCA and AHP Methods. *Sustainability*, 12(10), 4101. <https://doi.org/10.3390/su12104101>
- Ohimain, E. I., & Izah, S. C. (2017). A review of biogas production from palm oil mill effluents using different configurations of bioreactors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 242–253. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.221>
- Pilloni, M., Hamed, T. A., & Joyce, S. (2020). Assessing the success and failure of biogas units in Israel: Social niches, practices, and transitions among Bedouin villages. *Energy Research & Social Science*, 61, 101328. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101328>
- Ramadhani, L. I., Damayanti, S. I., Sudibyo, H., Azis, M. M., & Budhijanto, W. (2020). The Impact of Hydraulic Retention Time on the Biomethane Production from Palm Oil Mill Effluent (POME) in Two-Stage Anaerobic Fluidized Bed Reactor. *International Journal of Renewable Energy Development*, 10(1), 11–16. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.20639>
- Ramdani, F., & Hino, M. (2013). Land Use Changes and GHG Emissions from Tropical Forest Conversion by Oil Palm Plantations in Riau Province, Indonesia. *PLoS ONE*, 8(7), e70323. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070323>
- Rianawati, E., Sagala, S., Hafiz, I., Anhorn, J., Alemu, S., Hilbert, J., Rosslee, D., Mohammed, M., Salie, Y., Rutz, D., Rohrer, M., Sainz, A., Kirchmeyr, F., Zacepins, A., & Hofmann, F. (2021). The potential of Biogas in Energy Transition in Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1143(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1143/1/012031>
- Saputro, S. H., & Sudibandriyo, M. (2020). Feasibility Study of Biogas Upgrading Facility Development from Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent in Indonesia. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3796135>
- Sharvini, S. R., Noor, Z. Z., Chong, C. S., Stringer, L. C., & Glew, D. (2020). Energy generation from palm oil mill effluent: A life cycle assessment of two biogas technologies. *Energy*, 191, 116513. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116513>
- Styles, D., Dominguez, E. M., & Chadwick, D. (2016). Environmental balance of the UK biogas sector: An evaluation by consequential life cycle assessment. *Science of The Total Environment*, 560–561, 241–253. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.236>
- Ullah Khan, I., Hafiz Dzarfan Othman, M., Hashim, H., Matsuura, T., Ismail, A. F., Rezaei-DashtArzhandi, M., & Wan Azelee, I. (2017). Biogas as a renewable

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, doi:10.14710/jil.22.1.205-214

energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Conversion and Management*, 150, 277–294. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.035>

Uusitalo, V., Väisänen, S., Havukainen, J., Havukainen, M., Soukka, R., & Luoranen, M. (2014). Carbon footprint of renewable diesel from palm oil, jatropha oil and rapeseed oil. *Renewable Energy*, 69, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.020>

Widya Yudha, S., & Tjahjono, B. (2019). Stakeholder Mapping and Analysis of the Renewable Energy Industry in Indonesia. *Energies*, 12(4), 602. <https://doi.org/10.3390/en12040602>

Woittiez, L. S., van Wijk, M. T., Slingerland, M., van Noordwijk, M., & Giller, K. E. (2017). Yield gaps in oil palm: A quantitative review of contributing factors. *European Journal of Agronomy*, 83, 57–77. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.002>