

INOVASI PENGOLAHAN LIMBAH CAIR KELAPA SAWIT (POME) NET-ZERO EMISSION MENJADI LISTRIK SEBAGAI SUMBER ENERGI BARU TERBARUKAN (EBT)

Qonita Qurrotu'aini¹, Jaenab Athiah Al'afifah²

¹Teknologi Pascapanen, SITH-R, Institut Teknologi Bandung, Indonesia.

²Teknologi Pascapanen, SITH-R, Institut Teknologi Bandung, Indonesia.

¹ainiqon@students.itb.ac.id, ²thiyahathiyah@students.itb.ac.id.

Abstract

Palm oil mill effluent (POME) is the largest amount in palm oil processing, reach 55-67%, contains high BOD and COD which will pollute the environment if directly discharged into the waters. Besides, National Energy Policy of Indonesia has targeted the use of renewable energy by 23% in 2025. The high organic contents in POME can be anaerobic fermented to produce CH₄, converted to H₂, and produce electricity to fulfill the renewable energy needed. Converting POME into electricity is done using an anaerobic digester (AD), steam methane reforming (SMR), and hydrogen fuel cell (HFC). This series process releases net-zero emission because the gasses produced in AD and SMR is being inputed to the following reactor. The type of this research is written idea, done by literature study, analyzed, and integrated data following by estimated the electrical energy obtained from the series. This study aims 1) to design operation unit series for POME conversion that produces net-zero GHG emissions with high efficiency; and 2) to optimize generating electrical power from the POME input in the system. A key role in this technology innovation is SMR for CH₄ conversion and HFC for H₂ conversion into electricity. This idea-research has the conclude as follow: 1) supports Indonesia to produce renewable energy with net-zero emissions to the environment, and 2) (assuming an average mill capacity 60 tons of FFB to produce 60 m³ POME) the electricity theoretically generated by 1.67 GW.

Keywords: *Palm oil mill effluent (POME), anaerobic digester (AD), steam methane reforming (SMR), hydrogen fuel cell (HFC).*

Pendahuluan

Nilai Indeks Kualitas Udara (AQI) di Jakarta pada 20 Juni 2022 mencapai angka 80 AQI US dengan konsentrasi polutan P2.5 mencapai 26 µg/m³. Angka ini lebih besar 5,2 kali lipat dibandingkan dengan nilai panduan kualitas udara tahunan yang diterbitkan WHO (IQAIR, 2022). Pencemaran udara yang berasal dari sumber alami maupun aktivitas manusia mampu menyebabkan perubahan iklim. Ciri yang mampu terindra dari perubahan iklim ini yaitu pemanasan global dengan meningkatnya suhu bumi. Pemanasan global diperparah dengan adanya

efek gas rumah kaca meliputi gas CO₂, gas CH₄, gas N₂O, HFC, PFC, dan SF₆ (Hamid, 2020). Untuk itu, diadakannya Paris Agreement atas Konvensi Kerangka Kerja PBB mengenai Perubahan Iklim pada tahun 2015 membuat Indonesia berkomitmen untuk menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK) sebesar 29% pada tahun 2030. Salah satu upaya penurunan emisi GRK adalah penggunaan energi baru terbarukan (EBT). Dalam hal ini, pemerintah telah menegaskan dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 79 Tahun 2014 mengenai Kebijakan Energi Nasional (KEN) bahwa peran EBT paling sedikit mencapai 23% dalam bauran energi nasional pada tahun 2025. Di Indonesia, potensi penggunaan EBT dari bioenergi sendiri mencapai 32,654 GW, namun baru dimanfaatkan sebesar 5,8% atau 1.895,7 MW (KESDM, 2020). Pengolahan kelapa sawit menghasilkan limbah yang dapat merusak lingkungan, baik fasa padat maupun cairnya. Padahal, limbah tersebut dapat digunakan sebagai bahan baku EBT dengan total potensi energi listrik mencapai 12.654 MW dengan potensi terbesar di Sumatera sebesar 8.812 MW dan Kalimantan sebesar 3.384 MW (Ahmad, Indra, dan Arzul, 2021).

Dari hasil klarifikasi dan sterilisasi kelapa sawit, akan dihasilkan limbah cair yang memiliki efek pencemaran besar. Limbah cair yang umum disebut POME mampu menimbulkan kekeruhan dan menimbulkan bau yang tajam ketika dibuang langsung ke perairan. Penguraian yang lama dan dapat mengkonsumsi banyak oksigen terlarut akan membahayakan keselamatan biota dan ekosistem perairan (Afrahan, 2019). Daya rusak yang tinggi ini disebabkan oleh limbah POME yang jumlahnya mencapai 55-67% pada pengolahan kelapa sawit bersifat asam (pH 3,3-5,2), kental, mengandung padatan, minyak, dan lemak yang tinggi serta memiliki rata-rata BOD sebesar 8.200-35.000 mg/L dan COD 15.103-65.100 mg/L (Rahayu *et al.*, 2015). Menurut keputusan Menteri LH No. Kep51/MENLH/10/1995, COD dan BOD yang diizinkan untuk dibuang ke lingkungan yaitu sebesar 500 mg/L dan 250 mg/L. Sedangkan pada POME, nilai COD dan BOD sangat jauh diatas standar yang diizinkan pemerintah (Afrahan, 2019). Umumnya, kandungan organik POME diuraikan terlebih dahulu di Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Namun, berkaitan dengan variasi pengolahan POME dan kebutuhan Indonesia terhadap EBT, POME dapat dikonversi menjadi energi yang ramah lingkungan. Kandungan organiknya dapat menjadi substrat dalam proses anaerobik untuk menghasilkan biogas. Biogas tersebut dapat dikonversi lagi menjadi energi listrik.

Proses pengolahan POME di salah satu pabrik yang diteliti oleh Zulkifli (2016) dimulai dengan pengondisian temperatur, pH, nutrien, dan toksisitas POME sebelum memasuki reaktor. Kemudian, POME yang sudah siap diolah akan dilakukan fermentasi anaerobik dalam kolam anaerobik. Biogas yang dihasilkan akan dilakukan desulfurisasi dan dehumidifier terlebih dahulu, serta

diberi tekanan dari blower agar biogas memenuhi tekanan minimum pada *gas engine*. Prinsip kerja *gas engine* dalam produksi listrik yaitu dengan pembakaran biogas yang kemudian mampu menggerakkan piston yang terintegrasi dengan generator magnet untuk kemudian menghasilkan listrik. Keunggulan memakai sistem ini yaitu tidak diperlukan biaya yang mahal untuk instalasi alat serta unit-unit yang digunakan tidak rumit. Namun, kontak POME dengan bakteri pada kolam anaerobik masih kurang baik dan tingkat pengolahannya masih rendah. Penggunaan kolam ini masih belum ramah lingkungan karena dalam kolam anaerobik dihasilkan mayoritas gas metana yang mampu menyebabkan pemanasan global. Penggunaan *gas engine* juga memungkinkan menghasilkan GRK, sehingga sistem ini masih jauh dari *net-zero emission*. Dengan efisiensi *gas engine* 39%, dapat dihasilkan listrik sebesar 1 MW dari 200.000 ton TBS yang diolah. Angka ini tergolong kecil dibandingkan dengan proyeksi potensi daya POME yang ditulis oleh Rahayu et al. (2015) yaitu dari 30 ton TBS/jam mampu menghasilkan potensi daya sebesar 1,1 MWe. Oleh karena itu, diperlukan inovasi untuk meminimalkan emisi GRK ke lingkungan serta meningkatkan efisiensi dan perolehan listrik terkonversi.

Inovasi yang lahir untuk menjawab permasalahan tersebut yaitu rancangan sistem konversi POME menjadi listrik dengan memanfaatkan metana yang dalam permasalahan sebelumnya dapat meningkatkan GRK ke lingkungan, sehingga rancangan ini mampu untuk *net-zero emission*. Rancangan ini meliputi penggunaan reaktor UASB-HCPB sebagai sarana fermentasi anaerobik yang menghasilkan sebagian besar metana. Kemudian metana yang dihasilkan terlebih dahulu dilakukan perubahan menjadi gas hidrogen melalui *Steam Methane Reforming* (SMR). Konversi menjadi gas hidrogen dimaksudkan agar tidak ada metana yang dapat lolos ke lingkungan serta meminimalkan emisi berbahaya. Gas hidrogen yang diproduksi akan dikonversi menjadi listrik dengan unit *Hydrogen Fuel Cell* (HFC) tipe PEMFC. Prinsip konversi HFC ini berdasar pada elektrolisis sehingga meminimalkan penggunaan energi.

Beberapa penelitian yang berkaitan dengan inovasi rancangan pengolahan POME menjadi listrik *net-zero emission* yaitu sebagai berikut:

1. *Anaerobic digester* merupakan proses mengubah limbah cair POME menjadi biogas. Digunakan fermentor tipe UASB-HCPB karena dilengkapi dengan *packed bed* berongga yang diisi dengan *packing kaldnes* dengan fungsi menyaring limbah yang tidak membentuk granula sehingga meningkatkan efisiensi pengolahan biologis dengan memperluas area permukaannya. Metana yang dihasilkan pada tipe UASB-HCPB mencapai 52% dengan efisiensi konversi COD ke metana hingga lebih dari 90% (Poh dan Chong, 2014).

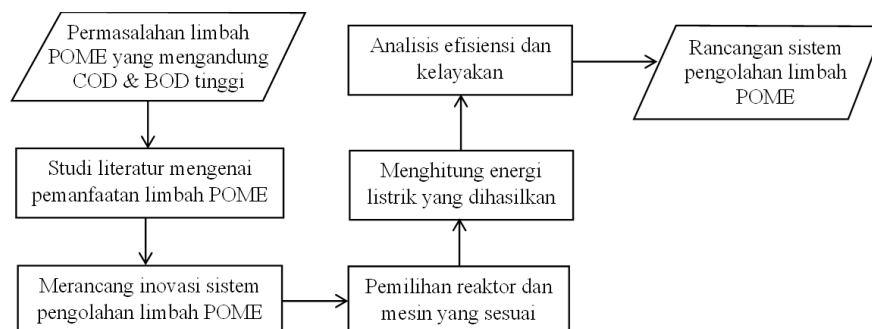
2. *Steam Methane Reforming* (SMR) merupakan unit pengubah metana menjadi hidrogen dengan proses penguapan tanpa menggunakan listrik seperti pada elektrolisis. Unit ini menghasilkan rasio H_2/CO yang tinggi yaitu diatas 3 serta biaya yang rendah. SMR tipe konvensional yang akan digunakan memiliki efisiensi termal sekitar 85% (Mokheimer, dkk., 2014).
3. *Hydrogen Fuel Cell* (HFC) merupakan unit pengkonversi gas hidrogen menjadi listrik. HFC menggunakan prinsip elektrolisis yang dapat mereduksi penggunaan energi, aman digunakan, serta tidak menghasilkan GRK seperti *gas engine*. Tipe HFC yang digunakan yaitu tipe *Polymeric Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) yang memiliki efisiensi paling tinggi dibandingkan tipe HFC lainnya. PEMFC memiliki efisiensi total sebesar 80% dan efisiensi listrik sekitar 35% (Milewski, 2010; Felseghi, dkk., 2019).

Oleh karena itu, dari penelitian ini dapat diketahui rancangan konversi limbah POME yang menghasilkan emisi GRK rendah ke lingkungan dengan efisiensi tinggi serta pengoptimalan daya listrik yang dihasilkan dari input POME dalam upaya mengurangi limbah cair yang mengandung BOD dan COD tinggi.

Metode Penulisan

A. Jenis Penelitian

Metode penulisan yang dilakukan dalam pembuatan karya tulis ilmiah ini adalah metode studi pustaka, yaitu penulisan berdasarkan sumber-sumber yang kemudian dikaji, ditelaah, dianalisis, diinterpretasikan dan dituangkan menjadi tulisan. Hasil didapatkan dari perhitungan secara teoritis dan data merupakan data sekunder yang diperoleh dari buku, skripsi, jurnal, artikel ilmiah, dan sumber digital kredibel lain baik data kuantitatif maupun data kualitatif. Alur berpikir pada pembuatan karya tulis ilmiah ini adalah:



Gambar 1. Skema alur berpikir

Penelitian ini merupakan gagasan tertulis perancangan inovasi sistem pengolahan limbah POME yang ramah lingkungan menjadi listrik. Dilakukan analisis perbandingan tipe masing-masing unit operasi (AD, SMR, dan HFC) untuk menentukan tipe terbaik yang memiliki efisiensi paling tinggi dan emisi paling rendah. Setelah itu dilakukan perhitungan input dan output secara berkelanjutan dari rangkaian sistem untuk menentukan energi listrik yang diperoleh serta emisi yang dihasilkan. Pengumpulan data sekunder dilakukan dengan menggunakan beberapa metode, yaitu:

1. Studi literatur

Dilakukan studi literatur dari berbagai pustaka seperti buku, jurnal, dan literatur untuk mengetahui permasalahan, merangkai solusi dari permasalahan tersebut, serta melakukan kajian teori.

2. Dokumentasi

Dilakukan dokumentasi berupa pengumpulan gambar dan data sekunder yang diperoleh dari berbagai sumber.

3. Pengolahan data

Dilakukan pengolahan data sekunder yang didapatkan dari literatur menggunakan rumus-rumus yang didapat dari sumber-sumber kredibel.

B. Variabel penelitian

1. Variabel kontrol

- a. Kandungan senyawa organik POME (BOD dan COD) sebagai input fermentor.
- b. Kandungan CH_4 dan H_2 pada biogas sebagai input *steam methane reforming*.
- c. Kadar H_2 sebagai input *hydrogen fuel cell*.

2. Variabel terikat

- a. Kandungan CH_4 dan H_2 pada biogas sebagai output fermentasi anaerob.
- b. Kandungan H_2 sebagai output *steam methane reforming*.
- c. Daya listrik sebagai output *hydrogen fuel cell*.

3. Variabel bebas

- a. Volume POME yang dipengaruhi pengolahan TKKS.
- b. Banyaknya unit operasi pada masing-masing tahap fermentasi, *methane*

reforming, dan elektrolisis H₂.

C. Teknik analisis data

1. Volume POME

Asumsi rata-rata perolehan POME 1.000 L (Rahayu dkk., 2015).

$$\text{Volume POME (L)} = 1000 \text{ (L/ton)} \times \text{massa kelapa sawit (ton)} \dots\dots\dots (1)$$

2. Produksi Biogas (AD)

Asumsi dari data penelitian Poh dan Chong (2014):

- 1 L POME mengandung 32,58 g/L COD.
- 27,5 g/L COD menghasilkan rata-rata produksi biogas 19,28 L.
- Kandungan metana sebesar 52% biogas

$$\begin{aligned} \text{Volume CH}_4 \text{ (L)} &= \text{volume POME (L)} \times \frac{\text{COD 1 L POME } \left(\frac{\text{g}}{\text{L}}\right)}{\text{COD 19,28 L biogas } \left(\frac{\text{g}}{\text{L}}\right)} \times 19,28 \text{ L biogas} \times \\ &\quad \text{kandungan CH}_4 \text{ pada biogas} \dots\dots\dots (2) \\ &= \text{volume POME (L)} \times \frac{32,58 \text{ g/L}}{27,5 \text{ g/L}} \times 19,28 \text{ L} \times 52\% \end{aligned}$$

3. Produksi H₂ (SMR)

- Perhitungan mol CH₄ menggunakan persamaan gas ideal

$$n_{\text{CH}_4} = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

P = tekanan (atm)

V = volume metana (L)

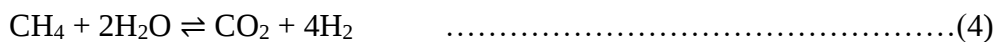
n = mol metana

R = tekanan standar (0,082 L/atm.K)

T = suhu (K)

- Penentuan mol H₂

Persamaan konversi H₂ menggunakan persamaan stoikiometri adalah sebagai berikut (Mokheimer, dkk., 2014):



Didapatkan kesimpulan bahwa mol H₂ adalah 4x mol CH₄.

4. Konversi ke listrik

Tegangan yang dihasilkan dari elektrolisis H₂ (Riniati dkk., 2010):



Konversi tegangan (volt) ke daya listrik (watt) menggunakan data yang diperoleh dari penelitian Dewi dkk. (2008) pada unit operasi PEMFC, yaitu 0,434 V untuk menghasilkan 0,67 W. Sehingga diperoleh konversi:

$$\begin{aligned}\text{Daya listrik (W)} &= \frac{\text{potensial diperoleh (V)}}{\text{potensial pada 1 unit (V)}} \times \text{daya 1 unit (W)} \dots\dots(6) \\ &= \frac{\text{potensial yang diperoleh (V)}}{0,434 \text{ V}} \times 0,67 \text{ W}\end{aligned}$$

D. Tipe dan Spesifikasi Unit Pengolahan

Tabel 1. Jenis-jenis unit operasi pada proses *anaerobic digester*, *steam methane reforming*, dan konversi listrik yang sudah dikembangkan.

Tipe	Spesifikasi
Anaerobic digester	
1. Lagoon	- <i>Hydraulic retention time</i> (HTR) yang lama yaitu $\pm$ 100 hari. - Membutuhkan lahan luas. - Melepaskan emisi GRK yang tinggi ke atmosfer (Hosseini, Ehsan, dan Wahid, 2013)
2. EGSB	Konversi COD ke metana hingga 82,9–88,6% (Wang, dkk., 2015).
3. CSTR	Konversi COD ke metana hingga 71% (Sinaga dan Nasution, 2016)
4. UASB	Konversi COD ke metana hingga 50% (Marbun, 2019)
5. UASB-HCPB	Konversi COD ke metana hingga lebih dari 90% (Poh dan Chong, 2014).
Steam methane reforming	
1. Reaktor nuklir	- Perpindahan panas secara konveksi. - Efisiensi termal sekitar 50% (Alimah dan Salimy, 2015).
2. Reaktor konvensional	- Perpindahan panas secara radiasi. - Efisiensi termal sekitar 85% (Alimah dan Salimy, 2015).
Konversi listrik	
1. Pembangkit listrik konvensional	Efisiensi sekitar 33-35% (US Department of Energy, 2010)
2. <i>Fuel cell</i> secara umum	- Efisiensi lebih dari 60% (US Department of Energy, 2010). - <i>Zero emission</i> (Felseghi dkk., 2019).
3. Polymeric Electrolyte Membrane Fuel Cell	- Dapat dioperasikan pada suhu rendah - Efisiensi total 80%

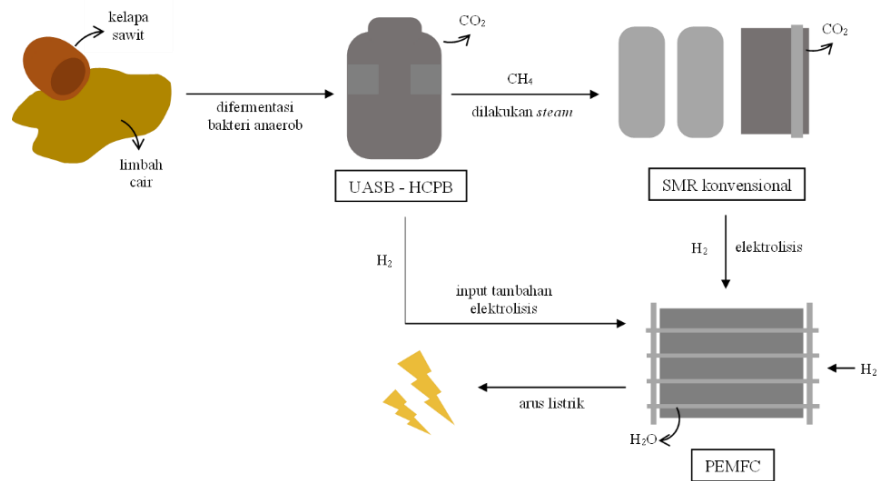
(PEMFC)	- Efisiensi listrik 35% (Milewski, 2010).
---------	---

Tabel 2. Integrasi unit operasi pada proses *anaerobic digester*, *steam methane reforming*, dan konversi listrik.

Tahap	Fungsi	Spesifikasi
<i>Anaerobic digester</i>	Fermentasi anaerobik	Tipe : UASB-HCPB Temperature range : 55°C pH : 6,8-8 Konversi COD hingga lebih dari 90% Output: 52% CH ₄ (Poh dan Chong, 2014)
<i>Steam Methane Reforming</i>	Pengubahan CH ₄ menjadi H ₂	Tipe : konvensional Temperature range : 850-900°C Tekanan : 2-3 MPa Efisiensi termal: 85% Katalisator: nikel Output: 86-90% H ₂ Terdapat unit pre-reformer untuk mengubah alkana menjadi input CH ₄ (Alimah dan Salimy, 2015)
<i>Hydrogen Fuel Cell</i>	Pengubahan H ₂ menjadi energi listrik	Tipe : Polymeric Electrolyte Membrane Fuel Cell Rentang suhu : 100-200°C Efisiensi total: 80% (konvensional: 33-35%) Efisiensi listrik: 35% Katalis: platina Output: air Startup yang cepat. (Felseghi, dkk., 2019)

Hasil dan Pembahasan

A. Mekanisme Reaksi Konversi POME menjadi Listrik

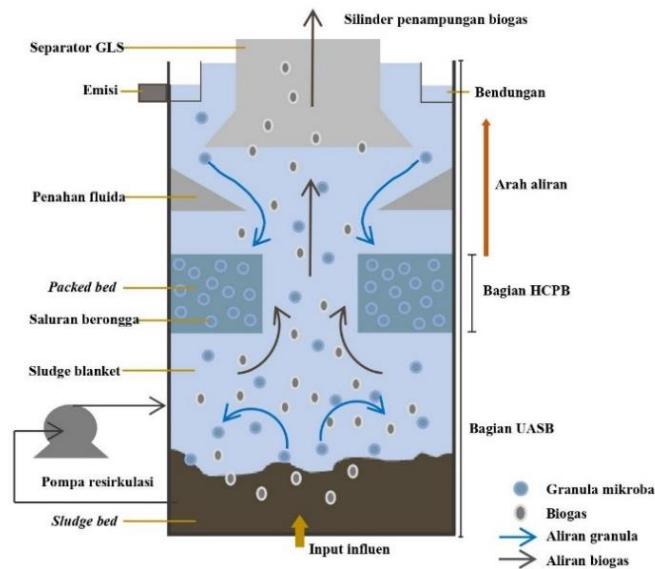


Gambar 2. Skema reaksi konversi POME menjadi energi listrik

Kandungan organik POME yang cukup tinggi (BOD 8.200-35.000 mg/L dan COD 15.103-65.100 mg/L) dapat menjadi substrat dalam proses fermentasi anaerobik untuk menghasilkan biogas. Proses fermentasi anaerobik terdiri dari empat tahap yaitu hidrolisis dan asidogenesis membentuk asam lalu asetogenesis dan metanogenesis membentuk metana (Sembiring, 2019). Salah satu faktor produksi biogas adalah lama waktu. Pembentukan biogas tidak linier dengan berjalannya waktu karena mikroorganisme bertumbuh melewati 4 tahap yaitu fase lag, eksponensial, stasioner, dan kematian. Pada fase lag, kenaikan volume biogas lambat karena mikroorganisme sedang dalam proses adaptasi dengan adanya perubahan komposisi kimiawi dan ukuran. Pada fase eksponensial, kenaikan biogas mengalami percepatan karena pertumbuhan mikroorganisme seimbang oleh konstannya aktivitas metabolik. Hal ini membuat mikroorganisme lebih stabil dalam penguraian zat organik. Pada fase stasioner, volume biogas cenderung tetap karena penumpukan produk samping serta kehabisan nutrient. Pada fase kematian, volume biogas mengalami penurunan (Wati dan Prasetyani, 2011).

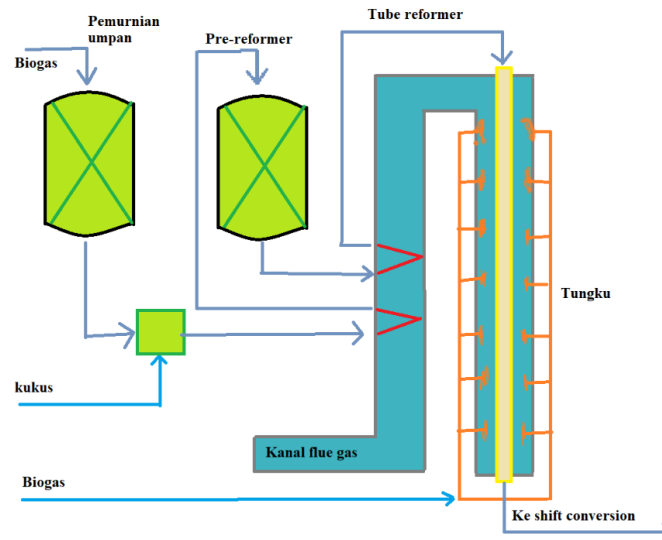
Biogas yang dihasilkan dari proses UASB-HCPB mengandung paling sedikit 52% CH₄ dan sejumlah kecil H₂ (Poh dan Chong, 2014). Pada bagian UASB, influen dari bawah dialirkan ke atas dikombinasi dengan pengendapan secara gravitasi oleh flokulan. Butiran limbah kecil terbentuk dengan permukaannya ditutupi agregasi bakteri. Lumpur yang mengendap dari agregat dimanfaatkan sebagai pertumbuhan bakteri. Fermentor ini memiliki fasilitas pengeluaran gas di bagian atas yang juga berfungsi sebagai pemisahan biomassa. Mikroorganisme tumbuh sebagai agregat sehingga tetap berada pada reaktor meskipun aliran

substrat kuat (Sinaga dan Nasution, 2016). Pada proses degradasi menjadi lumpur, gelembung terbentuk sehingga dapat mengaduk lumpur tanpa bantuan mekanis. Sekat menghambat padatan keluar dari atas. Pada UASB-HCPB, *packed bed* berongga yang diisi dengan *packing kaldnes* memiliki fungsi untuk menyaring limbah yang tidak membentuk granula sehingga meningkatkan efisiensi pengolahan biologis dengan memperluas area permukaannya (Poh dan Chong, 2014).



Gambar 3. Desain reaktor UASB-HCPB
(ilustrasi pribadi dari Poh dan Chong, 2014)

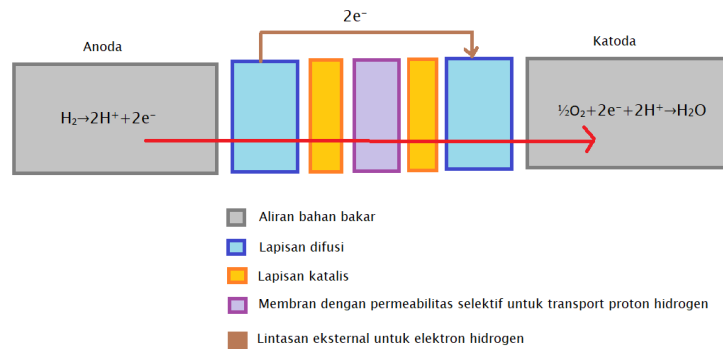
Selanjutnya, metana dialirkan dari fermentor UASB-HCPB untuk diubah menjadi hidrogen menggunakan reaktor *steam methane reforming* (SMR). Uap dialirkan ke metana dan proses ini menghasilkan rasio H_2/CO yang tinggi yaitu diatas 3. Karena proses ini tidak memerlukan listrik, biaya operasionalnya dapat ditekan (Mokheimer, dkk., 2014). *Steam methane reforming* merupakan proses paling umum dan ekonomis untuk membentuk gas hidrogen terutama dalam skala besar. Uap yang dialirkan ke metana berada dalam kondisi *superheated* (Bakey, 2015). Dua reaksi utama pada proses ini adalah reaksi *reforming* yang bersifat sangat endotermis pada temperatur tinggi dan *shift reaction* yang eksotermis untuk mengontrol kuantitas produk yang diinginkan dengan memaksimalkan produksi H_2 dari pengaliran uap ke CO (Alimah dan Salimy, 2015).



Gambar 4. Sistem *steam methane reforming* tipe konvensional
(ilustrasi pribadi dari Alimah dan Salimy, 2015)

Hidrogen yang dihasilkan bereaksi dengan oksigen menggunakan prinsip elektrolisis sehingga menghasilkan listrik pada *fuel cell*. Komponen dari *fuel cell* yaitu elektroda berupa anoda dan katoda serta elektrolit berupa membran penukar proton yang memisahkan elektroda. Reaksi yang terjadi pada anoda yaitu hidrogen dalam bentuk gas akan terionisasi menghasilkan elektron dan ion hidrogen yang berbentuk proton ketika melewati elektrolit dan bantuan katalis platina. Reaksi ini akan menghasilkan energi. Pada katoda terjadi reduksi oksigen oleh elektron dan membentuk air dengan proton dari atom hidrogen. Hasil samping dari proses ini berupa air yang aman dibuang atau digunakan (Riniati dkk., 2010). Selain itu, karena sistem operasinya minim pergerakan, HFC tidak menimbulkan polusi suara (kebisingan) yang mengganggu. Berdasarkan jenis elektrolit yang digunakan, sel bahan bakar dapat dikategorikan menjadi *alkaline fuel cell* (AFCs), PEMFCs, *phosphoric acid fuel cell* (PAFCs), *molten carbonate fuel cells* (MCFCs), dan *solid oxide fuel cells* (SOFC) (Fan dkk, 2021).

Fuel cell yang dipilih merupakan tipe Polymeric Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) dengan elektrolit dari polimer Nafion (polimer khusus yang diturunkan dari Teflon oleh perusahaan DuPont) dan katalis dari campuran platina yang cukup mahal. Walaupun mahal, PEMFC memiliki efisiensi total sebesar 80% dan efisiensi listrik sekitar 35% (Milewski, 2010). Selain itu, tipe PEMFC beroperasi pada temperatur rendah yang menggunakan membran polimer tipis dan permeable. Suhu operasi adalah sekitar 80°C dengan waktu pemanasan lebih sedikit karena tipisnya membran yang digunakan (Jain dan Jain, 2021).



Gambar 5. Skema *hydrogen fuel cell*
(ilustrasi pribadi dari Felseghi, dkk., 2019).

B. Perhitungan Perolehan Daya Listrik

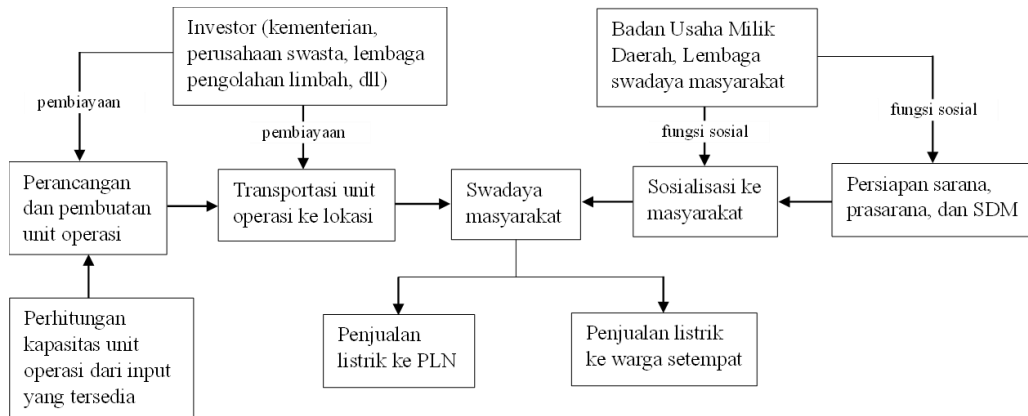
POME dihasilkan dari beberapa tahap pemrosesan kelapa sawit menjadi *crude palm oil* (CPO). Rata-rata kapasitas pabrik adalah 60 ton Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dan setiap 1 ton menghasilkan 700-1000 L POME (Rahayu *et al.*, 2015). Dengan asumsi 1 ton TKKS menghasilkan 1000 L POME, pada satu pabrik dapat dihasilkan 60.000 L POME. POME kemudian diubah menjadi biogas melalui proses *anaerobic digester*. Proses *anaerobic digester* menggunakan fermentor UASB-HCPB menghasilkan CH_4 . Menggunakan persamaan 2, diperoleh volume CH_4 sebesar 1.424.000 L.

CH_4 tersebut dikonversi menjadi H_2 melalui proses *steam methane reforming*. Pada reaktor SMR konvensional, dilakukan konversi CH_4 menjadi H_2 . Berdasarkan persamaan 3 (gas ideal), input 1.424.000 L CH_4 setara dengan 438.275 mol. H_2 yang diperoleh dari SMR konvensional ditentukan menggunakan persamaan 4 (stoikiometri) dengan mol H_2 sebesar 4x mol CH_4 . Dengan demikian diperoleh mol H_2 sebesar 1.753.102 mol.

H_2 kemudian menjadi input dalam proses konversi menjadi listrik menggunakan *hydrogen fuel cell*. Menggunakan persamaan 5, tegangan yang didapat dari 1.753.102 mol H_2 adalah sebesar 1.078.158 volt. Menggunakan persamaan 6, diperoleh daya dari tegangan tersebut sebesar 1,67 GW. Perolehan daya ini dapat dimaksimalkan dengan penambahan kolom input H_2 dari unit fermentor UASB-HCPB ke unit konversi listrik PEMFC. Amran (2019) menyatakan bahwa daya pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) Sidrap yang merupakan PLTB terbesar di Indonesia adalah 75 MW. Disimpulkan bahwa perolehan listrik dari POME lebih besar sekitar 22x lipat. Selain itu, menurut Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (2019), Hammam Riza selaku Kepala BPPT mengatakan bahwa PLT Biogas POME di Pabrik Kelapa Sawit PTPN V Riau dapat menyediakan 2 MW dari 60 ton TKKS. PLT tersebut

beroperasi dengan tipe reaktor *covered lagoon*. Secara teoritis, hal ini menunjukkan potensi sistem operasi konversi POME pada perancangan ini sangat menguntungkan sehingga layak diaplikasikan.

B. Implementasi di Masyarakat



Gambar 6. Skema implementasi kepada masyarakat

Sistem konversi POME menjadi listrik dapat menjadi potensi pembangunan PLTBm pada daerah pengolahan kelapa sawit. Setelah dilakukan perhitungan kapasitas unit operasi yang dibutuhkan dari ketersediaan limbah POME, dilakukan perancangan alat berikut pembuatannya. Alat tersebut meliputi fermentor bertipe UASB-HCPB, reaktor SMR konvensional, serta unit *fuel cell* berjenis PEMFC. Unit operasi yang telah dirakit ditransportasikan ke lokasi untuk diintegrasikan. Pembiayaan proses teknis ini didukung oleh investor, meliputi BUMN, kementerian, perusahaan swasta, lembaga pengolahan limbah, dan lainnya. Sementara itu, pada daerah yang dituju, sarana, prasarana, dan SDM disiapkan untuk instalasi unit operasi beserta tenaga pengelola berkelanjutan (pekerja). Setelah dibentuk tenaga pengelola, dilakukan sosialisasi ke masyarakat tentang sistem unit operasi yang ingin diaplikasikan. Persiapan dan sosialisasi pada lokasi daerah dibantu oleh Badan Usaha Milik Daerah (BUMD) dan lembaga swadaya masyarakat yang memiliki konsentrasi ke arah konservasi lingkungan, *renewable energy*, maupun *social welfare*. Setelah pengkondisian masyarakat dan perakitan unit operasi di lokasi, terbentuklah swadaya masyarakat yang menghidupkan pembangkit listrik dari biogas dengan emisi rendah tersebut. Listrik yang dihasilkan dapat dijual ke PLN sebagai *revenue* bisnis dan dijual kembali ke masyarakat dengan harga terjangkau sehingga memiliki manfaat yang besar bagi penduduk sekitar. Menurut Escandon dkk (2020), untuk aplikasi teknologi EBT skala besar, bagi investor swasta maupun pemerintah, integrasi teknologi harus dapat mencerminkan sistem bisnis yang baik agar dapat berkelanjutan. Hal ini membuat integrasi teknologi memiliki tantangan untuk dapat bersaing dengan teknologi tradisional seperti hidroelektrik.

Kesimpulan

Inovasi rancangan sistem konversi POME menjadi energi listrik dengan emisi rendah dan efisiensi tinggi adalah dengan fermentasi anaerobik menggunakan fermentor tipe UASB-HCPB untuk menghasilkan CH_4 52%, kemudian dilakukan pengubahan CH_4 menjadi H_2 dengan menggunakan SMR tipe konvensional untuk menghasilkan 86-90% H_2 , dan pengubahan menjadi listrik menggunakan HFC tipe PEMFC dengan konversi energi listrik hingga 80%. Pada sistem ini, dengan input 60 ton TKKS, estimasi daya listrik yang dihasilkan adalah sebesar 1,67 GW.

Daftar Pustaka

- Ahmad, A., Indra, N., dan Arzul. (2021). Operasi ekonomis pembangkit pada PT. Agro Wira Ligatsa (AWL). [Skripsi]. Padang: Universitas Bung Hatta.
- Aji, K. P. & Bambang, A. N. (2019). *Konversi energi biogas menjadi energi listrik sebagai alternatif energi terbarukan dan ramah lingkungan di Desa Langse, Kecamatan Margorejo, Kabupaten Pati*. Paper dipresentasikan di Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri, Lingkungan dan Infrastruktur (Sentikuin), Malang, Indonesia.
- Alimah, S., & Salimy, D. H. (2015). Analisis pasokan panas pada produksi hidrogen proses steam reforming konvensional dan nuklir. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 17(1), 11.
- Amran, M. A. (2019). Studi kestabilan sudut rotor sistem interkoneksi Sulselbar dengan integrasi PLTB Sidrap. [Skripsi]. Makassar: Universitas Hasanuddin.
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. (2019). *PLT biogas POME, olah limbah cair sawit menjadi listrik*. Diakses pada tanggal 27 Juni 2022 dari <https://bppt.go.id/berita-bppt/plt-biogas-pome-olah-limbah-cair-sawit-menjadi-listrik>.
- Bakey, K. (2015). The production of hydrogen gas: steam methane reforming. [Process Description]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University.
- Escandón, A. B., Ruiz, J. M. O., Tigre, J. D. C., & León, E. F. Z. (2020). Assessment of power generation using biogas from landfills in an equatorial tropical context. *Sustainability*, 12(2669).
- Fan, L., Tu, Z., & Chan, S. H. (2021). Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. *Energy Reports*.
- Firdausi, M. (2020). Potensi POME untuk pembangkit listrik tenaga biogas di Kabupaten Tanjung Jabung Barat. *Presisi*, 22(1), 48-53.
- Felseghi, R.-A., Carcadea, E., Raboaca, M. S., Trufin, C. N., & Filote, C. (2019). Hydrogen fuel cell technology for the sustainable future of stationary

- applications. *Energies*, 12(23), 4593.
- Hosseini, Ehsan, S., & Wahid, M. A. (2019). Feasibility study of biogas production and utilization as a source of renewable energy in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 454–462.
- IQAIR. (2022). Kualitas udara di Jakarta. Diakses pada 27 Juni 2022, dari <https://www.iqair.com/id/indonesia/jakarta>.
- Jain, K., & Jain, K. (2021). Hydrogen Fuel Cell: A Review of different types of fuel cells with Emphasis on PEM fuel cells and Catalysts used in the PEM fuel cell. *International Journal of All Research Education and Scientific Methods (IJARESM)*, 9(9).
- Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2020). *Inventarisasi emisi GRK bidang energi*. Jakarta Pusat: Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Khemkhao, M., Nuntakumjorn, B., Techkarnjanaruk, S., & Phalakornkule, C. (2012). UASB performance and microbial adaptation during a transition from mesophilic to thermophilic treatment of palm oil mill effluent. *Journal of Environmental Management*, 103, 74–82.
- Marbun, J. A. (2019). Perencanaan unit upflow anaerobic sludge blanket (UASB) pada IPAL eksisting industri kelapa sawit di Riau. [Skripsi]. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Milewski, J., K. Badyda, Misztal, Z., & M. Wołowicz. (2015). Combined heat and power unit based on polymeric electrolyte membrane fuel cell in a hotel application. *Rynek Energii*, 5, 118–123.
- Mokheimer, E. M. A., Ibrar Hussain, M., Ahmed, S., Habib, M. A., & Al-Qutub, A. A. (2014). On the modeling of steam methane reforming. *Journal of Energy Resources Technology*, 137(1).
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 79 Tahun 2014 mengenai Kebijakan Energi Nasional (KEN). Diakses pada tanggal 6 April 2022 dari <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/5523/pp-no-79-tahun-2014>.
- Poh, P. E., & Chong, M. F. (2014). Upflow anaerobic sludge blanket-hollow centered packed bed (UASB-HCPB) reactor for thermophilic palm oil mill effluent (POME) treatment. *Biomass and Bioenergy*, 67, 231–242.
- Rahayu, A. S., Karsiwulan, D., Yuwono, H., Trisnawati, I., Mulyasari, S., Rahardjo, S., Hokerman, S., & Paramita, V. (2015). *Konversi POME menjadi biogas*. Jakarta: Winrock International.
- Riniati, R., Hulupi, M., Anggraini, R., & Dewi, S. S. (2010, Oktober). *Aplikasi metoda loading katalis secara painting dan screen printing pada media dalam*

pembuatan sel bahan bakar hidrogen (Hydrogen Fuel Cell). Paper dipresentasikan di Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar, Bandung, Indonesia.

- Rico, B. Y. (2021). Pengoperasian dan perawatan generator set yuchai type SPI 100D di kapal KMN. Mina Makmur di Kantor Unit Penyelenggara Pelabuhan Juwana. [Skripsi]. Semarang: Universitas Maritim AMNI.
- Sembiring, S. D. (2019). Pengaruh *Hydraulic Retention Time* (HRT) terhadap produksi biogas dari limbah cair kelapa sawit pada reactor *Upflow Anaerobic Sludge Blanket-Hollow Centered Packed Bed* (UASB-HCPB) pada kondisi *ambient*. [Skripsi]. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Sinaga, N., & Nasution, A. S. B. (2016). Simulasi pengaruh komposisi limbah cair pabrik kelapa sawit (POME) terhadap kandungan air biogas dan daya listrik yang dihasilkan sebuah pembangkit listrik tenaga biogas. *Jurnal Teknik Energi*, 11(3).
- US Department of Energy. (2010). *Hydrogen and fuel cell technology program*. Diakses pada tanggal 18 April 2022 dari https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fct_h2_fuelcell_factsheet.pdf.
- Wang, J., Mahmood, Q., Qiu, J., Li, Y., Chang, Y., & Li, X. (2015). Anaerobic treatment of palm oil mill effluent in pilot-scale anaerobic EGSB reactor. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2015, 1-7.
- Wati, D. S., & Prasetyani, R. D. (2011). Pembuatan biogas dari limbah cair industri bioetanol melalui proses anaerob (fermentasi). [Laporan penelitian]. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Zulkifli, A. (2016). Analisis kelayakan potensi pembangunan PLTBg POME di wilayah perkebunan sawit. *Penelitian dan Aplikasi Sistem dan Teknik Industri*, 10(2), 182909.