

IMPLEMENTASI SISTEM WASTE TO ENERGY DENGAN INTEGRASI TEKNOLOGI GREEN HYDROGEN PRODUCTION DAN BIOGAS DIGESTER PADA LIMBAH CAIR KELAPA SAWIT

**I Ketut Satya Wirayudhana, Lukman Yulianto, Wellfritz Christianto, Danang Tri
Haryanto, S.T, M.T**

Universitas Gadjah Mada

Abstrak

Indonesia adalah negara produsen kelapa sawit terbesar di dunia dengan *global market share* mencapai 58%. Produksi yang tinggi ini berimplikasi pada tingginya produksi emisi karbondioksida (CO₂) dan limbah cair kelapa sawit yang dapat mencemari lingkungan dan merusak iklim. Pada tahun 2020, pabrik kelapa sawit PT Perkebunan Nusantara VII menghasilkan 53.500 L limbah cair kelapa sawit per hari dengan kadar *chemical oxygen demand* (COD) sebesar 55.000 mg/L. Jumlah ini sangat jauh di atas kadar COD yang diperbolehkan dibuang ke lingkungan oleh pemerintah yaitu sebesar 350 mg/L. Limbah ini dapat diolah menjadi energi dengan mengintegrasikan teknologi *Green Hydrogen Production* dan *Biogas Digester* yang dapat menghasilkan gas Hidrogen (H₂) sebanyak 21.797.202 L/hari dan gas Metana (CH₄) sebanyak 204.581 L/hari. Gas H₂ dan gas CH₄ masing-masing dapat dikonversi menjadi energi listrik dalam *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEM-FC) dan turbin gas sehingga secara total menghasilkan energi listrik sebesar 53.903 kWh/hari. Integrasi teknologi ini juga dapat mereduksi kadar COD pada limbah cair kelapa sawit sebanyak 99,4% menjadi 331 mg/L dan mencegah potensi emisi gas CO₂ sebanyak 55,94% dibanding solusi hanya menggunakan *Biogas Digester* saja seperti pada status quo. Berdasarkan analisis tekno-ekonomi, proses ini menghasilkan keuntungan berupa produksi listrik seharga 25.6 miliar rupiah per tahun dengan *Net Present Value* sebesar RP75.006.196, *Return of Investment* sebesar 35,33% dan *Payback Period* selama 3 tahun.

Kata Kunci: *Biogas Digester, Green Hydrogen Production, Hybrid Renewable Energy, Limbah Cair Kelapa Sawit, Waste To Energi*

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Indonesia adalah negara produsen kelapa sawit terbesar dunia. Pada Desember 2021, Indonesia memproduksi 58% kelapa sawit dunia [1]. Semakin tinggi produksi olahan kelapa sawit di suatu negara maka semakin tinggi pula limbah cair kelapa sawit yang dihasilkan. Limbah cair kelapa sawit adalah bahan pencemar lingkungan karena memiliki kandungan *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), dan *Total Suspended Solid* (TSS) [2].

Pada status quo, upaya yang dilakukan mengatasi limbah cair kelapa sawit ini adalah dengan mengubahnya menjadi energi dalam *Biogas Digester* (CH_4) [3]. Namun, teknologi *Biogas Digester* kurang efektif dan efisien dari segi emisi dan efisiensi pengolahan limbah. Emisi gas CO_2 yang dihasilkan mencapai 40% dari volume gas dalam *digester* dan berbanding lurus dengan volume biogas yang dihasilkan sehingga makin banyak biogas yang dihasilkan, makin banyak pula emisi CO_2 yang dilepas.

Selain itu, terdapat masalah pada efektivitas pengolahan limbah. Semakin tinggi kadar COD dan BOD dalam limbah, semakin lama pula proses pengolahannya. Setiap harinya pabrik kelapa sawit bisa memproduksi 20.000 – 75.000 L limbah dengan kadar COD berkisar 30.000 – 80.000 mg/L [4]. Standar yang ditetapkan pemerintah dalam Peraturan Menteri LHK Nomor 5 Tahun 2014 untuk baku mutu air limbah yang boleh dibuang ke lingkungan adalah dengan kadar COD sebesar 350 mg/L [5]. Untuk mereduksi limbah hingga kadar tersebut, *Biogas Digester* memerlukan waktu hingga 28 hari sehingga akumulasi limbah tertampung akan makin banyak dan akan sangat mudah untuk meluap dan akhirnya mencemari lingkungan seperti yang pernah terjadi pada penampungan limbah PT Perkebunan Nusantara V (PTPN V) Siak, Riau pada April 2019 yang mencemari Sungai Gasib hingga menyebabkan kematian ratusan ikan di sungai [6].

Solusi yang lebih baik dalam pengolahan limbah cair kelapa sawit yaitu mengintegrasikan beberapa teknologi *Green Hydrogen Production* dan *Biogas Digester* agar menghasilkan sumber energi bersih, melimpah, dan ramah lingkungan. Teknologi *Green Hydrogen Production* ini akan menghasilkan energi rendah karbon sekaligus dapat mengolah limbah cair kelapa sawit dengan lebih cepat. Teknologi *Green Hydrogen Production* tersebut antara lain *Dark Fermenter*, *Microbial electrolysis cell* (MEC), *Microbial Fuel Cell* (MFC), dan *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEM-FC). Berdasarkan hal tersebut, diperlukan penelitian tentang bagaimana mengolah limbah cair kelapa sawit dengan menggunakan teknologi *Green Hydrogen Production* dan *Biogas*

Digester sehingga limbah dapat dibuang secara aman ke lingkungan serta dapat menghasilkan energi alternatif.

B. Rumusan Masalah

Masalah yang akan dijawab dalam penelitian ini antara lain:

1. Bagaimana proses yang efektif dalam pengolahan limbah cair kelapa sawit untuk memproduksi energi listrik?
2. Bagaimana proses pengolahan limbah cair kelapa sawit dapat menghasilkan emisi CO₂ yang lebih rendah?
3. Bagaimana perancangan produksi listrik dari pengolahan limbah cair kelapa sawit dapat dilakukan secara berkelanjutan dari sisi ekonomi dan lingkungan?

C. Tujuan Penelitian

Tujuan dari karya tulis ilmiah ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui alternatif yang efektif dalam pengolahan limbah cair kelapa sawit untuk memproduksi listrik
2. Menghitung listrik yang dihasilkan dari pengolahan limbah cair kelapa sawit
3. Menganalisis studi kelayakan ekonomi teknik pengolahan limbah cair kelapa sawit menjadi listrik melalui parameter *Payback Period* (PP), *Investment Rate of Return* (IRR) dan *Net Present Value* (NPV).

D. Manfaat Penelitian

Manfaat dari karya tulis ilmiah ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan sumbangsih kepada ilmu pengetahuan yang dapat menjadi solusi efektif untuk permasalahan pengolahan limbah cair kelapa sawit
2. Memberikan strategi pengolahan limbah menjadi listrik yang menghasilkan daya yang lebih besar dan lebih menguntungkan bagi perusahaan kelapa sawit
3. Memberikan informasi teknologi yang mampu mengurangi emisi karbon dan pencemaran lingkungan bagi perusahaan sawit dan masyarakat.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. State of The Art

Kebaruan karya ilmiah ini dibanding dengan penelitian-penelitian sebelumnya

adalah pada integrasi teknologi dan efisiensi prosesnya. Penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan *biohydrogen production* berfokus pada satu atau dua alat saja, sedangkan pada karya ilmiah ini, terdapat 3 alat *biohydrogen production* dan 1 alat *methane production* yang terintegrasi dan lebih efisien dalam menggunakan energi.

B. Landasan Teoritis

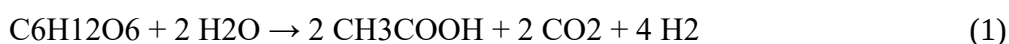
Berikut adalah landasan teori yang digunakan dalam karya tulis ilmiah ini yang diambil dari jurnal nasional dan internasional:

1. Mikroba

Mikroba adalah makhluk hidup yang berukuran mikrometer yang terdiri dari beberapa jenis seperti bakteri, fungi, protista, dan virus. Mikroba ini hidup dalam kondisi yang lingkungan (pH, suhu, kelembaban, dll) yang spesifik [7]. Beberapa mikroba dapat digunakan dalam proses produksi hidrogen mikroba jenis bakteri seperti *Thermoanaerobacterium sp* yang memiliki suhu optimum 75°C dan *Pseudomonas sp* yang memiliki suhu optimum 35°C [8]. Keduanya beroperasi pada rentang pH 6.5 - 7.5 dan memiliki ketahanan terhadap kondisi air limbah cair kelapa sawit yang memiliki kadar COD yang tinggi [9].

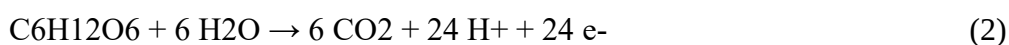
2. Fermentasi Gelap

Proses fermentasi gelap adalah proses untuk menghasilkan hidrogen menggunakan bakteri untuk mengubah senyawa organik dalam substrat menjadi gas hidrogen dan senyawa asam organik. Proses ini dilakukan dalam kondisi tanpa cahaya dan tanpa oksigen sehingga bakteri akan mendapatkan energi dari memecah senyawa organik dalam substrat. Reaksi yang terjadi dalam proses tersebut adalah [10]:



3. Microbial Fuel Cell (MFC)

Microbial Fuel Cell (MFC) adalah sebuah perangkat untuk mengubah senyawa organik dalam substrat menjadi energi listrik dengan bakteri sebagai katalisnya. MFC terdiri dari 2 tangki yang terpisah oleh sebuah jembatan garam. Substrat organik dan mikroba berada di tangki anoda, sedangkan substrat anorganik berada di tangki katoda. Senyawa organik dalam tangki anoda akan dipecah oleh bakteri sehingga melepaskan elektron yang kemudian dialirkan sebagai energi listrik. Salah satu reaksi yang terjadi adalah [11] :



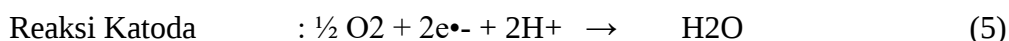
4. Microbial Electrolysis Cell (MEC)

Microbial Electrolysis Cell merupakan teknologi penghasil hidrogen yang prinsip

kerjanya adalah membalikkan sebagian proses dekomposisi senyawa organik dengan bantuan arus listrik [12]. Terdapat 3 bagian utama dalam MEC yaitu katoda, anoda, dan separator. Pada permukaan anoda terjadi pemecahan senyawa organik menjadi CO₂, elektron dan proton. Elektron dan proton melewati sirkuit listrik eksternal dan elektrolit secara masing-masing dan bergabung pada katoda untuk menghasilkan hidrogen [13].

5. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM-FC)*

Proton Exchange Membrane Fuel Cell adalah teknologi yang memanfaatkan prinsip sel elektrokimia untuk mengonversi gas Hidrogen (H₂) menjadi energi listrik [14]. Gas hidrogen akan teroksidasi di lapisan anoda menjadi proton dan elektron. Beda potensial antar elektroda menghasilkan arus listrik, sedangkan proton melewati elektrolit dan bertemu oksigen di lapisan katoda menghasilkan arus listrik, sedangkan proton melewati elektrolit dan bertemu oksigen di lapisan katoda menghasilkan air dan panas. Lapisan anoda dan katoda mengandung suatu katalis agar reaksi elektrokimia menjadi lebih cepat. Reaksi dari anoda dan katoda sebagai berikut [15]:



6. *Biogas Digester*

Biogas Digester merupakan teknologi penghasil biogas yang memanfaatkan proses fermentasi dari senyawa organik menjadi gas metana (CH₄) [16]. Dalam *digester*, terjadi proses penguraian senyawa organik menjadi gas metana oleh bakteri metanogenik yang secara alami terkandung dalam air limbah. Proses fermentasi ini memerlukan waktu yang relatif lama, tetapi dengan reduksi COD yang tinggi sehingga *effluent* dari alat ini akan menghasilkan limbah cair dengan konsentrasi COD yang rendah [17].

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Sistematika Penulisan



Gambar 1. Sistematika Penulisan

B. Pengumpulan Data

Data yang mendukung karya tulis ilmiah ini dicari dan dikumpulkan dengan cara melakukan pencarian tinjauan pustaka yang merupakan data sekunder dari jurnal ilmiah nasional dan internasional. Langkah pertama adalah menentukan alternatif metode pengolahan limbah cair kelapa sawit konvensional. Didapatkan data cara pengolahan limbah konvensional menggunakan *Biogas Digester* yang memiliki efektivitas rendah dan emisi tinggi. Kemudian, dicari alternatif teknologi pengolahan limbah yang lebih efektif. Dari beberapa potensi yang ada, dipilih integrasi beberapa teknologi seperti *Dark*

Fermentation, MFC, MEC, PEM Fuel Cell, dan Biogas Digester. Masing-masing alat dihitung efektivitas produksi hidrogen dan reduksi kadar limbahnya sehingga didapat neraca massa dan neraca energi masing-masing alat. Perhitungan produksi energi dilakukan melalui simulasi dengan pemrograman komputasi. Data, formula, dan *chemical properties* pada karya tulis ini dicari dengan menggunakan *database online* seperti Google Scholar, Sciencedirect, dan Scopus. Pada studi kelayakan ekonomi, informasi harga alat dan bahan didapatkan dari situs resmi penjualan instrumen kimia yang mempertimbangkan kapasitas alat.

C. Pengolahan Data

Pengolahan data bertujuan untuk mengubah data sekunder menjadi suatu informasi yang lebih berkembang sehingga memberikan arah untuk pengkajian lebih lanjut. Analisis data dilakukan dengan cara analitis dan cara simulasi melalui pemrograman komputasi sehingga didapatkan data produksi hidrogen (H_2) dari masing-masing alat yang kemudian akan disimulasikan dan dihitung dengan analisis kuantifikasi listrik yang didapatkan dari hidrogen yang diumpankan ke PEM-FC. Listrik yang dihasilkan tersebut merupakan dasar perhitungan untuk studi kelayakan ekonomi. Selanjutnya akan dihitung studi kelayakan ekonomi dengan parameter *Payback Period* (PP), *Investment Rate of Return* (IRR), dan *Net Present Value* (NPV) berdasarkan biaya investasi, biaya operasi, dan *revenue* yang didapatkan oleh produksi listrik.

D. Analisis Data

Berikut persamaan-persamaan yang digunakan dalam proses:

1. Persamaan Monod

Persamaan ini digunakan untuk menghitung kecepatan pertumbuhan bakteri dalam reaktor [18] :

$$dXd t = \frac{\mu_{max} S X}{K_s + S} - K_d X \quad (1)$$

dengan,

X = Konsentrasi sel (g/L)

S = Konsentrasi substrat (g/L)

K_s = Konstanta Saturasi (g/L)

μ_{max} = Kecepatan pertumbuhan sel bakteri maksimum (g/LS)

K_d = Konstanta kematian bakteri (g/L)

$dXd t$ = Laju pertumbuhan bakteri dalam reaktor (g/L/s)

2. Persamaan Gompertz

Persamaan ini digunakan untuk menghitung *yield* hidrogen yang dihasilkan dalam proses fermentasi gelap [19]:

$$H(t) = H_m \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{R_{m,e}}{H_m}(\lambda - t) + 1\right]\right\} \quad (2)$$

dengan,

H_t = Produksi Hidrogen Total (mL)

H_m = Potensi produksi Hidrogen (mL)

R_m = Kapasitas maksimum produksi Hidrogen (mL)

λ = *lag phase* (jam)

e = bilangan euler = 2,71828

t = waktu tinggal reaktor (jam)

3. Persamaan Logan

Persamaan ini digunakan untuk menghitung energi listrik yang dihasilkan oleh microbial fuel cell [20]:

dengan,

$$P = C \times V_t \times F \times \eta \quad (3)$$

P = Daya listrik (kWh/Volume limbah)

C = Konsentrasi COD (mg/L)

η = Efisiensi energi (%)

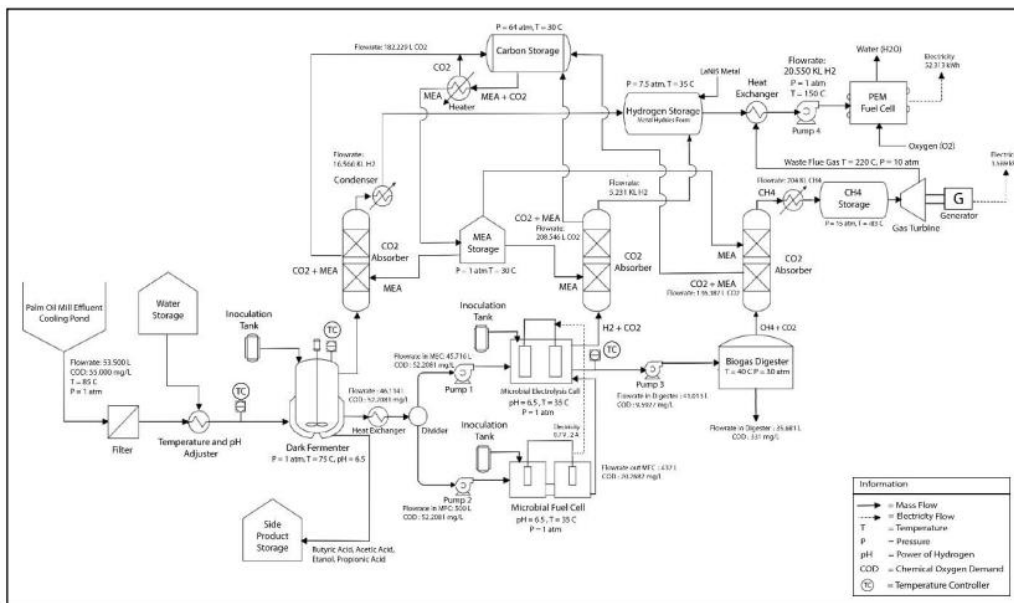
V_t = Volume reaktor (L)

F = Faktor konversi energi = 14,7 kJ/gCOD

BAB IV PEMBAHASAN

A. Proses Perancangan

Proses pengolahan limbah ini dirancang untuk menghasilkan hidrogen dan metana sebanyak-banyaknya untuk kemudian dikonversi menjadi energi sementara tetap mengurangi kadar COD dalam air limbah hingga di bawah ambang batas maksimum yang ditetapkan pemerintah. Berikut adalah *flow diagram* prosesnya :



Gambar 2. *Flow Diagram* Proses

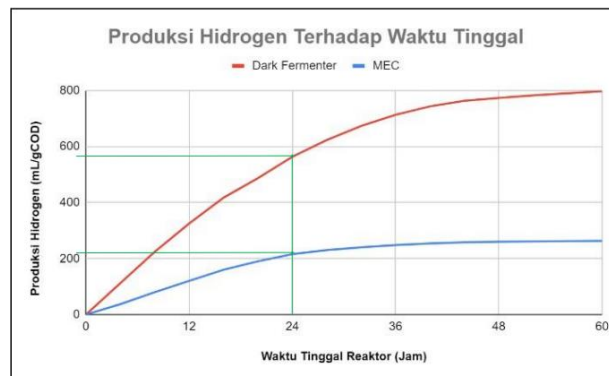
Berikut penjelasan tentang proses-proses inti yang dalam *flow diagram*.

1. *Pretreatment* Limbah Cair Kelapa Sawit

Limbah cair kelapa sawit yang keluar dari pabrik ditampung dalam *cooling pond* untuk kemudian dilakukan proses penyaringan untuk mengurangi kandungan padatan tersuspensi (TSS) yang terkandung pada limbah cair. Alat penyaringan yang digunakan merupakan filter berjenis *sand filter* yang memiliki efisiensi saringan yang tinggi untuk padatan tersuspensi [21]. Setelah melalui proses penyaringan, limbah cair kelapa sawit disesuaikan suhu dan pH agar sesuai dengan kondisi operasi *Dark Fermenter* dengan menambahkan basa organik dan membuat kontak dengan air pendingin.

2. Produksi Hidrogen dan Metana

Setelah proses pretreatment, limbah cair akan melalui proses fermentasi gelap dalam reaktor *Jacketed Continuous Stirred Tank Reactor (Jacketed-CSTR)* untuk menjaga suhu reaksi konstan agar *Thermoanaerobacter sp* yang digunakan dalam proses fermentasi dapat tumbuh dengan optimal. Proses fermentasi ini berlangsung pada pH 6.5 dan suhu 75°C. *Effluent* dari proses ini adalah air limbah yang telah tereduksi kadar COD-nya sebesar 15%, gas hidrogen sebagai produk utama, gas CO₂, dan produk sampingan lainnya seperti asam asetat dan etanol [22]. Perhitungan *yield* hidrogen dari *Dark Fermenter* dan *Microbial Electrolysis Cell (MEC)* bergantung pada kondisi operasi dan waktu tinggal atau seberapa lama fermentasi terjadi. Untuk menentukan waktu fermentasi optimal, dilakukan simulasi dengan pemrograman komputasi dengan hasil sebagai berikut:



Gambar 3. Pengaruh Waktu Tinggal Terhadap Produksi Hidrogen

Berdasarkan hasil simulasi tersebut, diambil waktu tinggal optimal di *Dark Fermenter* dan *Microbial Electrolysis Cell* selama 24 jam dengan produksi hidrogen di *Dark Fermenter* sebesar 563 mL/gCOD dan di *Microbial Electrolysis Cell* sebesar 216 mL/gCOD.

Limbah cair yang keluar dari *Dark Fermenter* didinginkan menjadi hingga suhunya mencapai 35°C untuk mengurangi bakteri *Thermoanaerobacter sp* dan menyesuaikan kondisi pertumbuhan optimum bakteri *Pseudomonas sp* yang akan digunakan dalam *Microbial Fuel Cell* (MFC) dan *Microbial Electrolysis Cell* (MEC). Arus limbah cair ini kemudian dibagi menggunakan divider sebesar 96% (v/v) limbah menuju MEC dan 4% (v/v) menuju MFC. Tujuan pembagian arus ini adalah mengefisienkan pengolahan limbah cair dan mengefisienkan penggunaan energi. MEC dapat memproduksi hidrogen secara optimal jika mendapat daya listrik dengan tegangan sebesar 0,7 Volt (V) dan kuat arus sebesar 2 Ampere (A) per liter limbah cair [23]. Kebutuhan energi ini didapatkan dari hasil simulasi dengan persamaan Gompertz dan persamaan Logan yang dihitung dengan pemrograman komputasi. Didapatkan hasil sebagai berikut:



Gambar 4. Pengaruh Tegangan Terhadap Produksi Hidrogen

Berdasarkan data tersebut, tegangan optimal yang dapat menghasilkan hidrogen tertinggi adalah pada tegangan 0,7 V. Tegangan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan terjadinya reaksi samping yang mengurangi *yield* hidrogen, sedangkan tegangan yang

terlalu rendah dapat menyebabkan konversi senyawa organik menjadi hidrogen menjadi tidak efektif dan lambat [24]. Perhitungan dan justifikasi pengambilan tegangan optimal.

Untuk menyuplai daya listrik tersebut, digunakan MFC yang mampu menyuplai cukup daya listrik sekaligus mengolah sebagian air limbah. Listrik yang dihasilkan MFC dialirkan ke MEC untuk memulai elektrolisis limbah cair yang berasal dari *effluent* dari *Dark Fermenter* dan MFC. Sisa air limbah yang dihasilkan akan diteruskan ke *Biogas Digester* dengan kadar COD yang telah tereduksi sebesar 81%. Pada MFC, energi yang dihasilkan adalah sebesar 1.475 kWh/hari dan terdapat sisa air limbah yang telah tereduksi kadar COD-nya sebesar 66% yang kemudian di-*recycle* di MEC. Limbah cair *effluent* dari MEC mengalami pemanasan hingga suhu 40°C lalu dimasukkan *Biogas Digester* selama 8 hari proses untuk menghasilkan gas metana (CH₄). Secara total, hidrogen yang dihasilkan oleh *Dark Fermenter* dan MEC adalah sebesar 21.797 m³/hari yang kemudian akan dikonversi menjadi energi listrik dalam PEM-FC. Sedangkan, jumlah metana/biogas yang dihasilkan adalah sebanyak 204.581 m³/hari yang akan dikonversi menjadi energi menggunakan turbin gas.

3. Purifikasi Gas Hidrogen dan Metana

Gas hidrogen dan metana yang dihasilkan harus dipisahkan dari CO₂ pengotor karena gas tersebut akan menurunkan konversi hidrogen atau metana dan merusak lingkungan. Dalam proses separasinya, digunakan *absorber* dengan *Methylethanolamine* (MEA) sebagai pelarut karena MEA memiliki *removal* CO₂ yang tinggi hingga 97% dan dapat digunakan secara konvensional [25]. Setelah proses purifikasi, gas hidrogen didinginkan hingga suhu 35°C untuk diabsorpsi oleh metal Lanthanum-Nickel 5 (LaNi₅) dalam bentuk metal *hydrides*. Sedangkan, gas metana didinginkan hingga suhu -83°C untuk disimpan dalam fasa cairnya.

4. Konversi Hidrogen dan Metana menjadi Energi

Gas hidrogen yang telah diabsorpsi kemudian dilepaskan kembali dengan cara memanaskan metal LaNi₅ pada suhu 150°C sehingga terjadi proses desorpsi sehingga seluruh gas hidrogen terlepas. Gas hidrogen kemudian dipompa menuju PEM-FC untuk dikonversi menjadi listrik sebesar 49.343 kWh/hari. Gas metana yang telah disimpan dalam *storage* kemudian dialirkan menuju rangkaian turbin gas dan generator untuk menghasilkan listrik sebesar 1.589 kWh/hari. Sisa gas panas yang dilepas turbin gas digunakan untuk membawa panas dalam *heat exchanger* agar penggunaan energi lebih efisien. Secara total, produksi energi proses ini adalah sebesar 53.903 kWh/hari atau 17,8 GWh/tahun. Produksi listrik ini mampu memenuhi 53,48% kebutuhan energi pabrik kelapa sawit [26].

B. Analisis Dampak Lingkungan

Analisis dampak lingkungan dilakukan untuk mengetahui dampak proses ini terhadap air limbah yang diolah dan emisi CO₂ yang dihasilkan:

1. Analisis Air Limbah Akhir

Air limbah akhir yang dikeluarkan dari proses ini adalah sebesar 35.681 L dengan konsentrasi COD sebesar 331 mg/L. Konsentrasi ini telah memenuhi batas maksimal baku mutu air limbah yang ditetapkan pemerintah dalam Peraturan Menteri LHK Nomor 5 Tahun 2014 yaitu sebesar 350 mg/L. Maka, air limbah yang keluar dari proses terakhir dapat langsung dibuang ke lingkungan dan tidak akan menyebabkan dampak negatif pada lingkungan [27].

2. Analisis Faktor Emisi

Proses yang ditawarkan dalam karya ini menghasilkan emisi yang lebih rendah dibandingkan hanya menggunakan *Biogas Digester*. Faktor emisi menggambarkan jumlah emisi CO₂ yang dilepas per satuan energi yang dihasilkan. Berdasarkan perhitungan, didapat energi yang dihasilkan oleh integrasi *Green Hydrogen Production* dan *Biogas Digester* sebesar 17,8 GWh/tahun dan emisi CO₂ sebesar 325,3 ton/tahun. Sedangkan, jika hanya menggunakan *Biogas Digester* saja, didapat energi yang lebih kecil, yaitu sebesar 3,9 GWh/tahun dan emisi CO₂ yang lebih besar yaitu 629,4 ton/tahun. Didapat faktor emisi integrasi *Green Hydrogen Production* dan *Biogas Digester* sebesar 18,29 gCO₂/kWh, sedangkan jika hanya menggunakan *Biogas Digester* saja seperti pada status quo, faktor emisinya sebesar 160,44 gCO₂/kWh. Hal ini berarti untuk mengolah limbah dalam jumlah yang sama maka proses ini mampu mengurangi potensi emisi CO₂ sebesar 304,14 ton CO₂/tahun.

C. Analisis Ekonomi

Untuk mengetahui apakah proses ini layak dibangun atau tidak, diperlukan suatu analisis kelayakan yang disebut analisis ekonomi teknik. Basis dari analisis ini adalah produksi padi PT Perkebunan Nusantara V (PTPN V) Siak, dimana industri ini menghasilkan limbah cair kelapa sawit sebesar 53.500 L limbah cair dengan konsentrasi COD sebesar 55.000 mg/L. Dari keseluruhan rangkaian proses mulai didapatkan gas hidrogen sebesar 21.797 m³ /hari. Total listrik yang dapat dibangkitkan sebesar 53.902 kWh/hari atau 17,8 GWh/tahun. Listrik yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan industri itu sendiri atau dapat bekerja sama dengan PT Perusahaan Listrik Negara (PLN) Indonesia untuk pendistribusian listrik ke rumah-rumah masyarakat. PT. PLN Indonesia menjual listrik ke masyarakat Rp1.440/kWh. Dengan basis ini didapatkan penjualan listrik setahun sebesar Rp25.614.651.379. Untuk menghitung parameter

ekonomi berupa keuntungan total, PP, NPV dan IRR, diperlukan harga dari setiap alat yang digunakan dan biaya operasional pabrik. Harga dari alat yang digunakan diambil dari *matche.com* dengan asumsi umur pabrik 15 tahun dan beberapa estimasi persentase dari biaya operasi dan modal tetap diambil dari *Book of Economic Engineering* dengan asumsi-asumsi yang logis [28]. Berikut ringkasan hasil perhitungan analisis ekonomi:

Tabel 1. Hasil Perhitungan Analisis Ekonomi

Hasil Perhitungan	
<i>Fixed Capital</i>	Rp15.858.818.640
<i>Manufacturing Cost</i>	Rp2.922.036.955
<i>General Expenses</i>	Rp146.101.847
<i>Raw Material</i>	Rp67.449.600
<i>Operational Cost</i>	Rp18.926.957.442
<i>Sales</i>	Rp25.614.651.379
<i>Profit/Year</i>	Rp6.687.693.936.
<i>Net Present Value (NPV)</i>	RP75.006.196
<i>Internal Rate of Return (IRR)</i>	34.90%
<i>Return of Investment (ROI)</i>	35.33%
<i>Payback Period (PP)</i>	3 Tahun

Pada perancangan ini, *Payback Period* (PP) yang didapatkan adalah 3 tahun yang berarti modal investasi akan dikembalikan dalam 3 tahun dan setelah itu akan mendapat penghasilan berkelanjutan. Jika dibandingkan dengan umur alat yang rata-rata memiliki umur 15 tahun, maka modal investasi akan dikembalikan sebelum umur dari alat-alat ini berakhir. Hal itu berarti investasi ini akan aman untuk dibangun karena memiliki PP hampir 5 kali lebih cepat dari umur alat yang diinvestasikan.

Pada Tabel 1, nilai *Net Present Value* (NPV) yang dihasilkan oleh perancangan dengan basis tersebut bernilai positif. Hal ini berarti bahwa proyeksi keuntungan yang didapat akan lebih besar dari proyeksi pengeluaran yang dihasilkan atau menguntungkan untuk dibangun. *Internal Rate of Return* (IRR) menggambarkan berapa persen keuntungan yang didapatkan dari investasi yang dikeluarkan per tahun. IRR yang didapatkan sebesar 34.90% lebih besar dibanding reksadana sekitar 7%, deposito sekitar 5%, dan pasar modal sekitar 10%, investasi ini sangat menjanjikan untuk dilakukan karena akan memberikan keuntungan akan investasi untuk produksi listrik.

D. Analisis Keberlanjutan

Aspek keberlanjutan karya ini untuk dikomersialkan dan diimplementasikan ditinjau dari beberapa aspek mulai dari produk teknis, ketersediaan sumber daya, dan lingkungan. Limbah cair kelapa sawit sebagai bahan baku utama dalam proses ini memiliki ketersediaan yang berkelanjutan. Umumnya pabrik kelapa sawit menghasilkan 20.000 – 75.000 L limbah dengan kadar COD berkisar 30.000 – 80.000 mg/L sehingga proses ini akan tetap dapat dilakukan selagi pabrik kelapa sawit beroperasi [29].

Proses *Dark Fermenter* membutuhkan inokulum dari bakteri *Thermoanaerobacter sp* sebagai sel fermentasi yang dapat diisolasi dari air limbah pabrik. Inokulum ini tergolong mudah didapatkan dan dikembangkan. Pada proses di *Microbial Fuel Cell* dan *Microbial Electrolysis Cell* digunakan inokulum dari bakteri *Pseudomonas sp*. Bakteri ini secara alami terdapat di tanah basah sehingga mudah untuk diisolasi dan dikembangkan. Kedua jenis bakteri yang digunakan ini mendukung implementasi pengolahan limbah cair kelapa sawit menjadi listrik secara berkelanjutan karena ketersediaannya yang melimpah.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Kesimpulan dari karya ilmiah ini adalah:

1. Proses pengolahan limbah cair kelapa sawit yang efektif adalah dengan mengintegrasikan teknologi *Green Hydrogen Production* dan *Biogas Digester* yang mampu mereduksi konsentrasi limbah cair kelapa sawit dari 55.000 mg/L menjadi 331 mg/L sekaligus menghasilkan energi listrik sebesar 53.903 kWh/hari. Proses ini menghasilkan energi yang 460% lebih besar dibanding solusi pada status quo yang menggunakan *Biogas Digester* saja yang hanya mampu mereduksi kadar COD limbah cair kelapa sawit dari 55.000 mg/L menjadi 1.260 mg/L dan hanya menghasilkan energi sebesar 11.888 kWh/hari.
2. Integrasi teknologi *Green Hydrogen Production* dan *Biogas Digester* memiliki faktor emisi sebesar 18,38 gCO₂/kWh sedangkan jika hanya menggunakan *Biogas Digester* saja, faktor emisinya 8 kali lebih besar yaitu mencapai 160,44 gCO₂/kWh. Secara total, integrasi teknologi ini mampu mengurangi potensi emisi CO₂ sebesar 304,14 ton CO₂ per tahunnya.
3. Pengolahan limbah dengan mengintegrasikan teknologi *Green Hydrogen*

Production dan *Biogas Digester* memiliki *net present value* sebesar RP75.006.196, *return of investment* sebesar 35.33%, dan *payback period* selama 3 tahun. Hal ini berarti proses ini layak untuk dibangun karena menguntungkan secara ekonomi. Secara lingkungan, konsentrasi limbah cair kelapa sawit yang dikeluarkan oleh proses terakhir sebesar 331 mg/L telah berada di bawah batas ambang maksimum yang ditetapkan pemerintah yaitu sebesar 350 mg/L sehingga proses ini dapat menyelesaikan masalah air limbah dengan baik.

B. Saran

Berikut adalah saran dari karya tulis ilmiah ini

1. Integrasi Teknologi *Green Hydrogen Production* dan *Biogas Digester* pada Limbah Cair Kelapa Sawit menyelesaikan masalah limbah cair, emisi CO₂, dan kebutuhan energi pabrik kelapa sawit secara bersamaan. Profit yang dihasilkan oleh proses ini juga lebih tinggi dibanding proses konvensional yang hanya mengandalkan *Biogas Digester* sehingga proses ini sangat disarankan untuk diimplementasikan oleh perusahaan sawit di Indonesia.
2. Proses *Dark Fermenter* menghasilkan *side product* berupa asam asetat, asam butirat, etanol, dan lain-lain dengan konsentrasi tinggi yang dapat dijual di pasar. Penelitian berikutnya diharapkan bisa membahas lebih detail mengenai pemisahan *side product* menjadi senyawa murni agar dapat menambah profit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. o. P. O. P. C. (CPOPC), "Palm Oil Supply and Demand Outlook Report 2022," 2021. [Online]. Available: www.cpopc.org . [Diakses 10 Juli 2022].
- [2] E. T. F. d. F. L. Nuraini, " Penentuan Nilai BOD dan COD Limbah Cair Inlet Laboratorium Pengujian Fisis Politeknik ATK," *Integrated Lab Journal*, pp. al: 10-15, 2019.
- [3] L. Parinduri, "Analisa Pemanfaatan POME Untuk Sumber Pembangkit Tenaga Biogas Di Pabrik Kelapa Sawit," *Jurnal Teknologi Elektro*, 2018.
- [4] Z. S. C. S. Y. L. J. W. W. T. & C. C. K. Lee, "Treatment technologies of palm oil mill effluent (POME) and olive mill wastewater (OMW): A brief review," *Environmental technology & innovation*, p. 15, 2019.
- [5] K. N. L. Hidup, "Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah," 2014.

- [6] Suryadi, "Pabrik Sawit Cemari Sungai di Siak, Bagaimana Penanganannya?," 12 2019. [Online]. Available: <https://www.mongabay.co.id/2019/01/22/pabrik-sawitcemari-sungai-di-siak-bagaimana-penanganannya/>. [Diakses 19 Juli 2022].
- [7] S. G. P. W. G. Z. M. O. N. & S. P. A. Hays, "Better together: engineering and application of microbial symbioses," *Current opinion in biotechnology*, pp. 40-49, 2015.
- [8] R. A. & A. L. Wilkes, "Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges," *Journal of applied microbiology*, vol. 123(3), pp. 582-593., 2017.
- [9] M. M. V. C. & P. R. S. Musa, "Secondary alcohol dehydrogenases from *Thermoanaerobacter pseudoethanolicus* and *Thermoanaerobacter brockii* as robust catalysts," *ChemBioChem*, vol. 22(11), pp. 1884-1893, 2021.
- [10] D. D. Y. Y. Q. L. Y. N. B. J. W. Q. .. & Y. Z. Wang, "Free ammonia enhances dark fermentative hydrogen production from waste activated sludge," *Water research*, pp. 133, 272-281., 2018.
- [11] B. E. W. M. J. K. K. Y. H. W. F. Y. & S. P. E. Logan, "Assessment of microbial fuel cell configurations and power densities. *Environmental Science & Technology Letters*," *Environmental Science & Technology Letters*, no. 2(8), pp. 206-214, 2015.
- [12] A. S. Y. A. P. A. N. F. C. K. & K. M. S. Kadier, "Kadier, A., Simayi, Y., Abdeslahian, comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor designs and configurations for sustainable hydrogen gas production," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55(1), pp. 427-443, 2016.
- [13] K. P. A. M. & S. P. E. Katuri, "The role of microbial electrolysis cell in urban wastewater treatment: integration options, challenges, and prospects," *Current opinion in biotechnology*, pp. 57, 101-110, 2019.
- [14] R. W. Y. M. Z. F. W. D. P. Z. L. Y. X. .. & Z. J. Haider, "High temperature proton exchange membrane fuel cells: Progress in advanced materials and key technologies," *Chemical Society Reviews*, vol. 50(2), pp. 1138-1187, 2021.
- [15] E. H. R. D. D. W. R. W. H. T. & H. M. A. Majlan, "Electrode for proton exchange membrane fuel cells: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 89, 117-134, 2018.
- [16] A. M. B. & S. A. Kumar, "Advancement in biogas digester," *Energy sustainability through green energy*, pp. 351-382., 2015.
- [17] B. J. L. J. & I. N. David, "Palm oil mill effluent (POME) treatment "Microbial communities in an anaerobic digester": A Review., 2014.
- [18] P. R. E. R. & S. K. Mullai, "Biohydrogen production and kinetic modeling using sediment microorganisms of pichavaram mangroves, India. *BioMed research international*, 2013., " *BioMed research international*, 2013.
- [19] L. G. W. Q. G. X. C. R. H. Y. W. J. T. C. G. L. .. & R. N. Q. Zhao, "Continuous hydrogen production from glucose/xylose by an anaerobic sequential batch reactor to maximize the energy recovery efficiency," *RSC advances*, vol. 8(37), p. 2071, 2018.

- [20] B. E. W. M. J. K. K. Y. H. W. F. Y. & S. P. E. Logan, "Assessment of microbial fuel cell configurations and power densities. Environmental Science & Technology Letters," Environmental Science & Technology Letters, vol. 2(8), pp. 206-214., 2015.
- [21] J. M. A. K. A. & S. O. Talvitie, "Solutions to microplastic pollution–Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies," Water research, pp. 123, 401-407, 2017.
- [22] S. D. M. F. M. T. S. M. N. M. S. M. W. Z. A. .. & S. L. Krishnan, "Accelerated two-stage bioprocess for hydrogen and methane production from palm oil mill effluent using continuous stirred tank reactor and microbial electrolysis under thermophilic condition," international journal of hydrogen energy, vol. 44(60), pp. 31841-31852., 2019.
- [23] P. J. A. K. P. R. A. & S. O. Khongkliang, "High efficient biohydrogen production from palm oil mill effluent by two-stage dark fermentation and microbial electrolysis under thermophilic condition," international journal of Hydrogen Energy, vol. 44(60), pp. 31841-31852, 2019.
- [24] P. J. A. K. P. R. A. & S. O. Khongkliang, "High efficient biohydrogen production from palm oil mill effluent by two-stage dark fermentation and microbial electrolysis under thermophilic condition," international journal of hydrogen energy, vol. 44(60), pp. 31841-31852, 2019.
- [25] U. A. S. B. Api, "Biohydrogen purification from palm oil mill effluent fermentation for fuel cell application," Malaysian Journal of Analytical Sciences, 23(1), 80-89., vol. 23(1), pp. 80-89., 2019.
- [26] E. I. M. & F. F. Warman, "Efficiency analysis of electric energy use in palm oil processing (case study Bandar Pulau)," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1, no. 505, p. 13, 2019.
- [27] H. C. S. D. M. F. M. R. S. K. T. & K. A. Kamyab, "Palm oil mill effluent as an environmental pollutant," Palm oil, pp. 13, 13-28., 2018.
- [28] J. Yates, Engineering Economics, USA: CRC Press, 2016.
- [29] Z. S. C. S. Y. L. J. W. W. T. & C. C. K. Lee, "Treatment technologies of palm oil mill effluent (POME) and olive mill wastewater (OMW): A brief review," Environmental technology & innovation, vol. 15, p. 100377, 2019.