

Pra Desain Pabrik Hidrogen dari Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Metode Gasifikasi Uap

Jericho Immanuel¹, Dewi Setiyaningsih¹, Fadlilatul Taufany¹, S. Susianto¹

DOI: [10.12962/j2964710X.v3i1.17512](https://doi.org/10.12962/j2964710X.v3i1.17512)

Abstrak—Energi merupakan aspek penting yang selalu dibutuhkan dalam kehidupan sehari-hari. Pandemi COVID-19 menurunkan penyediaan energi, terutama pada tahun 2020. Di Indonesia, sektor pembangkit listrik merupakan penyumbang emisi GRK terbesar. Sehubungan dengan hal tersebut, Indonesia telah menentukan target untuk energi baru terbarukan (EBT) pada 2025-2050 sebesar 23-31% dengan mengurangi penggunaan minyak bumi, batu bara, dan gas bumi. Telah terjadi peningkatan dalam pemanfaatan EBT salah satunya adalah biomassa. Di Indonesia, pemanfaatan energi biomassa masih 5,1% dari potensi yang ada. Biomassa tersedia secara melimpah perlu dikembangkan lebih jauh untuk menggantikan energi fosil yang terbatas dan mengurangi emisi CO₂. Di Indonesia, sangat sedikit PLT Biomassa yang dikembangkan menggunakan hidrogen murni dengan emisi hampir nol. Hidrogen telah muncul sebagai bagian penting dari campuran energi bersih secara berkelanjutan. Jenis produk hidrogen yang terpilih dalam pabrik ini yaitu hidrogen biru. Pabrik akan didirikan pada 2024 dan mulai beroperasi pada 2027. Lokasi pembangunan pabrik ditetapkan akan didirikan di kawasan industri Dumai, Riau. Pemilihan lokasi pabrik berdasarkan ketersediaan bahan baku, lahan, listrik transportasi, dan sumber tenaga kerja. Bahan baku utama proses produksi adalah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). Pemanfaatan TKKS sebanyak 4940.71 ton/tahun. Selain menghasilkan hidrogen, terdapat produk samping yaitu CO₂ yang akan dimanfaatkan oleh perusahaan lain. Proses pembuatan hidrogen dibagi menjadi beberapa proses yaitu *size reduction*, *drying*, *gasification*, *steam methane reforming*, *water gas shift*, dan *pressure swing adsorption*. Hasil akhir gas hidrogen memiliki kemurnian 99%. Untuk mengetahui kelayakan pabrik, dilakukan analisa ekonomi meliputi IRR, NPV, dan POT. Didapat IRR > WACC sebesar 18.61%, NPV > 0 sebesar Rp.539,001,002,607,985. Modal pabrik akan kembali (POT) setelah 3 tahun. Dari analisa yang telah dilakukan, ditarik kesimpulan bahwa pabrik layak untuk didirikan.

Kata Kunci—Biomassa, Energi, Gasifikasi, Hidrogen, TKKS

I. PENDAHULUAN

Energi merupakan aspek penting yang selalu dibutuhkan dalam kehidupan sehari-hari, baik dari skala kecil seperti aktivitas manusia hingga skala besar seperti di industri. Sektor energi selalu menjadi pusat perekonomian global dan memegang peranan penting di tengah krisis pandemi COVID-19. Kemudian, adanya pandemi COVID-19 menurunkan penyediaan energi, terutama pada tahun 2020. Penyediaan energi akan terjadi penurunan sebesar 8,3% untuk skenario optimis, 11,4% untuk skenario moderat, dan 14,4% untuk skenario pesimis. Penurunan penyediaan energi tidak sebesar penurunan kebutuhan energi karena rugi-rugi selama pengolahan dan distribusi energi ke konsumen cukup tinggi. Penelitian IRENA (2020) menunjukkan bahwa

menurunnya permintaan energi untuk transportasi dan industri menyebabkan bahan bakar fosil sangat terpuruk [1]. Hal ini dibuktikan dengan harga bahan bakar minyak telah turun tajam.

Untuk memenuhi kebutuhan energi yang sustainable, telah terjadi peningkatan dalam pemanfaatan energi terbarukan, salah satunya biomassa (bioenergi). Bioenergi atau biomassa ini menjadi sebuah alternatif penghasil energi terbarukan dalam beberapa dekade belakangan ini. Hal ini dibuktikan oleh Tabel 1 dimana bioenergi memiliki potensi yang cukup besar yaitu 32.654 MW. Namun, pemanfaatan bioenergi ini hanya 5,1% dari potensi yang ada. Masih ada 94,9% bioenergi yang dapat dimaksimalkan kembali untuk dimanfaatkan. Biomassa yang merupakan penghasil energi yang ramah lingkungan dan tersedia secara melimpah sudah selayaknya

¹ Departement of Chemical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya 60111, Indonesia. *E-mail: susianto@chem-eng.its.com

dikembangkan lebih jauh untuk menggantikan energi fosil yang terbatas dan menghasilkan emisi CO₂ yang cukup tinggi yang meningkatkan emisi Gas Rumah Kaca (GRK). Saat ini, sistem energi menghadapi transisi menuju teknologi yang memungkinkan pengurangan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) untuk menghadapi tantangan besar perubahan iklim.

kecil, sehingga metode ini belum cocok untuk digunakan pada aplikasi skala pabrik.

TABLE 1.

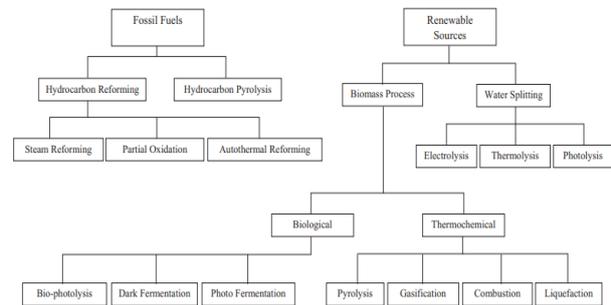
POTENSI EBT DI INDONESIA 2025-2050 [2]

Jenis Energi	Potensi (GW)	Kapasitas Terpasang (MW)	Pemanfaatan (%)
Panas Bumi	29.544	1438,5	4,9
Air	75.091	4826,7	6,4
Mini dan Mikrohidro	19.385	197,4	1
Surya	207.898	78,5	0,04
Angin	60.647	3,1	0,01
Bioenergi	32.654	1671	5,1
Laut	17.989	0,3	0,002

Di Indonesia, masih sangat sedikit PLT Biomassa yang dikembangkan menggunakan hidrogen murni dengan emisi hampir nol. Hidrogen telah muncul sebagai bagian penting dari campuran energi bersih yang dibutuhkan untuk masa depan yang berkelanjutan. Sinergi penting ada antara hidrogen dan energi terbarukan, karena hidrogen dapat mendorong pertumbuhan pasar listrik terbarukan dan memperluas jangkauan solusi terbarukan. Hidrogen semakin dianggap sebagai energi potensial dalam strategi nasional dan internasional, untuk diterapkan pada berbagai sektor mulai dari industri hingga transportasi, selain itu hidrogen telah dijadikan sebagai bahan baku dalam berbagai aplikasi industri, contohnya adalah operasi distilasi hingga proses produksi amonia dan metanol. Hal ini dikarenakan hidrogen memiliki kandungan energi yang sangat tinggi per satuan massa dengan nilai 142 kJ/g [3].

Hidrogen adalah pilihan yang menarik untuk mendekarbonisasi bagian-bagian dari sektor energi di mana akan bermasalah untuk menerapkan elektrifikasi. Salah satu tantangan penting dengan hidrogen adalah bahwa penyimpanan dan ekspor jauh lebih sulit daripada bahan bakar fosil. Ini dikarenakan hidrogen memiliki kepadatan energi volumetrik lebih dari 3x lebih rendah daripada gas alam dan mencair pada suhu yang jauh lebih rendah [4].

Produksi hidrogen dari biomassa secara garis besar dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu proses termokimia dan biologis. Untuk proses termokimia sendiri, terdapat empat metode yaitu pirolisis, likuifikasi, pembakaran, dan juga gasifikasi (Gambar 1). Dari keempat proses tersebut, hanya gasifikasi yang dapat memproduksi syngas dengan kandungan H₂ tinggi. Sedangkan untuk proses biologis, terdapat lima metode yaitu direct biophotolysis, indirect biophotolysis, biological water-gas shift reaction, photo-fermentation, dan dark-fermentation. Namun produksi H₂ dengan metode biologis masih dalam fasa penelitian dengan skala



Gambar 1. Metode Produksi Hidrogen [5].

Dari sekian banyak proses untuk menghasilkan hidrogen, gasifikasi merupakan proses terbaik untuk menghasilkan syngas yang kaya akan H₂. Gasifikasi sendiri merupakan konversi termokimia dari bahan bakar biomassa menjadi bahan bakar syngas. Gasifikasi dilakukan dalam dalam reaktor yang disebut gasifier, dan melibatkan berbagai reaksi pembentukan gas yang mudah terbakar. Penelitian Lepage dkk. menunjukkan bahwa reaksi gasifikasi merupakan reaksi yang sangat endotermis yang berlangsung pada kondisi sedikit oksigen pada suhu sekitar 1000 °C dan tekanan yang bervariasi antara tekanan atmosferik hingga 33 bar [6]. Reaksi ini mengkonsumsi agen pengoksidasi untuk memproduksi syngas, sebuah gas produk yang terdiri dari H₂, CH₄, CO, CO₂, beberapa hidrokarbon. Adapun agen-agen pengoksidasi yang biasa digunakan adalah steam, oksigen, dan juga udara.

Untuk menentukan proses mana yang akan digunakan pada pabrik ini, maka akan digunakan metode AHP dengan aplikasi expert choice. Dengan demikian, didapatkan beberapa parameter tersebut melalui Tabel 2. Dan dilakukan seleksi proses dengan metode AHP (Analysis Hierarchy Process) melalui expert choice dengan hasil seleksi pada Tabel 3. Berdasarkan analisis tersebut maka dapat disimpulkan bahwa proses yang terpilih adalah Gasifikasi Uap.

TABLE 2.

PARAMETER PERBANDINGAN AGEN GASIFIKASI

Parameter	Gasifikasi Udara N ₂ , CO, H ₂ , CO ₂ , Hidrokarbon ringan, H ₂ O	Gasifikasi Oksigen CO, H ₂ , Hidrokarbon ringan, CO ₂	Gasifikasi Uap H ₂ , CO, CO ₂ , Hidrokarbon ringan
Kandungan Tar (g/kg H ₂)	3,7-61,9	2,2-46	60-95
Komposisi H ₂ (%)	15	40	40
Rasio H ₂ /CO	0,75	1	1,6
Heating Value (MJ/Nm ³)	4-7	12-28	10-18

TABLE 3.

HASIL SELEKSI PROSES DENGAN METODE AHP				
Parameter	Bobot	Gasifikasi Udara	Gasifikasi Oksigen	Gasifikasi Uap
Gas Produk	23,6%	28,7%	35,4%	35,9%
Kandungan Tar	17,5%	31,8%	24,7%	43,5%
Kandungan H ₂	20,4%	23,9%	38%	38%
Rasio H ₂ /CO	20,6%	26,2%	35,1%	38,7%
Heating Value	17,9%	25,8%	35,4%	38,7%
Hasil Analisa Akhir		27,2%	34,2%	38,6%

II. DATA DASAR PERANCANGAN

A. Ketersediaan dan Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

Bahan baku yang digunakan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan tanaman komoditas perkebunan yang penting di Indonesia dan memiliki prospek pengembangan yang cukup bagus karena potensi produksinya jauh lebih tinggi dibandingkan tanaman penghasil minyak nabati lainnya. Kelebihan dari minyak goreng yang dihasilkan dari kelapa sawit adalah memiliki harga yang murah, rendah kolesterol dan memiliki kandungan karoten tinggi. Selain itu, minyak sawit juga dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan minyak alkohol, industri kosmetika, lilin, dan sabun. Pada umumnya, bagian utama yang diolah dari kelapa sawit adalah buahnya. Bagian daging buah ini menghasilkan minyak kelapa sawit mentah yang selanjutnya diolah menjadi minyak goreng, dengan berat tandan kosong yang merupakan produk sisanya itu adalah sekitar 21-23% dari berat tandan buah segar [7]. Spesifikasi dari TKKS ditunjukkan pada hasil analisa ultimat dan proksimat dari TKKS yang ditunjukkan pada Tabel 4.

TABLE 4.

ANALISA ULTIMAT DAN PROKSIMAT TKKS [8]	
Analisa Proksimat	
Parameter	Nilai
Kadar air (wt%)	56,79
Kadar abu (wt%)	2,34
Volatil Matter (wt%)	34,29
Fixed Carbon (wt%)	6,58
Analisa Ultimate	
Parameter	Nilai
Kadar air (wt%)	56,79
Kadar abu (wt%)	2,34
Kandungan hidrogen (wt%)	3,9
Kandungan karbon (wt%)	24,89
Kandungan oksigen (wt%)	12,01
Kandungan sulfur (wt%)	0,07
Kandungan nitrogen (wt%)	0,00
Nilai kalor (kcal/kg)	2382

Berdasarkan data yang diperoleh dari Direktorat Jenderal Perkebunan pada tahun 2011-2021, dapat dilihat bahwa produksi kelapa sawit melimpah dan setiap tahunnya mengalami peningkatan. Adapun data produksi

kelapa sawit ditunjukkan pada Tabel 5.

TABLE 5.

PRODUKSI KELAPA SAWIT INDONESIA [9]	
Tahun	Jumlah Produksi (Ribu Ton)
2011	23975,70
2012	26015,52
2013	27782,00
2014	29278,20
2015	31070,00
2016	31731,00
2017	34940,30
2018	42883,50
2019	47120,20
2020	48297,90
2021	49710,345

Hidrogen yang dihasilkan dari pabrik ini memiliki kemurnian sebesar 99.9% mol, dengan spesifikasi yang diasumsikan sama dengan *properties* hidrogen murni. Adapun spesifikasi tersebut ditunjukkan pada tabel 6.

TABLE 6.

SPESIFIKASI PRODUK HIDROGEN [10]	
Parameter	Keterangan
Titik leleh (°C)	-259,2
Titik didih (°C, pada 1 atm)	-252,88
Densitas (g/L, pada fase gas 0°C, 1 atm)	0,08988
Entalpi penguapan (cal/mol)	216
Entalpi peleburan (kJ/mol)	0,00585
Temperatur kritis (°C)	-240
Tekanan kritis (atm)	13
Densitas kritis (g/cm ³)	0,031
Kelarutan (cm ³ /g, 0°C, 1 atm)	0,0214
Explosive limits (vol % dalam udara)	4-76%
Sifat kimia	
Struktur kimia	H-H
Berat molekul	2,0159
CAS Registry Number	1333-74-0
UN Number	UN1049 (gas)

Adapun hidrogen dengan kemurnian tinggi seperti yang dihasilkan pada pabrik ini biasa digunakan dalam proses-proses dalam industri.

B. Kapasitas

Sebelum mendirikan sebuah pabrik, salah satu faktor penting yang perlu diperhatikan adalah penentuan kapasitas produksi. Pembangunan pabrik ini diharapkan untuk memenuhi sebagian kebutuhan hidrogen di Indonesia. Maka dari itu, perhitungan kapasitas pabrik ini didasari pada konsumsi hidrogen di Indonesia. Karena pabrik ini akan didirikan pada tahun 2025, maka sebagai basis perhitungan kapasitasnya akan menggunakan prediksi kebutuhan hidrogen pada tahun 2025. Adapun untuk prediksi kebutuhan tersebut akan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$M = P(1+i)^n$$

dimana,

M = Nilai data pada tahun ke X

- P = Nilai data pada tahun ke Y
- I = Rata-rata pertumbuhan
- N = Selisih tahun X dan Y

Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan data sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 7.

TABLE 7.
PERHITUNGAN KEBUTUHAN HIDROGEN PADA TAHUN 2025

Produksi (Kg)	Kebutuhan (Kg)	Ekspor (Kg)	Impor (Kg)
6,837,781.3	14,898,333.2	7,393,553.4	666,998.4
9	3	0	4

Dengan menggunakan rumus

$$\text{Kapasitas} = \text{Produksi} + \text{Impor} - \text{Ekspor}$$

didapatkan bahwa kebutuhan Hidrogen di Indonesia pada tahun 2025 adalah sebanyak 14,898,333,23 Kilogram.

Dengan mengambil kapasitas produksi sebanyak 30% dari kebutuhan nasional, maka didapatkan kapasitas produksi sebesar 4,500 ton/tahun. Adapun alasan dari pengambilan angka 28% adalah sebagai berikut:

1. Karena ini merupakan pabrik baru, maka baiknya untuk tidak memproduksi dalam kapasitas yang terlalu besar.
2. Ketersediaan bahan baku (TKKS) yang sekarang semakin terbatas karena sudah banyak dimanfaatkan
3. Apabila pabrik mengalami kendala, maka pasokan Hidrogen dapat dipenuhi oleh pabrik-pabrik lainnya.

C. Lokasi dan Ketersediaan Utilitas

Lokasi merupakan salah satu faktor yang menjadi pertimbangan dalam mendirikan sebuah pabrik, dengan lokasi yang strategis, maka dapat mendukung kelancaran produksi, meminimalisir biaya, dan memaksimalkan keuntungan dalam jangka panjang. Selain itu, penentuan lokasi pendirian pabrik ini juga memperhatikan pemerataan pemanfaatan lahan nasional. Sehingga, dalam hal ini terdapat beberapa alternatif pilihan untuk lokasi pendirian pabrik diantaranya Kota Dumai, Provinsi Riau dan Kabupaten Kotawaringin Barat, Provinsi Kalimantan Tengah.

Pemilihan lokasi pendirian pabrik menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dengan menggunakan parameter pembanding yaitu: ketersediaan bahan baku, ketersediaan air, ketersediaan lahan, transportasi, sumber daya manusia, dan ketersediaan listrik. Berdasarkan hasil analisa dengan metode AHP, Kota Dumai dipilih sebagai lokasi pendirian pabrik.

III. URAIAN PROSES

Secara garis besar, proses dalam pabrik ini terbagi menjadi 7 unit seperti yang terlihat pada Gambar 2, yaitu unit size reduction, unit drying, unit gasification, unit

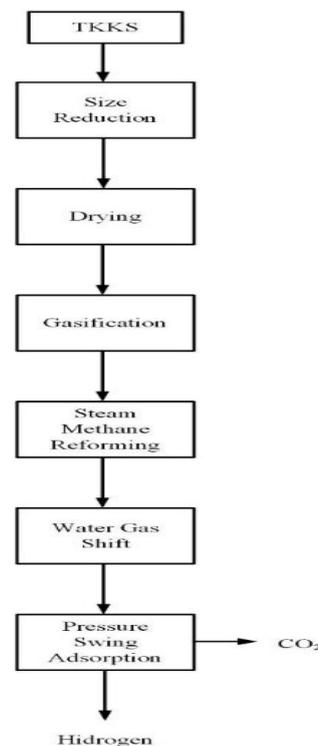
steam methane reforming, unit water-gas shift, dan unit pressure swing adsorption.

A. Unit Size Reduction

Uraian proses yang pertama adalah size reduction. TKKS yang disimpan dalam storage dibawa menuju unit size reduction dimana biomassa akan dihancurkan agar dapat lebih mudah untuk diproses. Di tempat size reduction, biomassa akan dimasukkan ke inlet grinder. Jenis alat yang digunakan untuk mencacah biomassa adalah Hammer Mill yang bisa digunakan untuk menghancurkan berbagai bahan keras. TKKS akan diproses hingga ukurannya mencapai 45 mesh. Menurut Chang dkk., pencacahan biomassa dilakukan hingga ukuran biomassa tidak lebih dari 0.35 mm atau sekitar 45 mesh untuk proses gasifikasi yang maksimal [11].

B. Unit Drying

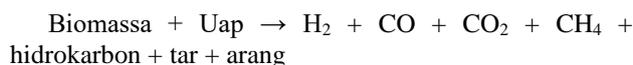
Setelah biomassa melewati proses *size reduction*, biomassa dibawa kedalam hopper menggunakan belt conveyor untuk ditampung terlebih dahulu sebelum memasuki proses pengeringan. Proses pengeringan berlangsung menggunakan rotary drier. Drier dipanaskan dari luar dengan udara yang telah dipanaskan dengan *heater* dan blower tanpa adanya kontak langsung antara biomassa dengan udara. Proses pengeringan dilakukan hingga kadar air biomassa mencapai 20%, hal ini didasarkan pada penelitian Hanchate dkk. yang menunjukkan bahwa jumlah kandungan air yang baik dalam biomassa untuk diproses adalah sekitar 20% wt% dengan meninjau aspek kualitas produk dan juga efisiensi energi [12].



Gambar 2. Diagram Balok Proses Produksi Hidrogen dari TKKS.

C. Unit Gasification

Biomassa yang telah melewati proses pengeringan dibawa oleh *screw conveyor* menuju gasifier. Proses gasifikasi ini merupakan proses utama yang digunakan dalam pabrik hidrogen ini. Proses gasifikasi menggunakan agen gasifikasi berupa uap karena telah terbukti merupakan agen gasifikasi terbaik. Tipe gasifier yang digunakan adalah *downdraft* gasifier. Menurut Sansaniwal dkk., dari tipe-tipe gasifier lain (*updraft gasifier* dan *fluidized bed gasifier*), *downdraft* gasifier merupakan yang paling sederhana dan lebih menguntungkan di aspek ekonomi [13]. Secara keseluruhan, reaksi yang terjadi pada proses gasifikasi adalah sebagai berikut.



Untuk memisahkan arang dari syngas, diperlukan alat pemisah gas dan padatan yaitu *cyclone*. *Cyclone* akan memisahkan arang dari syngas yang kemudian akan dialirkan menuju saluran pembuangan. Gas keluaran dari *cyclone* kemudian akan dialirkan menuju reaktor dimana akan memasuki proses *steam reforming*.

Untuk kondisi operasi, suhu steam yang digunakan adalah 800 °C. Walaupun semakin tinggi suhu akan meningkatkan kualitas produk, namun menggunakan suhu yang terlalu tinggi akan juga akan memakan terlalu banyak energi. Adapun tekanan yang biasa digunakan dalam proses gasifikasi adalah tekanan 1 – 10 atm [14].

D. Unit Steam Methane Reforming

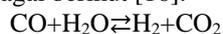
Syngas yang telah dipisahkan dari *cyclone* selanjutnya akan dibawa menggunakan blower menuju reaktor dimana akan berlangsung *steam methane reforming*. Proses *steam reforming syngas* dilakukan sesuai dengan reaksi kesetimbangan berikut [6].



Berdasarkan reaksi tersebut, steam reforming mengubah gas-gas hidrokarbon menjadi karbon monoksida dan hidrogen. Produk gas dari reaktor reformasi uap terdiri dari karbon monoksida dan hidrogen. Studi optimasi dari steam reforming menunjukkan bahwa prosesnya berlangsung pada suhu tinggi 800 °C dengan adanya katalis untuk meningkatkan proses reformasi uap katalitik [15]. Produk syngas hasil steam reforming akan dilanjutkan menuju sebuah cooler untuk didinginkan suhunya sebelum memasuki reaktor *water-gas shift*. Pendinginan dilakukan dari suhu 500°C menuju 340°C menggunakan air pendingin.

E. Unit Water-Gas Shift

Syngas yang telah didinginkan di *cooler* akan dilanjutkan menuju reaktor dimana akan berlangsung reaksi Water-Gas Shift. Reaksi dari Water-Gas Shift (WGS) adalah sebagai berikut [16].



Menurut Baloyi, konversi CO pada kesetimbangan terbatas pada suhu tinggi, karena reaksi ke depan bersifat eksotermik [17]. Oleh karena itu, untuk mengatasi keterbatasan ekuilibrium reaksi dilakukan oleh dua tahap. Langkah pertama melibatkan langkah pergeseran suhu tinggi (HTS) yang beroperasi antara 320-360 °C, yang mengurangi jumlah CO menjadi 2-3% dari jumlah awalnya, sedangkan tahap kedua adalah pergeseran suhu rendah (LTS) yang dilakukan pada kisaran suhu 190-250°C dan mengurangi jumlah kandungan CO menjadi 1-0,5% [18].

Katalis yang digunakan dalam proses ini adalah dolomit. Untuk menurunkan suhu syngas keluaran reaksi SMR, digunakan *cooler* sehingga suhu syngas nantinya akan sesuai dengan kondisi operasi yang diperlukan dalam reaksi *Water-Gas Shift* tahap 2. Suhu syngas diturunkan dari 270°C menjadi 240°C menggunakan air pendingin. Syngas hasil keluaran *water-gas shift* hanya mengandung CO₂, H₂, dan sebagian kecil CO. Dimana selanjutnya syngas ini akan dialirkan menuju kompresor dengan menggunakan blower. Kompresor akan meningkatkan tekanan syngas dari 10 atm menjadi 40 atm karena untuk tahap selanjutnya dibutuhkan tekanan tinggi.

F. Unit Pressure Swing Adsorption

Untuk memastikan produk terakhir dari proses ini merupakan hidrogen murni, CO₂ dan CO yang masih tersisa dari hasil reaksi water-gas shift perlu dipisahkan dari syngas. Untuk memisahkan CO₂ dan CO dari H₂ akan digunakan unit pressure swing adsorption (PSA). Proses PSA berlangsung pada suhu normal dan tekanan yang bervariasi. Pada proses ini, CO₂ dan CO dipisahkan dari H₂ dengan cara mengalirkan syngas kedalam bed yang berisi padatan adsorben. Hasil dari proses ini adalah gas hidrogen murni dan tail gas. Proses ini berlangsung secara siklus dan periode tiap siklusnya hanya selama beberapa menit. Syngas keluaran dari proses *water-gas shift* yang terdiri dari H₂ dan CO₂ dimasukkan kedalam kolom PSA menggunakan kompresor untuk menaikkan tekanannya.

Material yang digunakan sebagai bed adalah carbon molecular sieve. *Carbon molecular sieves* akan dengan efisien menyerap CO₂ karena memiliki area permukaan yang luas yaitu 1 km²/kg. Setelah kapasitas penyerapan terpenuhi, maka carbon molecular sieve perlu diregenerasi. Proses regenerasi dilakukan dengan cara menurunkan tekanan kolom PSA hingga tekanan sedikit diatas atmosferik sehingga terjadi desorpsi CO₂ dari carbon molecular sieve. Dari proses ini akan terproduksi tail gas yaitu CO₂ yang nantinya akan disimpan dan dimanfaatkan untuk pabrik lain. Sistem PSA pada pabrik ini akan menggunakan 2 kolom PSA dengan tekanan 40 bar untuk proses adsorpsi dan 1.3 bar untuk regenerasi, dimana akan terjadi pergantian proses antara adsorpsi dan regenerasi sehingga proses dapat terus berjalan. Gas H₂ akan keluar sebagai produk dari pabrik ini sementara CO₂ yang sudah dipisahkan kemudian akan didinginkan agar fasanya berubah dari fasa gas menjadi cair yang kemudian dialirkan sebagai bahan baku untuk pabrik lain.

IV. NERACA MASSA DAN ENERGI

Berdasarkan perhitungan neraca massa dengan asumsi pabrik beroperasi 24 jam selama 330 hari per tahun, dibutuhkan sebanyak 4940.71 kg/jam TKKS untuk menghasilkan 4500 ton H₂/tahun. Dari proses produksi hidrogen dalam pabrik ini, dihasilkan CO₂ (*by product*) sejumlah 4,503.36 kg/jam. Selain itu, berdasarkan perhitungan neraca energi pabrik ini akan membutuhkan panas sejumlah 13,790,120.31 kJ/jam. Total *power* yang dibutuhkan sejumlah 746.1894 kW/jam.

V. ANALISA EKONOMI

Analisa ekonomi dilakukan bertujuan untuk mengetahui jumlah biaya yang dibutuhkan baik untuk proses utama maupun penunjangnya. Parameter-parameter yang digunakan untuk menentukan kelayakan pabrik secara ekonomi adalah sebagai berikut:

1. Kekayaan yang dihasilkan dari pabrik (*Net Present Value*)
2. Laju Pengembalian Modal (*Internal Rate of Return*)
3. Waktu Pengembalian Modal (*Pay Out Time*)
4. Titik Impas (*Break Even Point*)

A. Asumsi-asumsi

Dalam perhitungan analisa ekonomi memerlukan asumsi –asumsi. Rincian asumsinya adalah sebagai berikut:

- a. Bunga bank yang berlaku sebesar 8% menggunakan bank BNI
- b. Tingkat inflasi sebesar 2.10% (Bank Indonesia, Maret 2021)
- c. Modal dibagi menjadi dua yaitu modal sendiri sebesar 60% dan modal pinjaman sebesar 40%
- d. Masa konstruksi selama 2 tahun, dimana tahun pertama menggunakan 60% modal sendiri dan 40% modal pinjaman. Kemudian pada tahun kedua menggunakan sisa modal sendiri dan pinjaman.
- e. Pembayaran modal pinjaman selama masa konstruksi dilakukan secara diskrit dengan cara sebagai berikut:
 1. Pada awal masa konstruksi (awal tahun ke-2) dilakukan sebesar 50% dari modal pinjaman untuk keperluan tanah dan berbagai hal uang muka.
 2. Pada akhir tahun kedua masa konstruksi (tahun ke-1) dibayarkan sisa modal pinjaman.
- f. Pengembalian pinjaman dalam waktu 10 tahun sebesar 10%
- g. Umur pabrik diperkirakan sebesar 10 tahun dengan depresiasi sebesar 10% dari FCI
- h. Kapasitas produksi tahun pertama sebesar 60%, tahun ke-2 sebesar 80%, dan tahun ke-3 sebesar 100%
- i. Pajak pendapatan sesuai Pasal 17 ayat 2 UU PPh no. 17, Tahun 2000
 1. Rp. 0 – Rp.50.000.000 = 10%

2. Rp.50.000.000 - Rp.100.000.000 = 15%
3. Lebih dari Rp.100.000.000 = 30%

B. CAPEX dan OPEX

CAPEX atau Capital Expenditure merupakan jumlah biaya yang perlu dikeluarkan oleh sebuah perusahaan untuk mendirikan suatu pabrik, terdiri dari direct cost dan indirect cost. Dimana fungsinya untuk agar pabrik dapat berdiri dan berfungsi dalam beberapa waktu sebelum mendapatkan laba. CAPEX dapat disamakan dengan FCI atau fixed capital cost. CAPEX dari pabrik ini mencapai Rp.118,122,699,029.90. OPEX atau Operating Expenditure merupakan pengeluaran yang dilakukan oleh perusahaan untuk memenuhi kebutuhan operasional agar dapat menghasilkan suatu produk dalam jangka waktu tertentu. OPEX bisa disamakan dengan working capital investment. Dalam pabrik ini, yang masuk dalam perhitungan OPEX adalah biaya yang dibutuhkan untuk memproduksi hydrogen dan nantinya OPEX akan digunakan untuk menentukan HPP (Harga Pokok Produksi) atau juga dikenal dengan TPC (Total Production Cost). Besarnya OPEX dalam pabrik ini mencapai Rp.109,332,413,887.21.

C. Parameter Kelayakan Pendirian Pabrik

1. Kekayaan yang dihasilkan dari pabrik (*Net Present Value*)
Net present value atau NPV adalah perbedaan antara nilai sekarang dari arus kas yang masuk dan nilai sekarang dari arus kas keluar pada sebuah waktu periode. Berdasarkan perhitungan, didapatkan nilai NPV sebesar Rp 539,001,002,607.985. Nilai NPV lebih dari 0 menandakan bahwa proyeksi pendapatan yang dihasilkan atau investasi melebihi dari proyeksi biaya yang dikeluarkan. Sehingga perusahaan layak untuk didirikan.
2. Laju Pengembalian Modal (*Internal Rate of Return*)
Internal rate of return (IRR) adalah semua pendapatan atau modal yang didapat yang akan menutup semua pengeluaran. Umumnya, IRR digunakan oleh perusahaan untuk menganalisis dan memutuskan proyek modal. Dari hasil perhitungan didapatkan harga *i* (*discounted factor*) = 18.61%. Harga *i* yang diperoleh lebih besar dari harga WACC yaitu 12.20%. Maka, dari perhitungan IRR menunjukkan bahwa pabrik ini layak untuk didirikan.
3. Waktu Pengembalian Modal (*Pay Out Time*)
Pay out time atau POT merupakan waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan modal suatu pabrik. Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa waktu pengembalian modal minimum adalah 3 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa pabrik ini

layak untuk didirikan karena POT yang didapatkan lebih kecil dari perkiraan usia pabrik.

4. Cashflow

Berikut adalah tabel yang menunjukkan proyeksi arus kas pabrik hidrogen. Proyeksi arus kas ini sudah dilakukan perhitungan pada Present Value-nya menggunakan discount factor berupa WACC sebesar 12.20%.

TABLE 8.
PROYEKSI I PABRIK HIDROGEN

Tahun ke-n	Net Cash Flow	Cumulative Cash Flow
1	Rp54,857,821,890	Rp54,857,821,890
2	Rp79,182,378,877	Rp134,040,200,766
3	Rp103,506,935,864	Rp237,547,136,630
4	Rp105,405,150,780	Rp342,952,287,410
5	Rp107,303,365,696	Rp450,255,653,106
6	Rp109,201,580,612	Rp559,457,233,718
7	Rp111,099,795,528	Rp670,557,029,247
8	Rp112,998,010,445	Rp783,555,039,692
9	Rp114,896,225,361	Rp898,451,265,052
10	Rp116,794,440,277	Rp1,015,245,705,330

5. Titik Impas (Break Even Point)

Break Even Point atau BEP digunakan untuk mengetahui kapasitas produksi dimana total biaya produksi sama dengan hasil penjualan. Berdasarkan perhitungan, BEP dari pabrik ini adalah 26.27%.

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang telah dipaparkan pada bab-bab sebelumnya, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- Perencanaan operasi: 24 jam/hari, 330 hari/tahun (kontinyu)
- Proses terpilih : Gasifikasi Uap
- Kapasitas produksi H₂ : 4500 ton/tahun
- Bahan baku TKKS : 4940.71 ton/tahun
- Lokasi pabrik : Kawasan Industri Dumai, Kota Dumai, Provinsi Riau
- Umur pabrik : 10 tahun
- Masa konstruksi : 3 tahun
- Analisis ekonomi :
 - IRR : 18,61%
 - POT : 3 tahun
 - NPV : Rp 539.001.002.607,985
 - BEP : 26,27%

Berdasarkan hasil analisis ekonomi tersebut, terlihat bahwa IRR sebesar 18,61% berada di atas bunga pinjaman bank sebesar 8%. Jangka waktu pengembalian modal (POT) yaitu pada tahun ke-3 lebih kecil dari waktu pengembalian modal yang ditetapkan pemberi pinjaman yaitu 10 tahun. Kemudian perhitungan NPV yang menunjukkan NPV sebesar Rp.539,001,002,607,985 yang menunjukkan NPV > 0. Berdasarkan analisa ini, pabrik

Hidrogen dari Tanda Kosong Kelapa Sawit ini layak untuk didirikan.

VII. DAFTAR PUSTAKA

- IRENA, "The Post-Covid Recovery: an Agenda for Resilience, Development, and Equality," Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020.
- IESR, Strategic Partnership for Green and Inclusive Energy, Jakarta: KESDM, 2017.
- D. Das, and T. N. Veziroglu, "Advances in Biological Hydrogen Production Processes," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 33, pp. 6046-6057, 2021.
- S. Cloete, et al., "Blue Hydrogen and Industrial Base Products: The Future of Fossil Fuel Exporters in A Net-Zero World," Econstor Journal, vol. 4, pp. 1-23, 2021.
- P., Nikolaidis, A. Poullikas, "A Comparative Review of Hydrogen Production Processes," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 67, pp. 597-611, 2017.
- T. Lepage, et al., "Biomass-to-hydrogen: A Review of Main Routes Production, Processes Evaluation, and Techno-economical Assessment," Biomass and Bioenergy, vol. 144, pp. 1-16, 2021.
- I. Kresnawaty, et al. "Konversi Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Menjadi Arang Hayati dan Asap Cair," Jurnal Penelitian Pascapanen Pertanian, vol. 14, no. 3, pp. 171-179, 2017.
- A. Wijono, "PLTU Biomasa Tandan Kosong Kelapa Sawit Studi Kelayakan dan Dampak Lingkungan," Simposium Nasional RAPI XIII, 2014.
- Direktorat Jenderal Perkebunan, "Produksi Tanaman Perkebunan (Ribu Ton) 2018-2020," 2020. Diakses 25 Oktober 2021. <https://www.bps.go.id/indicator/54/132/1/produksi-tanaman-perkebunan.html>
- A. Isao, "Physical and Chemical Properties of Hydrogen. Journal of Energy Carriers and Conversion Systems," vol. 1, no. 1, pp. 1-3, 2001.
- A. C. C. Chang, et al., "Biomass Gasification for Hydrogen Production," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 36, pp. 14252-14260, 2011.
- Hanchate et al., "Biomass Gasification Using Dual Fluidized Bed Gasification Systems: A Review," Journal of Cleaner Production, 2020.
- S. K. Sansaniwal, M. A. Rosen, S. K. Tyagi, "Global Challenges in the Sustainable Development of Biomass Gasification: An Overview," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 80, pp. 23-43, 2017.
- Li et al., "Recent Advances in Hydrogen Production by Thermo-Catalytic Conversion of Biomass," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 44, pp. 14266-14278, 2019.
- M. M. Jaffar, et al., "Synthetic Natural Gas Production from the Three Stage (i) Pyrolysis (ii) Catalytic Steam Reforming (iii) Catalytic Hydrogenation of Waste Biomass," Fuel Processing Technology Journal, vol. 208, no. 1, pp. 1-16, 2020.
- L. N. Baloyi, "The Production of Hydrogen from the Water Gas Shift Reaction Through the Use of a Palladium-Silver Membrane Reactor," Thesis, USA: Cape Peninsula University of Technology, 2016.
- J. Einvall, "High Temperature Water-Gas Shift Step in The Production of Clean Hydrogen Rich Synthesis Gas from Gasified Biomass," Biomass and Bioenergy Journal, vol. 35, no. 1, pp. 123-131, 2011.