

Pra Desain Pabrik Biodiesel *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) dari *Crude Palm Oil* (CPO) dan Metanol dengan Metode Ester-Transesterifikasi dengan Kapasitas 460.000 kL/Tahun

Michellia Pramoryza, Cheryn Ayudya Ardhaneswara, Raden Darmawan, dan Fahmi
Departemen Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: rdarmawan@chem-eng.its.ac.id

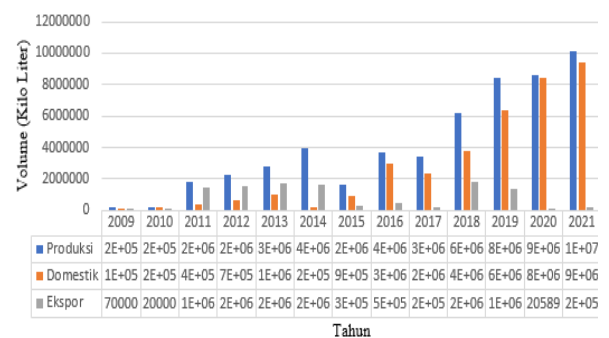
Abstrak—Pra Desain Pabrik Biodiesel dari Crude Palm Oil ini menggunakan proses esterifikasi dan transesterifikasi yang beroperasi secara kontinu yaitu 24 jam per hari selama 330 hari dalam setahun untuk memproduksi 460.000 kL biodiesel dalam setahun. Pabrik ini direncanakan akan dibangun pada tahun 2025 di Kawasan Industri Tanjung Buton, Kabupaten Siak, Provinsi Riau. Esterifikasi dan transesterifikasi akan dilakukan pada suhu 60°C dan pada tekanan 1 atm menggunakan reaktor alir tangki berpengaduk dengan tingkat konversi reaksi 96% dan 98,5%. Berdasarkan analisis ekonomi pabrik ini, disimpulkan bahwa didapatkan Capital Expenditure sebesar Rp 759.071.381.776, Operational Expenditure sebesar Rp 6.640.239.068.924, Internal Rate of Return sebesar 96,37% dengan bunga pinjaman 8,62% per tahun. Pay Out Time selama 1 tahun 3 bulan. Break Even Point sebesar 14,17%. Dari data analisis kelayakan di atas disimpulkan bahwa pabrik ini menguntungkan dan layak untuk didirikan.

Kata kunci—Biodiesel, Crude Palm Oil, Ekonomi, Esterifikasi, Transesterifikasi.

I. PENDAHULUAN

INDONESIA memiliki sumber daya alam yang sangat melimpah dan tercermin dalam perkembangan industri nasional dan internasional. Salah satu sumber daya alam utama yang dimiliki adalah minyak bumi. Minyak bumi adalah sumber energi yang tidak dapat diperbaharui, membutuhkan waktu jutaan bahkan ratusan juta tahun untuk mengubah bahan mentahnya menjadi minyak bumi. Namun, meningkatnya konsumsi minyak bumi telah mengurangi ketersediaan minyak bumi yang tersedia. Bahan bakar diesel adalah salah satu produk utama yang dihasilkan dari minyak bumi dan paling sering digunakan untuk kendaraan, peralatan berat, generator listrik, dan mesin pertanian. Semakin meningkatnya kebutuhan akan minyak bumi, maka harus dicari alternatif sumber energi lain sebagai antisipasi.

Fatty Acid Methyl Ester (FAME) atau biodiesel merupakan bahan bakar alternatif yang sangat potensial yang dapat dikembangkan. Biodiesel berasal dari minyak nabati terbarukan dan dapat diproduksi secara berkala. Biasanya, biodiesel disintesis dari ester asam lemak dengan rantai karbon antara C₁₂ - C₂₂. Penggunaan biodiesel menawarkan berbagai keunggulan, seperti ramah lingkungan karena kandungan sulfurnya yang lebih rendah dibandingkan dengan diesel minyak bumi, *biodegradable*, tidak beracun, mengeluarkan lebih sedikit polutan hidrokarbon yang tidak terbakar dan lebih sedikit jelaga dari pembakaran, memiliki jejak karbon yang lebih rendah, dan memiliki kandungan energi yang hampir mirip dengan solar minyak bumi (80%



Gambar 1. Realisasi implementasi biodiesel.

dari kandungan diesel minyak bumi). Selain itu, biodiesel memiliki jumlah *cetane* yang lebih tinggi yaitu 51-62 dibandingkan dengan diesel minyak bumi (44-49), dan mudah disimpan karena titik nyalanya yang rendah. Pengembangan biodiesel Indonesia diproyeksikan akan meningkat di masa mendatang, seiring dengan meningkatnya permintaan solar minyak bumi. Mengikuti target B-30 dari 2020 hingga 2025, proyeksi permintaan solar minyak bumi Indonesia akan berlipat ganda pada 2025, dari 39,66 juta kL pada 2016 menjadi 79,28 juta kL. Dari sisi permintaan, laju pertumbuhan permintaan solar minyak bumi diperkirakan akan meningkat rata-rata 8% per tahun. Untuk memenuhi peningkatan tersebut, permintaan biodiesel dalam negeri juga ditargetkan tumbuh lebih cepat, dengan target tahunan rata-rata 14%.

Indonesia memproyeksikan kebutuhan produksi *biofuel* yang besar untuk mengurangi impor Bahan Bakar Minyak (BBM) pada saat konsumsi dalam negeri meningkat hingga tahun 2040. Dewan Energi Nasional menghitung bahwa produksi *biofuel* sebesar 159 ribu barel per hari (bph) diperlukan selama tahun 2020-2025, 210 ribu bph diperlukan pada periode tahun 2025-2030, dan produksi yang diperlukan meningkat menjadi 238 ribu bph pada periode tahun 2030-2040. Proyeksi ini akan digunakan sebagai dasar untuk menetapkan target produksi *biofuel* dalam rancangan strategis industri nasional. Industri biodiesel terus berkembang dari tahun ke tahun, baik dari segi jumlah maupun kapasitas produksinya. Produksi biodiesel digunakan sebagai campuran solar untuk memenuhi kebutuhan sumber energi dalam negeri dan untuk tujuan ekspor. Gambar 1 menunjukkan realisasi implementasi biodiesel.

Pada tahun 2021, Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral menetapkan alokasi bahan bakar

Tabel 1.
Data spesifikasi bahan baku digunakan

Bahan baku	Kandungan	Kadar
Crude Palm Oil	Trigliserida (TGA)	92,62%
	Free Fatty Acid	4%
	Fosfolipid	0,07%
	Karoten	0,003%
	Tokoferol	0,28%
	Sumber : PTPN VIII	
Bleaching Earth	Bentuk : serbuk putih (1,5% kebutuhan CPO)	
Metanol	CH ₃ OH (larutan)	Kemurnian 97%
Katalis	H ₂ SO ₄ (larutan)	Kemurnian 98%
	NaOH (padatan)	Bentuk : padatan Warna : putih
Bahan Baku	H ₃ PO ₄ (larutan)	Kemurnian 85%
Penunjang	CaO (padatan)	Bentuk : bubuk putih Ukuran : 80 – 625 mesh

Tabel 2.

Data pertumbuhan konsumsi, produksi, impor, dan ekspor biodiesel

Tahun	Konsumsi (kL)	Produksi (kL)	Impor (kL)	Ekspor (kL)
2017	2.370.000	3.410.000	0	187.000
2018	3.750.066	6.167.387	0	1.802.926
2019	6.396.397	8.399.184	0	1.319.428
2020	8.460.983	8.634.867	0	20.589
2021	9.413.033	10.150.000	0	180.750

Tabel 3.

Persentase pertumbuhan konsumsi, produksi, impor, dan ekspor biodiesel

Tahun	Konsumsi (%)	Produksi (%)	Impor (%)	Ekspor (%)
Rata-rata	43,082	34,351	0	379,193

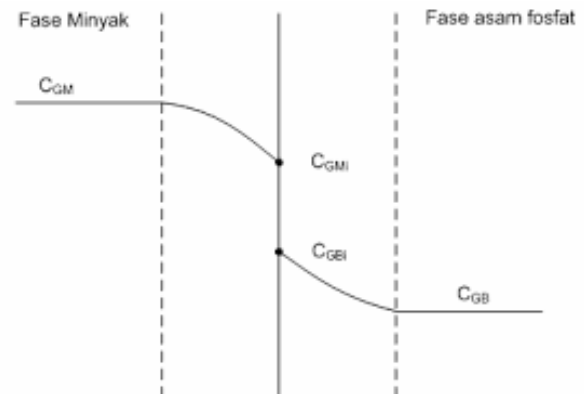
nabati berbasis biodiesel sebanyak 9,2 juta kL untuk dicampurkan dengan BBM jenis solar B30. Jumlah tersebut turun dari perkiraan awal sebesar 9,6 juta kL karena pandemi COVID-19 menyebabkan beberapa Badan Usaha BBN gagal menyediakan biodiesel. Produksi *Crude Palm Oil* (CPO) Indonesia pada Januari 2021 turun 7,1% dibandingkan bulan sebelumnya, di mana faktor banjir di beberapa sentra sawit menjadi salah satu penyebabnya. Konsumsi lokal CPO naik sedikit, sedangkan konsumsi oleokimia dan biodiesel turun. Total ekspor CPO Indonesia pada Januari 2021 sebanyak 2,86 juta ton, tetapi menurun 18,5% dibandingkan bulan sebelumnya karena stok di negara-negara importir masih tinggi. Meskipun alokasi biodiesel tahun 2021 lebih rendah, permintaan diperkirakan meningkat dengan rata-rata pertumbuhan 2,9% per tahun antara 2020-2025 dan konsumsi biodiesel diproyeksikan meningkat 7% selama satu dekade mendatang. Ada 20 Badan Usaha BBM dan Badan Usaha BBN yang telah ditetapkan sebagai pemasok biodiesel untuk pendistribusian pada tahun 2021. Selain itu, industri biodiesel telah berkembang dan memberikan semangat baru bagi pengembangan bahan bakar nabati berbasis potensi dalam negeri berkat dukungan dari pemerintah dan investor.

Pada Januari 2021, produksi Minyak Sawit Mentah Indonesia sebesar 3,76 juta ton, lebih rendah 7,1% dari bulan sebelumnya. Produksi tersebut terdiri dari 3,42 juta ton CPO, 334 ribu ton *Crude Palm Kernel Oil* (CPKO), dan 5 ribu ton impor. Penurunan ini disebabkan pola musiman dan banjir di sentra-sentra kelapa sawit yang menghambat proses panen. Namun, konsumsi lokal CPO sedikit meningkat menjadi 1,52 juta ton, terutama dari produk makanan, sementara konsumsi oleokimia dan biodiesel menurun. Ekspor CPO Indonesia sebesar 2,86 juta ton, lebih rendah 18,5% dibandingkan bulan

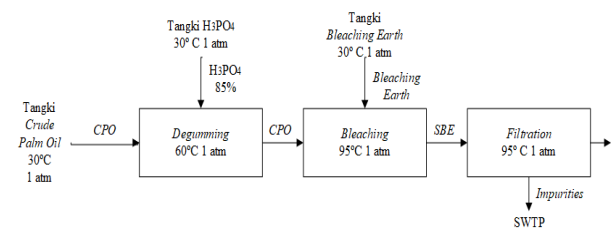
Tabel 4.

Estimasi kapasitas biodiesel tahun 2025

Tahun	Konsumsi (kL/Tahun)	Produksi (kL/Tahun)	Impor (kL/Tahun)	Ekspor (kL/Tahun)
2025	67.355.374	21.039.357	0	150



Gambar 2. Teori antar fase dua film..



Gambar 3. Diagram balok tahap *pre-treatment*.

sebelumnya, dengan total nilai ekspor hampir US\$ 2,6 miliar pada Januari 2021. Permintaan biodiesel diperkirakan akan meningkat di masa depan, dan pemerintah telah menunjuk 20 entitas sebagai pemasok biodiesel untuk tahun 2021. Perkembangan industri biodiesel di Indonesia disebabkan oleh penelitian yang sedang berlangsung dan dukungan pemerintah, yang mengarah pada munculnya industri biodiesel komersial yang mendorong pengembangan *biofuel* dalam negeri

II. DATA DASAR PERANCANGAN

A. Ketersediaan dan Kualitas Bahan Baku

Pada Tabel 1 disajikan data spesifikasi bahan baku yang digunakan.

B. Penentuan Kapasitas Produksi

Penentuan kapasitas produksi pabrik biodiesel didasarkan pada perhitungan peluang produksi yang ada. Peluang tersebut didasarkan pada nilai ekspor, nilai impor, dan konsumsi produk. Dalam hal ini, harga bahan baku diasumsikan tetap konstan, dan harga jual biodiesel juga diasumsikan konstan sepanjang masa pakai pabrik. Pabrik ini direncanakan beroperasi dengan kapasitas penuh pada 2025. Untuk menentukan kapasitas produksi, data pertumbuhan produksi, konsumsi, ekspor, dan impor dari 2017 hingga 2021 harus diketahui yang tertera pada Tabel 2. Berdasarkan Tabel 3, dapat diperkirakan kapasitas produksi biodiesel pada tahun 2025 menggunakan persamaan *discounted* berikut:

$$P_{2025} = P_{2021} \times (1 + i)^n$$

keterangan :

P = kapasitas produksi

n = selisih tahun = 2025 - 2021 = 4

Tabel 5.
Analytical hierarchy process lokasi pabrik

No.	Paramater		AHP		Pilihan Lokasi Pabrik		
	Keterangan	Bobot	Keterangan	Bobot	Riau	Kalbar Nilai	Kalteng
1	Bahan baku	0,2332	Bahan baku yang tersedia	0,5	0,5831	0,3499	0,2332
			Jarak bahan baku dengan pabrik	0,5	0,1166	0,1166	0,1166
2	Utilitas	0,2012	Sumber energi listrik	0,5	0,4024	0,3018	0,2012
			Sumber air	0,5	0,3018	0,4024	0,1006
3	Aksesabilitas dan transportasi	0,1568	Total panjang jalan raya	0,49	0,3076	0,2307	0,2307
			Airport	0,312	0,0978	0,1467	0,1956
			Port	0,198	0,0620	0,0930	0,1549
4	Tenaga kerja	0,0955	Pekerja. Pengangguran, persen TPT	0,75	0,2864	0,2148	0,1432
			Upah minimum regional	0,25	0,0716	0,0955	0,0716
5	Lokasi pemasaran	0,0924	Jarak pasar dengan pabrik	0,33	0,0616	0,0616	0,0616
			Potensi Pasar	0,67	0,0308	0,0308	0,0308
6	Tata ruang & wilayah	0,0584	Perencanaan pembangunan struktur	0,67	0,1948	0,1558	0,0390
			Potensi ekspansi lahan	0,33	0,0584	0,0974	0,0779
7	Iklim dan topografi	0,053	Kelembapan udara	0,75	0,1204	0,1204	0,1204
			Suhu udara	0,25	0,0401	0,0669	0,0669
8	Hukum & peraturan	0,0324	Peraturan pendukung pembangunan	0,50	0,0809	0,0486	0,0324
			Perizinan pembangunan	0,5	0,0809	0,0486	0,0162
9	Kompetitor	0,0307	Kapasitas produksi kompetitor	0,75	0,1152	0,0922	0,0691
			Jarak kompetitor dengan pabrik	0,25	0,0154	0,0384	0,0307
10	Lingkungan	0,0260	Teknik pengelolaan lingkungan	1,00	0,1301	0,1301	0,1301
11	Sosial budaya	0,0198	Company Social Responsibility	1,00	0,0991	0,0991	0,0991
Total		1,0000			3,2572	2,9412	2,2219

$$\begin{aligned}
 \text{Kebutuhan biodiesel} &= (\text{Ekspor} + \text{Konsumsi}) \\
 &\quad - (\text{Impor} + \text{Produksi}) \\
 &= (150 + 67.355.374) - (0 + 21.039.357) \\
 &= 46.316.167 \text{ kiloliter/tahun.}
 \end{aligned}$$

Perlu mempertimbangkan aspek kompetitif, yaitu industri biodiesel lain yang beroperasi pada tahun 2021 dengan kapasitas produksi yang bervariasi. Penentuan kapasitas pabrik biodiesel didasarkan pada cadangan bahan baku yang tersedia di lokasi pabrik dan mempertimbangkan produksi biodiesel oleh pesaing. Dengan pertimbangan tersebut, kapasitas produksi pabrik ditetapkan sebesar 460.000 kL/tahun, berkontribusi sebesar 1% terhadap kapasitas produksi nasional. Estimasi kapasitas biodiesel tahun 2025 tertera pada Tabel 4.

C. Lokasi dan Ketersediaan Utilitas

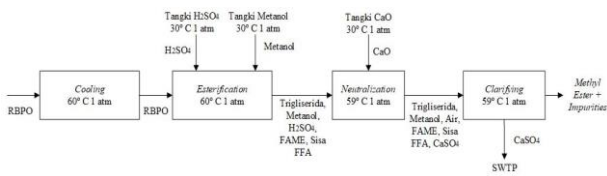
Memilih lokasi pabrik merupakan bagian krusial dari perencanaan pembangunan pabrik karena lokasi geografisnya memiliki pengaruh signifikan terhadap keberhasilan dan kelangsungan hidup pabrik tersebut. Hal ini karena lokasi memengaruhi biaya tetap dan biaya variabel dalam jangka menengah dan panjang. Lokasi pabrik yang ideal harus memberikan keuntungan jangka panjang untuk perusahaan dan masyarakat sekitar serta memungkinkan untuk memperluas atau meningkatkan kapasitas produksi. Dalam pemilihan lokasi pabrik, beberapa faktor telah dipertimbangkan, termasuk ketersediaan bahan baku, sumber energi listrik dan air, tenaga kerja, aksesibilitas dan fasilitas

transportasi, pasar, hukum dan peraturan, iklim dan topografi, serta rencana ekspansi. Dari berbagai faktor tersebut, ketersediaan bahan baku sawit menjadi faktor utama dalam menentukan lokasi pabrik karena bahan baku terbanyak tersedia di Provinsi Riau dan kemudahan dalam transportasi bahan baku dan produk akhir karena pasar untuk kedua produk tersebut sudah tersedia secara lokal. Berdasarkan perhitungan menggunakan *Analytical Hierarchy Process* yang tertera pada Tabel 5 didapatkan bobot tertinggi yaitu pada Provinsi Riau. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa pabrik biodiesel dari CPO akan dibangun di Kabupaten Siak, Provinsi Riau, khususnya di Kawasan Industri Tanjung Buton (KITB).

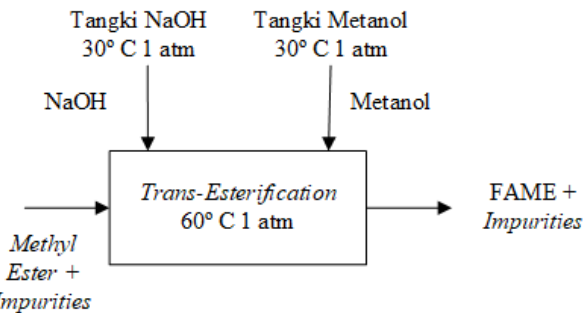
III. URAIAN PROSES

A. Tahap Pre-Treatment

Crude Palm Oil (CPO) adalah minyak sawit mentah yang dihasilkan oleh perkebunan kelapa sawit dan diekstraksi dari ampas buah kelapa sawit. CPO mengandung kotoran, polutan, lateks, dan rasa yang tidak diinginkan yang tidak larut, tersuspensi koloid dalam minyak, atau larut dalam minyak. Sebelum digunakan sebagai bahan baku industri, CPO perlu dimurnikan dalam tahap *pre-treatment* untuk menjadi *Refined Bleached Crude Palm Oil* (RBPO). Proses pemurnian bertujuan untuk menghilangkan komponen-komponen kecil yang dapat mempengaruhi kualitas dan stabilitas minyak sehingga memenuhi spesifikasi proses yang diinginkan. Nama lain untuk pengotor adalah gum atau lateks, yang terdiri dari fosfolipid, fosfatides, protein, hidrokarbon, karbohidrat, air, logam berat, resin, *Free Fatty*



Gambar 4. Diagram balok tahap esterifikasi.

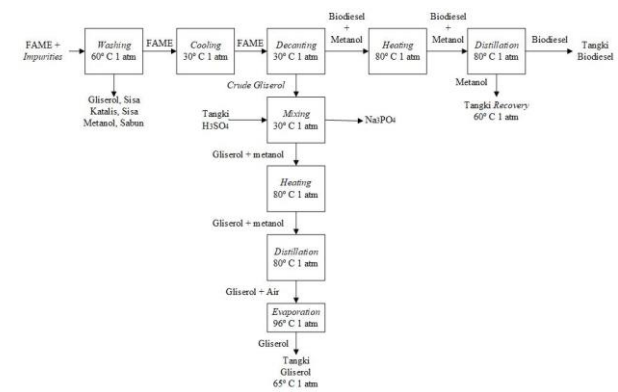


Gambar 5. Diagram balok tahap transesterifikasi.

Acid (FFA), tokoferol, pigmen, dan senyawa lainnya [1]. Kotoran dalam kandungan minyak dapat mengurangi kualitas dan mempengaruhi penampilan fisik, rasa, aroma, dan umur simpan minyak, sehingga perlu dihilangkan melalui proses pemisahan fisik dan kimia [2].

Pre-treatment melibatkan tiga tahap: *De-Gumming*, *Bleaching*, dan Filtrasi. *De-Gumming* adalah proses pemurnian yang bertujuan untuk memisahkan gum, lateks, dan lendir (fosfolipid, protein, residu, dan karbohidrat) dalam minyak tanpa mengurangi jumlah asam lemak bebas dalam minyak. Prinsip kerja *De-Gumming* adalah memisahkan senyawa fosfatida ke dalam fase air sehingga dapat dipisahkan dengan presipitasi, filtrasi, atau sentrifugasi. Proses *De-Gumming* yang umum digunakan adalah *Acid De-Gumming*, di mana efek asamnya adalah membentuk benjolan yang membuatnya lebih mudah untuk mengendapkan kotoran. Proses pemisahan atau *De-Gumming* dibagi menjadi *Water De-Gumming*, *Dry De-Gumming*, *Enzymatic De-Gumming*, *Membrane De-Gumming*, dan *Acid De-Gumming*. Dalam proses *pre-treatment* ini, *De-Gumming* asam digunakan, yang menggunakan asam fosfat. Tujuan dari *De-Gumming* asam CPO dengan asam fosfat adalah untuk mengikat kotoran, terutama senyawa fosfolipid/fosfatida dalam CPO, yang merupakan sumber rasa dan warna yang tidak diinginkan dan menyebabkan umur simpan minyak memendek. CPO mengandung fosfatida *non-hydratable* yang mempengaruhi kualitas minyak, sehingga fosfatida yang tidak dapat dihidrasi ini perlu diubah menjadi fosfat yang dapat dihidrasi dengan menambahkan asam fosfat. Asam fosfat digunakan karena merupakan proses yang mudah, harga bahannya murah, dan dapat merejeksi *gum* tinggi dan secara efektif menghilangkan *gum* yang tidak dapat dihidrasi selain *gum* yang dapat dihidrasi [3]. Selain itu, asam fosfat, sebagai agen *De-Gumming*, dapat mengurangi nilai peroksida dari minyak yang diputihkan dan meningkatkan stabilitas warna. Semakin tinggi konsentrasi asam fosfat yang digunakan, semakin tinggi nilai peroksida dari minyak yang diputihkan akan meningkat. Proses *De-Gumming* menggunakan katalis berupa 85% asam fosfat dengan waktu 30 menit.

Kandungan terbesar dalam *gum* CPO yang perlu dipisahkan adalah fosfatida, yang terdiri dari dua jenis:



Gambar 6. Diagram balok tahap pemurnian.

fosfatida yang dapat dihidrasi dan tidak dapat dihidrasi. Fosfatida yang dapat dihidrasi mudah dipisahkan dengan menambahkan air pada suhu rendah sekitar 40°C. Menambahkan air dapat menyebabkan fosfminyakpid kehilangan sifat lipofiliknya dan mengubah sifatnya menjadi lipofobia, membuatnya mudah dipisahkan dari minyak [4]. Teori antar fase dua film tertera pada Gambar 2.

Acid De-Gumming dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti konsentrasi asam, suhu proses, dan waktu pengadukan. Konsentrasi asam fosfat yang lebih tinggi dapat menyebabkan pengurangan konsentrasi *gum* yang tersisa dalam minyak. Ini karena asam fosfat bereaksi dengan *gum* dan memisahkannya dari minyak. Namun, penggunaan asam fosfat yang berlebihan dapat merusak minyak, karena asam fosfat yang tidak bereaksi dapat menyebabkan peningkatan nilai FFA minyak. Oleh karena itu, penggunaan asam fosfat dalam proses *De-Gumming* harus dipertimbangkan dengan cermat. Meningkatkan suhu menghasilkan lebih banyak *gum* yang diekstraksi dari minyak, yang pada gilirannya mengurangi konsentrasi *gum* yang tersisa dalam minyak. Selain itu, suhu yang lebih tinggi meningkatkan energi partikel CPO, yang mengarah ke mobilitas yang lebih besar. Pengadukan dimaksudkan untuk mencapai distribusi komponen yang lebih merata di dalam tangki, menghasilkan proses *De-Gumming* yang lebih menyeluruh. Transfer massa memainkan peran penting dalam kualitas produk yang dihasilkan, karena kecepatan pengadukan mempengaruhi produk yang dihasilkan. Meningkatkan kecepatan pengadukan menyebabkan pengurangan konsentrasi *gum* yang tersisa dalam minyak. Ini karena pengadukan meningkatkan turbulensi fluida, menghasilkan luas permukaan yang lebih besar untuk perpindahan massa dan pengurangan ketebalan lapisan film. Ini mengurangi resistensi eksternal, menghasilkan peningkatan laju transfer massa. Meningkatkan waktu pengadukan dapat menyebabkan peningkatan efisiensi pengurangan jumlah fosfatida, sebagai akibat dari peningkatan waktu reaksi.

Crude Palm Oil (CPO) sebagai feed bersuhu 30°C berada pada tangki penampung (F-111) selanjutnya CPO dipompa dengan menggunakan pompa (L-112) menuju *Heater* (E-113). *Heater* (E-113) digunakan untuk memanaskan *Crude Palm Oil* (CPO) hingga mencapai suhu 60°C. Hal ini bertujuan agar CPO mencapai kondisi operasi optimum pada proses selanjutnya (*De-Gumming*). Kemudian CPO yang dipompa menggunakan pompa (L-112) menuju *Heater* (E-113) akan dialirkan menuju tangki *Mixing Degumming* (R-110). Proses *Degumming* menggunakan bantuan H₃PO₄

Tabel 6.
Analisa ekonomi pabrik biodiesel dari CPO

Capital Expenditures (CAPEX)		
Direct Cost	Rp	589.838.644.498
Indirect Cost	Rp	179.232.737.278
Fixed Capital Investment (FCI)	Rp	769.071.381.776
Operational Expenditures (OPEX)		
Direct Production Cost (DPC)	Rp	6.054.384.628.825
Fixed Charge (FC)	Rp	87.674.137.522
Plant Overhead Cost (POC)	Rp	27.862.241.909
Manufacturing Cost (MC)	Rp	6.169.921.008.256
General Expenses (GE)	Rp	5.969.574.922.963

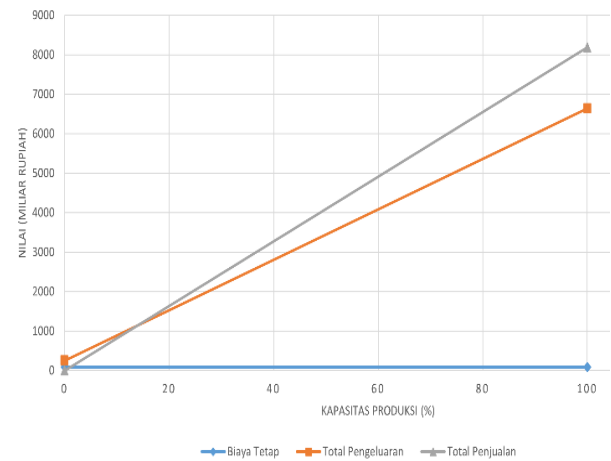
Tabel 7.
Faktor kelayakan pendirian pabrik

Net Present Value (NPV)	Rp 8.058.932.250.084,9
Internal Rate of Return (IRR)	93,67%
Pay Out Time (POT)	1 tahun 3 bulan
Break Even Point (BEP)	14,17%

dengan konsentrasi 85% yang dipompa dari tangki penampung H_3PO_4 (F-114) oleh pompa (L-115) ke Tangki *Mixing Degumming* (R-110).

Tangki *Mixing Degumming* (R-110) berfungsi untuk melakukan reaksi antara asam fosfat dan CPO secara kontinyu, sehingga juga dapat disebut sebagai *Mixed Flow Reactor*. Adanya agitator pada tangki tersebut memungkinkan pencampuran kedua larutan menjadi lebih homogen dan dapat meningkatkan kecepatan reaksi. Proses *Degumming* menghasilkan CPO dan juga *impurities* yang sesuai ketentuan kemudian dipompa menggunakan pompa (L-122) menuju *Heater* (E-123) untuk menaikkan suhu CPO hingga $95^\circ C$ yang selanjutnya akan melalui proses *Bleaching* di tangki pengaduk *Bleaching* (M-120) Untuk memutihkan CPO dan menjaga stabilitas produk akhir serta menyerap *impurities*, proses *Bleaching* dilakukan dengan tujuan menyerap pigmen warna, suspensi koloid, gum-gum yang terendapkan oleh asam fosfat selama proses *Degumming*, *moisture*, bahan-bahan oksidatif, dan *trace metals* melalui prinsip adsorpsi menggunakan bahan pengikat pewarna (*bleaching agent*) [1]. Pigmen yang biasa ditemukan dalam minyak mentah adalah *carotenoid* yang berwarna merah atau kuning, *chlorophyllida* dan *phaeophytin* yang berwarna hijau. *Bleaching earth* dan arang (karbon) merupakan bahan pengikat pewarna yang paling banyak digunakan dalam proses *bleaching* minyak dan lemak. Arang sangat efektif dalam menghilangkan pigmen warna merah, hijau, dan biru, namun harganya cukup mahal sehingga biasanya dicampur dengan *bleaching earth* dalam jumlah tertentu sesuai dengan jenis minyak mentah yang digunakan. CPO dipanaskan hingga mencapai suhu $95^\circ C$, yang merupakan kondisi operasional tangki pengaduk *Bleaching* (M-120). Dalam praktiknya di industri, proses *Bleaching* minyak sawit menggunakan *bleaching earth* dilakukan di bawah tekanan vakum kurang dari 50 mbar untuk mengurangi kadar zat oksidator dan air. Suhu yang digunakan berkisar antara $90-130^\circ C$ untuk menurunkan viskositas dan meningkatkan kecepatan adsorpsi pada CPO selama 15-30 menit. Jumlah *bleaching earth* yang digunakan dalam proses ini sekitar 6-12 kg/ton minyak sawit atau sekitar 0,6-1,2% [5].

Bleaching earth sebagai absorben dalam pemurnian CPO dari tangki penyimpanan (F-121) masuk menuju tangki pengaduk *Bleaching*. Output dari *Bleaching Mixing Tank* (M-120) akan menghasilkan *Spent Bleaching Earth* (SBE) yang



Gambar 7. Analisis *break even point*.

merupakan campuran dari *Bleaching earth* dan kotoran. SBE tergolong limbah padat yang masih mengandung 20-30% minyak dan tergolong limbah B3 karena sifatnya yang mudah terbakar. Proses *Bleaching* bertujuan untuk mengikat uap air dan kotoran yang masih terkandung dalam CPO untuk menghasilkan CPO yang jauh lebih murni dari kontaminannya. Proses *Bleaching* dalam penyulingan CPO merupakan tahapan yang paling mahal, karena sebagian besar biaya bahan kimia yang digunakan dalam pemilihan dan jumlah bahan pemutih. Selain itu, ada kehilangan minyak dalam proses ini, yaitu sekitar 20-30% minyak ada di SBE.

Setelah itu, campuran SBE dan CPO dari tangki *Bleaching* akan dipindahkan menggunakan pompa screw (L-130) ke bagian *Filter Press* (H-131). Di dalam *Filter Press*, limbah akan disaring dan kemudian dibuang ke *Solid Waste Treatment Plant* (SWTP). Suhu operasi pada tahap ini adalah sebesar $92^\circ C$. CPO yang telah melalui proses *Degumming* dan *Bleaching* akan disebut sebagai Tahap selanjutnya, RBPO akan dialirkan ke Reaktor Esterifikasi (R-210). Pada Gambar 3 disajikan diagram balok tahapan *pre-treatment*.

B. Tahap Esterifikasi

RBPO yang telah melalui proses pendinginan dengan menggunakan *Cooler* (E-213) akan dipompa ke Reaktor Esterifikasi (R-210) melalui pompa (L-212). Proses Esterifikasi dilakukan pada suhu $60^\circ C$ dan tekanan 1 atm dengan tujuan mengubah senyawa FFA dalam CPO menjadi Metil Ester. Metanol dan katalis asam sulfat digunakan sebagai reaktan pada suhu $30^\circ C$, dan katalis H_2SO_4 dipilih karena dapat mengonversi asam lemak bebas menjadi Metil Ester dengan lebih efektif dalam suasana asam. Penambahan metanol berlebih digunakan untuk meningkatkan produk yang dihasilkan. Reaksi Esterifikasi menghasilkan Metil Ester sebagai produk utama, sedangkan trigliserida, metanol, air, H_2SO_4 , FAME, dan sisa FFA juga terdapat pada keluaran reaktor. Reaksi Esterifikasi adalah reaksi kesetimbangan endotermis yang membutuhkan panas, sehingga temperatur feed pada reaktor dan suhu optimum pada $60^\circ C$ berpengaruh pada reaksi yang terjadi. Selain memiliki reaksi endotermis yang dapat meningkatkan suhu dan mempengaruhi pergeseran reaksi ke arah produk, proses esterifikasi juga memerlukan alat operasi yang disebut reaktor esterifikasi berpengaduk dengan coil steam. Penggunaan coil steam lebih disukai karena dapat mentransfer panas dengan lebih baik dibandingkan jacket steam dan lebih efektif digunakan di

dalam tangki yang dipanaskan pada suhu 60°C. Dari reaktor esterifikasi R-210, terbentuk senyawa Metil Ester (Biodiesel) dan air. Kemudian, keluaran dari reaktor akan dipompa ke tangki netralisasi I (R-220) untuk menetralkan sisa H₂SO₄ yang terkandung dalam reaksi esterifikasi. Penetralkan ini penting untuk menjaga suasana basa dalam reaksi transesterifikasi selanjutnya, yang memerlukan suasana basa agar dapat berjalan dengan baik dan menghasilkan metil ester dan gliserol dari trigliserida. Jika ada kandungan asam yang masuk, dapat terbentuk garam yang mengganggu reaksi.

Kalsium oksida (CaO) digunakan dalam reaksi netralisasi karena merupakan salah satu katalis yang tidak mudah larut dalam reaksi. CaO merupakan salah satu katalis basa padat alami yang paling efektif dalam sintesis biodiesel di antara katalis heterogen lainnya karena memiliki sifat-sifat yang ramah lingkungan, tidak beracun, biaya murah, aktivitas katalitik yang baik, dan kelarutan rendah dalam metanol. Selain itu, CaO memiliki kelarutan yang sangat sedikit dalam air dingin, air panas, dan metanol, serta hampir tidak larut dalam alkohol. CaO juga dapat membentuk padatan CaSO₄ yang dapat dipisahkan pada proses selanjutnya, sehingga produk yang terbentuk dalam fase padatan dapat dengan mudah dipisahkan.

Untuk memisahkan CaSO₄ dari larutan-larutan lainnya, digunakan *clarifier* yang bekerja berdasarkan prinsip pemisahan berdasarkan gaya gravitasi. Aliran yang mengandung padatan akan dibuang ke *Solid Waste Treatment Plant* (SWTP), sementara aliran yang mengandung *liquid* akan ditampung terlebih dahulu pada tangki penampung esterifikasi (F-312) sebelum dipompa menggunakan pompa (L-313) ke tahap selanjutnya yaitu transesterifikasi. Proses transesterifikasi menggunakan alat reaktor transesterifikasi (R-310). Gambar 4 disajikan diagram balok tahapan esterifikasi.

C. Tahap Transesterifikasi

Langkah berikutnya setelah melalui tahap esterifikasi (R-210), campuran sisa RBPO dan Metil Ester dipindahkan melalui pompa (L-313) ke reaktor transesterifikasi (R-310). Di reaktor ini, senyawa trigliserida diubah menjadi metil ester dengan suhu operasi 60°C dan tekanan 1 atm. Transesterifikasi menggunakan katalis NaOH dan senyawa metanol (CH₃OH) sebagai reaktan. Metanol yang digunakan diambil dari tangki penyimpanan (F-214), dibagi menjadi beberapa aliran menggunakan *splitter*, dan kemudian dipompa ke reaktor transesterifikasi (R-310) melalui pompa (L-314). NaOH padatan dimasukkan ke dalam *mixer* (M-315) dan dicampur dengan metanol di dalam *mixer* (M-315) untuk menghasilkan ion metoksida yang lebih reaktif terhadap reaksi transesterifikasi. Reaksi transesterifikasi terkatalisis basa dimulai dengan serangan ion metoksida pada atom karbon karbonil trigliserida, yang menghasilkan intermediet tetrahedral dan kemudian mengalami eliminasi yang diikuti dengan terbentuknya metil ester (biodiesel) dan ion gliserida, yang terlihat pada mekanisme reaksi transesterifikasi. Katalis NaOH bereaksi terlebih dahulu dengan metanol membentuk ion metoksida, yang kemudian menjadi pereaksi nukleofil. Reaksi pembentukan ester dalam kondisi basa dengan ion metoksida disebut reaksi nukleofilik [6]. Hasil keluaran dari mixer selanjutnya masuk ke reaktor transesterifikasi (R-310). Proses transesterifikasi berlangsung selama 30-60 menit pada

suhu operasi 60°C dan tekanan 1 atm. Pada Gambar 5 disajikan diagram balok tahapan transesterifikasi.

D. Tahap Finishing (Pemurnian)

Setelah proses transesterifikasi, biodiesel dipompa ke tangki penyimpanan transesterifikasi (F-412) dengan menggunakan pompa (L-411). Selanjutnya, biodiesel dipompa kembali menggunakan pompa (L-413) menuju *washing tower* (D-410) untuk proses pencucian dengan air, yang bertujuan untuk memisahkan metil ester dari gliserol, sisa katalis, sisa metanol yang tidak bereaksi, sabun, dan *impurities* yang terkandung di dalamnya sehingga menghasilkan metil ester yang lebih murni. Proses ini melibatkan tangki berpengaduk untuk mempercepat homogenisasi antara metil ester beserta *impurities* dengan air. Setelah proses pencucian, biodiesel dipompa menggunakan pompa (L-421) menuju *cooler* (E-422) untuk menurunkan suhu menjadi 30°C agar memenuhi kondisi operasi pada alat *decanter* (H-420). Pada proses *decanter*, biodiesel akan terpisah dari campuran air, gliserol, metanol, katalis, dan sabun, dengan biodiesel sebagai fraksi ringan yang berada di atas dan gliserol, metanol, katalis, dan sabun sebagai fraksi berat yang berada di bawah. *Output* dari *decanter* akan menghasilkan 2 output, yaitu *output* biodiesel yang akan diproses lebih lanjut dan *output crude* gliserol yang akan diproses untuk memperoleh gliserol murni. *Output* biodiesel dari *decanter* dipompa menggunakan pompa (L-431) menuju heater (E-432) untuk dipurnakan dan menghasilkan metil ester yang lebih murni. Proses pemurnian biodiesel dilakukan menggunakan kolom distilasi (D-430) dengan menggunakan *reboiler* (E-434) sebagai pemanas dan kondensor (E-435) untuk *me-recycle* kandungan metil ester yang ikut menguap sehingga proses distilasi lebih efisien dan menghasilkan metil ester dengan kemurnian yang tinggi. Kandungan metanol yang teruapkan akan dipompa ke tangki penampung metanol (F-471) untuk digunakan sebagai metanol *recovery*. Sementara itu, metil ester yang telah dimurnikan akan dipompa menggunakan pompa (L-438) menuju ke *cooler* E-439 untuk menurunkan suhu akhir biodiesel agar dapat didistribusikan. *Output crude* gliserol dari *decanter* ditambahkan dengan H₃PO₄ pada tangki berpengaduk (R-440) untuk menetralkan kandungan Na⁺ dalam campuran gliserol sehingga membuat suasana menjadi basa dan membentuk natrium fosfat (Na₃PO₄). Selanjutnya, gliserol akan dipanaskan dan dimurnikan menggunakan kolom distilasi (D-450) dengan menggunakan *reboiler* (E-454) dan kondensor (E-455) untuk memisahkan kandungan metanol pada gliserol. Gambar 6 disajikan diagram balok pada tahapan pemurnian.

IV. NERACA MASSA DAN ENERGI

Berdasarkan perhitungan neraca massa diperoleh bahwa pabrik berkapasitas produksi 460.000 kiloliter/tahun membutuhkan 51.278,64 kg/jam CPO yang diolah untuk menghasilkan metil ester 1.209 ton/hari atau sekitar 50.356,06 kg/jam biodiesel. Dalam proses dibutuhkan H₃PO₄ sebesar 235,75 kg/jam, metanol sebesar 13.621,76 kg/jam, *bleaching earth* sebesar 769,18 kg/jam, dan membutuhkan utilitas berupa air sebesar 8.346,14 kg/jam. Dari proses esterifikasi membutuhkan steam sebesar 308.157,74 kJ/jam

dan proses transesterifikasi membutuhkan steam sebesar 1.211.412,98 kJ/jam. Dalam pra-desain pabrik ini akan dan menghasilkan *Solid Waste Treatment Plant* sebesar 1.683,46 kg/jam dan *steam condensate* sebesar 765,19 kg/jam.

V. ANALISA EKONOMI

Untuk memulai pembangunan sebuah pabrik, diperlukan penilaian terhadap kelayakan pabrik yang mencakup analisis ekonomi. Salah satu faktor yang dapat digunakan untuk menentukan kelayakan tersebut adalah melalui perhitungan bahan baku dan produk yang dihasilkan berdasarkan neraca massa. Neraca massa dan energi juga digunakan untuk menentukan spesifikasi dan harga peralatan yang dibutuhkan dalam proses produksi. Selanjutnya, analisis ekonomi dilakukan dengan mempertimbangkan biaya operasi dan utilitas, jumlah dan gaji karyawan, serta akuisisi lahan untuk membangun pabrik. Beberapa faktor yang digunakan dalam analisis ekonomi tersebut meliputi *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Pay Out Time* (POT), dan sensitivitas terhadap IRR.

A. Asumsi-Asumsi

Analisis ekonomi dilakukan dengan menggunakan metode *discounted cash flow*, yaitu *cash flow* yang nilainya diproyeksikan pada masa sekarang. Terdapat beberapa asumsi-asumsi yang digunakan. Asumsi-asumsinya sebagai berikut:

1. Pabrik beroperasi selama 330 hari per tahun dengan 24 jam operasi.
2. Masa pendirian pabrik adalah 3 tahun, dengan keterangan 2 tahun konstruksi, dan 1 tahun untuk *commissioning* dan *start-up*.

Tahun pertama menggunakan 60% modal sendiri dan 40% modal pinjaman. Tahun kedua menggunakan sisa modal sendiri dan modal pinjaman. Pengadaan peralatan dan konstruksi dimulai tahun 2022 dan pabrik mulai beroperasi tahun 2025. Bunga peminjaman modal pada bank 8,62 % per tahun sesuai Bank Indonesia pada September 2022.

Laju inflasi 3,30 % per tahun, sesuai dengan Bank Indonesia pada November 2022. Struktur peminjaman modal dilakukan dengan tahun pertama menggunakan 50% modal sendiri dan 40% modal pinjaman. Tahun kedua menggunakan sisa modal sendiri dan modal pinjaman. Pembayaran pada kontraktor dengan modal pinjaman selama masa konstruksi dilakukan dengan cara sebagai berikut: pada awal masa konstruksi (awal tahun ke (-2)) dilakukan dengan pembayaran sebesar 40% dari modal pinjaman untuk keperluan pembelian tanah dan uang muka. Pada akhir tahun kedua masa konstruksi (tahun ke (-1)) dibayarkan sisa modal pinjaman.

Pengembalian pinjaman dalam waktu 10 tahun, sebesar 10% per tahun. Usia pabrik diperkirakan selama 20 tahun, dengan depresiasi 10% per tahun. Kapasitas produksi tahun ke-1 adalah 60%, tahun ke-2 adalah 80%, dan tahun ketiga seterusnya adalah 100%. Pajak tarif PPh Badan 22% sebagai salah satu tujuan RUU HPP untuk mengoptimalkan penerimaan negara dengan mempertimbangkan asas keadilan sehingga pasal 17 ayat (1) huruf b mengalami pembaharuan.

B. CAPEX dan OPEX

Biaya yang diperlukan untuk membangun dan

menjalankan pabrik ini dikategorikan menjadi dua, yaitu *Capital Expenditures* (CAPEX) dan *Operational Expenditures* (OPEX). *Capital Expenditures* atau belanja modal adalah sejumlah uang yang harus disediakan untuk pembuatan, konstruksi, dan mengoperasikan pabrik untuk beberapa waktu. *Operational Expenditures* atau belanja operasional adalah biaya dikeluarkan untuk menjalankan kegiatan operasi pabrik agar menghasilkan suatu produk. Analisa ekonomi pabrik yang disajikan pada Tabel 6.

C. Faktor Kelayakan Pendirian

Faktor kelayakan pabrik dihitung berdasarkan beberapa faktor seperti pada Tabel 7 dan Gambar 7.

VI. ASPEK SOSIAL DAN LINGKUNGAN

Di sekitar kita, terdapat banyak mesin yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Namun, untuk menjalankannya, dibutuhkan energi yang biasanya diperoleh dari bahan bakar. Bahan bakar fosil cepat diadopsi pada masa revolusi industri karena harganya yang murah dan efisien sehingga menjadi bagian utama masyarakat. Namun, untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan terbarukan perlu dikembangkan, seperti bioenergi. Biodiesel dapat menjadi alternatif yang baik untuk bahan bakar mesin diesel, menggantikan bahan bakar solar yang semakin langka. Biodiesel dianggap sebagai kandidat yang paling baik untuk menggantikan bahan bakar fosil sebagai sumber energi transportasi utama dunia. Selain itu, biodiesel merupakan bahan bakar terbaru yang dapat diangkut dan dijual dengan menggunakan infrastruktur zaman sekarang.

A. Aspek Sosial

Menggunakan biodiesel sebagai alternatif bahan bakar fosil dapat berdampak positif pada aspek sosial. Salah satu dampak positifnya adalah memberikan nilai tambah melalui hilirisasi industri pertanian dalam negeri. Selain itu, penggunaan biodiesel juga dapat menstabilkan harga *Crude Palm Oil*, meningkatkan kesejahteraan petani kecil atau pekebun mandiri yang pada akhirnya dapat mengurangi disparitas ekonomi antar wilayah. Dampak positif lainnya adalah penggunaan biodiesel juga dapat mengurangi impor bahan bakar, menghemat devisa negara dan neraca perdagangan, meningkatkan penyerapan tenaga kerja, serta menjaga ketahanan energi.

B. Aspek Lingkungan

Biodiesel adalah alternatif pengganti diesel minyak bumi yang dihasilkan di dalam negeri, bersifat terbarukan, dan lebih bersih dalam pembakarannya. Mesin diesel menghasilkan emisi yang lebih sedikit dan tidak mengeluarkan asap hitam berupa karbon atau CO₂ seperti yang dihasilkan oleh mesin yang menggunakan solar. Biodiesel juga lebih aman karena titik nyala lebih tinggi dan tidak mudah terbakar, serta mengurangi kerusakan lingkungan jika terjadi tumpahan atau kebocoran. Selain itu, biodiesel mengurangi emisi gas rumah kaca dalam siklus hidupnya karena tanaman biji minyak yang digunakan untuk produksi biodiesel menyerap CO₂ dari udara saat tumbuh. Ketika biodiesel dibakar, CO₂ dan emisi lainnya dilepaskan ke atmosfer, tetapi sebagian besar CO₂ yang dipancarkan

diimbangi oleh penyerapan CO₂ oleh tanaman biji minyak berikutnya. Biodiesel juga dapat mengurangi emisi nitrogen oksida dan partikulat materi dari mesin diesel baru.

VII. KESIMPULAN

Dari hasil-hasil yang telah diuraikan pada bab-bab sebelumnya, dapat disimpulkan sebagai berikut perencanaan operasi kontinu 24 jam 330 hari/year. Kapasitas Produksi sebesar 460.000 kiloliter/Tahun. Umur Pabrik selama 20 tahun. Masa Konstruksi selama 3 tahun. Untuk analisis ekonomi sebagai berikut:(1)IRR : 93,67%;(2)POT:1 tahun 3 bulan;(3)BEP :14,17%;(4)NPV :Rp8.058.932.250.084,9

Dari hasil analisis ekonomi diatas dapat disimpulkan bahwa pabrik biodiesel dari *Crude Palm Oil* (CPO) dengan kapasitas 460.000 kiloliter/tahun ini layak dan menarik untuk

dikaji lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. F. Mahmud, "Proses pengolahan CPO (crude palm oil) menjadi RBDPO (refined bleached and deodorized palm oil) di PT XYZ Dumai," *J. Unitek*, vol. 12, no. 1, pp. 55--64, 2019.
- [2] O. Zufarov, Š. Sekretár, and S. Schmidt, "Degumming of rapeseed and sunflower oil," *Acta Chim. Slovaca*, vol. 1, no. 1, pp. 321--328, 2008.
- [3] A. Hafidi, D. Pioch, and H. Ajana, "Membrane - based simultaneous degumming deacidification of vegetables oils," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 203--212, 2005.
- [4] K. Albert J. Dijkstra and I. Martin Van Opstal, 1986, "Process for Producing Degummed Vegetable Oils and Gums of High Phosphorylpyridic Acid Content," United State Patent, USA, 4698185.
- [5] I. Pahan, *Panduan Lengkap Kelapa Sawit*. Jakarta: Penebar Swadaya, 2006. ISBN: 979489995x.
- [6] S. Galuh, "Optimasi Katalis Basa dalam Pembuatan Biodiesel dari Lemak Sapi," Departemen Kimia: Universitas Islam Indonesia, 2007.