

Pra Desain Pabrik Biodiesel dari Biji Nyamplung dengan Proses Esterifikasi dan Transesterifikasi

Ainiya Nanda Aurunnisa, Aulia Rahma Nabila, dan Mahfud
 Departemen Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: mahfud@chem-eng.its.ac.id

Abstrak—Biodiesel dapat menjadi alternatif untuk mengatasi permasalahan krisis energi dunia karena sifatnya yang *renewable resources*. Salah satu bahan yang dapat digunakan dalam produksi biodiesel adalah biji nyamplung. Pabrik biodiesel dari biji nyamplung ini direncanakan akan mulai beroperasi pada tahun 2026 dengan mengacu pada pemenuhan kebutuhan dalam negeri. Dengan analogi untuk memenuhi 2,94% kebutuhan biodiesel nasional sehingga kapasitas produksi pabrik biodiesel menjadi 1200.000 ton/tahun. Biodiesel dari biji nyamplung diproduksi melalui tahap proses persiapan bahan baku, esterifikasi, transesterifikasi, pemurnian biodiesel, pemurnian gliserol, dan *recovery* metanol. Untuk dapat mendirikan pabrik biodiesel dari biji nyamplung ini, dibutuhkan total modal investasi sebesar Rp923.438.103.243,00. Estimasi umur pabrik ini adalah 20 tahun dengan *Internal Rate of Return* sebesar 17,551%, *Pay Out Time (POT)* 4 tahun 2 bulan, dan *Break Even Point (BEP)* sebesar 22,4%.

Kata Kunci—Biji Nyamplung, Biodiesel, Esterifikasi, Transesterifikasi.

I. PENDAHULUAN

ENERGI memiliki andil yang sangat besar dan sangat diperlukan dalam menjalankan aktivitas perekonomian Indonesia, baik untuk kebutuhan konsumsi maupun untuk aktivitas produksi berbagai sektor perekonomian. Krisis energi dunia yang terjadi pada satu dekade terakhir memberikan dampak yang signifikan pada meningkatnya harga bahan bakar minyak (BBM). Sebagai sumber daya alam, energi harus dimanfaatkan sebesar-besarnya bagi kemakmuran masyarakat dan pengelolaannya harus mengacu pada azas pembangunan berkelanjutan. Jika dilihat dari aspek ketersediaan, Indonesia merupakan negara yang kaya dengan sumber daya energi, baik energi yang bersifat *unrenewable resources* maupun *renewable resources*. Akan tetapi, eksplorasi sumber daya energi lebih banyak difokuskan pada energi fosil yang bersifat *unrenewable resources*, sedangkan energi yang bersifat *renewable* relatif belum banyak dimanfaatkan. Kondisi ini menyebabkan ketersediaan energi fosil, khususnya minyak mentah, semakin langka yang menyebabkan Indonesia saat ini yang mana cepat atau lambat pasti kan habis ketersediaannya.

Kelangkaan bahan bakar minyak saat ini yang disebabkan oleh semakin menipisnya cadangan energi fosil, sementara konsumsi energi terus mengalami peningkatan yang akan menjadi ancaman terhadap perkembangan perekonomian Indonesia. Oleh karena itu, berbagai upaya perlu dilakukan untuk mendorong pemanfaatan penggunaan energi yang efisien diiringi dengan pencarian sumber-sumber energi fosil baru secara intensif dan mengembangkan energi alternatif yang bersifat *renewable resources*. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan pencarian sumber bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar minyak. Bahan bakar

Tabel 1.
Perbandingan Proses Pembuatan Biodiesel

Parameter	Esterifikasi— Transesterifikasi	Pirolisis	Metanol Superkritis
Suhu	Tidak memerlukan suhu yang tinggi yaitu sebesar 60°C apabila menggunakan katalis basa pada reaksi transesterifikasi	Memerlukan suhu yang tinggi yaitu sekitar 250°C—350°C	Memerlukan suhu yang tinggi yaitu di atas 350°C karena tidak menggunakan katalis
Biaya produksi	Sedang bergantung pada jenis katalis yang digunakan.	Mahal karena konsumsi energi yang besar	Mahal karena konsumsi energi yang besar.
Mekanisme reaksi	Mekanisme reaksi cukup rumit karena harus dijaga pada suhu tertentu agar optimal.	Mekanisme reaksi cukup mudah dibandingkan yang lain	Mekanisme reaksi rumit karena dilakukan pada suhu tinggi.
Dampak terhadap lingkungan	Menggunakan banyak air untuk proses pencucian apabila menggunakan katalis. Selain itu, reaksi bersifat korosif apabila menggunakan katalis asam	Tidak ramah lingkungan karena konsumsi energi yang besar	Ekologis karena tidak menggunakan katalis

alternatif tersebut adalah Bahan Bakar Nabati (BBN). Bahan bakar nabati adalah bahan bakar yang diperoleh dari tanaman yang menghasilkan minyak sebagai bahan bakar.

Biodiesel dapat dijadikan bahan bakar alternatif karena diproduksi dari sumber daya hayati terbarukan seperti minyak nabati atau lemak hewani. Biodiesel bukan hanya energi terbarukan dan ramah lingkungan, namun juga energi yang dapat terdegradasi dalam lingkungan. Biodiesel dari minyak nabati pada umumnya mempunyai karakteristik yang mendekati bahan bakar yang berasal dari minyak bumi. Selain itu, biodiesel dari minyak nabati bersifat dapat diperbarui sehingga ketersediaannya lebih terjamin dan produksinya dapat terus ditingkatkan mengingat *supply* biodiesel tiap tahunnya juga semakin ditingkatkan guna mengatasi permasalahan energi.

Biodiesel dimanfaatkan sebagai energi alternatif pengganti diesel atau solar. Biodiesel dapat digunakan pada mesin diesel biasa dengan sedikit atau tanpa penyesuaian sesuai dengan kondisi tertentu. Penyesuaian dibutuhkan apabila penyimpanan biodiesel terbuat dari bahan seperti *seal*, gasket, atau perekat dari karet alam atau karet nitril

Bahan baku biodiesel harus memenuhi persyaratan untuk

Tabel 2.
Data Ketersediaan Bahan Baku

Wilayah	Potensi Produksi Biji Nyamplung sebagai Bahan Baku (ton/tahun)
Sumatera	484.000
Jawa	112.000
Bali dan Nusa Tenggara	408.000
Kalimantan	586.000
Sulawesi	260.000
Maluku	362.000
Irian Jaya Barat	754.000
Papua	1.924.000

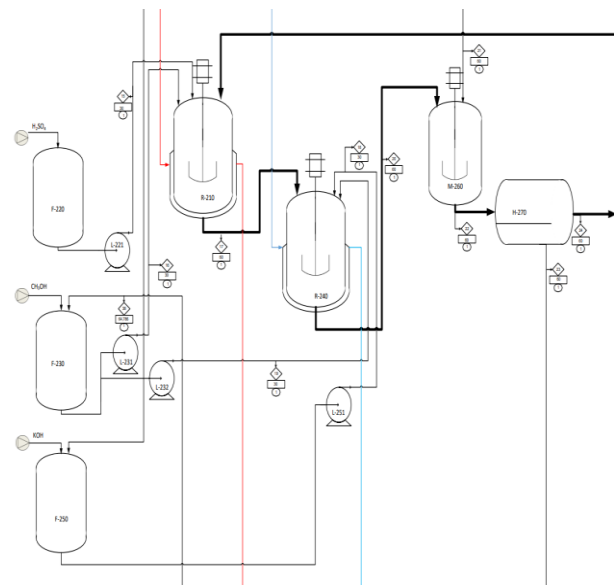
Tabel 3.
Supply-Demand Biodiesel di Indonesia

Tahun	Produksi (kg)	Konsumsi (kg)	Ekspor (kg)	Impor (kg)
2016	3.135.385.600	2.579.660.800	3.100.000.000	0
2017	2.929.561.600	2.205.747.200	3.600.000.000	0
2018	5.289.676.800	3.216.000.000	4.200.000.000	0
2019	7.202.982.400	5.482.636.800	5.800.000.000	0
2020	7.370.214.400	7.226.137.600	4.400.000.000	0
2021	8.781.824.000	7.889.920.000	4.700.000.000	0

produksi biodiesel dengan biaya produksi rendah dan produksi skala besar [1]. Selain itu, harga minyak nabati yang dapat dikonsumsi relatif mahal sehingga pengembangannya difokuskan pada minyak nabati yang tidak dapat dikonsumsi untuk menekan biaya produksi saat masa krisis [2]. Salah satu sumber minyak nabati yang tidak bersaing dengan kebutuhan pangan jika digunakan sebagai bahan baku pembuatan biodiesel adalah biji nyamplung. Selain itu, faktor produktivitas biji nyamplung yang besar, yaitu sebesar 20 ton/ha.tahun, juga menjadi keuntungan penggunaan biji nyamplung sebagai bahan baku biodiesel [3].

Minyak nyamplung yang dapat dijadikan biodiesel dapat diperoleh dari tanaman nyamplung dengan melakukan berbagai cara pengolahan, seperti esterifikasi dan transesterifikasi. Minyak biji nyamplung memiliki kandungan asam lemak bebas yang relatif tinggi sekitar 5,1%, sehingga produksi biodiesel minyak biji nyamplung bisa dilakukan dengan mempertimbangkan hal tersebut [4]. Minyak nyamplung ini bisa digunakan sebagai bahan bakar nabati dalam bentuk biodiesel, namun penggunaan biodiesel dari nyamplung masih belum dapat diterapkan secara operasional karena harganya yang masih lebih tinggi dari harga BBM solar. Oleh sebab itu penggunaan minyak nyamplung murni secara langsung sebagai BBN menjadi alternatif yang lebih potensial secara operasional.

Dalam merancang pabrik, diperlukan seleksi proses dengan meninjau beberapa faktor. Tabel 1 menunjukkan perbandingan tiga proses produksi biodiesel dengan parameternya. Berdasarkan Tabel 1, proses esterifikasi—transesterifikasi dipilih karena metode tersebut tidak memerlukan suhu yang tinggi [5-9]. Selain itu, metode lain memiliki beberapa kelemahan dibandingkan metode terpilih. Metode pirolisis lebih banyak menghasilkan biogasolin dibandingkan bahan bakar biodiesel sehingga metode esterifikasi—transesterifikasi lebih baik karena menghasilkan biodiesel sebagai produk utamanya. Berbeda dengan metode pirolisis, metode metanol superkritik menghasilkan biodiesel sebagai produk utama namun metode ini memerlukan kondisi khusus, yaitu temperatur dan tekanan yang tinggi.



Gambar 1. Diagram proses persiapan bahan baku.

Katalis yang dipilih untuk proses esterifikasi adalah H_2SO_4 . Hal ini dikarenakan H_2SO_4 memiliki sifat asam sehingga tidak memicu terjadinya reaksi saponifikasi pada proses esterifikasi. Selain itu, biaya H_2SO_4 yang murah juga menjadi pertimbangan dalam pemilihan katalis [10]. Katalis yang digunakan untuk proses transesterifikasi adalah katalis basa karena reaksi transesterifikasi menggunakan katalis basa membutuhkan durasi yang lebih cepat daripada menggunakan katalis asam. Transesterifikasi menggunakan katalis basa juga menghasilkan penurunan suhu dan tekanan reaksi dengan volume alkohol yang lebih sedikit serta efisiensi konversi yang tinggi [11]. Katalis basa yang digunakan adalah KOH karena biaya yang murah dan reaktivitasnya yang tinggi [1]. Alkohol yang dipilih untuk produksi biodiesel adalah metanol karena biaya yang murah dan strukturnya yang memiliki rantai polar dan terpendek [6].

II. DASAR PERANCANGAN

A. Ketersediaan dan Kualitas Bahan Baku dan Produk

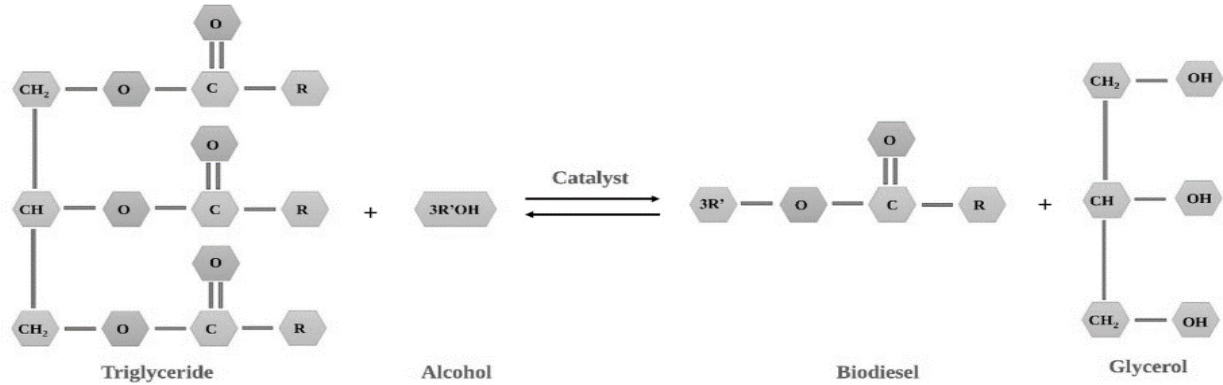
Seiring dengan berjalannya waktu, sumber bahan bakar fosil yang terus makin habis tidak bisa dijadikan sumber bahan bakar utama dan menjadikan sumber energi terbarukan sebagai alternatif. Indonesia yang merupakan negara agraris memiliki peluang dalam mengatasi hal tersebut karena melimpahnya sumber daya alam hayati yang bisa diolah menjadi bahan bakar terbarukan salah satunya biodiesel.

Biji nyamplung merupakan salah satu sumber bahan alam hayati yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan produksi biodiesel. Dalam meningkatkan produksi biodiesel dari bahan biji nyamplung, perlu diketahui ketersediaan bahan baku agar dapat menjalankan proses produk biodiesel ini. Tabel 2 menunjukkan data ketersediaan biji nyamplung di Indonesia [3].

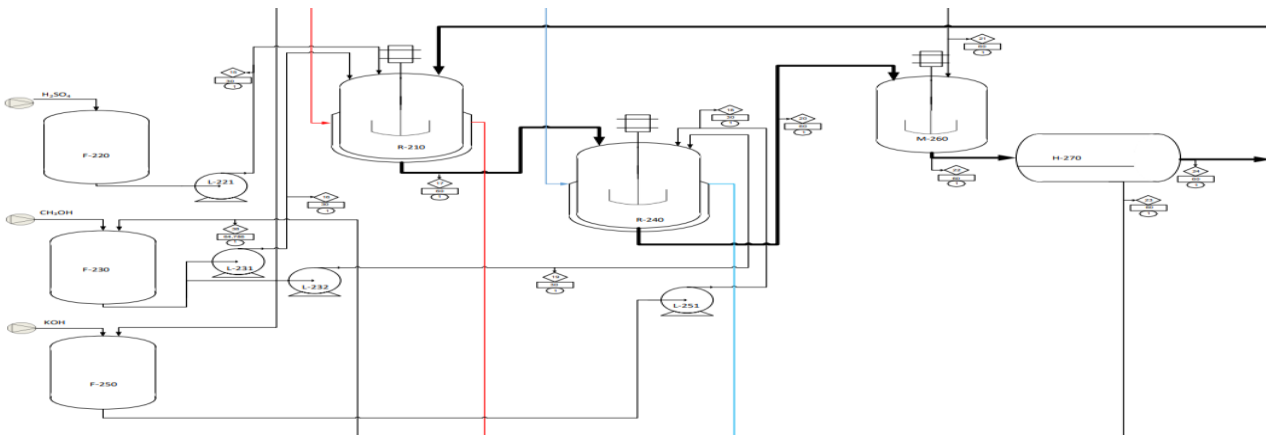
Dari Tabel 1 dapat diketahui potensi nyamplung yang ada di Indonesia jika menilik dari tegakan nyamplung dan tanah kosongnya, serta potensi produksi biji nyamplung sebagai feedstock. Berdasarkan data Tabel 2, bisa dilihat pula bahwa Indonesia memiliki potensi biji nyamplung yang cukup melimpah sehingga dapat dijadikan sebagai bahan baku



Gambar 2. Reaksi esterifikasi.



Gambar 3. Reaksi transesterifikasi.



Gambar 4. Diagram proses reaksi esterifikasi dan transesterifikasi.

(feedstock) pembuatan biodiesel di Indonesia.

Dalam pembuatan biodiesel, kualitas bahan baku dari biodiesel yaitu minyak sangat penting untuk diperhatikan. Minyak nyamplung didapatkan dari proses ekstraksi biji nyamplung. Biodiesel, yang merupakan alternatif bahan bakar selain fosil, perlu memenuhi suatu standar untuk mendapatkan kepastian mutu bahan bakar biodiesel dalam negeri dengan memperhatikan perkembangan teknologi, kemampuan produsen, kemampuan dan kebutuhan konsumen, keselamatan kerja, serta pengelolaan lingkungan hidup. Spesifikasi viskositas kinematik pada 40°C pada biodiesel ditetapkan untuk memastikan kemudahan mengalir dari bahan bakar. Titik nyala menunjukkan suhu terendah ketika pembakaran dimulai pada saat biodiesel dikontakkan pada sumber api. Titik nyala berbeda dengan titik bakar karena titik bakar merupakan suhu terendah suatu bahan bakar yang mengeluarkan uap akan tetap terbakar setelah sumber api dihilangkan. Titik nyala dapat menjadi indikator keamanan penyimpanan akibat pengaruh panas. Semakin rendah titik nyala biodiesel, maka semakin tidak aman penyimpanan bahan bakar tersebut.

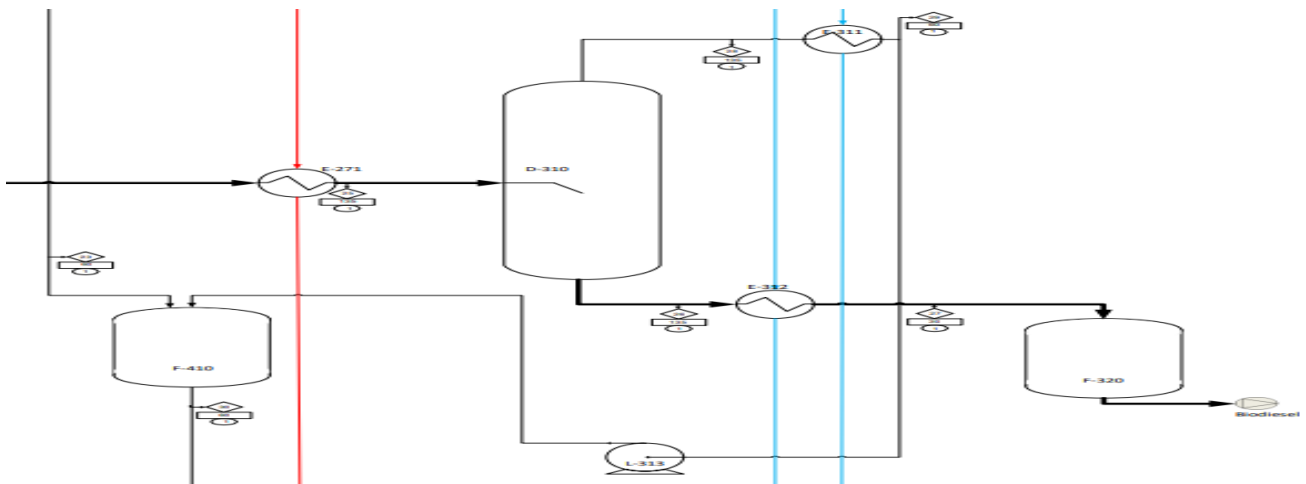
B. Penentuan Kapasitas

Ada beberapa pertimbangan dalam pemilihan kapasitas pabrik biodiesel, yaitu kebutuhan biodiesel di Indonesia, ketersediaan bahan baku, policy pemerintah, dan kapasitas produksi pabrik komersial yang sudah ada. Salah satu faktor yang harus diperhatikan dalam pendirian pabrik biodiesel adalah kapasitas pabrik. Pabrik biodiesel dengan bahan baku biji nyamplung ini direncanakan akan mulai beroperasi pada tahun 2026 dengan mengacu pada pemenuhan konsumsi dalam negeri serta penekanan jumlah impor.

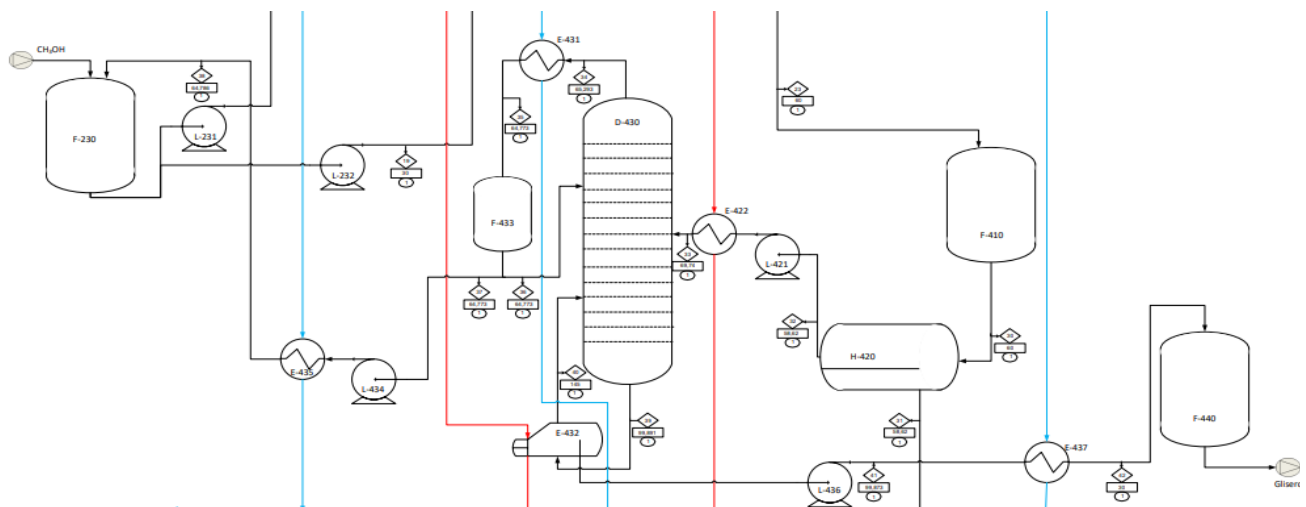
Data produksi, konsumsi, ekspor, dan impor biodiesel pada Tabel 3 kemudian diolah untuk mengetahui laju produksi, konsumsi, ekspor, dan impor untuk mengestimasi kebutuhan biodiesel pada tahun 2026. Berdasarkan perhitungan pemenuhan kebutuhan dalam negeri yang telah dilakukan, *feedstock*, Perpres No.5 Tahun 2006, dan data *existing plant*, didapatkan estimasi kapasitas pabrik sebesar 120.000 ton/tahun.

C. Lokasi dan Ketersediaan Utilitas

Pemilihan lokasi pabrik merupakan salah satu hal



Gambar 5. Diagram proses pemurnian biodiesel.



Gambar 6. Diagram proses pemurnian gliserol dan recovery metanol.

terpenting untuk kesuksesan keberjalanan pabrik dan menentukan kelancaran usaha karena berhubungan langsung dengan nilai ekonomis pabrik yang akan didirikan. Lokasi pabrik dapat mempengaruhi kedudukan pabrik dalam persaingan maupun penentuan kelangsungan produksinya. Hal-hal yang menjadi pertimbangan dalam penentuan lokasi suatu pabrik meliputi lokasi pemasaran, *feedstock*, aksesibilitas dan fasilitas transportasi, sumber tenaga kerja, utilitas, lahan pabrik, dampak terhadap lingkungan, iklim dan topografi, dan hukum dan peraturan. Berdasarkan hasil analisa yang dilakukan, lokasi pendirian pabrik biodiesel yang cocok dan memenuhi kriteria-kriteria yang diinginkan yaitu terletak di Provinsi Jawa Tengah tepatnya di Kabupaten Purworejo. Lokasi ini dipilih karena unggul dari segi sumber daya manusia, utilitas, dan aksesibilitas serta fasilitas transportasi.

III. URAIAN PENELITIAN

A. Tahap Persiapan Bahan Baku

Pada proses persiapan bahan baku, biji nyamplung terlebih dahulu dikupas dan dikeringkan dengan bantuan cahaya panas matahari agar didapat biji nyamplung dengan spesifikasi ukuran yang diinginkan. Selanjutnya, biji nyamplung disimpan di dalam gudang pada suhu ruangan 30°C dan tekanan 1 atm. Biji nyamplung yang telah siap

untuk diolah selanjutnya akan dibawa menuju *mills* untuk dihancurkan menjadi ukuran yang lebih kecil kemudian menuju *screw press* menggunakan conveyor. Pada *screw press*, biji diperas hingga menghasilkan keluaran berupa nyamplung *crude oil* yang terpisah dari ampas biji nyamplung. Ampas dari keluaran *screw press* akan dibawa menuju gudang ampas untuk dilakukan pengolahan limbah (UPL), sedangkan minyak hasil keluaran *screw press* umumnya masih terdapat ampas atau serat dari biji nyamplung sehingga akan dipisahkan kembali menggunakan *centrifuge*. *Crude oil* yang telah dipisahkan dari ampasnya selanjutnya akan dialirkan menuju degummer untuk diproses lanjut, sedangkan ampas dari keluaran alat *centrifuge* akan dialirkan ke UPL (unit pengolahan limbah).

Crude oil yang dialirkan menuju *degummer* akan dihilangkan getahnya dengan mencampurkan larutan H_3PO_4 85% pada suhu 60°C dan tekanan 1 atm. Selanjutnya, campuran *crude oil* dan larutan H_3PO_4 85% ini akan dialirkan menuju *decanter I* untuk dipisahkan antara *crude oil* dan campuran *gum* (getah) yang telah terikat oleh H_3PO_4 . Minyak nyamplung yang telah bersih akan diproses lanjut, sementara *gum* hasil bawah keluaran *decanter* akan dialirkan ke UPL. Diagram proses persiapan bahan baku dapat dilihat pada Gambar 1.

B. Tahap Esterifikasi dan Transesterifikasi

Proses esterifikasi merupakan reaksi reversibel di mana

FFA (*free fatty acid*) dikonversi menjadi ester seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 [12]. Pada reaksi esterifikasi, minyak nyamplung keluaran *decanter* akan dialirkan menuju reaktor esterifikasi untuk direaksikan. Reaktor esterifikasi berlangsung dalam reaktor alir tangki berpengaduk (RATB) pada suhu 60°C dan tekanan 1 atm dengan durasi 1,5 jam. Pada reaktor esterifikasi, ditambahkan katalis berupa asam kuat, yaitu larutan H₂SO₄ 13%, dan dengan bantuan larutan metanol CH₃OH sebagai reaktan.

Pada proses ini, metanol ditambahkan berlebih dengan perbandingan minyak—metanol 1:40 agar air yang terbentuk dari reaksi esterifikasi dapat diserap oleh metanol sehingga tidak menghalangi reaksi pengubahan FFA (*free fatty acid*) menjadi metil ester.

Hasil keluaran reaktor esterifikasi kemudian dialirkan menuju reaktor transesterifikasi. Proses transesterifikasi merupakan proses reaksi pembentukan ester dan gliserol dari trigliserida [13]. Dalam reaksi transesterifikasi, satu mol trigliserida akan direaksikan dengan tiga mol alkohol membentuk satu mol gliserida dan tiga mol metil ester seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 [14].

Trigliserida akan direaksikan dengan alkohol yaitu CH₃OH dan dengan bantuan katalis basa yaitu KOH. Reaksi berlangsung selama 60 menit pada suhu 60°C dan tekanan 1 atm. Rasio mol minyak nyamplung dan metanol adalah 1:8 dengan katalis KOH 1,25%. Penambahan metanol berlebih ini dilakukan agar reaksi tetap mengarah ke produk.

Reaksi transesterifikasi dilakukan dalam tangki berpengaduk (RATB) untuk memastikan terjadinya reaksi di seluruh bagian reaktor. Hasil reaktor transesterifikasi kemudian masuk ke dalam *washing tank* untuk dicuci. Setelah itu, keluaran dari *washing tank* kemudian dialirkan menuju *decanter II* untuk pemisahan biodiesel.

Biodiesel kemudian dialirkan menuju *flash tank* untuk dilakukan pemurnian, sedangkan katalis, metanol, air, dan gliserol ditampung di tangki penampung sementara. Diagram proses esterifikasi dan transesterifikasi dapat dilihat pada Gambar 4.

C. Tahap Pemurnian Biodiesel

Pada proses pemurnian biodiesel peralatan yang digunakan adalah *flash tank*. Campuran kaya metil (biodiesel) dilewatkan menuju *flash tank* untuk menghilangkan kadar air dan metanol yang masih terkandung dalam biodiesel. Hasil bawah *flash tank* yang merupakan biodiesel murni kemudian dialirkan menuju tangki penampung biodiesel. Sementara itu, hasil atas *flash tank* diumpankan menuju kondensor untuk mengubah metanol dan air pisahan dari biodiesel menjadi fasa cair kemudian dialirkan menuju tangki penampung sementara. Diagram proses pemurnian gliserol dapat dilihat pada Gambar 5.

D. Tahap Pemurnian Gliserol dan Recovery Metanol

Pemurnian gliserol dilakukan menggunakan beberapa alat, yaitu tangki penampung sementara, *decanter III*, dan kolom distilasi. Dari tangki penampung, campuran kaya gliserol dialirkan menuju *decanter III* untuk dipisahkan dari sisa katalisnya. Sisa katalis tersebut kemudian dibuang ke UPL, sementara hasil pisahan lainnya (gliserol dan metanol) dialirkan menuju kolom distilasi untuk memisahkan metanol dan gliserol. Gliserol yang sudah terpisah dari metanol

kemudian dialirkan ke tangki *crude* gliserol, sedangkan metanol akan di-*recovery* menuju tangki metanol dengan *recovery* sebesar 99% untuk digunakan pada proses reaksi pembuatan biodiesel kembali. Diagram proses pemurnian gliserol dan *recovery* metanol dapat dilihat pada Gambar 6.

IV. NERACA MASSA DAN NERACA ENERGI

A. Neraca Massa

Untuk membuat Pabrik Biodiesel dari Biji Nyamplung dengan kapasitas 120.000 ton/tahun diperlukan bahan baku utama, yaitu biji nyamplung, sebanyak 25.000 kg/jam.

B. Neraca Energi

Produksi biodiesel dari biji nyamplung dengan proses esterifikasi dan transesterifikasi memiliki kebutuhan panas total sebesar 15.321.714 kcal/jam dan kebutuhan power total sebesar 298.676 kJ/jam.

V. ANALISA EKONOMI

Analisa ekonomi merupakan salah satu parameter suatu pabrik tersebut layak didirikan atau tidak. Untuk menentukan kelayakan suatu pabrik secara ekonomi, diperlukan perhitungan bahan baku yang dibutuhkan dan produk yang dihasilkan menurut neraca massa, harga peralatan untuk proses berdasarkan spesifikasi peralatan yang dibutuhkan serta analisa biaya yang diperlukan untuk beroperasi dan utilitas, jumlah dan gaji karyawan serta pengadaan lahan untuk. Dari data yang diperoleh serta pengolahan data, hasil perhitungan pada neraca ekonomi didapatkan *Total Capital Investment* pabrik ini sebesar Rp875.788.588.500,00. Biaya produksi per tahun sebesar Rp1.157.953.804.928,00 untuk kapasitas bahan baku 355.694 ton/tahun dengan hasil penjualan per tahun sebesar Rp1.925.585.804.928,00 dengan kapasitas produksi 120.000 ton biodiesel/tahun. Untuk asumsi yang digunakan yaitu bunga bank 8% per tahun, dan umur pabrik diperkirakan selama 20 tahun yang beroperasi selama 330 hari/tahun. Selain itu, terdapat beberapa parameter kelayakan didirikannya suatu pabrik, yaitu dari *Interest Rate of Return* (IRR), *Net Present Value* (NPV), dan *Pay Out Time*. Dari hasil pengolahan data diperoleh IRR sebesar 17,55 %, NPV sebesar Rp1.465.508.664.293,00, dengan pengembalian modalnya selama 4,2 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa pabrik ini layak untuk didirikan karena POT yang didapatkan lebih kecil dari perkiraan usia Peralatan dan IRR lebih besar dari bunga bank [15].

VI. KESIMPULAN

Pabrik biodiesel dari biji nyamplung dengan proses esterifikasi-transesterifikasi yang akan didirikan di Kabupaten Purworejo, Jawa Tengah dapat membantu meningkatkan kebutuhan bahan bakar dalam negeri. Pabrik biodiesel ini direncanakan akan didirikan pada tahun 2026 dengan kapasitas produksi 120.000 ton/tahun. Proses produksi terdiri dari empat unit proses. Unit pertama adalah persiapan bahan baku, berfungsi sebagai unit *pre-treatment* bahan baku agar siap untuk diolah lebih lanjut. Unit kedua ialah proses esterifikasi dan transesterifikasi, berfungsi untuk mengubah FFA dan TGA menjadi metil ester. Unit ketiga adalah pemisahan biodiesel, berfungsi agar biodiesel yang

dihasilkan tidak mengandung produk lain selain biodiesel. Serta unit keempat, pemurnian gliserol dan *recovery* metanol, yang berfungsi untuk memurnikan gliserol sebagai produk samping dari proses produksi biodiesel dan *recovery* metanol untuk dapat digunakan kembali pada proses produksi. dari rangkaian proses ini, biodiesel yang dihasilkan memiliki *yield* sebesar 94,72%. Dengan hasil analisa ekonomi, didapatkan nilai IRR sebesar 17,55% yang lebih tinggi dari suku bunga bank, yaitu 8% per tahun, dengan pengembalian modalnya selama 4,2 tahun. Oleh karena itu, dapat disimpulkan baik dari segi teknis maupun ekonomi Pabrik Biodiesel dari Biji Nyamplung dengan Proses Esterifikasi-Transeserifikasi ini layak didirikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Baroutian, M. K. Aroua, A. A. A. Raman, and N. M. N. Sulaiman, "Potassium hydroxide catalyst supported on palm shell activated carbon for transesterification of palm oil," *Fuel Process. Technol.*, vol. 91, no. 11, pp. 1378–1385, 2010, doi: 10.1016/j.fuproc.2010.05.009.
- [2] I. M. Rizwanul Fattah *et al.*, "State of the art of catalysts for biodiesel production," *Front. Energy Res.*, vol. 8, p. 101, 2020, doi: 10.3389/fenrg.2020.00101.
- [3] P3HH, "Penelitian Pembuatan Biodiesel dari Biji Nyamplung (*Calophyllum Inophyllum* l." Pusat Penelitian dan Pengembangan Hasil Hutan (P3HH), Jakarta, 2008. [Online]. Available: <http://www.dephut.go.id>
- [4] S. Crane, G. Aurore, H. Joseph, Z. Mouloungui, and P. Bourgeois, "Composition of fatty acids triacylglycerols and unsaponifiable matter in *Calophyllum calaba* L. oil from Guadeloupe," *Phytochemistry*, vol. 66, no. 15, pp. 1825–1831, 2005, doi: 10.1016/j.phytochem.2005.06.009.
- [5] Y. A. Ndak, K. Sarifudin, and S. Sudirman, "Pengaruh komposisi SiO₂ pada katalis Cao/SiO₂ terhadap karakter morfologi permukaan, ukuran partikel dan rendamen metil ester reaksi transesterifikasi minyak jarak," *J. Beta Kim.*, vol. 1, no. 2, pp. 64–77, 2021, doi: 10.201185/jbk.v1i2.5583.
- [6] C. S. Singh and N. Kumar, "Role of co-solvent in the super critical esterification process of bio-diesel Production through Karanja oil," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1240, no. 1, p. 12159. doi: 10.1088/1742-6596/1240/1/012159.
- [7] A. Rajalingam, S. P. Jani, A. S. Kumar, M. A. Khan, and others, "Production methods of biodiesel," *J. Chem. Pharm. Res.*, vol. 8, no. 3, pp. 170–173, 2016.
- [8] C. Karaman, E. Bayram, O. Karaman, and Z. Aktaş, "Preparation of high surface area nitrogen doped graphene for the assessment of morphologic properties and nitrogen content impacts on supercapacitors," *J. Electroanal. Chem.*, vol. 868, p. 114197, 2020, doi: 10.1016/j.jelechem.2020.114197.
- [9] B. D. Argo and G. Gunarko, "Analisis energy produksi biodiesel dengan metode metanol super kritis," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 2, no. 1, pp. 39–45, 2011, doi: 10.21776/jrm.v2i1.115.
- [10] D. D. Chabukswar, P. K. K. S. Heer, and V. G. Gaikar, "Esterification of palm fatty acid distillate using heterogeneous sulfonated microcrystalline cellulose catalyst and its comparison with H₂SO₄ catalyzed reaction," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 52, no. 22, pp. 7316–7326, Jun. 2013, doi: 10.1021/ie303089u.
- [11] V. Amirthavalli, A. R. Warriar, and B. Gurunathan, "Various methods of biodiesel production and types of catalysts," *Biofuels and Bioenergy*, vol. 1, no. 1, pp. 111–132, 2022, doi: 10.1016/B978-0-323-85269-2.00020-4.
- [12] C. Caratelli, J. Hajek, F. G. Cirujano, M. Waroquier, F. X. Llabrés i Xamena, and V. Van Speybroeck, "Nature of active sites on UiO-66 and beneficial influence of water in the catalysis of Fischer esterification," *J. Catal.*, vol. 352, pp. 401–414, 2017, doi: 10.1016/j.jcat.2017.06.014.
- [13] D. P. Ningtyas, "Pengaruh katalis basa (NaOH) pada tahap reaksi transesterifikasi terhadap kualitas biofuel dari minyak tepung ikan sardin," *J. Teknosains*, vol. 2, no. 2, 2013, doi: 10.22146/teknosains.6000.
- [14] N. S. Topare *et al.*, "A Review on Application of Nano-Catalysts for Production of Biodiesel Using Different Feedstocks," in *Materials Today: Proceedings*, 2023, vol. 72, pp. 324–335. doi: 10.1016/j.matpr.2022.07.406.
- [15] Herman and W. Joetra, "Pengaruh Garam Dapur (NaCl) Terhadap Kembang Susut Tanah Lempung," Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Padang, 2015.