

1.

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia sebagai negara berpenduduk terbesar keempat di dunia terus mengalami peningkatan kebutuhan energi seiring pertumbuhan populasi, urbanisasi, dan penggunaan kendaraan yang semakin tinggi. Konsumsi energi nasional meningkat secara konsisten, terutama di sektor transportasi dan industri, karena aktivitas ekonomi yang semakin berkembang (Sari, 2025). Namun, ketergantungan Indonesia pada minyak bumi menghadirkan tantangan besar, sebab pasokan energi fosil dalam negeri terus menurun dan negara harus melakukan impor untuk memenuhi kebutuhan energi, yang berdampak pada defisit perdagangan. Selain itu, pemanfaatan energi fosil, terutama bahan bakar minyak, berkontribusi terhadap polusi udara dan emisi gas rumah kaca seperti CO_x, NO_x, dan SO_x, sehingga menimbulkan risiko kesehatan dan lingkungan. Untuk menghadapi kondisi ini, Indonesia perlu mempercepat peralihan menuju energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Transisi energi menjadi langkah penting guna mengurangi emisi, menekan ketergantungan pada sumber daya yang semakin menipis, serta memaksimalkan potensi energi terbarukan yang sebenarnya cukup besar namun belum dimanfaatkan secara optimal (Kharis dan Huda 2023).

Sebagai respons atas krisis energi fosil tersebut, pemerintah mulai mendorong pemanfaatan bahan bakar alternatif, salah satunya biodiesel. Biodiesel merupakan bahan bakar nabati yang diproduksi melalui reaksi transesterifikasi antara minyak nabati atau lemak hewani dengan alkohol (metanol atau etanol) menggunakan katalis tertentu. Produk ini memiliki sifat fisik dan kimia yang mendekati minyak solar, serta mampu menurunkan emisi gas berbahaya seperti karbon dioksida (CO₂) dan sulfur dioksida (SO₂). Selain itu, biodiesel juga bersifat mudah terurai, tidak beracun, dan dapat digunakan langsung pada mesin diesel tanpa modifikasi yang berarti (Kusumawati, D., 2024).

Di antara berbagai bahan baku yang dapat digunakan untuk memproduksi biodiesel ini, minyak kelapa sawit (*Crude palm oil/CPO*) merupakan yang paling

prospektif di Indonesia. Hal ini disebabkan oleh ketersediaan bahan baku yang melimpah, harga yang kompetitif, serta proses pengolahannya yang telah tersandarisi secara industri nasional. Indonesia saat ini termasuk produsen utama kelapa sawit dunia, dengan luas perkebunan yang terus meningkat setiap tahun. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik 2023, luas perkebunan kelapa sawit nasional meningkat dari 14,33 juta hektare pada tahun 2018 menjadi 15,93 juta hektare pada tahun 2023. Kondisi ini menegaskan bahwa Indonesia memiliki potensi besar untuk mengembangkan industri biodiesel berbasis kelapa sawit secara berkelanjutan (BPS, 2023).

Pemerintah Indonesia juga telah mengimplementasikan kebijakan program campuran biodiesel dengan solar (B35) sebagai bagian dari strategi transisi energi. Berdasarkan laporan Kementerian ESDM 2024, produksi biodiesel nasional telah mencapai 12,2 juta kiloliter, meningkat dibandingkan tahun sebelumnya. Program ini tidak hanya berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon, tetapi juga membantu penghematan devisa negara dan peningkatan nilai tambah sektor perkebunan kelapa sawit (Kementerian ESDM, 2024).

Meskipun demikian, proses produksi biodiesel masih memiliki beberapa kendala, terutama pada penggunaan katalis homogen (NaOH atau KOH) yang menimbulkan limbah cair dan meningkatkan biaya pemurnian produk. Oleh karena itu, pengembangan katalis heterogen alternatif yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Berdasarkan penelitian Rahmat & Primandari (2023), abu limbah boiler kelapa sawit mengandung senyawa basa seperti K_2O , CaO , dan Al_2O_3 sehingga berpotensi digunakan sebagai katalis heterogen dalam reaksi transesterifikasi. Penggunaan katalis ini terbukti mampu menghasilkan biodiesel dengan densitas 854–860 kg/m^3 dan viskositas 3,32–4,47 mm^2/s , yang seluruhnya telah memenuhi standar SNI biodiesel.

Pemanfaatan abu boiler sebagai katalis tidak hanya menekan biaya produksi, tetapi juga menjadi solusi dalam pengelolaan limbah industri sesuai prinsip ekonomi sirkular (*circular economy*). Dengan demikian, penggunaan limbah padat dari pabrik kelapa sawit sebagai katalis dapat memberikan nilai tambah baru sekaligus mengurangi dampak lingkungan.

Berdasarkan uraian di atas, maka perlu didirikan pabrik biodiesel di Indonesia untuk mendukung pemenuhan kebutuhan energi nasional. Adapun alasan penting pendirian pabrik biodiesel dari CPO dengan proses transesterifikasi menggunakan katalis abu boiler adalah:

2. Menyediakan alternatif bahan bakar terbarukan untuk mengurangi ketergantungan pada minyak bumi.
3. Meningkatkan pemanfaatan hasil dan limbah industri kelapa sawit.
4. Mendukung kebijakan pemerintah menuju *Net Zero Emission 2060*.
5. Mendorong pertumbuhan industri hijau yang berkelanjutan di Indonesia.

Dengan potensi bahan baku yang besar, dukungan kebijakan nasional, dan teknologi pemanfaatan limbah yang inovatif, pengembangan pabrik biodiesel ini menjadi langkah strategis dalam mewujudkan kemandirian energi nasional berbasis sumber daya terbarukan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan krisis energi fosil, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana biodiesel dapat menjadi bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan, bagaimana proses pembentukannya melalui reaksi transesterifikasi, serta bagaimana karakteristik dan keunggulannya dibandingkan dengan minyak solar dalam menurunkan emisi gas berbahaya.

1.3 Tujuan Pra Rancangan Pabrik

Prarancangan pabrik biodiesel ini bertujuan untuk mengaplikasikan kompetensi bidang teknik kimia, khususnya terkait operasi teknik kimia, instrumentasi proses, Pra Rancangan alat, dan Pra Rancangan proses pabrik. Melalui Pra Rancangan ini, diperoleh gambaran menyeluruh mengenai kelayakan teknis dan ekonomi pendirian pabrik biodiesel. Selain itu, Pra Rancangan ini ditujukan untuk mendukung penyediaan energi alternatif yang lebih berkelanjutan melalui pemanfaatan CPO sebagai bahan baku dan abu boiler sebagai katalis heterogen, sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada impor diesel serta meningkatkan nilai tambah limbah industri. Secara ekonomi dan sosial, pendirian

pabrik biodiesel ini juga diharapkan mampu membuka lapangan pekerjaan, mendorong pertumbuhan industri hijau, dan berkontribusi terhadap peningkatan kesejahteraan masyarakat.

1.4 Manfaat Pra Rancangan Pabrik

Adapun manfaat dari prarancangan pabrik biodiesel ini adalah:

1. Memberikan gambaran mengenai rancangan pabrik biodiesel dari *Crude palm oil* (CPO) dengan proses transesterifikasi menggunakan katalis abu boiler dengan kapasitas 400.000 ton/tahun.
2. Menjadi dasar untuk menilai kelayakan teknis dan ekonomis pendirian pabrik biodiesel tersebut.
3. Untuk membantu memenuhi kebutuhan bahan bakar diesel dalam negeri dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

1.5 Batasan Masalah

Prarancangan pabrik biodiesel ini dibatasi pada penggunaan bahan baku *Crude palm oil* (CPO) dengan proses transesterifikasi menggunakan katalis abu boiler, serta difokuskan pada Pra Rancangan proses yang direpresentasikan melalui simulasi menggunakan Aspen HYSYS dan penyusunan diagram P&ID. Selain itu, kapasitas pabrik ditetapkan sebesar 400.000 ton/tahun, yang berada dalam kisaran kapasitas pabrik biodiesel skala besar di Indonesia (>300.000 ton/tahun), sehingga dinilai realistis dengan mempertimbangkan total kapasitas nasional yang telah mencapai lebih dari 13 juta ton/tahun serta meningkatnya kebutuhan biodiesel akibat kebijakan mandatori (B35–B40) (APROBI, 2025).

1.6 Ketersediaan Bahan Baku

Berdasarkan Gambar 1.1 tersebut, wilayah Kalimantan khususnya Kalimantan Timur, Kalimantan Barat, dan Kalimantan Tengah termasuk kawasan dengan areal perkebunan kelapa sawit terbesar di Indonesia, yaitu masing-masing seluas 1,31 juta hektare, 2,02 juta hektare, dan 1,82 juta hektare. Kondisi ini menunjukkan bahwa ketersediaan bahan baku CPO di Kalimantan sangat melimpah

dan mendukung pendirian pabrik biodiesel di wilayah tersebut (BPS, 2021)



Gambar 1.1 Peta Sebaran Produksi Kelapa Sawit Indonesia Tahun 2021(BPS, 2021)

Bahan baku utama untuk pembuatan biodiesel adalah *Crude palm oil* (CPO), metanol (CH_3OH), serta katalis abu boiler. CPO dan abu boiler sebagai katalis diperoleh dari PT Kutai Refinery Nusantara (KRN) yang berlokasi di Kelurahan Kariangau, Kecamatan Balikpapan Barat, Kota Balikpapan, Kalimantan Timur. PT KRN merupakan salah satu pabrik pengolahan minyak sawit terbesar di Kalimantan Timur dengan kapasitas olahan CPO mencapai lebih dari 1.500–3.000 ton per hari, sehingga ketersediaan bahan baku dapat terjamin secara berkelanjutan.

Sementara itu, metanol (CH_3OH) diperoleh dari PT Kaltim Methanol Industri (KMI) yang berlokasi di Kota Bontang, Kalimantan Timur, dengan kapasitas produksi sebesar 660.000 ton per tahun. Kedekatan lokasi kedua pemasok bahan baku tersebut mendukung efisiensi logistik dan keberlanjutan operasi pabrik biodiesel yang akan dibangun di wilayah Kalimantan Timur yang direncanakan dapat dibangun di wilayah Kabupaten Penajam Paser Utara. Untuk mendukung analisis ketersediaan CPO, dapat dilihat pada gambar 1.7 yang menampilkan peta luas areal perkebunan kelapa sawit Indonesia tahun 2021.

1.7 Penentuan Kapasitas Pabrik dan Ekstrapolasi

Penentuan kapasitas pabrik biodiesel didasarkan pada tren kebutuhan biodiesel nasional yang terus meningkat setiap tahunnya, baik untuk sektor

transportasi maupun industri. Berdasarkan perkembangan konsumsi biodiesel serta potensi ketersediaan bahan baku CPO di Indonesia, kapasitas produksi yang dipilih harus memenuhi kebutuhan pasar sekaligus memberikan efisiensi ekonomi yang optimal. Selain itu, kapasitas pabrik juga perlu berada di atas atau minimal setara dengan kapasitas pabrik biodiesel yang telah beroperasi secara ekonomis.

1.7.1 Data Konsumsi Biodiesel di Indonesia

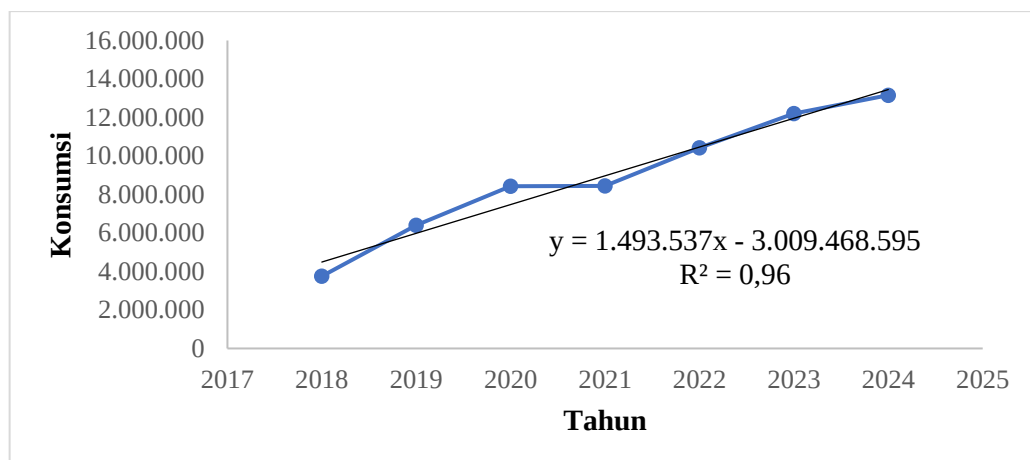
Peningkatan kebutuhan energi yang lebih ramah lingkungan mendorong Indonesia untuk memperluas pemanfaatan biodiesel sebagai salah satu sumber energi terbarukan. Berdasarkan data dari Asosiasi Produsen *Biofuel* Indonesia (APROBI), data konsumsi biodiesel di Indonesia dari tahun 2018-2024 dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Data Konsumsi Biodiesel di Indonesia

Tahun	Konsumsi (kL)
2018	3.750.980
2019	6.393.600
2020	8.426.829
2021	8.439.840
2022	10.418.000
2023	12.200.000
2024	13.156.000

(Sumber: APROBI, 2025)

Konsumsi biodiesel di Indonesia menurut data APROBI pada tahun 2018-2024 terlihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.2 Grafik Konsumsi Biodiesel di Indonesia

Berdasarkan Gambar 1.2, perkembangan konsumsi biodiesel terus mengalami kenaikan dari tahun 2018 sebesar 3.750.980 kL hingga tahun 2024 sebesar 13.156.000 kL. Dari grafik dengan metode regresi linear, maka didapat persamaan sebagai berikut:

$$y = 1.493.537x - 3.009.468.595$$

Keterangan:

x = Tahun

y = Kebutuhan

Produksi pabrik biodiesel ini direncanakan beroperasi pada tahun 2030, sehingga untuk mencari kebutuhan volume konsumsi biodiesel pada tahun 2030, maka:

$$x = 2030$$

$$y = 1.493.537x - 3.009.468.595$$

$$y = y = 1.493.537(2030) - 3.009.468.595$$

$$y = 22.411.515 \text{ kL/tahun}$$

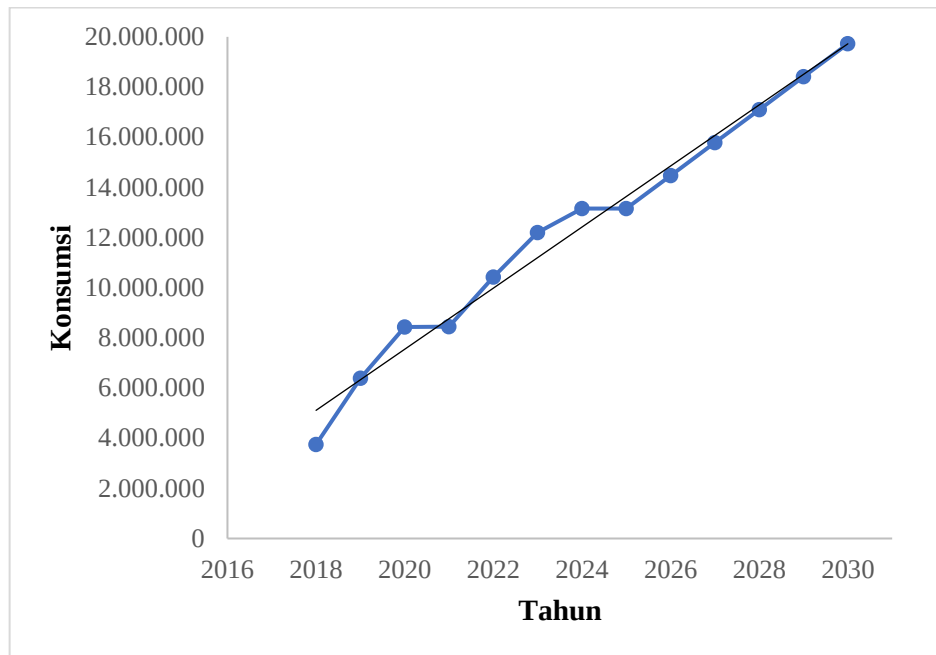
$$y = 19.722.133,2 \text{ ton/tahun}$$

Sehingga diperkirakan kebutuhan produksi biodiesel pada tahun 2030 adalah sebesar 19.722.133,2 ton/tahun, dengan tabel konsumsi sebagai berikut:

Tabel 1.2 Prediksi Data Konsumsi Biodiesel di Indonesia tahun 2030

Tahun	Konsumsi (kL)
2018	3.750.980
2019	6.393.600
2020	8.426.829
2021	8.439.840
2022	10.418.000
2023	12.200.000
2024	13.156.000
2025	13.150.570,4
2026	14.464.882,96
2027	15.779.195,52
2028	17.093.508,08
2029	18.407.820,64
2030	19.722.133,2

Berikut Grafik Prediksi Data Konsumsi Biodiesel di Indonesia dari tahun 2018 sampai 2030 dapat dilihat pada Gambar 1.3



Gambar 1.3 Grafik Prediksi Konsumsi Biodiesel di Indonesia

1.7.2 Data Produksi Biodiesel

Berdasarkan data yang didapat dari Asosiasi Produsen *Biofuel* Indonesia (APROBI), berikut ini adalah data produksi biodiesel dari tahun 2018-2024 dapat dilihat pada Tabel 1.3.

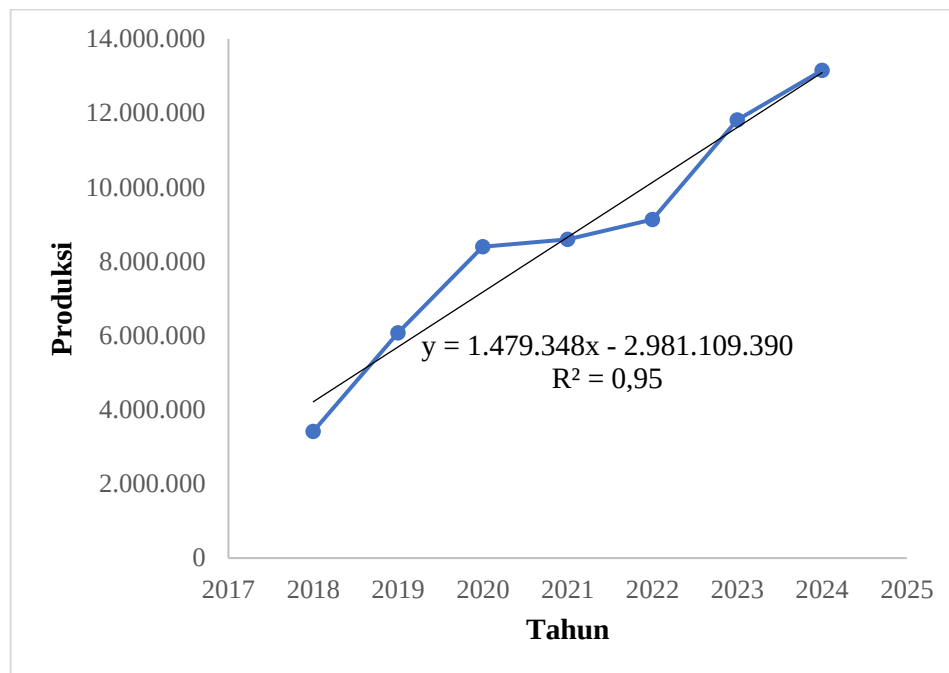
Tabel 1.3 Data Produksi Biodiesel di Indonesia

Tahun	Produksi (kL)
2018	6.069.312
2019	8.399.616
2020	8.591.496
2021	9.125.980
2022	11.816.000
2023	13.150.000
2024	13.929.037

(Sumber: APROBI, 2025)

Produksi biodiesel di Indonesia menurut data APROBI (2025) pada tahun 2018-2024) dapat dilihat pada Gambar 1.4

Berdasarkan Gambar 1.4 perkembangan produksi biodiesel terus mengalami kenaikan dari tahun 2018 sebesar 6.069.312 kL hingga tahun 2024 sebesar 13.929.037 kL.



Gambar 1.4 Grafik Produksi Biodiesel di Indonesia

Dari grafik pada gambar 1.4 dengan metode regresi linear, maka didapat persamaan:

$$y = 1.479.348x - 2.981.109.390$$

Keterangan:

x = Tahun

y = Kebutuhan

Pabrik biodiesel ini direncanakan beroperasi pada tahun 2030, sehingga untuk mencari kebutuhan volume produksi biodiesel pada tahun 2030, maka:

$$x = 2030$$

$$y = 1.479.348x - 2.981.109.390$$

$$y = 1.479.348(2030) - 2.981.109.390$$

$$y = 21.967.050 \text{ kL/tahun}$$

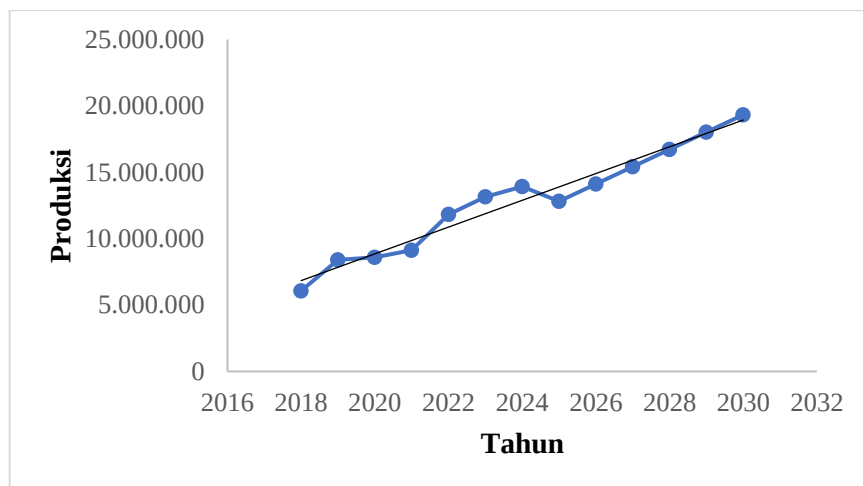
$$y = 19.331.004 \text{ ton/tahun}$$

Didapatkan hasil sekitar 19.331.004 ton/ tahun sehingga diperkirakan kebutuhan produksi biodiesel pada tahun 2030 adalah sebesar 19.331.004 ton/tahun, dengan Prediksi Data Produksi Biodiesel di Indonesia tahun 2030 dapat dilihat pada tabel 1.4 berikut:

Tabel 1.4 Prediksi Data Produksi Biodiesel di Indonesia tahun 2030

Tahun	Produksi (kL)
2018	6.069.312
2019	8.399.616
2020	8.591.496
2021	9.125.980
2022	11.816.000
2023	13.150.000
2024	13.929.037
2025	12.821.872,8
2026	14.123.699,04
2027	15.425.525,28
2028	16.727.351,52
2029	18.029.177,76
2030	19.331.004

Berikut Grafik Prediksi Data Produksi Biodiesel di Indonesia dari tahun 2018 sampai 2030 dapat dilihat pada Gambar 1.5



Gambar 1.5 Grafik Prediksi Produksi Biodiesel di Indonesia

Penentuan kapasitas dapat ditentukan dengan pertimbangan data perkiraan konsumsi biodiesel di Indonesia pada tahun 2030 sebesar 17.119.721,71 ton dan perkiraan produksi biodiesel di Indonesia pada tahun 2030 sebesar 16.720.616,28 ton. Maka untuk itu penentuan kapasitas Pra Rancangan pabrik biodiesel pada tahun 2030 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Kapasitas Pra Rancangan} &= \text{Konsumsi} - \text{Produksi} \\
 &= 19.722.133,2 - 19.331.004 \text{ ton/tahun} \\
 &= 391.129,2 \text{ ton/tahun}
 \end{aligned}$$

Maka dalam hal ini Pra Rancangan pabrik biodiesel proses transesterifikasi adalah sebesar 400.000 ton/tahun. Pada Tabel 1.5 dan 1.6 ditunjukkan pabrik biodiesel yang telah berdiri di dunia dan di Indonesia.

Tabel 1.5 Pabrik Biodiesel di Indonesia

Pabrik	Kapasitas (Ton/Tahun)
PT. Batara Elok Semesta Terpadu	679.000
PT. Bayas Biofuels	750.000
PT. Ciliandra Perkasa	250.000
PT. Darmex Biofuels	250.000
PT. Energi Unggul Persada	792.000
PT. Intibenua Perkasatama	385.000
PT. Jhonlin Agro Jaya	495.000
PT. Kutai Refinery Nusantara	990.000
PT. Multi Nabati Sulawesi	414.000
PT. Multimas Nabati Asahan	495.000
PT. Musim Mas (Medan)	400.000
PT. Musim Mas (Batam)	780.000
PT. Pelita Agung Agrindustri	695.000
PT. Permata Hijau Palm Oleo	363.000
PT. Sinarmas Bio Energy	396.198
PT. Smart, Tbk	985.500
PT. Sukajadi Sawit Mekar	350.000
PT. Tunas Baru Lampung, Tbk	875.000
PT. Wilmar Bioenergi Indonesia	1.395.000
PT. Wilmar Nabati Indonesia	1.975.500
Total	13.715.198

(Sumber: APROBI, 2025)

Berdasarkan Tabel 1.5, dapat dilihat bahwa kapasitas pabrik biodiesel di Indonesia didominasi oleh pabrik berskala besar dengan kapasitas di atas 300.000 ton per tahun. Dengan total kapasitas nasional yang mencapai lebih dari 13 juta ton per tahun, Pra Rancangan pabrik biodiesel sebesar 400.000 ton/tahun masih berada dalam kisaran kapasitas pabrik yang telah beroperasi di Indonesia dan dinilai realistis untuk mendukung kebutuhan biodiesel nasional akibat kebijakan mandatori biodiesel yang terus meningkat (B35–B40) (APROBI,2025).

Berdasarkan Tabel 1.6, pabrik biodiesel berskala besar masih terkonsentrasi di beberapa negara seperti Brazil, Germany, China dan Argentina sementara distribusi kapasitas produksi belum merata secara global. Kondisi ini menunjukkan adanya peluang pendirian pabrik biodiesel baru.

Tabel 1.6 Pabrik Biodiesel di Dunia

Tahun	Kapasitas (Ton/Tahun)			
	Brazil	Germany	China	Argentina
2018	4.892.653	3.073.423	1.046.527	1.557.198
2019	5.320.127	3.290.422	1.240.470	1.674.663
2020	5.551.154	3.206.945	1.419.127	1.450.105
2021	6.040.914	3.172.739	1.612.839	1.723.145
2022	5.948.970	3.118.668	2.137.825	1.908.068
2023	6.599.785	3.191.415	2.324.340	2.032.525
2024	7.904.915	3.227.171	2.462.278	2.104.046
2025	8.407.672	3.252.774	2.697.495	2.195.227
2026	8.909.430	3.278.377	2.933.272	2.286.408
2027	9.411.147	3.303.980	3.167.650	2.377.589
2028	9.912.945	3.329.583	3.403.427	2.468.770
2029	10.414.702	3.355.186	3.639.204	2.559.951
2030	10.916.460	3.380.789	3.874.981	2.651.132

(Sumber: The Global Economy.com, 2024)

1.8 Seleksi Pemilihan Proses

Minyak nabati perlu diolah sebelum dijadikan biodiesel karena penggunaan langsung dapat menimbulkan masalah teknis seperti penyumbatan dan penurunan performa mesin. Proses pengolahan yang umum melibatkan dua reaksi utama yaitu esterifikasi dengan katalis asam dan transesterifikasi dengan katalis basa, sehingga kualitas dan kinerjanya sesuai standar.

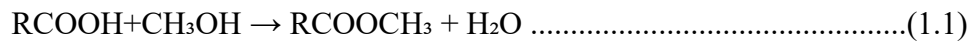
1.8.1 Esterifikasi

Esterifikasi merupakan tahap awal pengolahan minyak nabati dengan kadar asam lemak bebas (ALB) tinggi, di mana asam lemak direaksikan dengan alkohol menggunakan katalis asam seperti H_2SO_4 untuk membentuk metil ester dan air. Proses ini biasanya dilakukan pada kondisi operasi sekitar 60°C dengan tekanan 1 atm menggunakan reaktor. Meskipun efektif, esterifikasi sudah jarang digunakan secara luas karena katalis asam yang bersifat korosif dan laju reaksi yang relatif lambat. Selain itu, konversi dan kemurnian yang dihasilkan masih tergolong rendah, sehingga produk hasil esterifikasi tetap harus diproses lebih lanjut sebelum dapat digunakan atau dijual.

a. Reaksi Kimia

Berikut adalah reaksi esterifikasi yang terjadi antara asam lemak bebas dan

metanol:

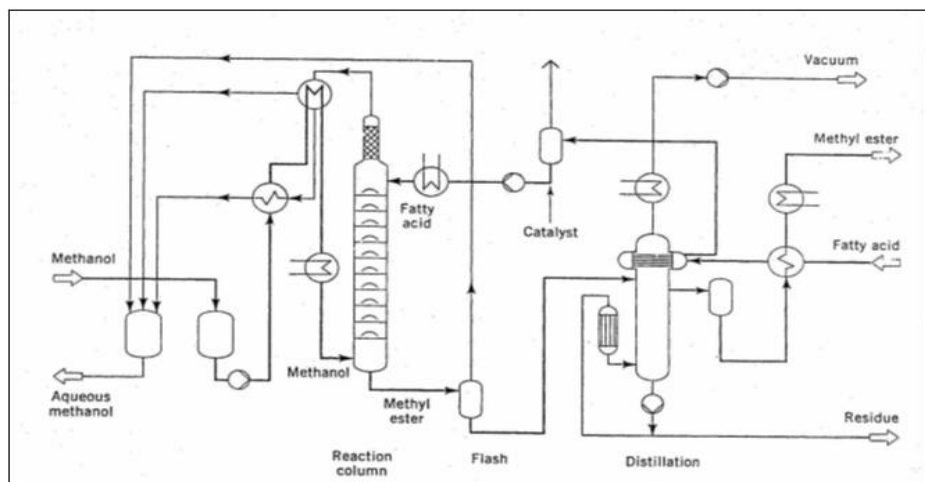


Asam lemak + Metanol → Metil Ester + Air

(Hayati, 2025)

b. *Flowsheet* Dasar

Flowsheet dasar proses esterifikasi pada Gambar 1.6 menggambarkan rangkaian utama pengolahan asam lemak menjadi metil ester melalui reaksi dengan metanol menggunakan katalis. Diagram ini disusun untuk menunjukkan alur masuk bahan baku, tahapan reaksi, pemisahan, serta pemurnian produk secara garis besar.



Gambar 1.6 *Flowsheet* Dasar Proses Esterifikasi (Bailey's Book, 1996)

Berdasarkan Gambar 1.6 proses esterifikasi diawali dengan umpan asam lemak dan metanol yang dialirkan ke kolom reaksi. Di dalam kolom tersebut terjadi reaksi esterifikasi dengan bantuan katalis sehingga terbentuk metil ester dan air sebagai produk samping. Hasil reaksi kemudian dialirkan ke unit flash dan distilasi untuk memisahkan metil ester dari metanol, katalis, dan residu. Metanol yang tidak bereaksi dipisahkan dan *direcycle* kembali ke proses, sedangkan metil ester diperoleh sebagai produk utama.

c. Uraian Proses

Secara umum, esterifikasi dilakukan dengan mereaksikan FFA dalam CPO dengan metanol menggunakan katalis asam sulfat (H_2SO_4). Reaksi ini berlangsung pada suhu sekitar 60–65°C dan tekanan atmosferik (1 atm), baik secara batch maupun kontinyu. Kondisi ini dipilih karena mendekati titik didih metanol sehingga

meningkatkan laju reaksi tanpa kehilangan metanol yang signifikan (Harahap dkk., 2021). Proses pembuatan biodiesel dibagi menjadi tiga tahap, yaitu:

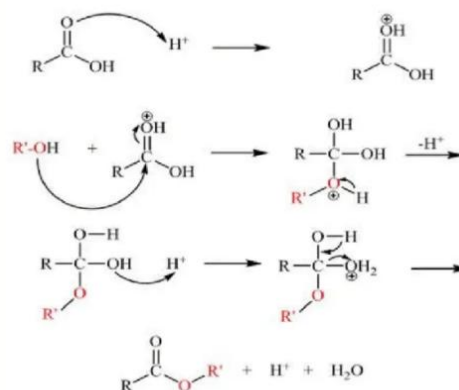
1. Tahapan Persiapan Bahan Baku

Langkah pertama dalam proses pembuatan biodiesel adalah persiapan bahan baku. Bahan baku utama yang digunakan yaitu *Crude palm oil* (CPO), metanol (CH_3OH), dan katalis asam sulfat (H_2SO_4). CPO disimpan dalam heated storage tank pada suhu sekitar $40\text{--}50^\circ\text{C}$ untuk menjaga viskositas tetap rendah dan mencegah pembekuan. Metanol disimpan dalam tangki tertutup pada kondisi suhu ruang dan tekanan atmosferik untuk menghindari penguapan, sedangkan H_2SO_4 disimpan dalam tangki khusus yang tahan terhadap korosi.

Sebelum masuk ke reaktor, CPO dan metanol dipompa menuju heat exchanger untuk dipanaskan hingga suhu reaksi ($60\text{--}65^\circ\text{C}$). Setelah itu, kedua aliran dicampurkan dengan katalis H_2SO_4 di dalam mixer. Rasio molar metanol terhadap FFA biasanya dibuat berlebih, berkisar antara 6:1 hingga 9:1, untuk menggeser kesetimbangan reaksi ke arah pembentukan produk (metil ester) karena reaksi bersifat reversibel (Atadashi et al., 2019)..

2. Pembentukan Produk

Reaksi esterifikasi berlangsung di dalam reaktor, umumnya menggunakan Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) karena sistem reaksi berupa cair-cair yang membutuhkan pencampuran intensif. Reaksi terjadi pada Gambar 1.7:



Gambar 1.7 Mekanisme Esterifikasi Pada Katalis Asam (Rahman.,2014)

Berdasarkan gambar 1.7 reaksi Esterifikasi dengan Katalis H_2SO_4 berperan dalam meningkatkan laju reaksi dengan cara memprotonasi gugus karbonil dari

FFA, sehingga lebih mudah bereaksi dengan metanol. Reaksi ini bersifat reversibel, sehingga keberadaan air sebagai produk samping dapat menurunkan konversi jika tidak dikendalikan. Oleh karena itu, penggunaan metanol berlebih dan pengadukan yang baik menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi reaksi. Reaktor biasanya dilengkapi dengan agitator untuk meningkatkan perpindahan massa dan jaket pemanas untuk menjaga suhu tetap konstan selama proses berlangsung (Yaakob et al., 2021).

3. Pemisahan Produk

Tahap pemisahan produk bertujuan untuk memperoleh biodiesel dengan kemurnian tinggi. Tahap awal pemisahan dilakukan menggunakan *decanter* atau pemisahan gravitasi untuk memisahkan fase air dari fase organik (minyak + metil ester). Hal ini dimungkinkan karena adanya perbedaan densitas antara fase air dan fase organik. Pemisahan air sangat krusial karena keberadaan air dapat menghambat reaksi lanjutan, menurunkan konversi, serta menyebabkan reaksi samping seperti hidrolisis. Proses pemisahan ini umumnya dilakukan melalui *decantation* atau *centrifugation* dalam industri biodiesel (Spanou dkk., 2024).

Setelah pemisahan fase, campuran masih mengandung metanol berlebih yang tidak bereaksi. Metanol ini kemudian dipisahkan menggunakan kolom distilasi. Proses distilasi bertujuan untuk mengambil kembali metanol (*recovery*), mengurangi kandungan alkohol dalam produk dan meningkatkan efisiensi ekonomi melalui *recycle*. Penggunaan distilasi sebagai metode pemisahan metanol merupakan teknik umum dalam proses biodiesel, baik pada tahap esterifikasi maupun transesterifikasi (Machado dkk., 2022).

Setelah pemisahan metanol, produk masih dapat mengandung sisa katalis, air dalam jumlah kecil dan impuritas lainnya. Tahap pemurnian lanjutan dapat dilakukan melalui *washing* (*wet/dry washing*), adsorpsi dan membrane separation (teknologi modern). Metode pemurnian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas biodiesel serta memenuhi standar bahan bakar (Camilo dkk., 2024).

Hasil akhir dari proses esterifikasi adalah minyak dengan kadar FFA yang telah menurun hingga kurang dari $\pm 1\%$. Proses esterifikasi efektif sebagai tahap pretreatment untuk bahan baku dengan FFA tinggi seperti CPO, sehingga

meningkatkan efisiensi keseluruhan produksi biodiesel (Naseef dkk., 2025).

d. Uji Ekonomi Awal

Analisa biaya ekonomi awal pada pembuatan biodiesel dengan proses esterifikasi dapat dilihat pada Tabel 1.7 di bawah ini:

Tabel 1.7 Analisa Ekonomi Awal Proses Esterifikasi

Bahan yang Digunakan	BM (gr/mol)	Harga Rp/kg
Bahan baku		
1. CPO	847,28	13.775
2. Metanol	32,04	6.192
Katalis		
1. Asam Sulfat	98,08	7.800
Produk		
1. Biodiesel	296,49	14.036

Bahan Baku

- CPO = $847,28 \text{ gr/mol} \times 1 \text{ kg}/1000 \text{ gr} \times \text{Rp. } 13.775$
= Rp. 11.672
- Metanol = $32,04 \text{ gr/mol} \times 1 \text{ kg}/1000 \text{ gr} \times \text{Rp. } 6.192$
= Rp. 198,39
- Asam Sulfat = $98,08 \text{ gr/mol} \times 1 \text{ kg}/1000 \text{ gr} \times \text{Rp. } 7.800$
= Rp. 765

Total Biaya Bahan Baku = Rp. 12.635

Produk

- Biodiesel = $296,49 \text{ gr/mol} \times 1 \text{ kg}/1000 \text{ gr} \times \text{Rp. } 14.036$
= Rp. 4.161

Keuntungan

- Laba = Rp. 4.161- Rp. 12.635
= Rp. -8.474

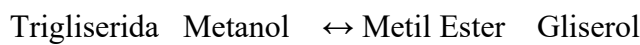
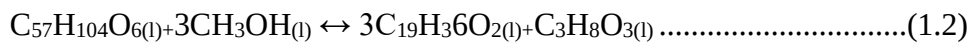
1.8.2 Transesterifikasi

Transesterifikasi adalah tahap utama produksi biodiesel, di mana trigliserida dalam minyak nabati direaksikan dengan alkohol, untuk membentuk metil ester (biodiesel) dan gliserol sebagai produk samping. Proses ini berlangsung pada sekitar 60°C dan 1 atm menggunakan reaktor, dengan katalis basa seperti NaOH atau KOH yang reaktif, non-korosif, dan mampu menghasilkan konversi serta *yield*

tinggi dalam waktu relatif singkat (30–60 menit). Katalis heterogen seperti CaO, Ba (OH)₂, atau material berbasis *fly ash* juga sering digunakan karena mudah dipisahkan, dapat digunakan kembali, dan tidak menimbulkan korosi. Transesterifikasi sangat sensitif terhadap kemurnian reaktan, sehingga kualitas bahan baku dan alkohol mempengaruhi efisiensi reaksi dan hasil biodiesel.

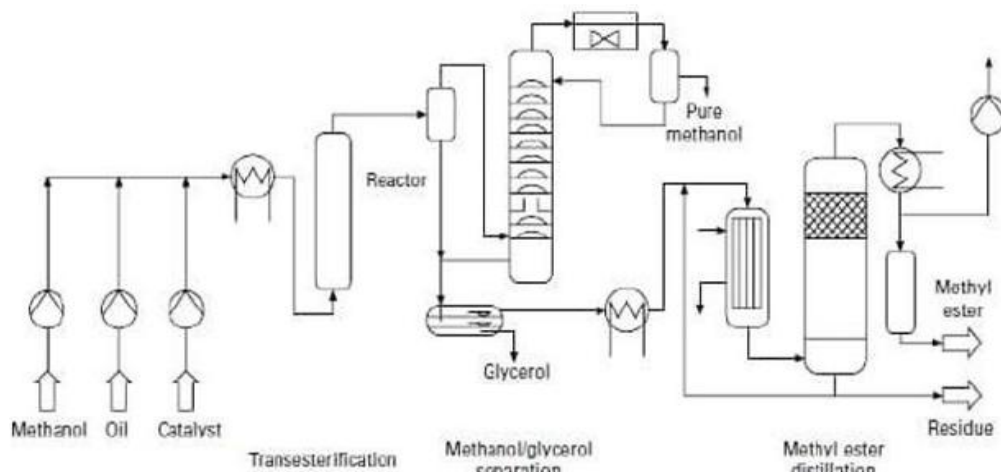
a. Reaksi Kimia

Berikut ini adalah reaksi transesterifikasi trigliserida menjadi metil ester:



(Hayati, 2025)

b. Flowsheet Dasar



Gambar 1.8 Flowsheet Dasar Proses Transesterifikasi (Bailey’s Book, 1996)

Flowsheet dasar proses transesterifikasi disusun untuk menggambarkan tahapan utama konversi minyak nabati menjadi biodiesel. Diagram ini menunjukkan aliran bahan baku utama berupa minyak, metanol, dan katalis, serta unit operasi yang berperan dalam reaksi, pemisahan produk, dan pemurnian biodiesel.

Berdasarkan Gambar 1.8, proses transesterifikasi diawali dengan pencampuran minyak, metanol, dan katalis yang kemudian dialirkan ke dalam reaktor untuk menghasilkan metil ester dan gliserol. Campuran hasil reaksi selanjutnya dipisahkan pada unit pemisahan metanol dan gliserol, di mana metanol

yang tidak bereaksi dimurnikan dan *direcycle* kembali ke proses. Tahap akhir dilakukan melalui distilasi metil ester untuk memperoleh biodiesel sebagai produk utama, sedangkan residu dialirkan keluar sebagai produk samping.

c. Uraian Proses

Pada proses produksi biodiesel dengan menggunakan reaksi transesterifikasi ini, digunakan bahan baku minyak kelapa sawit (CPO) yang direaksikan dengan metanol menggunakan katalis heterogen berbasis abu boiler yang telah diaktivasi. Proses berlangsung pada suhu 65°C dan tekanan 1 atm secara kontinyu. Proses pembuatan biodiesel dibagi menjadi tiga tahap, yaitu:

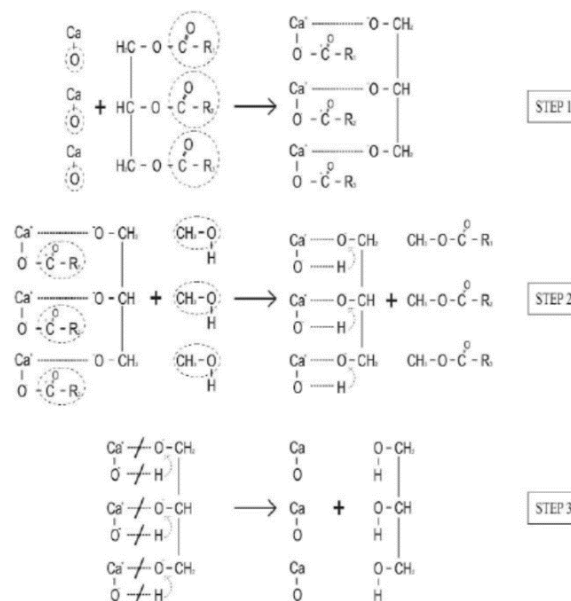
1. Tahapan Persiapan Bahan Baku

Langkah pertama dalam proses pembuatan biodiesel adalah persiapan bahan baku. Bahan baku utama yang digunakan yaitu *Crude palm oil* (CPO), metanol (CH_3OH), dan katalis heterogen abu boiler. Ketiga bahan ini disimpan pada fasilitas *raw material storage* sesuai dengan karakteristik masing-masing.

CPO disimpan di dalam heated storage tank yang dilengkapi sistem pemanas berbasis *steam* atau *hot oil*. Pemanas ini diperlukan untuk menjaga suhu CPO pada kisaran 40–50°C agar tetap berada dalam fase cair dan mencegah pembentukan padatan selama penyimpanan. Metanol disimpan pada tangki tertutup dalam fase cair pada suhu sekitar 30°C dan tekanan 1 atm. Sementara itu, katalis abu boiler sebagai material padat disimpan di gudang penyimpanan padatan (*solid catalyst warehouse*). Sebelum masuk ke reaktor, CPO dan metanol masing-masing dipompa menuju *heat exchanger* untuk dinaikkan suhunya hingga 65°C, sesuai dengan kondisi operasi reaktor. Setelah mencapai suhu operasi, kedua aliran cairan dipompakan ke reaktor untuk memulai proses reaksi. Perbandingan metanol dengan CPO adalah 1:3.

2. Pembentukan Produk

Reaksi pembuatan biodiesel adalah proses reaksi transesterifikasi, dimana proses ini dilakukan dengan menggunakan *Plug Flow Reactor* (PFR) dengan suhu operasi 65°C dan tekanan 1 atm. Reaksi yang terjadi seperti pada Gambar 1.9:



Gambar 1.9 Mekanisme Transesterifikasi Pada Katalis Heterogen (Putra dkk.,2018)

Berdasarkan gambar 1.9 reaksi transesterifikasi dengan katalis heterogen CaO berlangsung melalui tiga tahap utama, yaitu adsorpsi dan aktivasi trigliserida pada permukaan katalis, aktivasi metanol membentuk ion metoksida sebagai spesies aktif, serta pembentukan metil ester dan gliserol disertai regenerasi katalis.

Katalis heterogen berupa abu boiler berbentuk *powder* ditempatkan di dalam pipa reaktor sehingga aliran campuran CPO dan metanol melewati bed katalis secara kontinyu. Mekanisme aliran *plug flow* menyebabkan reaktan mengalami peningkatan konversi seiring bertambahnya panjang reaktor. Reaksi ini bersifat eksotermis, sehingga reaktor dilengkapi dengan jaket pendingin untuk mempertahankan suhu operasi tetap pada 65°C selama proses berlangsung. Aliran *plug flow* memberikan distribusi waktu tinggal merata sehingga perpindahan panas dan massa berlangsung optimal dan efisiensi konversi biodiesel dapat tercapai.

3. Pemisahan Produk

Tahap pemisahan produk bertujuan untuk memperoleh biodiesel dengan kemurnian tinggi. Produk dari reaktor dialirkan ke Kolom Distilasi I untuk pemisahan awal. Pada kolom ini diperoleh produk atas berupa campuran biodiesel, metanol, dan gliserol yang dialirkan ke Kolom Distilasi II, sedangkan produk

bawah berupa trigliserida dialirkan ke unit recovery trigliserida. Kolom Distilasi II menerima umpan dari produk atas Distilasi I dan beroperasi dengan sistem *refluks* untuk memisahkan komponen berdasarkan perbedaan volatilitas. Hasil pemisahan berupa metanol sebagai produk atas yang dialirkan ke unit recovery metanol, gliserol sebagai produk tengah, dan biodiesel sebagai produk bawah. Biodiesel kemudian dialirkan ke tangki penyimpanan dengan kemurnian sekitar 99%, sedangkan gliserol diperoleh sebagai produk samping dengan kemurnian 98%.

d. Uji Ekonomi

1. Katalis Homogen

Awal Analisa biaya ekonomi awal pada pembuatan biodiesel dengan proses transesterifikasi katalis homogen dapat dilihat pada Tabel 1.8 di bawah ini:

Tabel 1.8 Analisa Ekonomi Awal Proses Transesterifikasi

Bahan yang Digunakan	BM (gr/mol)	Harga Rp/kg
Bahan baku		
1. CPO	847,28	13.775
2. Metanol	32,04	6.192
Katalis		
1. NaOH	40	18.000
Produk		
1. Biodiesel	296,49	14.036
2. Gliserol	92,093	109.998

Bahan Baku

- CPO = $847,28 \text{ gr/mol} \times 1 \text{ kg}/1000 \text{ gr} \times \text{Rp. } 13.775$
= Rp. 11.672
- Metanol = $32,04 \text{ gr/mol} \times 1 \text{ kg}/1000 \text{ gr} \times \text{Rp. } 6.192$
= Rp. 198,39
- NaOH = $40 \text{ gr/mol} \times 1 \text{ kg}/1000 \text{ gr} \times \text{Rp. } 18.000$
= Rp. 720

Total Biaya Bahan Baku = Rp. 12.590

Produk

- Biodiesel = $296,49 \text{ gr/mol} \times 1 \text{ kg}/1000 \text{ gr} \times \text{Rp. } 14.036$
= Rp. 4.161
- Gliserol = $92,093 \text{ gr/mol} \times 1 \text{ kg}/1000 \text{ gr} \times \text{Rp. } 109.998$
= Rp. 10.130

Total Produk = Rp. 14.291

Keuntungan

- Laba = Rp. 14.291 - Rp. 12.590
= Rp. 1.701

2. Katalis Heterogen

Analisa biaya ekonomi awal pada pembuatan biodiesel dengan proses transesterifikasi katalis heterogen dapat dilihat pada Tabel 1.9 di bawah ini:

Tabel 1.9 Analisa Ekonomi Awal dengan Katalis Heterogen

Bahan yang Digunakan	BM (gr/mol)	Harga Rp/kg
Bahan baku		
1. CPO	847,28	13.775
2. Metanol	32,04	6.192
Katalis		
1. Abu Boiler	94,20	2.500
Produk		
3. Biodiesel	296,49	14.036
Gliserol	92,093	109.998

Bahan Baku

- CPO = $847,28 \text{ gr/mol} \times 1 \text{ kg/1000 gr} \times \text{Rp. } 13.775$
= Rp. 11.672
- Metanol = $32,04 \text{ gr/mol} \times 1 \text{ kg/1000 gr} \times \text{Rp. } 6.192$
= Rp. 198,39
- Abu Boiler = $94,20 \text{ gr/mol} \times 1 \text{ kg/1000 gr} \times \text{Rp. } 2.500$
= Rp. 235

Total Biaya Bahan Baku = Rp. 12.105

Produk

- Biodiesel = $296,49 \text{ gr/mol} \times 1 \text{ kg/1000 gr} \times \text{Rp. } 14.036$
= Rp. 4.161
- Gliserol = $92,093 \text{ gr/mol} \times 1 \text{ kg/1000 gr} \times \text{Rp. } 109.998$
= Rp. 10.130

Total Produk = Rp. 14.291

Keuntungan

- Laba = Rp. 14.291 - Rp. 12.105
= Rp. 2.186

1.8.3 Tabel perbandingan proses dan Analisa ekonomi awal

Dalam Pra Rancangan pabrik biodiesel, pemilihan metode proses merupakan aspek penting karena berpengaruh terhadap kondisi operasi, efisiensi reaksi, serta kualitas produk yang dihasilkan. Oleh karena itu, dilakukan perbandingan antara metode transesterifikasi dan esterifikasi untuk menentukan proses yang paling sesuai diterapkan dapat dilihat pada Tabel 1.10.

Tabel 1.10 Perbandingan Metode dalam Pembuatan Biodiesel

Perbandingan	Transesterifikasi	Esterifikasi
Suhu	50–65°C	60°C
Tekanan	1 atm	1 atm
Bahan Baku	Minyak Nabati	Minyak Nabati
Konversi	> 95%	90%
Waktu Reaksi	30–60 menit	±1 jam
Aspek Lingkungan	Produk samping berupa gliserol dan dapat dimanfaatkan kembali	Produk samping berupa air

(Sumber: Dimawarnita, 2021)

Berdasarkan Tabel 1.10, metode transesterifikasi memiliki keunggulan dibandingkan esterifikasi, terutama dari segi suhu operasi yang lebih rendah, waktu reaksi yang lebih singkat, serta konversi reaksi yang lebih tinggi. Selain itu, produk samping berupa gliserol masih memiliki nilai ekonomis, sehingga metode ini lebih menguntungkan untuk diterapkan dalam produksi biodiesel skala industri.

Selain pemilihan metode proses, jenis katalis yang digunakan juga sangat mempengaruhi efisiensi reaksi, kemudahan pemisahan, serta dampak lingkungan. Katalis yang umum digunakan dalam proses biodiesel adalah katalis homogen dan katalis heterogen, yang masing-masing memiliki karakteristik berbeda. Perbandingan keduanya dapat dilihat pada Tabel 1.11.

Berdasarkan Tabel 1.11, katalis heterogen memiliki keunggulan dalam hal kemudahan pemisahan, kemampuan untuk digunakan kembali, serta dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan katalis homogen. Oleh karena itu, penggunaan katalis heterogen dinilai lebih sesuai untuk mendukung proses transesterifikasi yang efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

Tabel 1.11 Perbandingan Penggunaan Katalis Homogen serta Katalis Heterogen

Jenis Katalis	Kelebihan	Kekurangan
Homogen	1. Biasanya lebih selektif dan spesifik untuk suatu reaksi daripada katalis heterogen. 2. Mekanisme reaksi sederhana.	1. Sulit dipisahkan dari campuran reaksi. 2. Biaya Pemisahan mahal. 3. Bersifat korosif dan menghasilkan limbah. 4. Tidak dapat digunakan kembali.
Heterogen	1. Mudah dipisahkan karena berada pada fasa berbeda. 2. Biaya Pemisahan Murah. 3. Dapat digunakan kembali. 4. Lebih stabil secara termal. 5. Lebih ramah lingkungan dan tidak korosif.	1. Suhu reaksi lebih tinggi.

(Sumber: Lestari, 2024)

Tabel 1.12 Perbandingan Analisa Ekonomi Metode dalam Pembuatan Biodesel

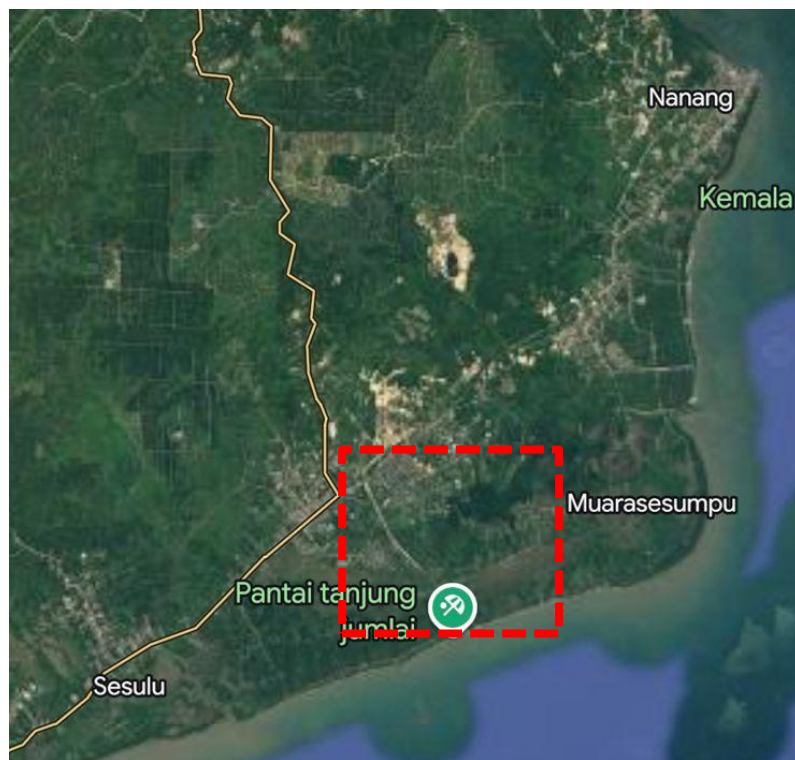
Pros			
------	--	--	--

Esterifikasi			
Transesterifikasi (Homogen)			
Transesterifikasi (Heterogen)			

Berdasarkan Tabel 1.12, terlihat bahwa proses esterifikasi mengalami kerugian sebesar Rp 8.474 karena nilai produk yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan biaya bahan baku. Sementara itu, proses transesterifikasi memberikan keuntungan, baik yang menggunakan katalis homogen maupun heterogen. Di antara keduanya, transesterifikasi heterogen menghasilkan keuntungan terbesar yaitu Rp 10.014, diikuti oleh transesterifikasi homogen sebesar Rp 9.529.

1.9 Pemilihan Lokasi Pabrik

Lokasi Pabrik di Jalan Silkar Km 10, Desa Girimukti, Kecamatan Penajam, Kabupaten Penajam Paser Utara, Kalimantan Timur karena dekat dengan sumber bahan baku utama, yaitu CPO dan abu boiler sebagai katalis diperoleh dari PT Kutai Refinery Nusantara (KRN) yang berlokasi di Kelurahan Kariangau, Kecamatan Balikpapan Barat, Kota Balikpapan, Kalimantan Timur serta Metanol (CH_3OH) diperoleh dari PT Kaltim Methanol Industri (KMI) yang berlokasi di Kota Bontang, Kalimantan Timur, dengan kapasitas produksi sebesar 660.000 ton per tahun.. Kedekatan dengan pemasok menjamin ketersediaan bahan baku, menekan biaya logistik, dan mendukung keberlanjutan operasi pabrik biodiesel. Lokasi pembangunan pabrik dapat dilihat pada Gambar 1.10



Gambar 1.10 Kabupaten Penajam Paser Utara (Google Maps, 2026)