

Pengaruh Variasi Enzim Lipase Amobil Terhadap Rasio Mol CPO: Metanol Pada Transesterifikasi

Elisabeth Putri Dania*, Martha Aznury, Anerasari Meidinariasty

Program Studi Teknologi Kimia Industri, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang

*Koresponden email: elisabethputridania1607@gmail.com

Diterima: 11 September 2025

Disetujui: 18 September 2025

Abstract

Biodiesel is a renewable and environmentally friendly alternative fuel that can be produced from vegetable oils such as Crude Palm Oil (CPO). This study aims to evaluate the effect of varying the mass of immobilized lipase enzyme (12–16 grams) and the molar ratio of CPO to methanol (1:4 and 1:6) on the quality of biodiesel produced through a transesterification process using a Packed Bed Reactor. The process stages include degumming, neutralization, and transesterification at a reaction temperature of 40°C for 6 hours. Immobilized lipase was chosen as the biocatalyst due to its ability to operate under mild conditions and produce high-quality biodiesel without generating harmful waste. The best result was achieved at a 1:4 molar ratio and 15 grams of enzyme, producing biodiesel with a density of 875.67 g/cm³, viscosity of 3.97 mm²/s, saponification value of 177.65 mg KOH/g, acid value of 0.32 mg KOH/g, iodine value of 48.05 g I₂/100 g, cetane number of 66.21, yield of 90.20%, and methyl ester content of 97.31%. All parameters met the Indonesian National Standard (SNI 7182:2015).

Keywords: biodiesel, crude palm oil, enzim lipase amobil, transesterifikasi

Abstrak

Biodiesel adalah bahan bakar terbarukan yang bersifat ramah lingkungan dan dapat dihasilkan dari minyak nabati, salah satunya adalah *Crude Palm Oil* (CPO). Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi massa enzim lipase *amobil* (12–16 gram) dan rasio mol CPO:metanol (1:4 dan 1:6) terhadap kualitas biodiesel yang dihasilkan melalui proses transesterifikasi dalam reaktor tipe *Packed Bed*. Tahapan proses meliputi *degumming*, netralisasi, dan transesterifikasi pada suhu 40°C selama 6 jam. Penggunaan enzim lipase *amobil* sebagai biokatalis dipilih karena mampu bekerja pada kondisi ringan dan menghasilkan biodiesel berkualitas tinggi tanpa menghasilkan limbah berbahaya. Hasil terbaik diperoleh pada rasio mol 1:4 dan massa enzim 15 gram, menghasilkan biodiesel dengan densitas 875,67 g/cm³, viskositas 3,97 mm²/s, angka penyabunan 177,65 mg KOH/g, angka asam 0,32 mg KOH/g, angka iodin 48,05 g I₂/100 g, angka setana 66,21, persen yield 90,20%, dan kandungan metil ester 97,31%. Seluruh parameter berada dalam rentang standar SNI 7182:2015.

Kata Kunci: biodiesel, crude palm oil, enzim lipase amobil, transesterifikasi

1. Pendahuluan

Permintaan energi dunia terus bertambah sejalan dengan peningkatan jumlah penduduk dan perkembangan kegiatan ekonomi. Saat ini, sekitar 81,1% dunia masih memakai bahan bakar fosil sebagai energi utama, yang menghasilkan emisi gas rumah kaca dan krisis energi berkepanjangan. Biodiesel menjadi alternatif energi terbarukan yang menjanjikan karena ramah lingkungan dan dapat diperbarui (1). Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif berbasis mono-alkil ester asam lemak yang digunakan sebagai pengganti solar. Pemanfaatannya berpotensi mengatasi keterbatasan bahan bakar fosil, sekaligus menawarkan keunggulan sebagai energi terbarukan yang ramah lingkungan dengan menghasilkan emisi CO yang lebih rendah dibandingkan solar (2).

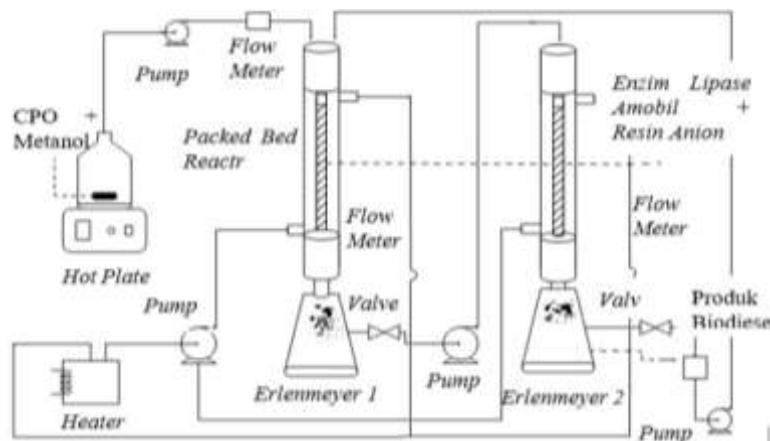
Crude Palm Oil (CPO) merupakan bahan baku potensial biodiesel karena memiliki rendemen tinggi dan ketersediaan melimpah di Indonesia (3). Pada 2023, Sumatera Selatan memproduksi sekitar 4,12 juta ton CPO (4). Pemanfaatannya semakin meningkat seiring kebijakan B40 yang mendorong nilai tambah dan mengurangi impor BBM (5).

Produksi biodiesel umumnya dilakukan melalui transesterifikasi yang menghasilkan metil ester dan gliserol. Namun, metode konvensional membutuhkan energi tinggi dan sulit mengendalikan kadar asam lemak bebas pada minyak dengan FFA tinggi. Penggunaan katalis enzim, khususnya lipase eversa transform 2.0 yang di amobil, dapat mengatasi keterbatasan ini karena memungkinkan reaksi pada suhu rendah, menghasilkan limbah minimal, dan katalis dapat digunakan berulang (6).

Penelitian sebelumnya menunjukkan lipase Eversa Transform efektif menghasilkan konversi $\pm 98\%$ dan dapat digunakan hingga beberapa siklus (7–9). Kebaruan penelitian ini adalah penggunaan katalis lipase Eversa Transform 2.0 yang diamobilisasi pada resin kation untuk transesterifikasi CPO di *packed bed reactor*. Resin kation dipilih untuk meningkatkan stabilitas enzim, memperpanjang umur pakai katalis, dan memungkinkan penggunaan ulang tanpa penurunan kinerja signifikan. Keunggulan ini juga memungkinkan proses berlangsung tanpa tahap esterifikasi awal, meskipun bahan baku memiliki FFA tinggi, sehingga lebih sederhana, efisien, dan berkelanjutan. Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi massa enzim lipase amobil dan rasio mol metanol–CPO terhadap kualitas biodiesel yang dihasilkan sesuai SNI 7182:2015.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini memanfaatkan *Crude Palm Oil* (CPO), metanol, serta enzim lipase Eversa Transform 2.0 yang telah di *amobil* pada media resin sebagai bahan utama dan bahan penunjang yaitu H_3PO_4 dan NaOH. Alat yang digunakan *Packed Bed Reactor*.



Gambar 1. Alat Packed Bed Reactor

Variabel tetap pada penelitian ini yaitu *Crude Palm Oil* 250 ml, kecepatan pengadukan 350 rpm, suhu 40°C, dengan waktu reaksi 6 jam. Untuk variabel bebasnya yaitu variasi katalis enzim lipase amobil 12-16 gram dengan rasio mol CPO:Metanol (1:4) dan (1:6).

Tahapan pelaksanaan penelitian meliputi proses sebagai berikut:

1. Aktivasi Resin Lewatit MP-64 (10)

Resin dicuci dengan aquades untuk menghilangkan kotoran, kemudian direndam dalam larutan NaOH 6 M dengan perbandingan resin:NaOH 1:4 selama 30 menit pada suhu 60°C dengan pengadukan 200 rpm. Proses pencucian resin dilakukan menggunakan *aquadest* sampai air bilasan mencapai kondisi netral, lalu resin dikeringkan di dalam oven dalam temperatur 110°C selama 24 jam.

2. Imobilisasi Enzim Lipase

Enzim lipase dilarutkan dalam buffer fosfat pada pH 7 dengan perbandingan enzim terhadap buffer fosfat 1:9. Resin yang telah diaktifasi kemudian ditambahkan ke dalam campuran tersebut, diaduk pada kecepatan 500 rpm tanpa pemanasan selama 6 jam. Setelah itu campuran diinkubasi dalam oven pada suhu 30°C selama 24 jam, disaring, dan disimpan pada suhu 4°C.

3. Degumming (11)

Kadar Asam Lemak Bebas (ALB) CPO dianalisis terlebih dahulu. Sebanyak 250 g CPO dipanaskan pada temperatur 60–70°C dengan pengadukan 500 rpm selama 10 menit, kemudian menambahkan H_3PO_4 sebanyak 1,5% (b/b) serta air dalam jumlah tertentu. Campuran diaduk selama 40 menit dan pengotor padat dipisahkan menggunakan sentrifugasi selama 10 menit pada kecepatan 6000 rpm. Minyak kemudian dicuci ± 3 kali dengan aquades 60°C hingga pH netral, dipanaskan kembali, dan dianalisis kadar ALB-nya.

4. Netralisasi

Minyak hasil *degumming* dipanaskan dengan temperatur 60–70°C dengan kecepatan pengadukan yaitu 300 rpm, kemudian ditambahkan larutan 10% NaOH 0.15 N dan diaduk selama 30 menit. Campuran dimasukkan ke corong pisah hingga terbentuk lapisan sabun, air, dan minyak. Minyak dipisahkan lalu dicuci 2–3 kali dengan akuades 60–70°C untuk menghilangkan residu sabun, dipanaskan pada suhu 100°C, dan dianalisis kadar ALB-nya.

5. Transesterifikasi

Disiapkan minyak hasil *refining*, metanol, enzim lipase *amobil*, dan rangkaian *packed bed reactor*. Air panas bersuhu 40°C dialirkan ke *jacket* reaktor. Enzim lipase *amobil* dimasukkan ke dalam dua kolom reaktor sesuai variasi massa (12 g; 13 g; 14 g; 15 g; 16 g). Minyak sebanyak 250 g dipanaskan dalam beaker glass hingga 40°C, kemudian ditambahkan metanol dengan rasio molar minyak:metanol 1:4 dan 1:6 sambil diaduk pada kecepatan 250 rpm. Campuran dipompa ke dalam reaktor untuk berkontak dengan enzim lipase *amobil* dan dibiarkan bereaksi selama 6 jam hingga diperoleh produk.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Biodiesel

Produksi biodiesel dilakukan melalui percobaan eksperimental dengan proses transesterifikasi pada variasi rasio mol CPO-Metanol dan konsentrasi katalis. Penelitian ini memberikan kontribusi baru dengan pemanfaatan katalis enzim lipase Eversa Transform 2.0 yang di *amobil* menggunakan resin kation dalam *reaktor packed bed* pada kondisi optimum 40°C dengan kecepatan pengadukan 250 rpm, yang masih jarang dilaporkan dalam literatur sebelumnya. Data yang diperoleh dari proses pembuatan biodiesel meliputi persen hasil (% yield) serta parameter mutu sesuai SNI 7185:2015, seperti kadar asam lemak bebas, % yield, titik nyala, angka setana, kandungan metil ester, dan analisis GC-MS untuk mengetahui kandungan komposisi metil ester yang dihasilkan. Hasil uji biodiesel dapat dilihat pada **Tabel 1** berikut.

Tabel 1. Data Analisa Karakteristik Biodiesel Dengan Rasio Mol CPO : Metanol (1:4) dan (1:6)

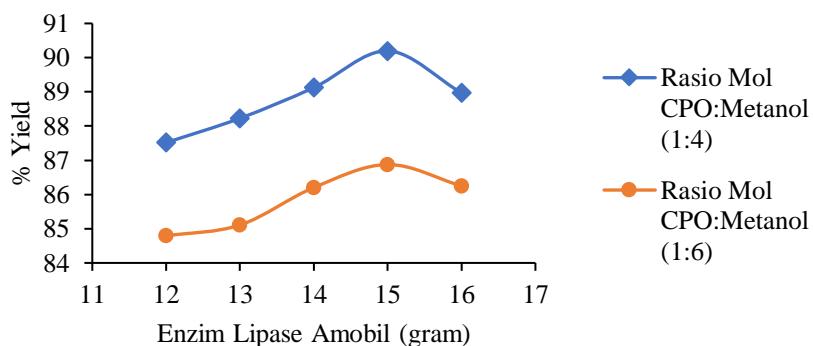
Parameter Biodiesel	Rasio Mol CPO : Metanol (1:4)					*SNI 7182:2015
	12 gram	13 gram	14 gram	15 gram	16 gram	
Viskositas (cSt)	5,76	4,29	4,09	3,97	4,84	2,3-6,0
Densitas (kg/m ³)	867,92	868,41	875,18	875,67	876,15	850-890
Angka Setana	64,25	64,52	64,55	66,02	65,32	Min 51
Titik Nyala (°C)	97,30	101,5	110,9	125,1	108,3	Min 100
<i>Yield (%)</i>	87,52	88,23	89,12	90,20	88,97	-
Metil Ester (%)	96,98	97,13	97,29	97,31	97,19	Min 96,5
Parameter Biodiesel	Rasio Mol CPO : Metanol (1:6)					*SNI 7182:2015
	12 gram	13 gram	14 gram	15 gram	16 gram	
Viskositas (cSt)	6,09	5,86	5,82	5,79	5,97	2,3-6,0
Densitas (kg/m ³)	869,86	873,25	877,60	878,08	880,02	850-890
Angka Setana	64,25	64,76	64,84	64,94	64,12	Min 51
Titik Nyala (°C)	92,80	99,8	105,3	110,1	103,6	Min 100
<i>Yield (%)</i>	84,79	85,11	86,20	86,88	86,65	-
Metil Ester (%)	96,89	96,99	97,14	97,21	97,07	Min 96,5

Analisa % Yield

Persentase *yield* biodiesel menunjukkan rasio antara jumlah biodiesel yang dihasilkan dengan jumlah minyak awal, dinyatakan dalam persen (%). (12). Nilai ini menggambarkan efisiensi konversi minyak menjadi biodiesel melalui reaksi transesterifikasi. Analisis % *yield* dilakukan untuk menilai pengaruh variasi enzim lipase *amobil* dan rasio mol CPO : metanol dapat di lihat pada **Gambar 2**.

Gambar 2 menunjukkan *yield* terendah pada massa enzim 12 gram dengan rasio mol 1:4 sebesar 87,52% dan 1:6 sebesar 84,79%, sedangkan *yield* tertinggi tercapai pada 15 gram dengan rasio 1:4 sebesar 90,26% dan 1:6 sebesar 86,88%. Peningkatan massa enzim hingga 15 gram meningkatkan *yield*, menunjukkan bahwa jumlah enzim yang cukup mempercepat reaksi. Penurunan *yield* pada 16 gram diduga akibat kejemuhan substrat yang mengakibatkan inaktivasi enzim. Rasio 1:4 menghasilkan *yield* lebih stabil dibanding 1:6 karena tidak mengalami inhibisi oleh metanol berlebih. Kondisi optimal diperoleh pada

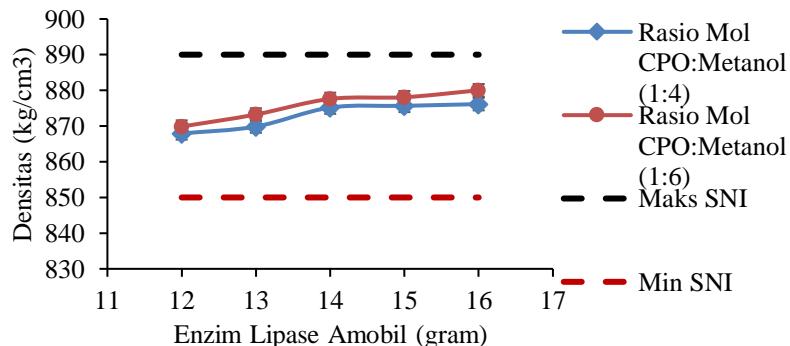
massa enzim 15 gram dan rasio mol 1:4, dengan *yield* mendekati hasil optimal dari penelitian (13), menunjukkan efisiensi proses yang tinggi.



Gambar 2. Pengaruh Variasi Massa Enzim pada Rasio 1:4 dan 1:6 terhadap Persentase Yield

Analisa Densitas

Densitas merupakan suatu pengukuran untuk memperlihatkan massa jenis setiap satuan volume benda. Densitas juga merupakan salah satu parameter terpenting dalam penilaian kualitas biodiesel karena berhubungan langsung dengan efisiensi pembakaran dalam mesin diesel dan kesesuaian dengan standar nasional. Hasil analisa densitas biodiesel yang diperoleh dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Pengaruh Perbedaan Jumlah Enzim Lipase *Amobil* serta Rasio Metanol terhadap Nilai Densitas Biodiesel

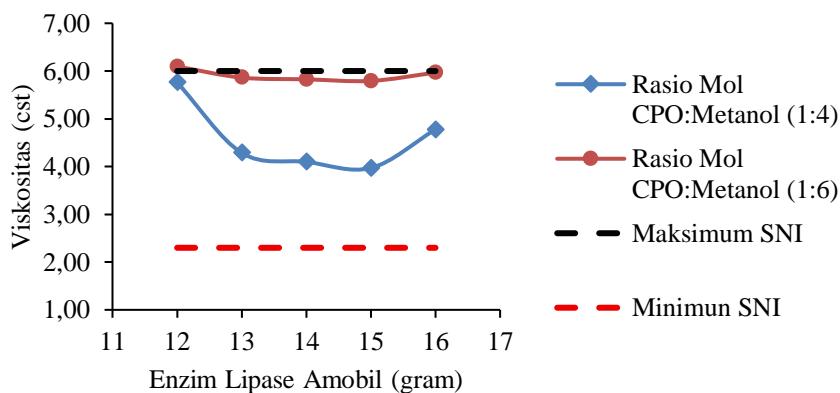
Peningkatan massa enzim dari 12 g hingga 16 g pada rasio mol minyak CPO:metanol (1:4) dan (1:6) menyebabkan peningkatan densitas biodiesel. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah enzim yang lebih tinggi meningkatkan konversi trigliserida menjadi metil ester secara lebih optimal.

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) 7182:2015, standar densitas biodiesel adalah 850–890 kg/m³. Hasil pengujian dalam penelitian ini menunjukkan nilai antara 867–880 kg/m³, sehingga dapat dikatakan telah memenuhi standar tersebut.

Kombinasi rasio mol 1:4 dengan massa enzim 14–15 g memiliki angka densitas yang optimal karena menghasilkan densitas stabil (870–875 kg/m³) dan aman dari potensi kelebihan senyawa berat. Kualitas pembakaran biodiesel akan berkurang apabila densitasnya melampaui ambang batas SNI, disebabkan oleh tingginya rasio karbon terhadap hidrogen dalam struktur minyak. Hasil densitas tinggi pada biodiesel dapat berdampak negatif pada kinerja mesin diesel yaitu dapat meningkatkan keausan, emisi gas buang serta berpotensi merusak komponen yang terdapat dalam mesin (14).

Analisa Viskositas

Pengujian viskositas dilakukan menggunakan viskometer digital untuk menentukan tingkat kekentalan dari sampel biodiesel yang dihasilkan. Berdasarkan hasil yang diperoleh, nilai viskositas dari seluruh sampel berada dalam rentang 3,97 hingga 6,10 cSt. Data analisis viskositas biodiesel disajikan pada **Gambar 4**.



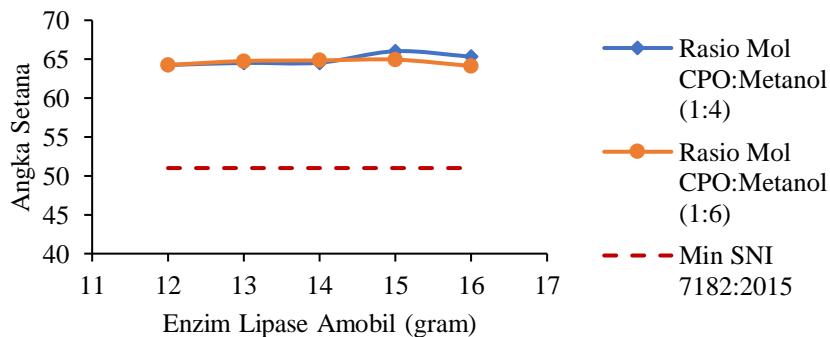
Gambar 1. Pengaruh Perbedaan Jumlah Enzim Lipase *Amobil* serta Rasio Metanol terhadap Nilai Viskositas Biodiesel

Jika dibandingkan dengan SNI biodiesel (2,3-6,0 cSt), hasil pengujian menunjukkan bahwa viskositas biodiesel masih sesuai dengan batas standar yang berlaku, sehingga layak dimanfaatkan sebagai alternatif pengganti solar. Namun, pada variasi enzim 12 gram dengan rasio mol minyak CPO:Metanol (1:6), viskositas yang dihasilkan mencapai 6,10 cSt, melebihi batas maksimum. Hal ini diduga dapat disebabkan oleh proses transesterifikasi yang kurang efektif akibat jumlah enzim yang terlalu sedikit, sehingga konversi trigliserida menjadi metil ester tidak berlangsung secara optimal.

Secara umum, peningkatan massa enzim dari 12 g hingga 15 g menyebabkan penurunan viskositas biodiesel. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi transesterifikasi berjalan lebih optimal, menghasilkan metil ester yang lebih murni dan mengurangi kandungan trigliserida, digliserida, serta monogliserida yang bersifat kental. Peningkatan nilai viskositas dapat disebabkan oleh kejemuhan substrat. Viskositas yang melebihi standar SNI dapat menyebabkan tetesan bahan bakar lebih besar saat disemprotkan ke ruang bakar, sehingga pembakarannya tidak sempurna. Sementara itu, viskositas yang terlalu rendah akan menyebabkan kebocoran pada pompa injeksi bahan bakar (15).

Analisa Angka Setana

Penentuan mutu biodiesel sangat dipengaruhi oleh angka setana sebagai salah satu karakteristik penting (**Gambar 5**).



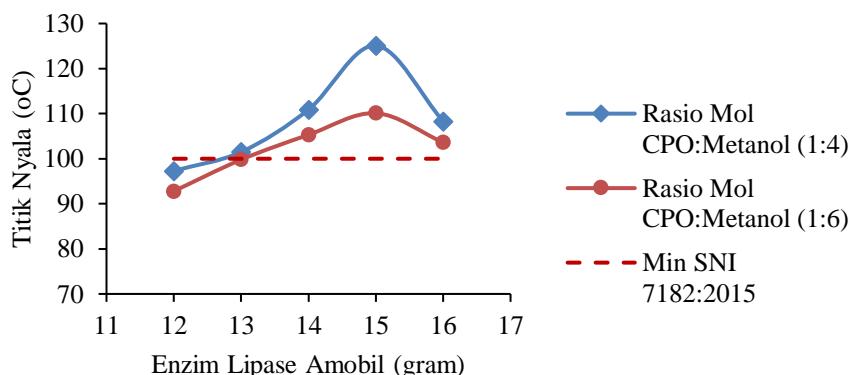
Gambar 5. Pengaruh Perbedaan Jumlah Enzim Lipase *Amobil* serta Rasio Metanol terhadap Nilai Angka Setana Biodiesel

Angka setana mencerminkan kualitas pembakaran biodiesel; nilai angka setana tinggi mempermudah penyalaan mesin dan mengurangi ledakan. Hasil tertinggi sebesar 66,02 diperoleh pada katalis 15 gram (rasio 1:4), sedangkan terendah 64,25 pada 12 gram enzim (rasio 1:4 dan 1:6). Seluruh nilai memenuhi standar SNI. Peningkatan angka setana mencerminkan proses pembakaran yang lebih sempurna sekaligus efisiensi transesterifikasi yang lebih baik (6).

Titik Nyala (*Flash Point*)

Flash point adalah temperatur minimum bahan bakar minyak dapat menyala jika terkena api. Uji ini menggunakan *Flash Point Tester* dan berperan penting dalam menentukan tingkat keamanan terhadap

kebakaran, serta berkaitan dengan prosedur penyimpanan dan penanganan bahan bakar. Data hasil uji titik nyala dapat diperhatikan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Pengaruh Perbedaan Jumlah Enzim Lipase *Amobil* serta Rasio Metanol terhadap Titik Nyala Biodiesel

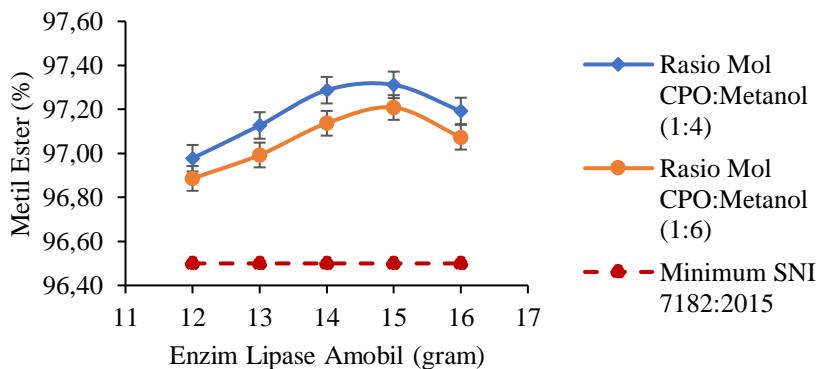
Berdasarkan **Gambar 6**, peningkatan massa enzim dari 12 hingga 15 gram menyebabkan kenaikan titik nyala biodiesel pada kedua rasio mol CPO:Metanol, yaitu (1:4) dan (1:6). Titik nyala tertinggi dicapai pada massa enzim 15 gram, terutama pada rasio (1:4) yang mencapai sekitar 125°C. Setelah itu, pada massa enzim 16 gram, titik nyala kembali menurun.

Titik nyala yang tinggi menunjukkan bahwa kandungan metanol sisa dalam biodiesel semakin sedikit. Hal ini berarti proses transesterifikasi berlangsung dengan baik, karena metanol berhasil dikonversi atau terpisahkan secara efisien. Sebaliknya, titik nyala yang rendah dapat disebabkan oleh masih adanya metanol sisa dalam biodiesel, yang bersifat mudah menguap dan dapat menurunkan stabilitas termal biodiesel.

Dari hasil perbandingan, rasio mol 1:4 memberikan titik nyala lebih besar daripada rasio 1:6. Hal tersebut menandakan bahwa pada rasio 1:4 pemisahan metanol sisa lebih optimal, sehingga biodiesel yang dihasilkan lebih aman digunakan dan memenuhi standar minimum SNI 7182:2015, yaitu $\geq 100^\circ\text{C}$. Dengan demikian, kombinasi terbaik untuk menghasilkan biodiesel dengan titik nyala tinggi dan aman digunakan adalah pada rasio mol 1:4 dengan massa enzim 15 gram.

Pengaruh Jumlah Katalis dan Rasio Metanol Terhadap Metil Ester

Gambar 7 menunjukkan semua sampel memenuhi standar metil ester SNI $\geq 96,5\%$. Kandungan metil ester meningkat seiring penambahan enzim hingga 15 gram, lalu sedikit menurun pada 16 gram. Rasio 1:4 menghasilkan metil ester lebih tinggi dari 1:6, dengan nilai tertinggi 97,31% pada 15 gram enzim. Ini menunjukkan rasio 1:4 lebih sesuai untuk aktivitas enzim, sementara rasio 1:6 terhambat oleh kelebihan metanol. Kombinasi optimal terdapat pada rasio 1:4 dan 15 gram enzim, sejalan dengan studi sebelumnya



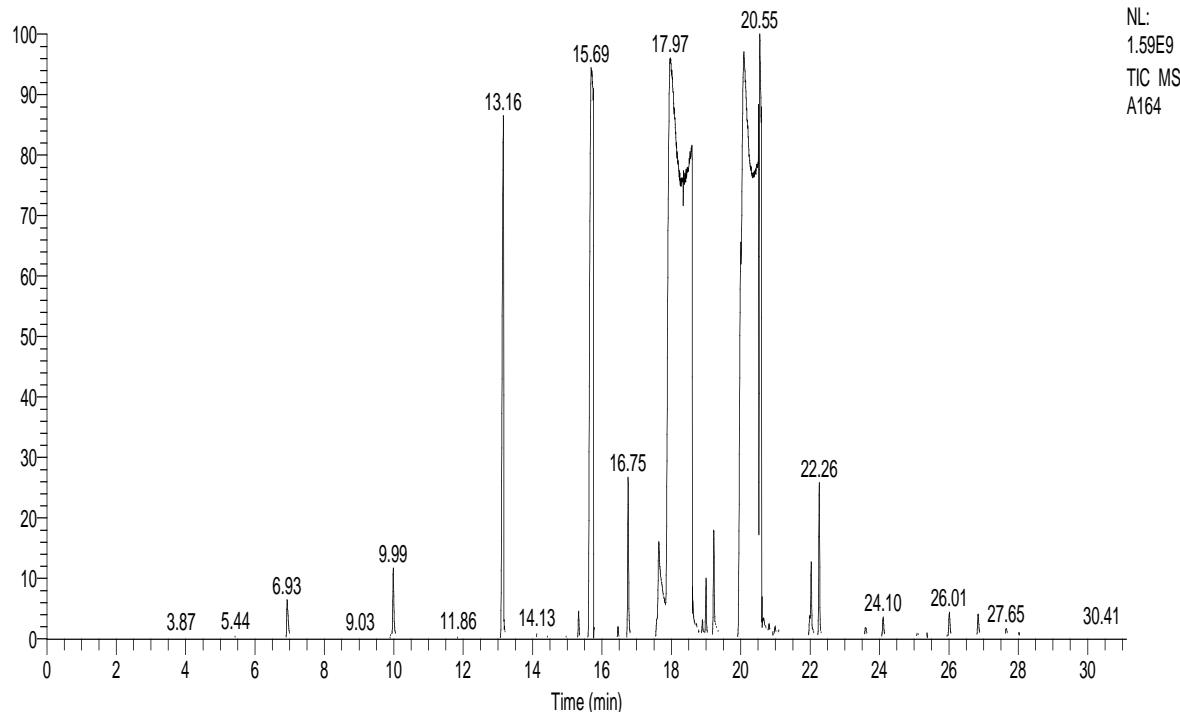
Gambar 7. Pengaruh Jumlah Katalis dan Rasio Metanol Terhadap Metil Ester Produk Biodiesel

Analisa GC-MS

GC-MS digunakan terutama untuk memastikan bahwa reaksi transesterifikasi berjalan dengan benar dan menghasilkan senyawa FAME yang diharapkan, seperti metil palmitat, metil oleat, serta metil linoleat.

Instrumen GC (Gas Chromatography) berperan memisahkan komponen sesuai dengan titik didihnya, sedangkan MS (Mass Spectrometry) berfungsi mengidentifikasi senyawa tersebut berdasarkan rasio massa terhadap muatan (m/z). Hasil pengujian ini menghasilkan kromatogram yang memperlihatkan puncak-puncak senyawa dalam biodiesel, di mana tiap puncak mewakili jenis metil ester tertentu. Selain itu, GC-MS juga mampu mengidentifikasi senyawa pengotor yang tidak diinginkan, seperti sisa metanol, gliserol, maupun produk degradasi dari minyak bekas. Data hasil analisis GC-MS pada pembuatan biodiesel ditunjukkan pada **Gambar 8**.

RT: 0.00 - 31.12



Gambar 8. Kromatogram Hasil Analisis GC-MS Biodiesel

Sumber: Analisis GC-MS Unsri FMIPA.

Tabel 2. Komposisi Senyawa Biodiesel

No.	Nama Senyawa	% Area
1	Total Metil Oleat	44,27
2	Metil Palmitat	27,28
3	Metil Miristat	11,17
4	Metil Stearat	6,46
5	Metil Laurat	4,51
6	Metil Palmitoleat	1,41
7	Senyawa metil ester lainnya	<1

Sumber: Lab. FMIPA, Unsri

Hasil biodiesel dari proses transesterifikasi *Crude Palm Oil* menjadi Biodiesel dilakukan menggunakan instrumen *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS). Berdasarkan data kromatogram dan identifikasi senyawa yang dilakukan, hasil analisis menunjukkan bahwa senyawa dominan dalam biodiesel adalah total metil oleat dengan kandungan mencapai 44,17%, diikuti oleh metil palmitat sebesar 27,28%. Kandungan metil oleat yang tinggi menandakan dominasi asam lemak tak jenuh tunggal (MUFA) yang memberikan keunggulan dalam hal flowability, angka setana yang baik, serta pembakaran yang bersih. Sementara itu, metil palmitat berkontribusi terhadap stabilitas oksidasi dan titik nyala tinggi, meskipun dapat meningkatkan titik beku. Komponen lain seperti metil linoleat (11,17%), metil stearat (6,46%), dan senyawa minor lainnya tetap berada dalam kisaran yang wajar dan tidak berdampak negatif signifikan. Secara keseluruhan, komposisi metil ester yang dihasilkan tergolong seimbang, dengan dominasi senyawa yang mendukung mutu dan kinerja biodiesel, sehingga produk yang dihasilkan dapat dikatakan berkualitas baik dan layak digunakan sebagai bahan bakar nabati.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa variasi massa enzim dan rasio mol Minyak-Metanol berpengaruh signifikan terhadap karakteristik biodiesel yang dihasilkan. Biodiesel optimal diperoleh pada penggunaan 15 g enzim lipase *amobil* dengan rasio mol CPO:Metanol 1:4, menghasilkan *yield* 90,20%, angka setana 66,21, titik nyala 125°C, metil ester 97,31%). Kombinasi ini meningkatkan efisiensi transesterifikasi, menurunkan FFA, dan menghasilkan biodiesel murni.

5. Ucapan Terima Kasih

Puji dan Syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkah dan Rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian ini. Demikian juga penulis mengucapkan terima kasih banyak atas bantuan PT. Sinar Alam Permai (SAP) yang telah mendukung bahan baku untuk penelitian Tugas Akhir. Terimakasih kepada ibu selaku orang tua penulis, dosen pembimbing dan teman-teman terdekat

6. Daftar Pustaka

1. Mohamad Nor NFS, Veny H, Hamzah F, Muhd Rodhi MN, Kusumaningtyas RD, Prasetiawan H, et al. Enzymatic Transesterification Using Different Immobilized Lipases and its Biodiesel Effect on Gas Emission. *Bull Chem React Eng Catal.* 2024 Aug 30;19(2):265–74.
2. Husna A, Azhari A, Hakim L, Ginting Z, Dewi R. Pemanfaatan Minyak Nabati (Jarak Pagar Dan Jarak Kepyar) Sebagai Bahan Baku Biodiesel. *Chem Eng J Storage CEJS.* 2021 Oct 29;1(2):81–94.
3. Harahap RA, Azhari A, Meriatna M, Sulhatun S, Suryati S. Penurunan Kadar Free Fatty Acid (Ffa) Pada Crude Palm Oil (CPO) Dengan Proses Esterifikasi Menggunakan Katalis Asam Sulfat (H_2SO_4). *Chem Eng J Storage CEJS.* 2021 Oct 29;1(2):56–63.
4. Badan Pusat Statistik. Produksi Tanaman Perkebunan - Tabel Statistik - Badan Pusat Statistik Indonesia [Internet]. 2024 [cited 2025 Feb 15]. Available from: <https://www.bps.go.id/statistics-table/2/MTMyIzI=/produksi-tanaman-perkebunan.html>
5. Aulia Mutiara Hatia Putri. FYI! Ini Produk Olahan CPO yang Kita Gunakan Setiap Hari [Internet]. 2023 [cited 2025 Feb 15]. Available from: <https://www.cnbcindonesia.com/research/20230616090009-128-446469/fyi-ini-produk-olahan-cpo-yang-kita-gunakan-setiap-hari>
6. Aznury M, Zikri A, Junaidi R, Lupikawaty M, Oktariyensi C. Pengaruh Metanol dalam Produksi Biodiesel dari Tamanu Oil Menggunakan Katalis Lipase. *J Selulosa.* 2022 Jun 30;12(01):33.
7. Hidayatullah IM, Soetandar F, Sudiyasa PV, Cognet P, Hermansyah H. Ion Exchange Resin and Entrapped *Candida rugosa* Lipase for Biodiesel Synthesis in the Recirculating Packed-Bed Reactor: A Performance Comparison of Heterogeneous Catalysts. *Energies.* 2023 Jun 16;16(12):4765.
8. Remonatto D, Oliveira JV, Guisan JM, Oliveira D, Ninow J, Fernandez-Lorente G. Immobilization of Eversa Lipases on Hydrophobic Supports for Ethanolysis of Sunflower Oil Solvent-Free. *Appl Biochem Biotechnol.* 2022 May;194(5):2151–67.
9. Shafika RI, Aznury M, Purnamasari I. Crude Palm Oil Dikatalisis Enzim Lipase Amobil dengan Pengaruh Waktu Reaksi Menggunakan Packed Bed Reactor. *J Setambi Eng.* 2024;Volume IX.
10. Hartono R, Mulia B, Sahlan M, Utami TS, Wijanarko A, Hermansyah H. The modification of ion exchange heterogeneous catalysts for biodiesel synthesis. In Bogor, Indonesia; 2017 [cited 2025 Mar 3]. p. 020020. Available from: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/695191>
11. Ristianingsih Y. Studi Kinetika Proses Kimia Dan Fisika Penghilangan Getah Crude Plum Oil (CPO) Dengan Asam Fosfat. *React Chem Eng.* 2011;13(4).
12. Kartika, Dwi, and Senny Widyaningsih. "Konsentrasi katalis dan suhu optimum pada reaksi esterifikasi menggunakan katalis zeolit alam aktif (ZAH) dalam pembuatan biodiesel dari minyak jelantah." *Jurnal Natur Indonesia* 14.3 (2012): 219-226.
13. Sun S, Guo J, Chen X. Biodiesel preparation from Semen Abutili (Abutilon theophrasti Medic.) seed oil using low-cost liquid lipase Eversa® transform 2.0 as a catalyst. *Ind Crops Prod.* 2021 Oct;169:113643.
14. Erziza WN, Amri I. Pembuatan Biodiesel Dari Bahan Baku Cpo (Crude Palm Oil) Dengan Reaksi Transesterifikasi Menggunakan Kolom Sentrifugal Kontaktor (Variasi Temperatur Dan Waktu Reaksi). 2015;2(1).
15. Herlina, Idra, et al. "Pembuatan Biodiesel Berbahan Baku Fraksi Minyak Cpo (Crude Palm Oil) Parit Terkatalisis Zeolit Alam Lampung." *Jurnal Inovasi Teknik Kimia* 7.1 (2022): 1-8.