

Available online at: <http://reactor.poltekatiptdg.ac.id/>

# REACTOR

## Journal of Research on Chemistry and Engineering

| ISSN Online 2746-0401 |



### STUDI PENGARUH WAKTU TRANSESTERIFIKASI PADA SINTESIS BIODIESEL DARI BIJI KARET DENGAN MENGGUNAKAN KATALIS $\text{CaO/ZnO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

Ida Hasmita<sup>1\*</sup>, Chartika Putri<sup>1</sup>, Zulhaini Sartika<sup>1</sup>, Khairul Akli<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Kimia, Universitas Serambi Mekkah, Banda Aceh

<sup>2</sup> Program Studi Teknologi Rekayasa Bioproses Energi Terbarukan, Politeknik ATI Padang

#### ARTICLE INFORMATION

Received: Maret 19, 2026  
Revised: Juni 8, 2026  
Available online: Juni 22, 2026

#### KEYWORDS

Rubber seed, biodiesel, transesterification,  $\text{CaO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$  catalyst, yield optimization

#### CORRESPONDENCE

Name: Ida Hasmita

E-mail: [idahasmita@serambimekkah.ac.id](mailto:idahasmita@serambimekkah.ac.id)

#### ABSTRACT

Rubber seeds (*Hevea brasiliensis*) from Aceh plantations, Indonesia, offer a promising non-edible feedstock for biodiesel synthesis via transesterification due to their high oil content addressing fossil fuel depletion and environmental challenges. This study examines the effect of transesterification time on biodiesel yield and quality using a novel  $\text{CaO-ZnO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  heterogeneous catalyst. Rubber seed oil was extracted via Soxhlet method with *n*-hexane, degummed with phosphoric acid, and transesterified with methanol (1:5 molar ratio, 3 wt% catalyst) at 70°C for 60, 70, and 80 minutes. Oil characterization revealed low moisture (0.012%) and free fatty acids (7.96%). Maximum yield reached 95% at 70 minutes, which may be associated with more effective triglyceride conversion. Density values (903.5-941.5 kg/m<sup>3</sup>) exceeded SNI 7182:2015 limits ( $\leq 860$  kg/m<sup>3</sup>) possibly due to incomplete glycerol separation or residual impurities, while kinematic viscosity met standards (2.67-2.88 mm<sup>2</sup>/s). GC-MS analysis of the optimal sample identified key fatty acid methyl esters, dominated by methyl linoleate (48.78%) and methyl oleate (42.35%), along with a minor component of methyl palmitate (1.04%). These results confirm rubber seed biodiesel viability with process optimization needed for density compliance, promoting waste valorization in rubber-producing regions.

#### PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi global yang masif telah memicu krisis cadangan bahan bakar fosil dan degradasi lingkungan yang serius [1]. Sebagai solusi, biodiesel dikembangkan sebagai bahan bakar nabati (BBN) alternatif yang ramah lingkungan karena mampu mengurangi emisi gas rumah kaca secara signifikan [2]. Namun, tantangan utama produksi biodiesel saat ini adalah dominasi penggunaan minyak pangan (lebih dari 95%), yang memicu kompetisi antara kebutuhan pangan dan energi serta meningkatkan biaya produksi [3]. Kondisi ini menuntut peralihan fokus pada bahan baku non-pangan, seperti minyak biji karet (*Hevea brasiliensis*) [4] [5].

Biji karet merupakan limbah perkebunan yang melimpah namun belum dimanfaatkan secara optimal di Indonesia

[5]. Meskipun memiliki kandungan minyak tinggi (40-50%), sintesis biodiesel dari biji karet menghadapi tantangan teknis yang belum sepenuhnya terpecahkan, terutama terkait kualitas produk yang belum stabil dalam memenuhi standar SNI, khususnya pada parameter massa jenis dan stabilitas oksidatif [4] [6] [7]. Selain itu, minyak biji karet seringkali memiliki kadar Asam Lemak Bebas (ALB) yang tinggi. Secara teori, proses transesterifikasi langsung hanya dapat dilakukan jika kadar ALB berada di bawah batasan 2%; jika melebihi angka tersebut, maka risiko reaksi penyabunan (saponifikasi) meningkat, yang mempersulit pemisahan produk dan menurunkan rendemen [8].

Efisiensi konversi minyak tersebut sangat bergantung pada jenis katalis yang digunakan [9]. Katalis homogen konvensional (seperti NaOH atau KOH) seringkali menimbulkan masalah dalam pemisahan produk dan

menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar [10]. Untuk mengatasi kelemahan tersebut, penelitian ini menggunakan katalis heterogen  $\text{CaO/ZnO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  [11]. Pemilihan campuran logam oksida ini didasarkan pada sinergi  $\text{CaO}$  yang memiliki aktivitas katalitik tinggi dan  $\text{ZnO}$  yang meningkatkan stabilitas katalis, sementara penyangga  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  dipilih karena memiliki luas permukaan besar dan stabilitas termal yang baik untuk mencegah peluruhan situs aktif selama reaksi [12], [13], [14]. Keunggulan katalis campuran ini dibanding katalis tunggal atau katalis homogen adalah sifatnya yang lebih ramah lingkungan, dapat dipisahkan dengan mudah, dan berpotensi untuk digunakan kembali (*reusable*) [15].

Hingga saat ini, meskipun penelitian mengenai biodiesel biji karet telah dilakukan, masih terdapat celah penelitian (*research gap*) mengenai pengaruh parameter operasional yang spesifik pada katalis campuran  $\text{CaO/ZnO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  ini. Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi mendalam mengenai pengaruh waktu transesterifikasi terhadap performa katalis heterogen tersebut dalam menghasilkan biodiesel yang memenuhi standar mutu. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan titik optimal waktu reaksi guna menghasilkan rendemen maksimal serta menganalisis karakteristik produk menggunakan GC-MS untuk memastikan kualitas metil ester yang dihasilkan.

## METODOLOGI

### Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain: biji karet, akuades, asam sulfat ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 85%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ , metanol,  $\text{NaOH}$ , n-heksana,  $\text{ZnO}$ , dan  $\text{CH}_3\text{COOH}$ . Sedangkan alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: gelas *beaker*, labu leher tiga, *magnetic stirrer*, erlenmeyer, timbangan analitik, blender, rangkaian alat distilasi, buret, corong pisah, pH meter, indikator pH, inkubator, ayakan dan *ball mill*, *hot plate*, *furnace*, piknometer, dan alat uji GC-MS dengan merk Shimadzu GC-MS QP2010 Ultra.

### Prosedur Penelitian

#### 1. Preparasi Sampel

Biji karet yang digunakan pada penelitian ini berasal dari perkebunan masyarakat di Kabupaten Nagan Raya, Provinsi Aceh. Pada tahap awal, biji karet dibersihkan dan dikeringkan. Proses pengeringan biji karet dilakukan di dalam oven pada suhu  $150^\circ\text{C}$  selama  $\pm 5$  jam hingga diperoleh berat konstan. Selanjutnya biji karet kering dihaluskan dengan blender dan diayak menggunakan ayakan ukuran 80 mesh. Serbuk biji karet kemudian dimasukkan ke dalam desikator untuk dihilangkan kadar air tersisa. Selanjutnya serbuk biji karet diekstraksi menggunakan metode sokletasi pada suhu  $60\text{-}70^\circ\text{C}$  dengan menggunakan pelarut n-heksana selama 6 jam. Proses ekstraksi ini menggunakan 250 gram serbuk biji karet yang dicampur dengan 1 liter heksana dengan perbandingan 1:4.

#### 2. Degumming

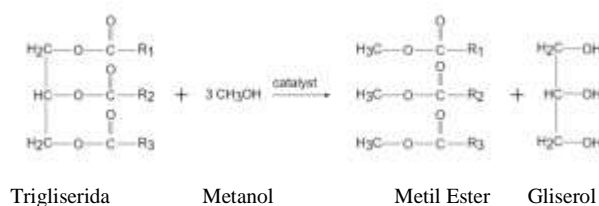
Pada proses ini, minyak biji karet terlebih dahulu ditimbang kemudian dipanaskan hingga suhu  $80^\circ\text{C}$  sambil diaduk menggunakan pengaduk magnet. Setelah itu, ditambahkan asam fosfat sebanyak 0,3% dari berat minyak biji karet yang digunakan. Selanjutnya minyak disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan minyak dengan kotoran yang mengendap.

#### 3. Preparasi Katalis

Pembuatan katalis  $\text{CaO/ZnO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  dilakukan dengan menggabungkan metode pengendapan dan impregnasi. Tahapan pertama yaitu melarutkan  $\pm 4,25$  gr  $\text{CaO}$  di dalam 50 mL akuades dan dilanjutkan dengan pengadukan selama 30 menit. Kemudian ditambahkan  $\text{CH}_3\text{COOH}$  secara stoikiometri dan diaduk selama 5 menit hingga larutan menjadi jernih. Selanjutnya ditambahkan 10 gram katalis  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  dan diaduk lagi selama 30 menit. Impregnasi larutan  $\text{ZnO}$  ke dalam campuran lalu diaduk selama 3 jam. Selanjutnya larutan dipanaskan hingga menjadi pasta pada suhu  $80^\circ\text{C}$  selama  $\pm 1,5$  jam. Pasta tersebut kemudian dimasukkan ke dalam oven pada suhu  $110^\circ\text{C}$  selama 12-14 jam. Katalis kemudian digiling dan diayak menggunakan saringan 27 mesh dan katalis dikalsinasi dengan suhu  $650^\circ\text{C}$  selama 5 jam. Katalis yang telah dikalsinasi didinginkan dengan cara dimasukkan ke dalam desikator hingga mencapai suhu kamar.

#### 4. Sintesis Biodiesel

Proses sintesis biodiesel dari biji karet ini dilakukan dengan metode transesterifikasi dan siklus refluks menggunakan sokhlet dan peralatan labu leher tiga untuk homogenisasi campuran. Sebanyak 100 gram minyak biji karet dipanaskan hingga suhu  $70^\circ\text{C}$  dengan cara dimasukkan ke dalam labu leher tiga. Kemudian ditambahkan metanol yang telah dicampur dengan katalis  $\text{CaO/ZnO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (3%-wt minyak) dengan perbandingan molar 1:5 dan refluks dengan variasi waktu reaksi 60, 70, dan 80 menit. Filtrat yang diperoleh dari reaksi esterifikasi ini dimasukkan ke dalam corong pemisah dan didiamkan selama 1 hari. Filtrat campuran kemudian membentuk dua lapisan, yaitu lapisan atas berupa biodiesel (metil ester) dan lapisan bawah berupa gliserol, beserta pengotor dan katalis. Berikut reaksi utama transesterifikasi dengan menggunakan katalis [16]:



**Gambar 1.** Reaksi transesterifikasi [16]

**Analisis Parameter Uji**

Analisis parameter uji minyak biji karet yang dilakukan adalah kadar air, kadar FFA menggunakan titrasi AOAC, rendemen, densitas dengan piknometer, viskositas dengan viskometer Ostwald dan alat uji GC-MS merk Shimadzu GCMS QP2010 Ultra. Hasil uji parameter minyak karet ini mengacu pada SNI 7182:2015 yang ditampilkan pada Tabel 1 berikut.

**Tabel 1.** Standar Mutu Biodiesel SNI 7182:125

Parameter Uji	SNI 7182:2015	Satuan, min/maks
Massa jenis pada 40°C	850 - 890	kg/m <sup>3</sup>
Viskositas kinematik pada 40°C	2,3 - 6,0	mm <sup>2</sup> /s
Kadar ester metil	96,5	%-massa, min
Air dan sedimen	0,05	%-vol, maks

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019)

Rendemen biodiesel dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Rendemen\ biodiesel = \frac{massa\ biodiesel}{massa\ minyak} \times 100\% \tag{1}$$

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Kadar Air dan Asam Lemak Bebas (ALB) Minyak Biji Karet**

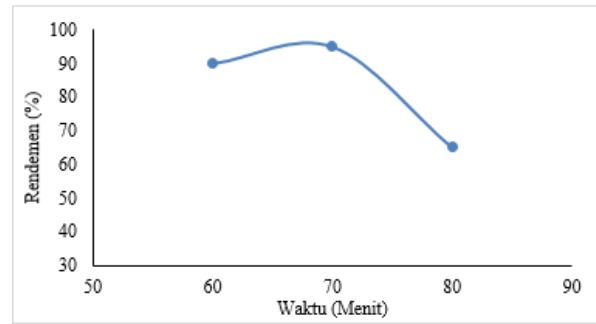
Hasil uji karakterisasi kadar air dan kandungan asam lemak bebas (ALB) pada minyak biji karet telah memenuhi SNI 7182:2015 dan disajikan pada **Tabel 2**. Kadar air sampel rata-rata minyak biji karet 0,012% dan kadar asam lemak bebas rata-rata pada nilai 7,96%.

**Tabel 2.** Hasil Uji Kadar Air dan Asam Lemak Bebas (ALB) Minyak Biji Karet

Sampel	Kadar Air (%)	ALB (%)
	Hasil Uji	Hasil Uji
B1	0,016	7,80
B2	0,016	7,99
B3	0,004	8,50
<b>Rerata</b>	<b>0,012</b>	<b>7,96</b>

**Rendemen Biodiesel**

Proses transesterifikasi ini menghasilkan tiga nilai efisiensi sebagai fungsi dari variasi waktu. Pengaruh perbedaan waktu terhadap tingkat kinerja proses tersebut disajikan pada **Gambar 2**.

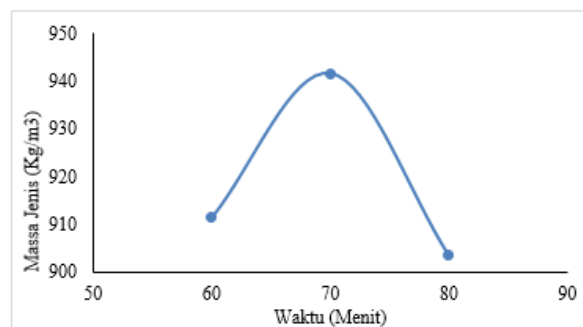


**Gambar 2.** Pengaruh waktu transesterifikasi terhadap rendemen biodiesel

**Gambar 2** menunjukkan bahwa peningkatan waktu transesterifikasi dari 60 menit ke 70 menit meningkatkan rendemen yang dihasilkan, yaitu dari 90% menjadi 95%. Akan tetapi, pada waktu 80 menit terjadi penurunan rendemen menjadi 60%. Secara umum, waktu transesterifikasi yang lebih lama meningkatkan jumlah tumbukan antar-molekul dalam produksi biodiesel, sehingga rendemen yang diperoleh semakin tinggi hingga mencapai titik jenuh [17]. Namun, penurunan pada menit ke-80 dapat dipengaruhi oleh reaksi esterifikasi minyak biji karet yang menghasilkan trigliserida dan air; air tersebut dapat bereaksi dengan katalis sehingga mengurangi jumlah katalis aktif [18]. Selain itu, kinerja reaksi dan hasil biodiesel juga dipengaruhi oleh rasio molar trigliserida/alkohol, jenis alkohol, jenis katalis, kadar air, kadar asam lemak bebas, kandungan sabun serta waktu reaksi [19].

**Massa Jenis Biodiesel**

Hasil uji massa jenis biodiesel dengan variasi waktu transesterifikasi disajikan pada **Gambar 3**. Nilai massa jenis yang diperoleh berturut-turut adalah 911,5 kg/m<sup>3</sup>, 941,5 kg/m<sup>3</sup>, dan 903,5 kg/m<sup>3</sup> untuk variasi waktu reaksi 60, 70, dan 80 menit. Peningkatan nilai massa jenis yang cukup signifikan terjadi pada waktu proses 70 menit (941,5 kg/m<sup>3</sup>). Kenaikan densitas ini diduga kuat terjadi karena terbentuknya produk samping berupa gliserol yang belum terpisah secara sempurna, mengingat massa jenis gliserol jauh lebih tinggi daripada biodiesel (sekitar 1260 kg/m<sup>3</sup>) [11] [20]. Proses pemisahan biodiesel dari gliserol yang kurang optimal ini umumnya terjadi pada pemisahan manual menggunakan corong pemisah [21].



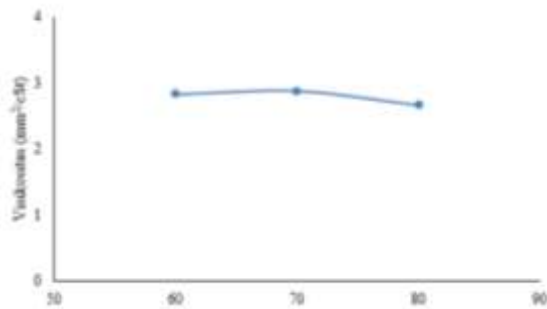
**Gambar 3.** Pengaruh waktu transesterifikasi terhadap massa jenis biodiesel

Pada variasi waktu transesterifikasi 80 menit, terjadi penurunan nilai massa jenis yang signifikan menjadi 903,5 kg/m<sup>3</sup>. Penurunan densitas pada waktu reaksi yang terlalu lama ini diduga disebabkan oleh terjadinya reaksi balik (*reversible reaction*) atau hidrolisis metil ester menjadi asam lemak bebas, serta potensi terbentuknya sabun (saponifikasi) akibat adanya air atau interaksi katalis yang berkepanjangan [22][23]. Perubahan komposisi produk ini secara langsung memengaruhi karakteristik fisik, termasuk menurunkan nilai densitas biodiesel.

Massa jenis juga memengaruhi stabilitas oksidasi biodiesel, di mana komponen dengan kepadatan molekul tertentu atau struktur rantai yang lebih jenuh umumnya memiliki stabilitas oksidasi yang lebih baik [23]. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh perlakuan variasi waktu (60, 70, dan 80 menit) menghasilkan nilai densitas yang belum memenuhi standar mutu biodiesel SNI 7182:2015 (yaitu sebesar 850–890 kg/m<sup>3</sup>).

**Viskositas Biodiesel**

Nilai viskositas biodiesel dari minyak biji karet yang dilakukan pada percobaan ini dapat dilihat pada **Gambar 4**.



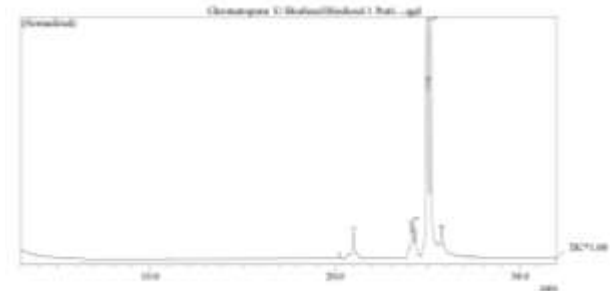
**Gambar 4.** Pengaruh waktu transesterifikasi terhadap viskositas biodiesel

**Gambar 4** menunjukkan hubungan yang linier antara waktu transesterifikasi dengan viskositas biodiesel yang diperoleh. Pengaruh waktu transesterifikasi tidak terlalu signifikan dan dapat dikatakan cenderung agak stabil terhadap perubahan nilai viskositas biodiesel, yaitu 2,83; 2,88; dan 2,67 mm<sup>2</sup>/s secara berturut-turut untuk waktu proses 60, 70 dan 80 menit. Namun, semakin lama waktu proses transesterifikasi juga dapat berdampak pada nilai viskositas biodiesel yang semakin turun sehingga lebih mudah mengalir keluar dari viskometer Ostwald saat pengujian. Penyebabnya yaitu masih terdapatnya kandungan zat pengotor di dalam biodiesel yang dapat berupa sisa reagen yang tidak bereaksi, sisa asam lemak bebas (ALB) maupun sisa air [24]. Hasil uji dari nilai viskositas menunjukkan bahwa parameter viskositas biodiesel yang diperoleh pada penelitian ini telah memenuhi spesifikasi

yang sesuai dengan standar SNI 7182:2015 (2,3-6,0 mm<sup>2</sup>/s).

**Analisis GC-MS Biodiesel (Gas Chromatography – Mass Spectrometry)**

Komponen-komponen kimia penyusun biodiesel diidentifikasi menggunakan analisis GC-MS pada sampel dengan variasi waktu transesterifikasi terbaik (70 menit) yang menghasilkan rendemen tertinggi. Kromatogram hasil pengujian disajikan pada **Gambar 5**, sedangkan komposisi senyawa metil ester yang terbentuk dirangkum dalam **Tabel 3**.



**Gambar 5.** Hasil uji GC-MS biodiesel pada sampel dengan waktu reaksi 70 menit

**Tabel 3.** Komposisi Metil Ester (Biodiesel) dari Minyak Biji Karet pada Waktu Reaksi 70 Menit

No. Peak	Waktu Retensi (menit)	Senyawa	Rumus Kimia	Luas Area (%)
1	20,266	Methyl palmitate	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	1,04
2	21,058	Pentadecanoic acid, methyl ester	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	5,43
3	24,152	Methyl linoleate	C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	5,29
4	24,231	Methyl linolenate	C <sub>19</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	2,40
5	24,380	Methyl oleate	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	3,77
6 & 7	25,056 & 25,107	Methyl linoleate	C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	43,49
8 & 9	25,249 & 25,831	Methyl oleate	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	38,58
				100,00

Berdasarkan hasil GC-MS, produk biodiesel dari minyak biji karet ini didominasi oleh senyawa ester asam lemak tak jenuh, dengan komponen utama berupa *methyl linoleate* (metil linoleat) sebesar 48,78% (total akumulasi *peak* 3, 6, dan 7) dan *methyl oleate* (metil oleat) sebesar 42,35% (total akumulasi *peak* 5, 8, dan 9). Selain itu, ditemukan pula komponen minor berupa ester asam lemak jenuh seperti *methyl palmitate* (metil palmitat) sebesar 1,04% pada waktu retensi 20,266 menit.

Tingginya kandungan *methyl linoleate* dan *methyl oleate* ini menunjukkan bahwa profil asam lemak dari minyak

biji karet (*Hevea brasiliensis*) memang kaya akan asam linoleat dan asam oleat. Fenomena dominansi senyawa ester tak jenuh ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Pandiangan dkk. (2023) yang menyatakan bahwa karakteristik utama biodiesel minyak biji karet terletak pada tingginya fraksi rantai karbon tak jenuh berikatan ganda, dengan komposisi utama berupa asam linoleat dan oleat [26].

Tingginya kandungan *methyl linoleate* dan *methyl oleate* ini merefleksikan profil asam lemak asal dari minyak biji karet (*Hevea brasiliensis*) yang memang kaya akan asam linoleat dan asam oleat. Fenomena dominansi senyawa ester tak jenuh ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Pandiangan dkk. (2023) yang menyatakan bahwa karakteristik utama biodiesel minyak biji karet terletak pada tingginya fraksi rantai karbon tak jenuh berikatan ganda, dengan komposisi utama berupa asam linoleat dan oleat [26].

Keberadaan komponen asam lemak tak jenuh yang tinggi ini menguntungkan bagi sifat fisik biodiesel di daerah beriklim dingin karena dapat menjaga nilai titik tuang (*pour point*) dan titik kabur (*cloud point*) tetap rendah. Namun, di sisi lain, banyaknya ikatan ganda pada *methyl linoleate* dan *methyl oleate* menyebabkan produk biodiesel menjadi lebih rentan terhadap proses oksidasi [27]. Hal ini menyebabkan nilai stabilitas oksidasi biodiesel minyak biji karet cenderung rendah, sehingga berpotensi belum sepenuhnya konsisten dalam memenuhi batasan ketat stabilitas oksidasi yang dipersyaratkan oleh standar mutu SNI 7182:2015 tanpa penambahan antioksidan komersial.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian sintesis biodiesel dari minyak biji karet menggunakan katalis heterogen CaO/ZnO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Variasi waktu transesterifikasi berpengaruh signifikan terhadap karakteristik biodiesel yang dihasilkan, meliputi persentase rendemen, massa jenis, dan viskositas kinematik.
2. Waktu transesterifikasi optimal dicapai pada waktu reaksi 70 menit dengan perolehan rendemen tertinggi sebesar 95%. Peningkatan waktu reaksi menjadi 80 menit justru menurunkan rendemen menjadi 60% akibat adanya potensi reaksi balik (*reversible reaction*) atau reaksi saponifikasi.
3. Nilai viskositas kinematik biodiesel pada seluruh variasi waktu reaksi berkisar antara 2,67–2,88 mm<sup>2</sup>/s dan telah memenuhi standar mutu SNI 7182:2015. Sebaliknya, parameter massa jenis (903,5–941,5 kg/m<sup>3</sup>) belum memenuhi standar SNI 7182:2015 (850–890 kg/m<sup>3</sup>) yang diduga kuat akibat pemisahan fase biodiesel dan gliserol yang kurang sempurna menggunakan corong pemisah manual.
4. Hasil analisis GC-MS pada sampel terbaik (waktu reaksi 70 menit) mengonfirmasi keberhasilan

konversi metil ester dengan dominansi senyawa asam lemak tak jenuh, yaitu *methyl linoleate* (metil linoleat) sebesar 48,78% dan *methyl oleate* (metil oleat) sebesar 42,35%, serta komponen jenuh minor berupa *methyl palmitate* (metil palmitat) sebesar 1,04%.

## SARAN

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan beberapa hal berikut:

1. Perlu dilakukan optimasi pada proses pemisahan (*purification*) produk pasca-transesterifikasi, misalnya melalui metode pencucian (*dry washing* atau *wet washing*) yang lebih efektif, atau penggunaan sentrifugasi untuk memastikan pemisahan emulsi gliserol bebas secara total demi menurunkan nilai densitas hingga memenuhi standar SNI 7182:2015.
2. Perlu dilakukan pengujian lebih lanjut mengenai parameter stabilitas oksidasi biodiesel mengingat tingginya kandungan metil ester tak jenuh berikatan ganda (*methyl linoleate*), serta mengevaluasi penambahan antioksidan untuk meningkatkan ketahanan simpan biodiesel minyak biji karet.
3. Disarankan untuk menguji stabilitas dan kemampuan penggunaan kembali (*reusability*) katalis heterogen CaO/ZnO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada beberapa siklus reaksi untuk menilai efisiensinya secara komprehensif.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. D. Romadhon and R. Subekti, 'Analisis Pengaturan Energi Terbarukan Kendaraan Berbasis Elektrik Untuk Mendukung Perlindungan Lingkungan (Analisis Komparatif Antara Indonesia, Brazil, dan Pakistan)', *Jurnal Pacta Sunt Servanda*, vol. 4, no. 1, pp. 177–190, 2023.
- [2] S. M. Farouk, A. M. Tayeb, S. M. S. Abdel-Hamid, and R. M. Osman, 'Recent advances in transesterification for sustainable biodiesel production, challenges, and prospects: a comprehensive review', *Environmental Science and Pollution Research*, Jan. 2024, doi: 10.1007/s11356-024-32027-4.
- [3] I. Edeh, 'Biodiesel Production as a Renewable Resource for the Potential Displacement of the Petroleum Diesel', in *Biorefinery Concepts, Energy and Products*, IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.93013.
- [4] A. E. Atabani, A. S. Silitonga, I. A. Badruddin, T. M. I. Mahlia, H. H. Masjuki, and S. Mekhilef, 'A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 4, pp. 2070–2093, May 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.01.003.
- [5] N. Ulya and E. D. Siswani, 'Sintesis Biodiesel Dari Minyak Biji Karet (*Hevea Brasiliensis*)

DOI: <http://dx.doi.org/10.52759/reactor.v7i1.81>

- Pada Variasi Suhu Transesterifikasi dan Rasio (Metanol/Minyak) Pada Waktu 60 Menit', *Jurnal Elemen Kimia*, vol. 6, no. 4, pp. 120–126, 2017.
- [6] A. Hakim and E. Mukhtadi, 'Pembuatan Minyak Biji Karet Dari Biji Karet Dengan Menggunakan Metode Screw Pressing: Analisis Produk Penghitungan Rendemen, Penentuan Kadar Air Minyak, Analisa Densitas, Analisa Viskositas, Analisa Angka Asam Dan Analisa Angka Penyabunan', *METANA*, vol. 13, no. 1, p. 13, Feb. 2018, doi: 10.14710/metana.v13i1.9745.
- [7] A. Akbar, K. Akli, and R. Youfa, 'Effect Soursop Leaf Extract For Oxidation Stability Of Palm Oil Biodiesel and Soybean Oil Biodiesel', *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1053, no. 1, p. 012087, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1053/1/012087.
- [8] B. Freedman, E. H. Pryde, and T. L. Mounts, 'Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils', *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 61, no. 10, pp. 1638–1643, Oct. 1984, doi: 10.1007/BF02541649.
- [9] N. Hidayati, T. S. Ariyanto, and H. Septiawan, 'Transesterifikasi Minyak Goreng Bekas Menjadi Biodiesel dengan Katalis Kalsium Oksida', *Jurnal Teknologi Bahan Alam*, vol. 1, no. 1, 2017.
- [10] L. P. Lestari, Meriatna, Suryati, Jalaluddin, and N. Sylvia, 'Pengaruh Suhu dan Waktu Reaksi Transesterifikasi Minyak Jarak Kepyar (Castor Oil) terhadap Metil Ester dengan Menggunakan Katalis Abu Tandan Kosong Kelapa Sawit', *Chemical Engineering Journal Storage*, vol. 1, no. 2, pp. 64–80, 2021.
- [11] R. Hartono, Y. R. Denny, D. S. Ramdhani, L. D. Assaat, A. W. Priakbar, and W. H. Ribawa, 'Pembuatan Biodiesel dengan Reaktor Bersirkulasi Sederhana Menggunakan Katalis KOH', *J. Teknol.*, vol. 15, no. 1, pp. 123–132, 2023.
- [12] J. Kandedo, K. T. Lee, and S. Bhatia, 'Biodiesel production from palm oil via heterogeneous transesterification', *Biomass Bioenergy*, vol. 33, no. 2, pp. 271–276, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.biombioe.2008.05.011.
- [13] I. Fatimah, G. Fadillah, S. Sagadevan, W.-C. Oh, and K. L. Ameta, 'Mesoporous Silica-Based Catalysts for Biodiesel Production: A Review', *ChemEngineering*, vol. 7, no. 3, p. 56, Jun. 2023, doi: 10.3390/chemengineering7030056.
- [14] S. H. Teo, M. Goto, and Y. H. Taufiq-Yap, 'Biodiesel production from *Jatropha curcas* L. oil with Ca and La mixed oxide catalyst in near supercritical methanol conditions', *J. Supercrit. Fluids*, vol. 104, pp. 243–250, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.supflu.2015.06.023.
- [15] R. ANR, A. A. Saleh, Md. S. Islam, S. Hamdan, and Md. A. Maleque, 'Biodiesel Production from Crude *Jatropha* Oil using a Highly Active Heterogeneous Nanocatalyst by Optimizing Transesterification Reaction Parameters', *Energy & Fuels*, vol. 30, no. 1, pp. 334–343, Jan. 2016, doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b01899.
- [16] S. W. Steidl, H. Stangl, I. Kohl, and T. Loerting, 'The Inexhaustible Teaching Potential of the Transesterification Reaction: The Kinetics of the Production of Biodiesel for Undergraduate Students', *J. Chem. Educ.*, vol. 102, no. 8, pp. 3497–3505, Aug. 2025, doi: 10.1021/acs.jchemed.4c01335.
- [17] N. P. Mauliza, N. Suriaini, C. M. Rosnelly, S. Satriana, and M. D. Supardan, 'Effect of Solid to Solvent Ratio and Extraction Time on Yield, Phytochemical Content and Physicochemical of Amla (*Phyllanthus emblica*) Seed Oil Extracted using Hexane', *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, vol. 17, no. 2, pp. 114–120, Jan. 2023, doi: 10.23955/rkl.v17i2.26915.
- [18] D. T. Oyekunle, E. A. Gendy, M. Barasa, D. O. Oyekunle, B. Oni, and S. K. Tiong, 'Review on utilization of rubber seed oil for biodiesel production: Oil extraction, biodiesel conversion, merits, and challenges', *Clean. Eng. Technol.*, vol. 21, p. 100773, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.clet.2024.100773.
- [19] S. Wahyuni, Ramli, and Mahrizal, 'Pengaruh suhu proses dan lama pengendapan terhadap kualitas biodiesel dari minyak jelantah', *Jurnal Berkala Ilmiah Fisika*, vol. 6, pp. 33–40, 2015.
- [20] J. M. Encinar, J. F. González, and A. Rodríguez-Reinares, 'Biodiesel from Used Frying Oil. Variables Affecting the Yields and Characteristics of the Biodiesel', *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 44, no. 15, pp. 5491–5499, Jul. 2005, doi: 10.1021/ie040214f.
- [21] Harmiansyah *et al.*, 'Analisis Pengaruh Jumlah Variasi Katalis MeOH Pada Pembuatan Biodiesel Melalui Proses Transesterifikasi', *Jurnal Elektro dan Mesin Terapan*, vol. 9, no. 1, pp. 113–120, May 2023, doi: 10.35143/elementer.v9i1.5927.
- [22] T. Priscilla, Muh. Irwan, and Z. Arifin, 'Sintesis Biodiesel Dari Minyak Jelantah Dalam Reaktor Ultrasonik', *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 5, no. 1, pp. 44–56, Mar. 2024, doi: 10.14710/jebt.2024.21938.
- [23] T. Eevera, K. Rajendran, and S. Saradha, 'Biodiesel production process optimization and characterization to assess the suitability of the product for varied environmental conditions', *Renew. Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 762–765, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.04.006.
- [24] R. I. Pramitha, A. Haryanto, and S. Triyono, 'Pengaruh Perbandingan Molar dan Durasi Reaksi terhadap Rendemen Biodiesel dari Minyak Kelapa (Coconut Oil)', *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, vol. 5, no. 3, pp. 157–166, 2016.
- [25] K. D. Pandiangan, W. Simanjuntak, S. Hadi, I. Ilim, D. I. Alista, and D. A. Sinaga, 'Study on the Reaction Parameters on Transesterification of Rubber Seed Oil Using MgO/zeolite-A

- Catalyst', *Trends in Sciences*, vol. 20, no. 8, p. 6480, Mar. 2023, doi: 10.48048/tis.2023.6480.
- [26] T. T. Kivevele, M. M. Mbarawa, Á. Bereczky, and M. Zöldy, 'Evaluation of the Oxidation Stability of Biodiesel Produced from Moringa oleifera Oil', *Energy & Fuels*, vol. 25, no. 11, pp. 5416–5421, Nov. 2011, doi: 10.1021/ef200855b.