

	JURNAL CHEMURGY E-ISSN 2620-7435 Available online at http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TK	 SINTA Accreditation No. 152/E/KPT/2023
---	---	--

PENGARUH RASIO VOLUME METANOL:MINYAK TERHADAP YIELD DAN SIFAT FISIS CRUDE BIODIESEL DARI MINYAK KEDELAI (*Glycine max*) DENGAN METODE TRANSESTERIFIKASI

*EFFECT OF METHANOL:OIL VOLUME RATIO ON THE YIELD AND PHYSICAL PROPERTIES OF CRUDE BIODIESEL FROM SOYBEAN OIL (*Glycine max*) THROUGH TRANSESTERIFICATION METHODE*

Delima Kartika Zahra*, Cintiya Septa Hasannah, Allisya Putri Pranoto, Anggi Anggreyni Tabrani

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang, 41361, Indonesia

*email : 2210631230003@student.unsika.ac.id

(Received: 2026 05, 06; Reviewed: 2026 06, 05; Accepted: 2026 06, 27)


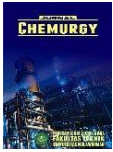
Abstrak

Ketergantungan pada bahan bakar fosil mendorong pengembangan energi terbarukan, salah satunya biodiesel dari minyak nabati. Minyak kedelai berpotensi digunakan sebagai bahan baku biodiesel karena kandungan trigliseridanya tinggi dan ketersediaannya melimpah. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh rasio volume metanol:minyak kedelai terhadap *yield*, densitas, dan viskositas *crude* biodiesel yang dihasilkan melalui transesterifikasi. Reaksi dilakukan pada suhu 65 °C selama 60 menit dengan kecepatan pengadukan 700 rpm menggunakan katalis KOH sebanyak 1 g, dengan variasi rasio volume metanol:minyak 1:10, 1:12, dan 1:14. Produk yang diperoleh dikategorikan sebagai *crude* biodiesel karena pemurnian dilakukan secara terbatas, sehingga evaluasi difokuskan pada *yield*, densitas, dan viskositas kinematik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio 1:12 menghasilkan *yield* rata-rata tertinggi, yaitu 93,678%, dibandingkan rasio 1:10 sebesar 84,456% dan 1:14 sebesar 86,661%. Nilai densitas *crude* biodiesel pada 40 °C berada pada rentang 861,67–880,93 kg/m³, sedangkan viskositas kinematik pada 40 °C berada pada rentang 3,77–4,54 cSt. Rasio 1:12 memberikan performa terbaik dengan densitas 877,60 kg/m³ dan viskositas kinematik 3,99 cSt, yang masih berada dalam rentang acuan SNI 7182:2024 untuk parameter yang diuji. Hasil ini menunjukkan bahwa rasio volume metanol:minyak memengaruhi *yield* dan karakteristik fisik awal *crude* biodiesel.

Kata Kunci: *crude biodiesel, minyak kedelai, rasio volume metanol:minyak, yield, sifat fisik*

Abstract

Dependence on fossil fuels has driven the development of renewable energy, one of which is biodiesel derived from vegetable oils. Soybean oil has the potential to be used as a biodiesel feedstock due to its high triglyceride content and abundant availability. This study aimed to analyze the effect of the methanol:soybean oil volume ratio on the yield, density, and viscosity of crude biodiesel produced through transesterification. The reaction was carried out at 65 °C for 60 minutes with a stirring speed of 700 rpm using 1 g of KOH catalyst, while the methanol:oil volume ratio was varied at 1:10, 1:12, and 1:14. The product obtained was classified as crude biodiesel because purification was conducted only to a limited extent; therefore, the evaluation focused on yield, density, and kinematic viscosity. The results showed that the 1:12 ratio produced the highest average yield of 93.678%, compared with 84.456% at 1:10 and 86.661% at 1:14. The density of crude biodiesel at 40

	<h1>JURNAL CHEMURGY</h1> <p>E-ISSN 2620-7435</p> <p>Available online at http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TK</p>	 <p>SINTA Accreditation No. 152/E/KPT/2023</p>
---	---	---

$^{\circ}\text{C}$ ranged from 861.67 to 880.93 kg/m^3 , while the kinematic viscosity at 40 $^{\circ}\text{C}$ ranged from 3.77 to 4.54 cSt. The 1:12 ratio provided the best performance, with a density of 877.60 kg/m^3 and a kinematic viscosity of 3.99 cSt, both of which were still within the reference range of SNI 7182:2024 for the tested parameters. These results indicate that the methanol:oil volume ratio affects the yield and initial physical characteristics of crude biodiesel.

Keywords: crude biodiesel, methanol:oil volume ratio, physical properties, soybean oil, yield

1. PENDAHULUAN

Ketergantungan kebutuhan bahan bakar fosil global masih mendominasi pemenuhan kebutuhan energi, khususnya untuk sektor transportasi, manufaktur, pembangkit listrik, dan industri. Akhir-akhir ini, hasil minyak bumi yang akan dijadikan bahan bakar juga menghadapi beberapa tantangan yang serius akibat dari penurunan cadangan bahan mentah, gejolak ekonomi dan juga krisis tekanan geopolitik. Tren konsumsi yang meningkat, ternyata tidak sebanding dengan kecepatan pemenuhan kebutuhan yang bahan bakunya bersifat tidak terbarukan. Sumber energi terbarukan menjanjikan solusi diversifikasi energi yang lebih stabil dan berkelanjutan (Araby and Araby, 2024). Pengembangan biofuel sedang menjadi sorotan karena dapat menggantikan bahan bakar fosil dalam sektor transportasi tanpa modifikasi yang signifikan pada mesin diesel (Bousbaa *et al.*, 2024).

Biodiesel adalah sebuah terobosan bahan bakar alternatif yang diperoleh melalui proses transesterifikasi dari minyak nabati ataupun lemak hewani. Keunggulan dari biodiesel meliputi beberapa hal, yakni biodegradabilitas tinggi, angka setana yang baik, dan reduksi emisi gas rumah kaca (Mignogna and Ceci, 2024). Crude biodiesel adalah produk metil ester yang dihasilkan dari proses pasca transesterifikasi namun belum melalui tahap pembersihan terakhir dan belum diuji secara lengkap, sehingga masih berpotensi mengandung kotoran seperti gliserol sisa, sabun atau katalis, sisa metanol, air, serta monodigliserida dan digliserida. Kandungan pengotor tersebut merupakan alasan utama dilakukannya tahap pemurnian karena dapat memengaruhi kualitas dan sifat fisik produk, termasuk densitas dan viskositas, sebelum biodiesel memenuhi standar kualitas (Jariah *et al.*, 2021).

Rasio metanol terhadap minyak menjadi sebuah variabel kondisi operasi yang akan sangat menentukan berhasil atau tidaknya reaksi transesterifikasi yang dilakukan, karena sifat reaksi transesterifikasi yang *reversible*, sehingga kelebihan metanol diperlukan untuk menggeser kesetimbangan menuju pembentukan metil ester dan meningkatkan konversi biodiesel yang dihasilkan (Pranita *et al.*, 2020). Penelitian Encinar *et al.*, (2022) menyebutkan bahwa pada transesterifikasi minyak kedelai dengan katalis homogen, rasio molar metanol:minyak berpengaruh terhadap kinetika reaksi, di mana peningkatan rasio dari 3:1 hingga 9:1 meningkatkan konstanta kinetika pada sistem berbasis KOH, sedangkan peningkatan hingga 12:1 tidak lagi memberikan kenaikan yang signifikan. Eksperimen lain yang dilakukan oleh Haryanto *et al.* (2022) menyatakan bahwa variasi rasio volume metanol akan meningkatkan *yield* biodiesel di titik optimum tertentu, peningkatan metanol dikisaran tertentu akan menggeser kesetimbangan reaksi ke arah produk. Penurunan *yield* akan terjadi ketika volume metanol terlalu besar karena pengaruh pengenceran dan pemisahan fase.

Peningkatan rasio volume metanol meningkatkan *yield* hingga kondisi optimum, kemudian menurunkannya pada penambahan metanol yang lebih tinggi. Studi tersebut juga menunjukkan bahwa rasio volume metanol berpengaruh terhadap viskositas dan densitas biodiesel, sehingga perubahan jumlah metanol tidak hanya memengaruhi hasil reaksi, tetapi juga karakteristik fisik produk (Haryanto *et al.*, 2022). Hasil ini menunjukkan bahwa pengaruh rasio volume terhadap *yield*

bersifat tidak linier. Pola optimum tersebut mendukung pentingnya studi variasi rasio volume. Rasio volume metanol:minyak yang terlalu tinggi juga dapat mengurangi *yield* biodiesel yang terukur setelah proses pemisahan. Metanol berlebih bisa meningkatkan kelarutan gliserol dalam fase biodiesel, sehingga pemisahan produk tidak efektif (Larimi *et al.*, 2024). Beberapa penelitian yang dilakukan membahas optimasi produksi biodiesel berbahan minyak kedelai dengan memvariasikan kondisi operasi termasuk rasio metanol terhadap minyak, suhu, waktu, dan katalis, serta melaporkan peningkatan *yield* pada kombinasi kondisi tertentu (Masjudin and Chang, 2023).

Fokus penelitian yang dominan masih pada optimasi berbasis rasio molar dan target produk biodiesel yang diasumsikan telah mencapai mutu akhir, sementara isu pemisahan fase kelarutan gliserol saat metanol berlebih dan implikasinya terhadap karakteristik *crude* biodiesel atau produk setelah transesterifikasi dengan pemurnian terbatas masih sering dibahas sebagai tantangan umum di artikel ulasan, bukan dipetakan secara spesifik pada rancangan eksperimen sederhana dan parameter fisik dasar (Yahya *et al.*, 2025). Literatur lain juga menegaskan bahwa setelah reaksi, campuran metil ester dengan gliserol umumnya dipisahkan menjadi *crude* biodiesel dan *crude glycerol*, sehingga kualitas produk awal sangat dipengaruhi tahap pemisahan/pemurnian dan keberadaan pengotor (Wang *et al.*, 2024).

Keterbatasan tersebut membuka ruang penelitian untuk menguji secara terarah pengaruh variasi rasio volume metanol:minyak kedelai pada kondisi operasi tetap terhadap *yield* serta sifat fisik awal seperti densitas dan viskositas pada *crude* biodiesel dari minyak kedelai. Perlu adanya kajian yang menilai pengaruh variasi rasio volume metanol:minyak terhadap *yield* serta karakteristik fisik dasar seperti densitas dan viskositas pada *crude* biodiesel dari minyak kedelai sebelum pemurnian lanjutan.

Tujuan penelitian ini di antaranya yaitu menganalisis pengaruh hubungan rasio volume metanol:minyak kedelai (v/v) yaitu, 1:10, 1:12, dan 1:14, terhadap *yield crude* biodiesel yang dihasilkan melalui proses transesterifikasi pada kondisi operasi tetap, yaitu di suhu 65°C, waktu operasi selama 60 menit, dan dengan kecepatan pengadukan 700 rpm. Penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan densitas dan viskositas kinematik *crude* biodiesel pada tiap variasi rasio volume metanol:minyak kedelai (v/v) 1:10, 1:12, dan 1:14 serta mengevaluasi kesesuaiannya terhadap rentang acuan SNI 7182:2024 untuk parameter yang diuji.

2. METODOLOGI

Kegiatan penelitian serta pengujian ini dilakukan di Gedung Laboratorium Bersama Universitas Singaperbangsa Karawang (GLB UNSIKA). Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan, yaitu preparasi alat dan bahan, sintesis *crude* biodiesel dengan metode transesterifikasi, dan pencucian *crude* biodiesel. Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini di antaranya, minyak kedelai komersil dengan kadar FFA 0,08% (PT Daesang Agung Indonesia), Kalium Hidroksida (KOH) sebagai katalis homogen, metanol grade analisis dengan *purity* 99%, dan aquades.

2.1. Preparasi Bahan dan Alat

Minyak kedelai diukur sebanyak 100 mL sebagai bahan baku setiap percobaan. Sebelum reaksi berlangsung, minyak perlu dipanaskan pada suhu 65-70°C selama 15 menit untuk menghilangkan kandungan air pada minyak, kemudian diturunkan suhunya hingga mendekati suhu reaksi, yaitu 65°C (Ho, Ng and Gan, 2022). Rasio volume methanol:minyak kedelai (v/v) yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Variasi Volume Sampel dengan Metanol

Variasi (v/v)	Volume Minyak Kedelai (mL)	Volume Metanol (mL)
1:10	100	10
1:12	100	8,33
1:14	100	7,14

Larutan katalis disiapkan dengan melarutkan 1 g KOH ke dalam metanol sesuai variasi rasio yang digunakan hingga homogen. Larutan katalis kemudian segera digunakan dalam proses transesterifikasi untuk meminimalkan penyerapan uap air dan penurunan aktivitas katalis.

2.2. Reaksi Sintesis *Crude Biodiesel* dengan Transesterifikasi

Proses transesterifikasi dilakukan menggunakan sistem refluks untuk mencegah penguapan metanol selama reaksi berlangsung. Minyak kedelai hasil preparasi sebanyak 100 mL dimasukkan ke dalam reaktor, dipanaskan hingga mencapai suhu operasi 65°C. Pengadukan diatur pada kecepatan 700 rpm untuk memastikan pencampuran yang merata antara fase minyak dan fase metanol. Setelah suhu minyak stabil pada 65 °C. Larutan katalis disiapkan dengan melarutkan 1 gram KOH ke dalam metanol sesuai variasi rasio volume metanol:minyak kedelai, yaitu 1:10, 1:12, dan 1:14. Larutan katalis metanol–KOH ditambahkan secara perlahan ke dalam erlenmeyer sambil pengadukan tetap berlangsung. Kondensor dipastikan berfungsi dengan baik sehingga metanol yang menguap dapat terkondensasi kembali ke dalam sistem. Reaksi transesterifikasi dijalankan pada suhu 65°C selama 60 menit dengan kecepatan pengadukan tetap 700 rpm, terhitung sejak seluruh larutan katalis ditambahkan (Ho, Ng and Gan, 2022).

2.3. Pencucian *Crude Biodiesel*

Setelah reaksi transesterifikasi selesai dilakukan, campuran didinginkan dahulu, kemudian dipisahkan lapisan gliserolnya. Setelah dipisahkan hasil sampel *crude biodiesel* tersebut dicuci menggunakan 100 mL air suling hangat pada suhu 45-50 °C. Pencucian bertujuan mengurangi kandungan sisa katalis, metanol, gliserol, dan pengotor polar lainnya. Sampel yang ditambahkan dengan air suling hangat tersebut dikocok perlahan, kemudian campuran didiamkan hingga terbentuk dua fase. Fase bawah yang mengandung air dan pengotor dipisahkan, sedangkan fase atas dipertahankan sebagai *crude biodiesel* (Jariah *et al.*, 2021).

2.4. Analisis Data

2.4.1. Analisis *Yield Crude Biodiesel*

Crude biodiesel yang telah dicuci dan dikeringkan didinginkan hingga mencapai suhu ruangan, kemudian ditimbang menggunakan timbangan analitik untuk mendapatkan massa *crude biodiesel*. Massa minyak awal yang digunakan dalam reaksi ditentukan sebagai massa bahan baku. Jika minyak awal diukur dalam satuan volume, massa minyak bisa didapat dengan menimbang minyak sebelum reaksi atau dengan mengubahnya menggunakan nilai densitas minyak kedelai yang digunakan dalam penelitian (Encinar *et al.*, 2022). *Yield crude biodiesel* dihitung dengan menggunakan perbandingan massa *crude biodiesel* terhadap massa minyak awal, seperti yang umum digunakan dalam penelitian *biodiesel* (Tsaoulidis *et al.* 2023).

$$Yield (\%) = \frac{m_{crude\ biodiesel} (gram)}{m_{minyak\ awal} (gram)} \times 100\% \quad (1)$$

Analisis Densitas *Crude Biodiesel*

Densitas *crude biodiesel* diukur menggunakan metode piknometer pada suhu 40 °C mengacu pada rentang pengujian SNI 7182:2024. Nilai densitas dihitung berdasarkan selisih massa piknometer berisi sampel dan massa piknometer kosong, kemudian dibagi dengan volume piknometer 5 mL, sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (2) di bawah ini (Taqiya and Samik, 2025).

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{v} \quad (2)$$

Piknometer kosong ditimbang terlebih dahulu untuk memperoleh m_2 , kemudian diisi sampel *crude biodiesel* hingga tanda batas volume tetap dan ditimbang kembali untuk memperoleh m_1 . Nilai densitas dihitung menggunakan Persamaan (2), dengan ρ sebagai densitas (g/cm^3), m_1 sebagai massa piknometer berisi sampel (g), m_2 sebagai massa piknometer kosong (g), dan v sebagai volume piknometer (cm^3). Pengukuran dilakukan pada seluruh sampel dengan kondisi suhu yang sama, dan nilai akhir densitas ditetapkan sebagai rata-rata hasil pengukuran (Taqiya and Samik, 2025).

Analisis Viskositas *Crude Biodiesel*

Pengujian viskositas *crude biodiesel* di menggunakan Viskometer Digital *Brookfield*. viskositas kinematik adalah viskositas dinamis yang dibagi dengan kerapatan fluida. Hal ini berarti, fluida

dengan Viskositas dinamis yang sama bisa memiliki viskositas kinematik berbeda jika kerapatannya berbeda Viskositas kinematik dan dapat dinyatakan dalam cSt atau mm²/s, karena satuan ini umum digunakan dalam mengevaluasi bahan bakar. Hubungan antara viskositas kinematik (ν) dan viskositas dinamis (μ) dengan densitas (ρ) bisa ditulis dalam persamaan di bawah ini (Sánchez-rodríguez *et al.*, 2025):

$$\text{Viscosity } (\nu) = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

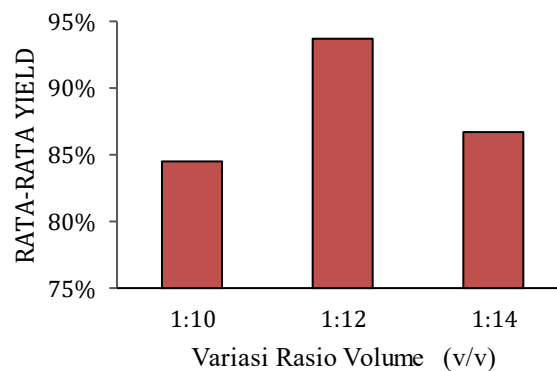
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh Variasi Rasio Volume Metanol:Minyak Kedelai terhadap Yield

Adanya variasi rasio volume metanol dengan minyak kedelai menghasilkan keterkaitan akan *yield crude biodiesel*. *Yield* rata-rata *crude biodiesel* yang tertinggi diperoleh pada rasio volume 1:12 dengan nilai 93,678%, yang kemudian disusul rasio volume 1:14 dan 1:10 dengan nilai 86,661% dan 84,456%. Setiap variasi menunjukkan pola peningkatan lalu, penurunan.

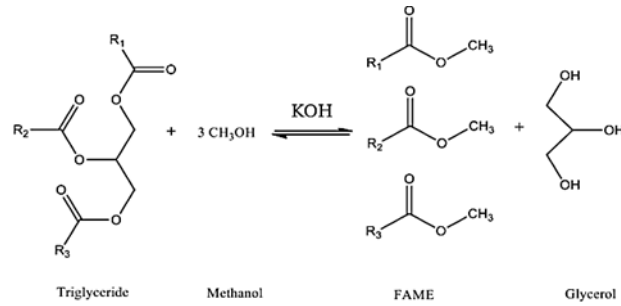
Tabel 2. Data Hasil Perhitungan Persentase *Yield Crude Biodiesel*

Kode Sampel	Yield (%)	Rata-Rata Yield Crude Biodiesel (%)
10A	84,897%	84,456%
10B	84,015%	
12A	93,632%	93,678%
12B	93,723%	
14A	87,156%	86,661%
14B	86,167%	



Gambar 1. Rata-rata *Yield*

Sebagian studi perbandingan melaporkan rasio metanol:minyak dalam rasio molar, sedangkan penelitian ini menggunakan rasio volume (v/v), adapun perbandingan difokuskan pada tren *yield* dan kisaran nilai, bukan pada penyederhanaan angka rasio secara langsung. *Yield* pada penelitian ini dihitung berdasarkan perbandingan massa *crude biodiesel* yang diperoleh setelah proses pencucian ataupun pemurnian terhadap massa minyak awal, sehingga perubahan ketegasan pemisahan dua fase dan potensi kehilangan *crude biodiesel* selama pemisahan dapat langsung memengaruhi nilai *yield* terukur, selain pengaruh konversi reaksi.



Gambar 2. Reaksi Transesterifikasi dengan Katalis KOH

Minyak kedelai merupakan salah satu minyak nabati yang memiliki kandungan *Free Fatty Acid* (FFA) yang rendah, yaitu dikisaran 0,08%. Menurut kajian Ulukardesler (2023) menyatakan bahwa minyak nabati dengan kadar asam lemak bebas (FFA) di bawah kisaran 2% dapat langsung diproses melalui transesterifikasi secara langsung tanpa perlu melakukan tahap esterifikasi untuk menurunkan kadar FFA, maka dari itu untuk konversi minyak kedelai menjadi biodiesel menggunakan metode transesterifikasi langsung. Reaksi transesterifikasi pada eksperimen yang dilakukan melibatkan pertukaran gugus alkoksi antara trigliserida dan metanol dengan bantuan katalis basa yaitu KOH, yang menghasilkan produk utama berupa *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) dan produk samping berupa gliserol (Changmai, Vanlalveni and Ingle, 2020). KOH berperan sebagai katalis homogen yang terlebih dahulu dilarutkan dengan metanol, sehingga membentuk spesies aktif berupa ion metoksida (Nabgan *et al.*, 2022). Spesies alkoksi aktif ini kemudian menyerang atom karbonil pada gugus ester trigliserida, sehingga akan membentuk intermediet tetrahedral yang akan terurai menjadi metil ester dan juga gliserol. Reaksi berlangsung bertahap, mulai dari trigliserida, digliserida, monogliserida, hingga akhirnya gliserol dengan satu molekul ester terbentuk pada setiap tahapnya (Yusuf and Oladepo, 2024).

Hasil dari eksperimen *yield* rasio volume metanol terhadap minyak 1:12 melaporkan hasil tertinggi dengan rata-rata dari dua replikasi ialah 93,678%. Hasil studi terbaru lain berbasis *soybean oil and methanol* oleh Acevedo-quiroz *et al.* (2024) melaporkan bahwa *experimental optimum yield* berada pada kisaran 84,97% pada rasio metanol dengan minyak kedelai 6:1. Perbedaan nilai pada hasil eksperimen terhadap literatur tersebut wajar karena penelitian ini melaporkan *yield crude* biodiesel berbasis massa produk setelah pemisahan atau pencucian yang terbatas, sedangkan studi pembandingan melaporkan *yield* berbasis konversi reaksi berupa FAME murni. Volume metanol pada rasio ini cukup untuk mempertahankan berlangsungnya reaksi transesterifikasi dan juga tidak berlebihan, sehingga tidak mengganggu proses pemisahan lapisan *crude* biodiesel dan gliserol. Studi lain terkait intensifikasi reaksi yang dilakukan oleh Tsaoulidis *et al.* (2023) melaporkan bahwa *yield* dapat mencapai >90% pada rentang rasio volume tertentu antara metanol dengan minyak, dan tren *yield* juga dapat meningkat lalu menurun ketika rasio volume dinaikkan atau diturunkan melewati nilai optimum. Berdasarkan hasil *yield* dan juga kesesuaian pola memperkuat interpretasi bahwa rasio volume metanol dengan minyak di 1:12 merupakan titik optimum untuk kombinasi kondisi operasi dan metode pemurnian yang digunakan.

Rasio volume 1:14 memberikan rata-rata *yield* sebesar 86,661%, yang lebih rendah dibandingkan rasio volume 1:12, namun sedikit lebih tinggi dibandingkan rasio volume 1:10. Pada rasio volume 1:14, jumlah metanol yang lebih sedikit berpotensi mengurangi kelarutan silang antara *crude* biodiesel dan gliserol, sehingga proses pemisahan lapisan bisa terjadi lebih mudah (Chanakaewsomboon and Moollakorn, 2021). Sistem dua fase yang mengandung metanol terlalu sedikit juga mengurangi peluang terjadinya tumbukan efektif antar molekul di permukaan, sehingga proses pembentukan FAME (*Fatty Acid Methyl Ester*) bisa lebih lambat atau tidak lengkap dalam waktu reaksi yang sama (Tsaoulidis *et al.* 2023). Kurangnya metanol sebagai reaktan juga akan memengaruhi keadaan kesetimbangan reaksi, karena proses transesterifikasi bersifat reversibel. Rasio metanol:minyak kedelai yang lebih rendah, mengakibatkan pembentukan metil ester yang kurang optimal (Li *et al.*, 2022). Penurunan *yield* pada rasio volume 1:14 diindikasikan karena

adanya pengaruh dari keterbatasan jumlah reaktan, dibandingkan dengan adanya kehilangan saat proses pemurnian.

Rasio volume 1:10 menghasilkan *yield* yang paling rendah, yaitu dengan nilai rata-rata 84,456% pada perlakuan dua kali replikasi. Rasio volume 1:10 merupakan kondisi dengan jumlah metanol paling tinggi di antara variasi yang diuji, sehingga kelarutan silang antara metil ester dan gliserol cenderung meningkat, sehingga batas antar fase menjadi kurang tegas, akibatnya dapat menurunkan efisiensi pemisahan dan *yield* terukur lebih rendah (Limmun *et al.*, 2024). Faktor kondisi pemisahan yang kurang ideal akan berpengaruh pada massa *crude* biodiesel yang dapat dipulihkan, karena sebagian biodiesel ikut terbawa pada fasa bawah yaitu campuran antara gliserol dan air, atau terperangkap sebagai emulsi.

Perbandingan tiga rasio menunjukkan adanya hubungan antara kebutuhan metanol untuk reaksi dan dampak metanol terhadap proses pemisahan. Variasi rasio volume 1:10, konsentrasi metanol lebih tinggi dibandingkan dua rasio lainnya, sehingga keuntungan dari sisi reaksi bisa tergantikan oleh peningkatan kesulitan pemisahan dan risiko terbentuknya emulsi selama proses pencucian (Chanakaewsomboon and Moollakorn, 2021). Variasi rasio volume 1:14 mengurangi jumlah metanol, sehingga pemisahan dua fase secara termodinamika menjadi lebih efisien, tetapi penurunan metanol juga bisa mengurangi tingkat konversi pada waktu reaksi yang sama (Li *et al.*, 2022).

Titik optimal pada perbandingan rasio volume 1:12 tercapai ketika konsentrasi metanol masih cukup untuk mendukung pembentukan FAME, sementara dampak negatif terhadap pemisahan belum terlalu signifikan. Pola adanya titik optimum pada penelitian ini juga konsisten dengan studi produksi biodiesel minyak kedelai pada kondisi operasi terkontrol yang melaporkan bahwa perubahan rasio alkohol dengan minyak menghasilkan perubahan hasil yang nyata pada kondisi suhu yang sama, sehingga rasio berperan sebagai pengendali utama ketika variabel lain ditahan tetap (Acevedo-quiroz, Jes and Acevedo-quiroz, 2024). Pendekatan berdasarkan keseimbangan termodinamika fasa menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi metanol membuat biodiesel dan gliserol mendekati kondisi tidak larut satu sama lain, sehingga memudahkan proses pemisahan dan meningkatkan *recovery crude* biodiesel (Limmun *et al.*, 2024).

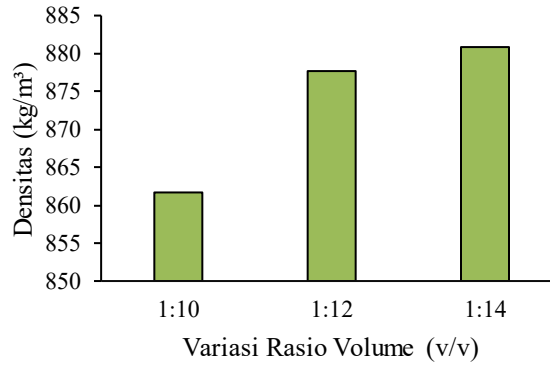
3.2. Karakteristik Densitas dan Viskositas Kinematik *Crude* Biodiesel serta Kesesuaian terhadap Standar Acuan

3.2.1 Analisis Densitas *Yield Crude* Biodiesel

Pengujian densitas menjadi parameter utama yang sensitif dalam menilai sifat fisis dari *crude* biodiesel, hal ini karena keduanya menunjukkan komposisi metil ester, ataupun adanya kandungan zat pengotor lainnya pasca reaksi terjadi.

Tabel 3. Data Hasil Perhitungan Densitas *Crude* Biodiesel

Kode Sampel	Densitas pada 40°C (kg/m ³)	Rata-Rata Densitas pada 40°C (kg/m ³)
10A	859,98	861,67
10B	863,36	
12A	875,6	877,6
12B	879,6	
14A	872,06	880,93
14B	889,8	



Gambar 3. Rata-rata Densitas *Yield Crude Biodiesel*

Rata-rata densitas berturut-turut adalah 861,67 kg/m³ untuk variasi rasio volume 1:10, 877,60 kg/m³ untuk variasi rasio volume 1:12, dan 880,93 kg/m³ untuk variasi rasio volume 1:14, sehingga rasio volume 1:14 menghasilkan densitas tertinggi berdasarkan data uji. Pola kenaikan menunjukkan bahwa perubahan rasio metanol:minyak tidak hanya memengaruhi pembentukan FAME, tetapi juga memengaruhi komposisi fase ester yang terkonversi sebagai *crude* biodiesel, sehingga densitas lebih tepat dibaca sebagai indikator gabungan antara fraksi FAME (Kumbhar *et al.*, 2022).

Hasil densitas sampel *crude* biodiesel pada penelitian ini dapat dibandingkan dengan biodiesel kedelai (B100) yang telah diteliti oleh McCormick *et al.* (2024), yang menyatakan bahwa densitasnya sebesar 0,884 g/mL pada suhu 15 °C untuk biodiesel kedelai standar yang ada di pasar. Perbedaan suhu pembandingan ditekankan karena menunjukkan bahwa densitas berubah secara linear terhadap suhu, sehingga densitas pada suhu yang lebih tinggi secara fisik akan cenderung lebih kecil jika komposisi bahan bakar sama. Kedekatan antara densitas sampel *crude* biodiesel tertentu dengan nilai *soy* B100 pada suhu 15 °C bisa menunjukkan bahwa fase ester yang terpisah masih memiliki komponen yang memengaruhi peningkatan densitas efektif, seperti fraksi yang lebih polar atau lebih berat. Ini dapat diartikan bahwa kondisi pengukuran suhu harus dipertahankan secara ketat agar perbandingan antar studi tetap akurat dan tidak bias. Kerangka acuan dari McCormick *et al.* (2024) menekankan bahwa suhu uji penting untuk dijelaskan dalam interpretasi kepadatan, karena kepadatan juga memengaruhi proses atomisasi dan kemampuan semprotan untuk meresap dalam penerapan mesin.

Nilai densitas rata-rata terendah pada rasio volume 1:10 yaitu 861,67 kg/m³, hasil ini didapatkan dengan perlakuan penambahan metanol paling banyak di antara variasi yang diuji, sehingga akan berpotensi meningkatkan peluang residu metanol ikut terbawa pada fase ester, dan dampaknya densitas campuran cenderung lebih rendah dibanding kondisi dengan metanol lebih sedikit. Nilai densitas pada rasio volume 1:12 yaitu 877,60 kg/m³ dapat diposisikan sebagai kondisi stabil yang menghasilkan fase ester lebih konsisten, karena rentang replikasi lebih kecil, sehingga mengindikasikan komposisi *crude* biodiesel yang lebih stabil pada skema pemisahan dan pencucian yang sama (Wan Osman *et al.*, 2024).

Variasi rasio volume 1:14 memperlihatkan rentang densitas yang paling besar dibanding rasio lain yaitu 872,06 dan 889,8 kg/m³, yang menandakan replikasi pada rasio ini paling sensitif terhadap perlakuan. Secara fisik dan kimia, densitas biodiesel meningkat ketika fraksi komponen lebih berat atau pengotor polar masih ikut terbawa, misalnya jejak gliserol, air, sabun, katalis, atau metanol yang belum terkonversi sempurna dari fase ester. Ulasan terkait sistem pasca reaksi menegaskan bahwa produk hasil transesterifikasi dapat mengandung alkohol, katalis basa, sabun, serta gliserida yang belum bereaksi, sehingga kualitas fase yang terbentuk sangat bergantung pada pemisahan dan pemurnian (Jarrah *et al.*, 2021).

Hal ini dapat membenarkan perubahan densitas pada tiga rasio volume *crude* biodiesel dipengaruhi oleh rasio metanol:minyak kedelai melalui dua mekanisme utama, yaitu residu metanol yang dapat tertahan pada fase ester dan terbawanya pengotor polar atau komponen berat akibat pemisahan yang

belum sepenuhnya bersih. Komposisi fase ester yang terkonversi sebagai *crude* biodiesel dapat berubah dan tercermin pada densitas terukur (Yang, Shiyou and Teng, 2024).

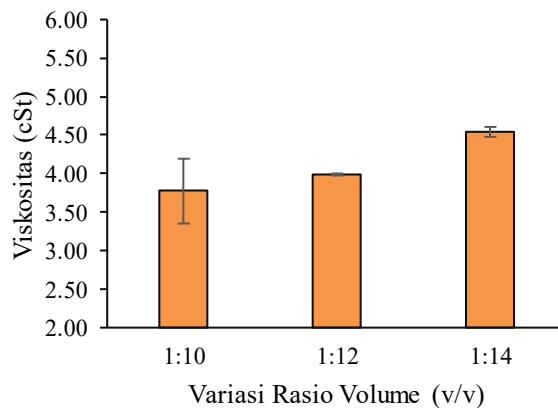
Rata-rata hasil densitas dari ketiga variasi sampel tersebut, jika dibandingkan dengan nilai densitas minyak kedelai awal yaitu 917 kg/m^3 , maka keseluruhan nilai densitas sampelnya lebih rendah dari pada densitas minyak kedelai awal. Penurunan densitas ini mendukung bahwa struktur trigliserida dalam minyak kedelai telah berubah ke arah pembentukan senyawa ester, yaitu *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME). Kajian oleh Yusuf & Oladepo (2024) memaparkan bahwa transesterifikasi akan mengonversi trigliserida menjadi FAME dan gliserol, adanya perubahan struktur tersebut akan memengaruhi sifat fisik dari *crude* biodiesel, termasuk densitas. Hasil ini didukung penelitian sebelumnya yang dibandingkan dengan penelitian biodiesel kedelai (B100) oleh McCormick et al. (2024), yang menyatakan bahwa densitasnya sebesar 884 kg/m^3 untuk biodiesel kedelai standar yang ada di pasar. Kedekatan antara densitas sampel *crude* biodiesel sampel dengan nilai densitas *soy* B100 mencerminkan bahwa densitas minyak awal telah terkonversi menjadi densitas metil ester atau *crude* biodiesel. Penurunan nilai densitas *crude* biodiesel dari densitas minyak kedelai awal mendukung kuat bahwa produk yang diperoleh telah terkonversi ke arah pembentukan FAME, namun untuk konfirmasi komposisi dari FAME tetap memerlukan analisis lanjutan (Yeşilova, Yücel and Ergan, 2025).

3.2.2. Analisis Viskositas Yield Crude Biodiesel

Pengujian densitas menjadi parameter utama yang sensitif dalam menilai sifat fisis dari *crude* biodiesel, hal ini karena keduanya menunjukkan komposisi metil ester, ataupun adanya kandungan zat pengotor lainnya pasca reaksi terjadi.

Tabel 4. Data Hasil Perhitungan Viskositas Kinematik Yield

Kode Sampel	Viskositas Kinematik pada 40°C (cSt)	Rata-Rata Viskositas Kinematik pada 40°C (cSt)
10A	4,07	3,77
10B	3,47	
12A	4,00	3,99
12B	3,98	
14A	4,59	4,54
14B	4,50	



Gambar 4. Rata-rata Viskositas Yield

Rata-rata viskositas kinematik *crude* biodiesel berturut-turut adalah 3,77 cSt untuk rasio volume 1:10, 3,99 cSt untuk rasio volume 1:12, dan 4,54 cSt untuk rasio volume 1:14, sehingga rasio 1:14 menghasilkan viskositas tertinggi. Adanya uji viskositas sangat penting untuk melihat spesifikasi pompa, kualitas atomisasi, serta performa injektor, yang nantinya akan berpengaruh pada karakteristik semprotan bahan bakar (Sánchez-rodríguez *et al.*, 2025). Viskositas *crude* biodiesel meningkat ketika kadar metil ester efektif berkurang dan fraksi gliserida atau komponen polar meningkat, karena gliserida memiliki berat molekul lebih besar dan interaksi antarmolekul lebih kuat dibanding metil ester (Yeşilova, Yücel and Ergan, 2025). Penelitian sebelumnya juga menguji densitas dan viskositas secara bersamaan dengan kadar gliserida menempatkan bahwa viskositas merupakan parameter yang sensitif terhadap komposisi minor, seperti monogliserida dan turunannya (Casas, Pérez and Ramos, 2023). Nilai viskositas tertinggi terjadi pada rasio 1:14, yaitu sekitar 4,50–4,59 cSt, yang menunjukkan aliran yang paling lambat dalam kondisi metanol terendah, sesuai dengan kemungkinan konversi yang tidak sempurna atau sisa gliserida yang lebih tinggi. Nilai ini dapat dibandingkan dengan *soy* B100 pada studi McCormick *et al.* (2024) yang melaporkan viskositas kinematik 4,05 cSt pada 40 °C.

Nilai viskositas tertinggi pada rasio volume 1:14, yaitu sekitar 4,50–4,9 cSt per replikasi dapat ditafsirkan bahwa pada metanol terendah, campuran pasca reaksi cenderung menyisakan fraksi yang meningkatkan hambatan alir, baik karena ketercapaian reaksi yang lebih terbatas maupun karena fase ester yang dipulihkan sebagai *crude* biodiesel lebih mudah membawa fraksi berat akibat variasi pemisahan dan pencucian. Interpretasi ini sejalan dengan konsep bahwa rasio alkohol dan minyak berperan pada ketercapaian reaksi sekaligus memengaruhi perilaku dua fase pasca reaksi (Yahya *et al.*, 2025). Nilai viskositas pada rasio volume 1:12, yaitu sekitar 4,00–3,98 cSt per replikasi, konsistensi ini dapat diibaratkan sebagai kondisi stabil yang menghasilkan komposisi *crude* biodiesel yang lebih seragam pada prosedur pemurnian terbatas yang sama, sehingga perubahan kecil proses tidak terlalu menggeser komposisi minor yang sensitif terhadap viskositas.

Hubungan antara kadar metanol dengan kelarutan silang biodiesel dan gliserol menunjukkan bahwa pemilihan rasio yang tidak terlalu tinggi dapat membantu menjaga stabilitas pada tahap pemisahan tanpa mengorbankan kebutuhan metanol untuk menggeser reaksi (Yang *et al.*, 2024). Pelaporan kualitas biodiesel melalui program BQ-9000, viskositas kinematik yang umum teramati berada dalam rentang sekitar 3,9–4,9 mm²/s, sehingga nilai pada rasio 1:12 berada pada kisaran yang lazim ditemui pada biodiesel pasar, walaupun sampel penelitian ini masih berada pada kategori *crude* (McCormick, 2024). Kombinasi densitas tinggi dan viskositas yang moderat pada rasio 1:12 mendukung pendapat bahwa kondisi ini menghasilkan biodiesel yang dominan berupa metil ester tanpa adanya penumpukan komponen berat yang meningkatkan viskositas (Casas *et al.*, 2023). Konsistensi ini menjadi dasar untuk membaca viskositas sebagai indikator dari kemurnian dan tingkat konversi *crude* biodiesel.

Peningkatan rasio volume metanol:minyak dari 1:10 ke 1:14 diikuti kenaikan viskositas kinematik *crude* biodiesel dari 3,77 cSt menjadi 4,54 cSt, menunjukkan bahwa penurunan jumlah metanol cenderung menghasilkan fase ester dengan hambatan alir lebih besar. Kondisi metanol terendah pada rasio 1:14 diduga membatasi ketercapaian reaksi sekaligus meningkatkan peluang terbawanya fraksi yang lebih berat atau lebih polar pada *crude* biodiesel, seperti sisa gliserida atau komponen lain, sehingga viskositas terukur menjadi paling tinggi (Casas *et al.*, 2023). Rasio 1:12 menghasilkan viskositas moderat di 3,99 cSt dan konsistensi antar replikasi yang lebih baik, sehingga dapat dibaca sebagai kondisi yang lebih stabil.

Rata-rata viskositas kinematik hasil ketiga variasi sampel eksperimen, jika dibandingkan dengan nilai viskositas kinematik dari minyak kedelai awal yaitu 49,5 cSt, maka seluruh sampel hasil *crude* biodiesel menunjukkan penurunan yang signifikan. Penurunan nilai viskositas kinematik pada hasil sampel mendukung bahwa minyak kedelai telah mengalami konversi dari trigliserida menjadi *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME). Menurut Yusuf & Oladepo (2024), adanya perubahan nilai viskositas kinematik dari minyak awal ke arah nilai yang mendekati acuan nilai fisis FAME, dikarenakan perubahan struktur molekul dari trigliserida menjadi metil ester, sehingga berdampak pada sifat alir fluida yang lebih baik untuk mesin diesel. Hasil viskositas kinematik dari sampel didukung hasil penelitian sebelumnya yang dibandingkan dengan penelitian *soy* B100 pada studi McCormick *et al.*

(2024) yang melaporkan viskositas kinematik 4,05 cSt. Kedekatan antara viskositas kinematik sampel *crude* biodiesel sampel dengan nilai viskositas dinamis *soy* B100 mencerminkan bahwa viskositas kinematik minyak awal telah terkonversi menjadi viskositas kinematik metil ester atau *crude* biodiesel. Penurunan nilai viskositas kinematik minyak kedelai awal dengan nilai viskositas kinematik dari ketiga sampel mendukung kuat bahwa minyak kedelai awal telah terkonversi ke arah pembentukan FAME, namun untuk mengkonfirmasi komposisi FAME lainnya, perlu analisis lanjutan (Ramos *et al.*, 2024).

3.2.3. Keterkaitan Densitas dan Viskositas Yield Crude Biodiesel

Keterkaitan antara densitas dan viskositas dalam data penelitian ini terlihat dari perhitungan viskositas kinematik yang bergantung pada viskositas dinamis serta densitas. Perubahan densitas bisa memperkuat atau melemahkan perubahan viskositas. Variasi rasio volume metanol terhadap minyak kedelai menghasilkan densitas rata-rata tertinggi pada rasio volume 1:14, sedangkan viskositas kinematik meningkat ketika jumlah metanol relatif lebih rendah terhadap minyak, yang mengindikasikan kontribusi fraksi komponen berat atau impuritas lebih dominan pada kondisi tersebut. Rasio 1:12 menghasilkan kombinasi densitas sekitar 0,878 g/mL dan viskositas kinematik sekitar 3,99 cSt yang paling stabil antar replikasi, sehingga kondisi ini dapat dianggap sebagai titik operasi yang menghasilkan fraksi biodiesel yang paling seragam. Rasio 1:14 menghasilkan viskositas tertinggi yaitu sekitar 4,59 cSt, yang menunjukkan adanya hambatan alir yang lebih besar dan kemungkinan terkait dengan sisa gliserida akibat keterbatasan alkohol dalam reaksi reversibel (Tsaoulidis, Garciadiego-ortega and Angeli, 2023). Rasio 1:10 menunjukkan densitas terendah dan variasi viskositas yang lebih besar, yang sesuai dengan laporan bahwa metanol berlebih meningkatkan kelarutan silang antara biodiesel dan gliserol serta dapat memicu emulsifikasi sehingga sebagian gliserol ikut terbawa. Proses pemurnian seperti pemisahan fase yang memadai, penghilangan metanol, dan pengurangan kontaminan polar menjadi sangat penting karena gliserol adalah produk samping utama yang dapat memengaruhi sifat fisik biodiesel jika masih tersisa (Ampairojanawong *et al.*, 2023).

Berdasarkan hasil uji dan pengamatan densitas *crude* biodiesel pada masing-masing variasi rasio volume metanol:minyak kedelai yaitu 1:10, 1:12, dan 1:14 seluruhnya berada rentang acuan mutu SNI 7182:2024, sehingga dapat dinyatakan sebagai *crude* biodiesel yang memenuhi standar parameter massa jenis. Densitas rata-rata yang diperoleh pada rasio volume 1:10 berada pada 861,67 kg/m³, rasio volume 1:12 berada pada 877,6 kg/m³, dan rasio volume 1:14 berada pada 880,93 kg/m³. Rentang ini berada dalam ketentuan SNI 7182:2024 untuk massa biodiesel yaitu 850-890 kg/m³ pada suhu 40 °C. Berdasarkan hasil data uji densitas, kecenderungan densitas ketiga sampel lolos standar yang menunjukkan bahwa produk *crude* biodiesel yang dihasilkan telah sesuai dengan karakter kepadatan, namun tetap diperlukan uji lanjutan untuk mengetahui komposisi dari *crude* biodiesel.

Berdasarkan hasil uji dan pengamatan viskositas kinematik *crude* biodiesel pada masing-masing variasi rasio volume metanol:minyak kedelai yaitu 1:10, 1:12, dan 1:14 seluruhnya berada dalam rentang acuan mutu SNI 7182:2024, sehingga dapat dinyatakan sebagai *crude* biodiesel yang memenuhi standar parameter viskositas kinematik. Rata-rata viskositas kinematik berturut-turut adalah 3,77 cSt untuk rasio volume 1:10, 3,99 cSt untuk rasio volume 1:12, dan 4,54 cSt untuk rasio volume 1:14. Nilai viskositas kinematik tersebut yang berada dalam rentang acuan mutu menunjukkan bahwa *crude* biodiesel memiliki kemampuan alir yang sesuai untuk proses pemompaan dan penginjeksian, namun tetap diperlukan uji lanjutan untuk mengetahui komposisi dari *crude* biodiesel. Penjelasan dan perbandingan yang telah dibahas sebelumnya membantu penjabaran angka menjadi interpretasi berbasis sifat fluida, karena McCormick *et al.* (2024) menyajikan konteks bahwa viskositas dan densitas adalah parameter yang relevan untuk kualitas semprotan dan kompatibilitas operasi pada temperatur tertentu.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan berdasarkan keterkaitan antara hasil eksperimen pada kondisi operasi tetap dengan tujuan penelitian, mencakup pencapaian *yield* serta perubahan densitas dan viskositas kinematik sebagai indikator mutu fisik awal produk. Variasi rasio volume metanol:minyak kedelai (v/v) berpengaruh terhadap *yield* serta karakteristik fisik *crude* biodiesel yang dihasilkan melalui proses transesterifikasi. Pada kondisi operasi tetap 65 °C, 60 menit, 700 rpm, dan 1 g KOH, variasi rasio

1:12 memberikan performa terbaik dengan yield rata-rata tertinggi sebesar 93,678%, dibandingkan rasio 1:10 sebesar 84,456% dan 1:14 sebesar 86,661%. Nilai densitas crude biodiesel pada seluruh variasi berada pada rentang 861,67–880,93 kg/m³, sedangkan viskositas kinematik berada pada rentang 3,77–4,54 cSt, yang masih berada dalam rentang acuan SNI 7182:2024 untuk parameter yang diuji pada suhu 40 °C. Penurunan densitas dan viskositas dibandingkan minyak kedelai awal menunjukkan bahwa produk telah terkonversi ke arah pembentukan FAME. Variasi rasio 1:12 dapat dinyatakan sebagai kondisi paling efektif dalam rancangan percobaan ini karena memberikan kombinasi yield tertinggi dan karakteristik fisik awal *crude* biodiesel yang paling optimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, atas dukungan fasilitas laboratorium yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing atas arahan, masukan, dan dukungan selama proses penelitian serta penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Acevedo-quiros, A., Jes, E. De and Acevedo-quiros, N. (2024) 'Experimental Study on Biodiesel Production in a Continuous Tubular Reactor with a Static Mixer'. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr12122859>.
- Ampairojanawong, R. *et al.* (2023) 'Separation Process of Biodiesel-Product Mixture from Crude Glycerol and Other Contaminants Using Electrically Driven Separation Technique with AC High Voltage', *Electrochem*, 4(1), pp. 123–144. Available at: <https://doi.org/10.3390/electrochem4010011>.
- Araby, E. and Araby, R. El (2024) 'Biofuel production : exploring renewable energy solutions for a greener future', *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s13068-024-02571-9>.
- Bousbaa, H. *et al.* (2024) 'Prediction and Simulation of Biodiesel Combustion in Diesel Engines: Evaluating Physicochemical Properties, Performance, and Emissions', *Fire*, 7(10), pp. 1–23. Available at: <https://doi.org/10.3390/fire7100364>.
- Casas, A., Pérez, Á. and Ramos, M.J. (2023) 'Effects of Diacetylmonoglycerides and Triacetyl on Biodiesel Quality', *Energies*, 16(17). Available at: <https://doi.org/10.3390/en16176146>.
- Chanakaewsomboon, I. and Moollakorn, A. (2021) 'Soap formation in biodiesel production: effect of water content on saponification reaction', *International Journal of Chemical and Environmental Sciences*, 2(2), pp. 28–36. Available at: <https://doi.org/10.15864/ijcaes.2203>.
- Changmai, B., Vanlalveni, C. and Ingle, P. (2020) 'Widely used catalysts in biodiesel production ', pp. 41625–41679. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/d0ra07931f>.
- Encinar, J.M. *et al.* (2022) 'Transesterification of Soybean Oil through Different Homogeneous Catalysts : Kinetic Study'. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/catal12020146>.
- Haryanto, H. *et al.* (2022) 'The effect of volume ratio of methanol and temperature on yields and properties of biodiesel from callophylum inophylum oil The Effect of Volume Ratio of Methanol and Temperature on Yields and Properties of Biodiesel From Callophylum Inophylum Oil', 020001(November). Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/5.0106494>.
- Ho, W.W.S., Ng, H.K. and Gan, S. (2022) 'Biodiesel Synthesis from Refined Palm Oil Using a Calcium Oxide Impregnated Ash-Based Catalyst: Parametric, Kinetics, and Product Characterization Studies', *Catalyst* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/catal12070706>.
- Jariah, N.F. *et al.* (2021) 'Technological Advancement for Efficiency Enhancement of Biodiesel and Residual Glycerol Refining: A Mini Review', pp. 1–15. Available at:

- <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr9071198>.
- Kumbhar, V. *et al.* (2022) 'Statistical analysis on prediction of biodiesel properties from its fatty acid composition', *Case Studies in Thermal Engineering*, 30(December 2021), p. 101775. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101775>.
- Larimi, A. *et al.* (2024) 'Aspects of Reaction Engineering for Biodiesel Production'. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/catal14100701>.
- Li, W. *et al.* (2022) 'Optimization and Comparison of Biodiesel Production Process by Electric Heating and Microwave-Assisted Heating Transesterification for Waste Cooking Oil via One-Way Experiments and ANOVA', *Frontiers in Environmental Science*, 10(April), pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.885453>.
- Limmun, Warunee *et al.* (2024) 'Enhancing biodiesel yield and purification with a recently developed centrifuge machine: A response surface methodology approach', *Heliyon*, 10(7), p. e29018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29018>.
- Masjudin and Chang, W. (2023) 'Regression Analysis to Investigate Contributions of Process Parameters on Transesterification of Waste Soybean Oil †'. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/engproc2023055044>.
- McCormick, R.L. *et al.* (2024) 'Properties That Potentially Limit High-Level Blends of Biomass-Based Diesel Fuel', *Energy and Fuels*, 38(10), pp. 8829–8841. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c00912>.
- Mignogna, D. and Ceci, P. (2024) 'Biomass Energy and Biofuels: Perspective, Potentials, and Challenges in the Energy Transition', pp. 1–33. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su16167036>.
- Nabgan, W. *et al.* (2022) 'Sustainable biodiesel generation through catalytic transesterification of waste sources: a literature review and bibliometric survey', pp. 1604–1627. Available at: <https://doi.org/10.1039/d1ra07338a>.
- Pranita, Z.A. *et al.* (2020) 'Optimization of Oil and Methanol Ratio, Time, and Reaction Temperature of Biodiesel Making from Kemiri Sunan Oil (Trisperma Oil Reuteals) with Two Stage Transesterification', *Journal of Vocational Studies on Applied Research*, 2(2), pp. 25–30. Available at: <https://doi.org/10.14710/jvsar.v2i2.9323>.
- Ramos, P.R. *et al.* (2024) 'Extraction of Soybean Oil with Pressurized Ethanol: Prospects for a New Processing Approach with an Analysis of the Physical Properties of Crude Oil and Implementation Costs through Scale-Up in an Intermittent Process', *Processes*, 12(10). Available at: <https://doi.org/10.3390/pr12102224>.
- Sánchez-rodríguez, G. *et al.* (2025) 'Density and Viscosity in Biodiesel + Diesel Mixtures from Recycled Feedstocks'. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app15073812>.
- Taqiya, R.Z. and Samik, S. (2025) 'Indonesian Journal of Chemical Research', 13(1), pp. 57–63. Available at: <https://doi.org/10.30598/ijcr>.
- Tsaoulidis, D., Garciadiego-ortega, E. and Angeli, P. (2023) 'Intensified biodiesel production from waste cooking oil and flow pattern evolution in small-scale reactors', (April), pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.3389/fceng.2023.1144009>.
- Ulukardesler, A.H. (2023) 'Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using Different Types of Catalysts', *Processes*, 11(7). Available at: <https://doi.org/10.3390/pr11072035>.
- Wan Osman, W.N.A. *et al.* (2024) 'Comparative review of biodiesel production and purification', *Carbon Capture Science and Technology*, 13(July), p. 100264. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100264>.
- Wang, H. *et al.* (2024) 'International Journal of Biological Macromolecules A systematic review on utilization of biodiesel-derived crude glycerol in sustainable polymers preparation',

International Journal of Biological Macromolecules, 261(P1), p. 129536. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129536>.

Yahya, S.M. *et al.* (2025) 'RSM based optimization of process parameters of biodiesel production from waste palm oil using modified', *npj Clean Energy*, pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s44406-024-00001-1>.

Yang, L., Shiyu, X. and Teng, X. (2024) 'Liquid – Liquid Equilibrium Behavior of Ternary Systems Experimental Data and Modeling'. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/catal14050320>.

Yeşilova, K., Yücel, Ö. and Ergan, B.T. (2025) 'Modeling Prediction of Physical Properties in Sustainable Biodiesel–Diesel–Alcohol Blends via Experimental Methods and Machine Learning', *Processes*, 13(7). Available at: <https://doi.org/10.3390/pr13072310>.

Yusuf, B.O. and Oladepo, S.A. (2024) 'Efficient and Sustainable Biodiesel Production via Transesterification: Catalysts and Operating Conditions'. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/catal14090581>.