



Peran Waktu Reaksi dalam Mengendalikan *Trade-Off* antara Efisiensi Konversi dan Karakteristik Fisikokimia Biodiesel dari Minyak Goreng Bekas

The Role of Reaction Time in Controlling the Trade-Off between Conversion Efficiency and Physicochemical Characteristics of Biodiesel from Used Cooking Oil

Dani Hari Tunggal Prasetyo^{1,a)}, Andi Sanata¹, Danang Yudistiro¹, Alief Muhammad², Mas Ahmad Baihaqi³, Hartawan Abdillah³

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Indonesia

²Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Panca Marga, Indonesia

³Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Panca Marga, Indonesia

^{a)}Corresponding author: dani.hari@unej.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan minyak goreng bekas sebagai bahan baku biodiesel merepresentasikan pendekatan strategis. Hal ini dikarenakan dapat pengelolaan limbah dengan optimal menjadi penyediaan energi berkelanjutan. Akan tetapi, peran durasi reaksi dalam mengendalikan keterkaitan antara efisiensi konversi dan mutu bahan bakar masih belum dipahami secara komprehensif. Oleh karena itu, kajian ini menguantifikasi pengaruh waktu reaksi yang mendasari fenomena *trade-off* antara *yield* dan karakteristik fisikokimia biodiesel. Eksperimen dilakukan pada variasi waktu reaksi 45–90 menit dengan evaluasi parameter *yield*, densitas, viskositas *kinematikaa*, dan *flash point*. Hasil menunjukkan bahwa *yield* maksimum sebesar 85,64% dicapai pada 45 menit, kemudian menurun hingga 74,34% pada 90 menit. Sebaliknya, densitas dan viskositas meningkat secara bertahap, sementara *flash point* mengalami penurunan. Tren ini mengindikasikan adanya pergeseran komposisi produk yang dipicu oleh dominasi reaksi samping, termasuk reaksi *reversibel* dan akumulasi senyawa antara. Temuan tersebut menegaskan bahwa waktu reaksi berperan sebagai variabel pengendali distribusi komponen dalam sistem, yang secara simultan memengaruhi efisiensi konversi dan kualitas bahan bakar. Berdasarkan evaluasi terhadap parameter *yield*, densitas, viskositas *kinematika*, dan *flash point*, rentang waktu reaksi 45–60 menit menunjukkan keseimbangan terbaik antara efisiensi konversi dan karakteristik fisikokimia biodiesel sesuai SNI 7182:2024. Secara konseptual, studi ini memperkuat pemahaman mengenai mekanisme *trade-off* dalam proses transesterifikasi serta menawarkan pendekatan optimasi berbasis keseimbangan antara kuantitas dan kualitas produk.

Kata Kunci: biodiesel; durasi reaksi; minyak goreng bekas; sifat fisikokimia

Abstract

The use of used cooking oil as a biodiesel feedstock represents a strategic approach. This is because it can optimally manage waste into a sustainable energy supply. However, the role of reaction duration in controlling the relationship between conversion efficiency and fuel quality is still not comprehensively understood. Therefore, this study quantifies the effect of reaction time on the underlying *trade-off* phenomenon between *yield* and the physicochemical characteristics of biodiesel. Experiments were conducted at varying reaction times of 45–90 minutes with evaluation of the parameters of *yield*, density, kinematic viscosity, and *flash point*. The results showed that a maximum *yield* of 85.64% was achieved at 45 minutes, then decreased to 74.34% at 90 minutes. Conversely, density and viscosity increased gradually, while the *flash point* decreased. This trend indicates a shift in product composition triggered by the dominance of side reactions, including reversible reactions and the accumulation of intermediate compounds. These findings confirm that reaction time plays a role as a controlling variable in the distribution of components in the system, which simultaneously affects conversion efficiency and fuel quality. Based on the evaluation of *yield*, density, kinematic viscosity, and *flash point* parameters, a reaction time range of 45–60 minutes demonstrates the best balance between conversion efficiency and the physicochemical characteristics of biodiesel in accordance with SNI 7182:2024. Conceptually, this study strengthens the understanding of the *trade-off* mechanisms in the transesterification process and offers an optimization approach based on the balance between product quantity and quality.

Keywords: *biodiesel; used cooking oil; reaction duration; physicochemical properties*

PENDAHULUAN

Penurunan cadangan bahan bakar fosil kini tidak lagi sekadar isu energi. Hal ini telah menjadi isu dan tantangan strategis yang dapat mengancam keberlanjutan pasokan energi global [1], [2]. Ketergantungan yang terus berlangsung terhadap energi berbasis fosil tidak hanya mempercepat penipisan sumber daya melainkan juga meningkatkan emisi gas rumah kaca, sehingga memicu laju perubahan iklim yang sangat cepat [3], [4]. Permasalahan ini tentunya mendorong akademisi maupun praktisi untuk melakukan riset menuju energi bersih dan ramah lingkungan. Dalam konteks tersebut, pengembangan sumber energi alternatif menjadi langkah yang tidak dapat dipisahkan [5], [6], [7]. Di antara berbagai opsi yang tersedia, biodiesel menjadi salah satu kandidat yang menjanjikan karena berasal dari sumber terbarukan serta memiliki kompatibilitas yang cukup baik dengan sistem mesin konvensional [8], [9]. Selain itu, pemanfaatannya berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan menekan emisi yang ditimbulkan oleh sektor transportasi dan industri serta pembangkit energi [10].

Minyak goreng bekas menjadi salah satu primadona untuk memecahkan masalah krisis dan ketergantungan energi fosil. Hal ini dikarenakan kemudahan dalam memperoleh minyak goreng bekas, yang dapat diperoleh dari limbah rumah tangga maupun industri makanan. Jika tidak dikelola dengan baik maka limbah ini memicu pada kerusakan lingkungan. Kerusakan yang ditimbulkan antara lain pencemaran air dan tanah serta gangguan terhadap keseimbangan ekosistem [11], [12]. Di sisi lain, minyak goreng bekas mengandung asam lemak yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku biodiesel melalui proses transesterifikasi [13], [14], [15]. Pemanfaatan limbah ini tidak hanya berkontribusi dalam mengurangi pencemaran, tetapi juga memberikan nilai tambah sebagai sumber energi alternatif [16], [17], [18]. Namun, variasi kualitas bahan baku serta keberadaan pengotor menjadi tantangan dalam menghasilkan biodiesel yang memenuhi standar kualitas, seperti SNI 7182:2024.

Berbagai penelitian telah mengeksplorasi pengaruh parameter proses, seperti temperatur dan konsentrasi katalis, serta rasio molar alkohol terhadap karakteristik biodiesel [19]. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa

optimasi parameter proses, termasuk jenis katalis dan kondisi operasi, berpengaruh terhadap efisiensi konversi biodiesel [20], [21]. Penggunaan katalis heterogen berbasis nano, seperti TiO_2 yang difungsionalisasi, dilaporkan mampu menghasilkan *yield* FAME hingga lebih dari 98% dari minyak goreng bekas, dengan peningkatan aktivitas katalistik dan stabilitas reaksi [22]. Namun, peran waktu reaksi masih sering dievaluasi secara terbatas dan belum terintegrasi dengan perubahan sifat fisikokimia bahan bakar [23]. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Oke dkk [24], menunjukkan bahwa interaksi antara waktu reaksi dan konsentrasi katalis *fly ash* memengaruhi hasil dan sifat biodiesel, dengan hasil optimal pada satu jam. Dalam kondisi ini. Hasil yang dari penelitian, nilai *yield* sebesar 68,17% dan densitas maupun viskositas mendekati standar yang ditetapkan. Penelitian lain juga dilakukan oleh Ramadhani dkk. [25], hasil penelitian menunjukkan penyesuaian waktu reaksi dalam kisaran 40 hingga 80 menit memberikan pengaruh pada nilai *yield* biodiesel. Nilai *yield* yang dihasilkan sebesar 86% yang terjadi saat transesterifikasi waktu 60 menit. Sebaliknya, Rosidah dkk [26], meneliti waktu reaksi yang lebih pendek dan mengamati bahwa parameter kualitas biodiesel, termasuk densitas dan viskositas, dengan hasil yang berbeda terhadap variasi waktu reaksi. Selain itu, Budiman dkk., [27], melakukan tinjauan literatur yang mengkonfirmasi bahwa efektivitas proses transesterifikasi tidak hanya bergantung pada jenis katalis tetapi juga pada kondisi operasi optimal, seperti waktu reaksi. Secara umum, penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa waktu reaksi memengaruhi *yield* maupun beberapa sifat fisikokimia biodiesel. Namun, sebagian besar penelitian masih mengevaluasi parameter tersebut secara terpisah atau berfokus pada pencapaian *yield* maksimum, sehingga hubungan simultan antara efisiensi konversi, perubahan komposisi produk, dan karakteristik fisikokimia biodiesel belum dijelaskan secara komprehensif. Selain itu, mekanisme *trade-off* antara peningkatan *yield* dan perubahan mutu biodiesel akibat variasi waktu reaksi masih belum banyak dibahas. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya mengevaluasi pengaruh waktu reaksi terhadap masing-masing parameter, tetapi juga menganalisis keterkaitan antar parameter untuk menjelaskan peran waktu reaksi sebagai pengendali keseimbangan antara efisiensi konversi dan kualitas biodiesel.

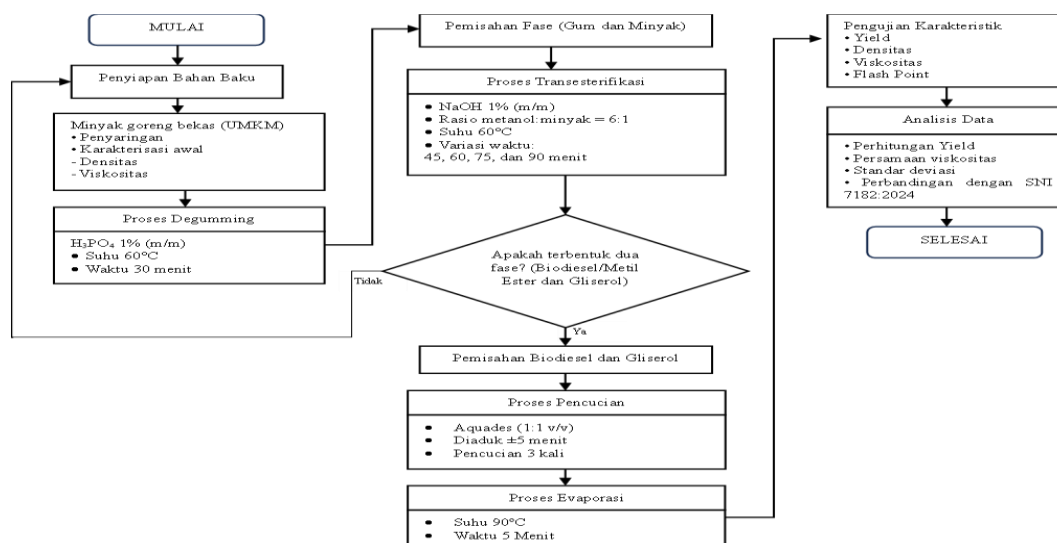
Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh durasi reaksi terhadap keterkaitan antara efisiensi konversi dan karakteristik fisikokimia biodiesel. Tentunya hal ini dilakukan untuk mengevaluasi mekanisme yang mendasari *trade-off* antara *yield* dan mutu bahan bakar dalam sistem transesterifikasi menggunakan bahan baku minyak goreng bekas. Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji parameter proses, sebagian besar masih bersifat parsial dan berfokus pada variabel tunggal seperti katalis atau temperatur, sehingga peran waktu reaksi sebagai pengendali simultan konversi dan kualitas produk belum dianalisis secara komprehensif. Selain itu, variasi rentang waktu reaksi dalam literatur menghasilkan temuan yang tidak konvergen, sehingga belum terbentuk konsensus mengenai kondisi optimum yang representatif [28], [29].

Dalam konteks tersebut, penelitian ini mengevaluasi dan mengoptimalkan durasi reaksi pada rentang 45–90 menit dengan pendekatan analisis terintegrasi, menggunakan *yield*, densitas, viskositas kinematika, dan

flash point sebagai indikator kinerja dan mutu bahan bakar sesuai SNI 7182:2024. Waktu reaksi diposisikan sebagai variabel sistemis yang tidak hanya memengaruhi kinetika reaksi, tetapi juga mengendalikan evolusi komposisi kimia dalam sistem. Dengan demikian, kajian ini tidak terbatas pada identifikasi kondisi optimum, melainkan menelusuri hubungan mekanis antara perubahan komposisi dan sifat fisikokimia biodiesel. Oleh karena itu, optimasi proses dipahami sebagai upaya menyeimbangkan aspek kuantitas dan kualitas, sekaligus memperkuat kerangka konseptual dalam pengembangan biodiesel berbasis limbah sebagai sumber energi terbarukan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen, yang dilakukan melalui beberapa tahap dan tersusun secara berurutan. Setiap tahap saling berkaitan dan membentuk satu rangkaian proses yang utuh. Alur penelitian tersebut dapat diamati pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Rangkaian Penelitian

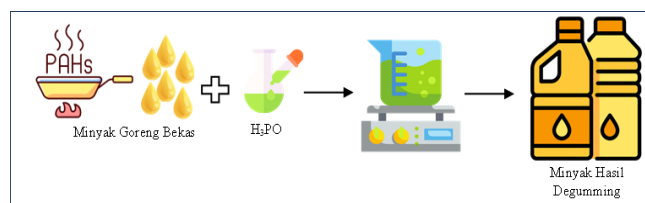
Minyak goreng bekas yang digunakan sebagai bahan baku diperoleh dari pedagang/UMKM penjual gorengan. Sebelum digunakan, minyak disaring untuk menghilangkan partikel padat hasil penggorengan. Karakterisasi awal bahan baku dilakukan untuk mengetahui sifat fisiknya sebelum proses transesterifikasi. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa minyak goreng bekas memiliki densitas sebesar 0,94 g/cm³ (940 kg/m³) dan viskositas kinematika sebesar 14,2 cSt. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa minyak telah mengalami perubahan sifat fisik akibat proses penggorengan berulang, sehingga diperlukan tahap pemurnian (*degumming*) sebelum digunakan sebagai bahan baku biodiesel. Sintesis biodiesel pada penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu *degumming*, transesterifikasi, pencucian, dan

evaporasi. Proses diawali dengan tahap *degumming* untuk menghilangkan pengotor, yang terdapat dalam minyak goreng bekas. Pada tahap ini, asam fosfat (H₃PO₄) ditambahkan sebanyak satu persen dari massa minyak, kemudian campuran diaduk hingga homogen selama kurang lebih 30 menit pada suhu 60°C.

Sintesis biodiesel pada penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu *degumming*, transesterifikasi, pencucian, dan evaporasi. Proses diawali dengan tahap *degumming* untuk menghilangkan pengotor yang terdapat dalam minyak goreng bekas. Pada tahap ini, asam fosfat (H₃PO₄) ditambahkan sebanyak 1% (m/m) terhadap massa minyak, kemudian campuran diaduk hingga homogen selama 30 menit pada suhu 60 °C. Setelah proses *degumming* berlangsung, sistem akan terpisah menjadi dua

fase, yaitu fase minyak yang telah mengalami pemurnian awal dan fase endapan yang mengandung gum serta pengotor lainnya. Kedua fase tersebut kemudian dipisahkan untuk memperoleh minyak hasil *degumming*

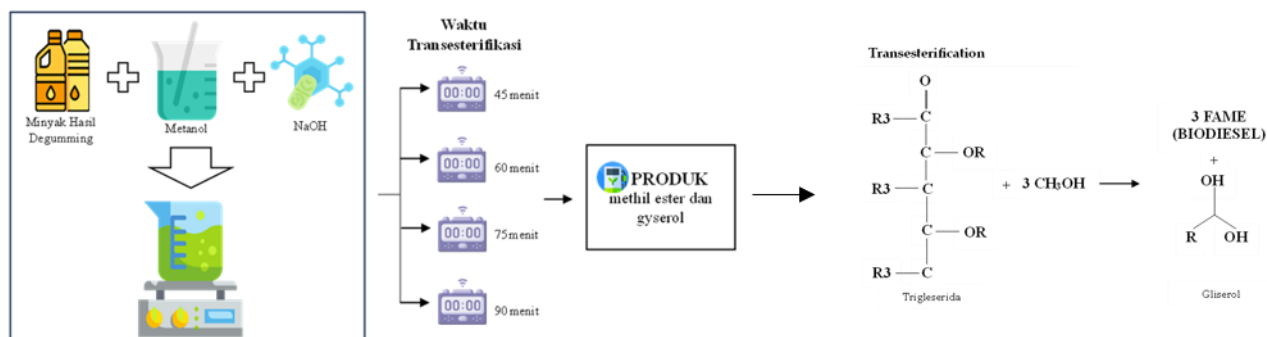
yang siap digunakan pada tahap transesterifikasi. Visualisasi proses *degumming* minyak goreng bekas ditampilkan pada [Gambar 2](#).



Gambar 2. Proses *Degumming* Minyak Goreng Bekas

Minyak hasil *degumming* selanjutnya digunakan sebagai bahan baku pada tahap transesterifikasi. Pada proses ini, ditambahkan katalis basa berupa natrium hidroksida (NaOH) sebesar 1% terhadap massa minyak, serta metanol dengan rasio molar 1:6 terhadap minyak. Larutan metanol dan katalis terlebih dahulu dicampur hingga homogen, kemudian direaksikan dengan minyak pada temperatur 60°C dengan pengadukan konstan untuk

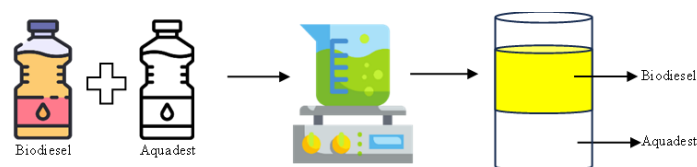
menjaga kestabilan sistem reaksi. Variasi waktu reaksi yang diterapkan dalam penelitian ini meliputi 45, 60, 75, dan 90 menit, dengan tujuan untuk mengevaluasi pengaruh durasi reaksi terhadap perolehan serta karakteristik biodiesel yang dihasilkan. Produk utama yang dihasilkan dari proses ini berupa metil ester sebagai biodiesel dan gliserol sebagai produk samping. Ilustrasi proses transesterifikasi ditunjukkan pada [Gambar 3](#).



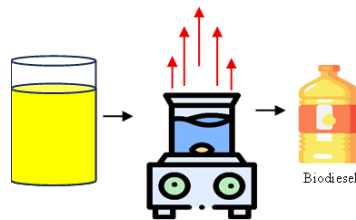
Gambar 3. Proses Transesterifikasi Minyak Goreng Bekas

Metil ester yang dihasilkan selanjutnya dimurnikan melalui tahap pencucian untuk menghilangkan sisa katalis, metanol, serta senyawa pengotor lainnya. Proses ini dilakukan dengan menambahkan akuades ke dalam metil ester pada rasio volume 1:1 (v/v). Campuran kemudian dihomogenkan menggunakan *magnetic stirrer* selama ± 5 menit pada temperatur 100°C guna meningkatkan kontak antar fase dan efektivitas pemindahan kontaminan. Setelah pencucian, sistem akan terpisah menjadi dua lapisan yang berbeda secara jelas, yaitu fase biodiesel pada bagian atas dan fase air pada bagian bawah. Pemisahan ini

dimanfaatkan untuk mengeluarkan kontaminan yang terlarut dalam fase air. Prosedur pencucian dilakukan sebanyak tiga kali untuk memastikan tingkat kemurnian biodiesel yang optimal. Tahap berikutnya adalah evaporasi, yang bertujuan untuk menghilangkan sisa air dan metanol yang masih terlarut dalam biodiesel. Proses ini dilakukan melalui pemanasan pada temperatur 90°C selama 3–5 menit hingga diperoleh produk dengan kandungan senyawa volatil yang minimal. Tahapan pencucian dan evaporasi biodiesel dari minyak goreng bekas divisualisasikan pada [Gambar 4](#) dan [Gambar 5](#).



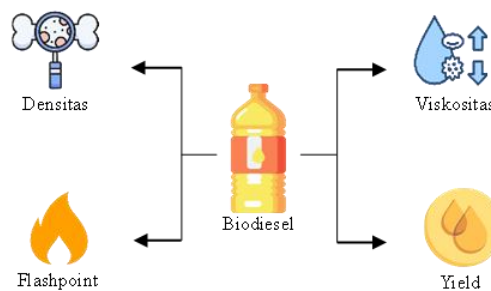
Gambar 4. Proses Pencucian Biodiesel dari Minyak Goreng Bekas



Gambar 5. Proses Penguapan Biodiesel dari Minyak Goreng Bekas

Biodiesel yang dihasilkan dilanjutkan ke tahap perhitungan nilai *yield*, densitas, viskositas, dan *flash point*. Produk biodiesel yang telah dihasilkan pada

penelitian ini dilakukan pengujian fisikokimia yang dapat diamati pada Gambar 6.



Gambar 6. Skema Pengujian Karakteristik Fisikokimia Bahan Bakar

Yield dihitung berdasarkan perbandingan massa biodiesel yang dihasilkan terhadap massa minyak awal yang digunakan. Persamaan yang digunakan adalah persamaan (1).

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

Pengukuran densitas biodiesel dilakukan menggunakan hidrometer sebagai instrumen utama. Sebelum pengujian, sampel dipastikan dalam kondisi homogen serta bebas dari gelembung udara untuk menghindari bias pembacaan. Biodiesel kemudian dituangkan ke dalam gelas ukur yang bersih dan kering dengan volume yang memadai, sehingga hidrometer dapat mengapung secara bebas tanpa bersentuhan dengan dinding wadah. Pengukuran dilakukan pada temperatur 40°C untuk menjaga konsistensi hasil. Untuk memastikan keandalan hasil, setiap pengujian dilakukan berulang sebanyak tiga kali.

Pengujian viskositas dilakukan menggunakan viskometer *Ostwald* berdasarkan prinsip aliran laminar fluida melalui pipa kapiler akibat gaya gravitasi. Sebelum pengukuran, viskometer dibersihkan dan dikeringkan, kemudian dikalibrasi menggunakan akuades sebagai fluida referensi pada suhu 40 ± 0,5 °C. Akuades dipilih sebagai fluida referensi karena memiliki nilai viskositas dan densitas yang telah diketahui dengan baik pada berbagai temperatur, sehingga umum digunakan sebagai fluida standar dalam kalibrasi viskometer kapiler. Selama

pengujian, suhu dijaga tetap konstan menggunakan penangas air (*water bath*) karena viskositas sangat dipengaruhi oleh perubahan temperatur. Sampel biodiesel dimasukkan ke dalam viskometer hingga batas yang ditentukan, kemudian dihisap melewati tanda atas dan dibiarkan mengalir secara alami. Waktu yang diperlukan fluida untuk mengalir dari tanda atas hingga tanda bawah dicatat menggunakan *stopwatch*. Prosedur yang sama dilakukan terhadap akuades sebagai fluida referensi. Setiap pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali dan nilai waktu alir dinyatakan sebagai rata-rata hasil pengukuran. Perhitungan viskositas dinamis didasarkan pada persamaan viskometer *Ostwald* (Persamaan 2), yang selanjutnya digunakan untuk menentukan viskositas *kinematika* (Persamaan 3) dan dikonversi ke satuan cSt melalui Persamaan (4).

$$\eta = \eta_{ref} \times \frac{\rho_{sampel} \cdot t_{sampel}}{\rho_{ref} \cdot t_{ref}} \quad (2)$$

Keterangan:

- η = viskositas dinamis biodiesel (Pa·s)
- η_{ref} = viskositas fluida pembanding (air) (Pa·s)
- ρ_{sampel} = densitas biodiesel (kg/m³)
- ρ_{ref} = densitas fluida pembanding (kg/m³)
- t_{sampel} = waktu alir biodiesel (s)
- t_{ref} = waktu alir fluida pembanding (s)

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3)$$

Keterangan:

- ν = viskositas kinematika (m^2/s)
- η = viskositas dinamis ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
- ρ = densitas biodiesel (kg/m^3)

Konversi ke cSt (*centistokes*)

$$\nu(\text{cSt}) = \frac{\eta}{\rho} \times 10^6 \quad (4)$$

Viskositas dinamis biodiesel ditentukan berdasarkan rasio antara waktu alir dan densitas sampel terhadap fluida referensi yang digunakan sebagai pembanding. Selanjutnya, viskositas kinematika dihitung dengan membagi viskositas dinamis terhadap densitas biodiesel yang bersangkutan. Untuk memastikan reliabilitas data, setiap pengukuran dilakukan dalam tiga kali pengulangan, dan nilai akhir dinyatakan sebagai rata-rata dari keseluruhan hasil pengujian.

Pengujian *flash point* dilakukan untuk menentukan temperatur minimum pada saat uap bahan bakar mulai mengalami penyalaan ketika terpapar sumber api. Parameter ini merupakan indikator penting yang berkaitan dengan aspek keselamatan dalam penyimpanan dan penanganan bahan bakar, terutama yang berhubungan dengan volatilitas dan potensi bahaya kebakaran. Pengukuran dilakukan menggunakan alat uji titik nyala tipe closed cup yang mengacu pada metode standar, seperti ASTM D93. Sampel biodiesel sebanyak 50 mL dimasukkan ke dalam cawan uji, kemudian dipanaskan secara bertahap dengan laju kenaikan temperatur yang terkontrol. Selama proses pemanasan, sumber api kecil diaplikasikan secara periodik pada permukaan sampel untuk mendeteksi terjadinya nyala sesaat. Temperatur pada saat pertama kali muncul nyala singkat tersebut dicatat sebagai nilai *flash point*. Semakin tinggi nilai yang diperoleh, semakin baik tingkat keamanan bahan bakar dalam proses penyimpanan dan distribusi.

Konsistensi data hasil pengukuran dievaluasi melalui analisis standar deviasi yang dihitung dari pengulangan pada setiap variasi parameter. Perhitungan dilakukan dengan menentukan selisih antara masing-masing nilai data terhadap nilai rata-rata, kemudian selisih tersebut dikuadratkan, dijumlahkan, dan dibagi dengan derajat kebebasan ($n-1$), sebelum diambil nilai akar kuadratnya. Pendekatan ini digunakan untuk mengukur tingkat sebaran data pada parameter yang diamati, meliputi *yield*, densitas, viskositas, dan *flash point*. Nilai standar deviasi yang kecil mencerminkan tingkat konsistensi dan presisi pengukuran yang baik, sedangkan nilai yang lebih besar menunjukkan adanya variasi data dalam hasil eksperimen. Formulasi matematis yang digunakan dalam perhitungan standar deviasi ditampilkan pada Persamaan (5).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

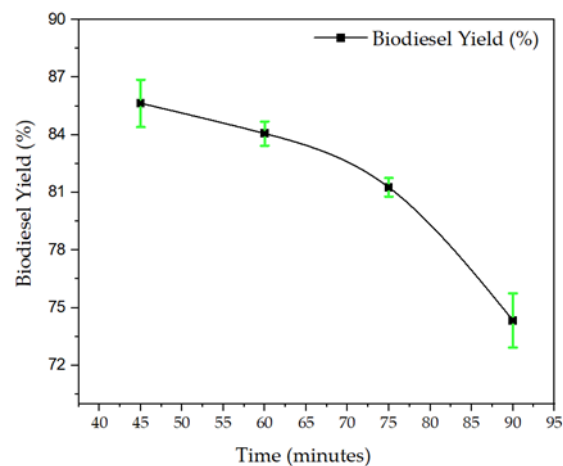
Keterangan:

- s = standar deviasi
- x_i = nilai data ke- i
- $\bar{x}$ = nilai rata-rata data
- n = jumlah data (pengulangan)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Waktu Reaksi terhadap Yield Biodiesel

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa variasi waktu reaksi memengaruhi perolehan biodiesel yang dihasilkan. *Yield* tertinggi sebesar 85,64% diperoleh pada waktu reaksi 45 menit. Setelah itu, *yield* mengalami penurunan bertahap menjadi 84,07% pada 60 menit, 81,27% pada 75 menit, dan 74,34% pada 90 menit. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan waktu reaksi tidak selalu diikuti oleh peningkatan konversi. Secara keseluruhan, terjadi penurunan *yield* sekitar 11,3% ketika waktu reaksi diperpanjang dari 45 hingga 90 menit. Fenomena ini menunjukkan bahwa setelah mencapai kondisi panas maksimum, sistem reaksi cenderung mengalami penurunan efisiensi, yang kemungkinan dipengaruhi oleh terjadinya reaksi samping atau pergeseran kesetimbangan reaksi. Dengan demikian, perpanjangan waktu reaksi di luar kondisi optimum tidak memberikan keuntungan terhadap hasil biodiesel, bahkan berpotensi menurunkan performa proses secara keseluruhan. Distribusi nilai *yield* pada setiap variasi waktu reaksi dapat diamati pada Gambar 7.



Gambar 7. Nilai Yield Biodiesel Terhadap Waktu Proses Transesterifikasi

Pada Gambar 7 terlihat bahwa fase awal reaksi berlangsung hingga 45 menit. Pada tahap ini, laju reaksi dipengaruhi oleh ketersediaan reaktan serta aktivitas katalis. Interaksi antara trigliserida dan metanol berlangsung cukup kuat, sehingga pembentukan metil ester menjadi lebih dominan. Proses ini didukung oleh rasio molar metanol terhadap minyak yang memadai dan katalis basa yang mempercepat pemutusan ikatan ester trigliserida. Akibatnya, konversi efisien dan menghasilkan hasil yang relatif tinggi. Seiring bertambahnya waktu reaksi, sistem mendekati kesetimbangan. Dalam kondisi ini, reaksi maju

yang membentuk metil ester tidak lagi mendominasi reaksi balik. Seiring bertambahnya waktu reaksi, sistem diperkirakan mulai mendekati kondisi kesetimbangan sehingga laju pembentukan metil ester cenderung menurun. Pada kondisi tersebut, berbagai reaksi samping maupun reaksi reversibel berpotensi terjadi, yang dapat mengurangi efisiensi konversi. Akibatnya, *yield* biodiesel menunjukkan kecenderungan menurun pada waktu reaksi yang melebihi 60 menit. Mekanisme ini telah dilaporkan pada sistem transesterifikasi berbasis katalis basa dalam beberapa penelitian terdahulu.

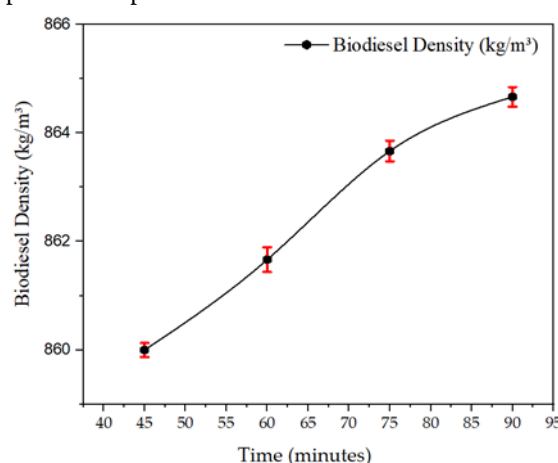
Selain itu, sifat-sifat bahan baku minyak goreng bekas berkontribusi pada penurunan hasil pada waktu reaksi yang lebih lama. Kandungan asam lemak bebas (FFA) yang relatif tinggi dalam minyak goreng bekas bereaksi dengan katalis basa untuk membentuk sabun melalui saponifikasi. Seiring bertambahnya waktu reaksi, kontak yang lebih lama antara katalis dan FFA mengintensifkan pembentukan sabun. Proses ini tidak hanya mengonsumsi katalis yang dibutuhkan untuk reaksi utama tetapi juga menyebabkan pembentukan emulsi, yang menghambat pemisahan biodiesel dan gliserol. Akibatnya, sebagian biodiesel hilang selama pencucian, sehingga menghasilkan hasil yang lebih rendah. Penurunan hasil yang diamati juga terkait dengan perubahan sifat fisikokimia biodiesel. Peningkatan densitas dan viskositas dengan waktu reaksi yang lebih lama menunjukkan adanya senyawa yang lebih berat atau produk sampingan dalam campuran biodiesel. Temuan ini mendukung kesimpulan bahwa reaksi tersebut tidak hanya menghasilkan metil ester tetapi juga senyawa perantara atau residu yang berdampak negatif pada kualitas produk secara keseluruhan.

Perbandingan dengan penelitian sebelumnya menunjukkan pola yang konsisten. Ramadhani dkk [25], melaporkan waktu reaksi optimum sekitar 60 menit, menghasilkan maksimum sekitar 86%. Demikian pula, Rosidah dkk [26], menemukan bahwa memperpanjang waktu reaksi tidak secara konsisten meningkatkan nilai *yield*. Hal ini disebabkan oleh reaksi samping dan efek kesetimbangan. Temuan ini menunjukkan bahwa waktu reaksi memiliki ambang batas optimum dan tidak dapat ditingkatkan secara linier untuk meningkatkan hasil biodiesel.

Singkatnya, waktu reaksi optimum yang diidentifikasi dalam penelitian ini adalah antara 45 dan 60 menit. Dalam kisaran ini, reaksi maju mendominasi, dan reaksi samping memberikan kontribusi minimal, sehingga menghasilkan *yield* maksimum. Di luar kisaran ini, peningkatan reaksi samping, efek kesetimbangan, dan karakteristik bahan baku mengurangi efisiensi konversi.

Pengaruh Waktu Reaksi terhadap Densitas Biodiesel

Nilai densitas hasil pengujian menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan bertambahnya durasi reaksi. Pada 45 menit, densitas berada pada 860 kg/m³, lalu meningkat secara bertahap menjadi 862 kg/m³ (60 menit), 864 kg/m³ (75 menit), hingga 865 kg/m³ pada 90 menit. Kenaikan yang terjadi memang tidak besar, hanya sekitar 0,58%, namun polanya terlihat konsisten. Hal ini menunjukkan bahwa durasi reaksi memiliki pengaruh terhadap komposisi kimia biodiesel yang dihasilkan. Peningkatan densitas tersebut diduga berkaitan dengan *monoasilgliserol* (*monogliserida*), *diasilgliserol* (*digliserida*), serta residu trigliserida, seiring dengan lamanya proses berlangsung. Perbandingan nilai densitas biodiesel terhadap variasi waktu proses transesterifikasi dapat diamati pada Gambar 8.



Gambar 8. Nilai Densitas Biodiesel Terhadap Waktu Proses Transesterifikasi

Hasil penelitian pada nilai densitas yang ditunjukkan pada Gambar 8 menunjukkan bahwa durasi reaksi yang relatif singkat, nilai densitas biodiesel cenderung lebih rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa komposisi produk didominasi oleh metil ester hasil konversi trigliserida yang berlangsung secara efektif. Senyawa metil ester secara inheren memiliki densitas lebih kecil dibandingkan dengan komponen dengan berat molekul lebih tinggi seperti *digliserida*, *monogliserida*, maupun sisa trigliserida yang belum bereaksi secara sempurna. Hal ini sejalan dengan penurunan *yield* yang mengindikasikan dominasi senyawa non-ester. Oleh karena itu, pada kondisi reaksi yang mendekati optimum, biodiesel yang dihasilkan menunjukkan karakteristik fisik yang semakin mendekati bahan bakar konvensional.

Namun demikian, peningkatan waktu reaksi justru menunjukkan kecenderungan kenaikan densitas. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui perubahan komposisi kimia dalam sistem reaksi. Pertama, reaksi samping seperti saponifikasi antara katalis basa dan asam lemak bebas dapat menghasilkan senyawa non-ester, termasuk sabun, yang berkontribusi terhadap peningkatan

massa jenis campuran. Kedua, adanya kemungkinan reaksi reversibel yang memicu terbentuknya kembali senyawa antara, seperti *diglisierida* dan *monoglisierida*. Akumulasi *monoglisierida*, *diglisierida*, dan triglisierida yang tidak bereaksi secara langsung memengaruhi kenaikan densitas biodiesel secara keseluruhan.

Menariknya, tren densitas ini menunjukkan hubungan yang berlawanan dengan *yield* yang dihasilkan. Ketika *yield* biodiesel mengalami penurunan, densitas justru meningkat, yang mengindikasikan bahwa produk yang terbentuk tidak lagi didominasi oleh metil ester murni, melainkan mengandung fraksi komponen berat dalam jumlah nilai yang lebih tinggi. Hal ini menguatkan dugaan bahwa perpanjangan waktu reaksi tidak selalu meningkatkan kualitas produk, tetapi justru memperbesar peluang terbentuknya produk samping yang berdampak pada sifat fisik bahan bakar.

Jika dibandingkan dengan standar biodiesel yang berlaku, nilai densitas yang diperoleh masih berada dalam rentang yang diperbolehkan, yaitu sekitar 850–890 kg/m³. Hal ini menunjukkan bahwa secara umum biodiesel yang dihasilkan masih memenuhi persyaratan dasar sebagai bahan bakar alternatif. Meskipun demikian, kecenderungan peningkatan densitas pada waktu reaksi yang lebih lama perlu mendapat perhatian khusus, mengingat hal tersebut berpotensi menurunkan kualitas atomisasi bahan bakar serta efisiensi proses pembakaran di dalam mesin.

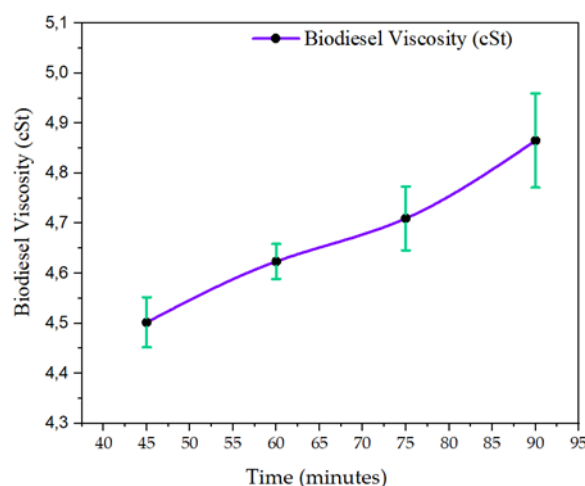
Hasil yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan kecenderungan yang konsisten dengan laporan sebelumnya, di mana sifat biodiesel, khususnya densitas, sangat dipengaruhi oleh kondisi proses serta parameter operasional yang digunakan selama reaksi berlangsung. Kajian oleh Agus Sartomo dkk [30], mengindikasikan bahwa variabel utama seperti temperatur dan waktu reaksi memberikan pengaruh terhadap kinerja proses, termasuk interaksi keduanya yang berkontribusi terhadap efisiensi konversi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa perubahan kondisi operasi tidak hanya berdampak pada perolehan hasil, tetapi juga memengaruhi karakteristik fisik produk yang dihasilkan. Sejalan dengan hal tersebut, penelitian yang dilakukan oleh E D Daryono dkk [31], melaporkan bahwa kombinasi kondisi reaksi yang optimum, meliputi waktu reaksi, rasio molar, dan jenis katalis, mampu menghasilkan biodiesel dengan densitas sebesar 888 kg/m³, yang masih berada dalam rentang standar ASTM. Hasil ini menegaskan bahwa parameter proses memiliki peranan penting dalam menentukan mutu biodiesel, tidak hanya ditinjau dari aspek kuantitas, tetapi juga dari sifat fisik yang dihasilkan.

Dengan demikian, temuan dalam penelitian ini semakin memperkuat bahwa densitas biodiesel merupakan parameter yang sensitif terhadap variasi kondisi proses, terutama waktu reaksi. Oleh karena itu, pengendalian

parameter operasional secara tepat menjadi aspek krusial dalam menghasilkan biodiesel dengan kualitas yang stabil dan memenuhi standar SNI 7182:2024.

Pengaruh Waktu Reaksi terhadap Viskositas Biodiesel

Hasil pengujian menunjukkan bahwa viskositas biodiesel meningkat seiring dengan peningkatan waktu reaksi. Viskositas *kinematika* rata-rata meningkat dari 4,50 cSt pada 45 menit menjadi 4,62 cSt pada 60 menit, 4,71 cSt pada 75 menit, dan 4,87 cSt pada 90 menit. Ini mewakili peningkatan keseluruhan sekitar 8,2%. Tren ini menunjukkan bahwa waktu reaksi yang lebih lama mengubah komposisi dan struktur molekul biodiesel.



Gambar 9. Nilai Viskositas Biodiesel Terhadap Waktu Proses Transesterifikasi

Pada **Gambar 9** durasi reaksi yang lebih singkat, nilai viskositas biodiesel cenderung lebih rendah, yang mengindikasikan dominasi metil ester dalam komposisi produk. Struktur molekul metil ester yang relatif lebih sederhana memungkinkan mobilitas fluida yang lebih tinggi dibandingkan triglisierida atau senyawa antara lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa proses transesterifikasi berlangsung secara efektif dalam mengonversi triglisierida menjadi senyawa ester yang lebih ringan. Oleh karena itu, biodiesel yang dihasilkan pada rentang waktu 45–60 menit masih mempertahankan kualitas yang baik dan sesuai dengan spesifikasi bahan bakar standar.

Sebaliknya, peningkatan viskositas pada waktu reaksi yang lebih lama mengindikasikan adanya perubahan komposisi dalam sistem reaksi. Kondisi ini kemungkinan dipengaruhi oleh terbentuknya senyawa antara seperti *diglisierida* dan *monoglisierida* akibat konversi yang tidak berlangsung sempurna. Selain itu, ketika sistem mendekati kondisi kesetimbangan, sebagian metil ester dapat mengalami reaksi lanjutan atau reversibel yang menghasilkan senyawa dengan struktur lebih kompleks. Kehadiran asam lemak bebas dalam bahan baku minyak

Goreng Bekas juga memperbesar peluang terjadinya reaksi saponifikasi dengan katalis basa, menghasilkan sabun yang berkontribusi terhadap peningkatan viskositas campuran.

Pembentukan sabun ini tidak hanya meningkatkan viskositas, tetapi juga memicu terbentuknya emulsi yang menghambat proses pemisahan fase. Akibatnya, komponen dengan massa molekul lebih tinggi cenderung tetap terdispersi dalam fase biodiesel. Fenomena ini konsisten dengan tren peningkatan densitas yang diamati, yang mengindikasikan akumulasi senyawa berat dalam sistem.

Analisis lebih lanjut menunjukkan adanya hubungan terbalik antara viskositas dan *yield* biodiesel. Penurunan *yield* yang disertai peningkatan viskositas mengindikasikan bahwa produk yang dihasilkan tidak lagi didominasi oleh metil ester murni, melainkan mengandung fraksi senyawa antara dan produk samping dalam jumlah yang lebih besar. Hal ini menegaskan bahwa perpanjangan waktu reaksi tidak selalu memberikan keuntungan terhadap kualitas biodiesel, bahkan cenderung menurunkan tingkat kemurniannya.

Meskipun demikian, nilai viskositas yang diperoleh masih berada dalam kisaran standar yang diizinkan, yaitu 2,3–6,0 cSt, sehingga secara umum biodiesel masih layak digunakan sebagai bahan bakar alternatif. Namun, kecenderungan peningkatan viskositas pada waktu reaksi yang lebih lama perlu menjadi perhatian, karena dapat berdampak pada kualitas atomisasi bahan bakar dalam sistem injeksi serta menurunkan efisiensi pembakaran di dalam mesin.

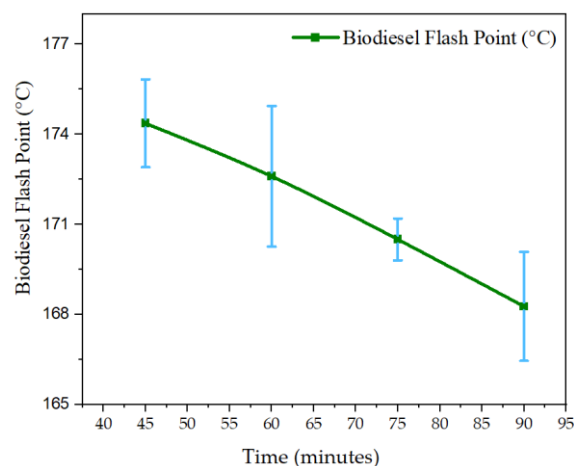
Hasil penelitian ini menunjukkan konsistensi dengan temuan terdahulu yang mengindikasikan bahwa viskositas biodiesel sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia produk, khususnya keberadaan senyawa antara seperti *monogliserida* dan *digliserida*. Kajian oleh L. Aisyah dkk [32], mengungkapkan bahwa peningkatan kandungan *monogliserida* dalam biodiesel berkontribusi langsung terhadap kenaikan viskositas, yang mencerminkan perubahan sifat aliran bahan bakar. Kondisi ini mengindikasikan bahwa konversi trigliserida yang tidak berlangsung secara sempurna selama proses transesterifikasi menghasilkan fraksi senyawa antara yang turut memengaruhi karakteristik fisik biodiesel. Sejalan dengan hal tersebut, penelitian yang dilakukan oleh Enkeledo Menalla dkk [33], menunjukkan bahwa distribusi produk reaksi sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional, termasuk temperatur, tekanan, dan waktu reaksi. Variasi parameter tersebut terbukti memengaruhi proporsi senyawa antara seperti *monogliserida*, *digliserida*, dan asam lemak bebas dalam sistem reaksi. Peningkatan kompleksitas komposisi ini berimplikasi langsung terhadap perubahan sifat fisik bahan bakar, termasuk viskositasnya.

Dengan demikian, peningkatan waktu reaksi cenderung mendorong terbentuknya senyawa antara dengan struktur

molekul yang lebih kompleks, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap peningkatan viskositas biodiesel. Oleh karena itu, pengendalian waktu reaksi menjadi aspek penting dalam menjaga keseimbangan komposisi produk, sehingga biodiesel yang dihasilkan memiliki viskositas yang sesuai standar serta kualitas yang lebih stabil.

Pengaruh Waktu Reaksi terhadap *Flash Point* Biodiesel

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai *flash point* biodiesel mengalami kecenderungan menurun seiring dengan bertambahnya waktu reaksi. Nilai rata-rata yang diperoleh adalah 174,4°C pada 45 menit, kemudian menurun menjadi 172,6°C pada 60 menit, 170,5°C pada 75 menit, dan mencapai 168,3°C pada 90 menit. Secara keseluruhan, terjadi penurunan sekitar 3,5% dari kondisi waktu reaksi terpendek hingga terpanjang. Meskipun penurunan yang terjadi relatif kecil, pola ini mengindikasikan adanya peningkatan kandungan komponen volatil dalam biodiesel. Perubahan ini menunjukkan bahwa durasi reaksi tidak hanya memengaruhi konversi, tetapi juga berkontribusi terhadap karakteristik termal bahan bakar yang dihasilkan.



Gambar 10. Nilai *Flashpoint* Biodiesel Terhadap Waktu Proses Transesterifikasi

Pada **Gambar 10** durasi reaksi yang relatif singkat, nilai *flash point* yang tinggi mengindikasikan rendahnya fraksi komponen volatil dalam biodiesel. Kondisi ini mencerminkan efektivitas tahap pemurnian dalam menghilangkan metanol residu, yang secara inheren memiliki titik nyala rendah. Dominasi metil ester sebagai produk utama juga berperan penting, mengingat sifatnya yang kurang volatil dibandingkan alkohol rantai pendek. Dengan demikian, pada rentang waktu awal reaksi, biodiesel yang dihasilkan menunjukkan stabilitas termal yang baik dan karakteristik keselamatan yang lebih unggul.

Sebaliknya, penurunan *flash point* yang teramati pada waktu reaksi yang lebih panjang mengindikasikan adanya perubahan dalam komposisi kimia produk. Penurunan *flash*

point tersebut diperkirakan berkaitan dengan perubahan distribusi komponen hasil reaksi yang memengaruhi karakteristik volatilitas biodiesel. Namun, karena penelitian ini tidak mengukur kadar metanol residu maupun komposisi produk secara langsung, mekanisme tersebut tidak dapat dipastikan dan hanya diinterpretasikan berdasarkan karakteristik umum proses transesterifikasi yang telah dilaporkan dalam penelitian terdahulu.

Selain itu, perpanjangan waktu reaksi juga membuka peluang terjadinya reaksi samping yang memodifikasi struktur kimia campuran. Pembentukan senyawa antara maupun residu reaksi tidak hanya meningkatkan kompleksitas sistem, tetapi juga memengaruhi distribusi volatilitas komponen. Fenomena ini selaras dengan peningkatan densitas dan viskositas yang telah diamati sebelumnya, yang secara kolektif menunjukkan akumulasi senyawa dengan massa molekul lebih tinggi serta ketidaksempurnaan konversi.

Analisis terintegrasi terhadap parameter fisikokimia menunjukkan adanya hubungan yang saling berkaitan namun berlawanan arah: peningkatan densitas dan viskositas terjadi bersamaan dengan penurunan *flash point*. Pola ini menegaskan bahwa perubahan komposisi produk tidak hanya berdampak pada sifat aliran, tetapi juga pada karakteristik termal dan keselamatan bahan bakar. Dengan kata lain, waktu reaksi yang terlalu lama tidak meningkatkan kualitas biodiesel secara keseluruhan, melainkan justru mengindikasikan degradasi mutu akibat dominasi produk samping dan senyawa non-ideal.

Meskipun nilai *flash point* yang diperoleh masih melampaui batas minimum standar keselamatan, parameter ini tidak semata-mata ditentukan oleh satu variabel tunggal, melainkan sangat bergantung pada struktur molekul dan komposisi campuran biodiesel. Kajian oleh Jun Yao dkk [34], menunjukkan bahwa *flash point* biodiesel dapat diprediksi berdasarkan karakteristik struktur molekulnya, yang mencerminkan kontribusi relatif setiap komponen dalam menentukan sifat keselamatan bahan bakar. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan komposisi akibat variasi kondisi proses memiliki potensi dalam memengaruhi nilai *flash point*.

Sejalan dengan hal tersebut, penelitian yang dilakukan oleh Junli Liu dkk [35], menegaskan bahwa sifat bahan bakar biodiesel, khususnya karakteristik termal, sangat dipengaruhi oleh distribusi komponen fatty acid methyl esters (FAME). Variasi komposisi FAME, baik melalui peningkatan maupun penurunan fraksi tertentu, terbukti berdampak terhadap sifat fisik bahan bakar, termasuk stabilitas termal dan performa pada kondisi operasional tertentu. Hal ini mengindikasikan bahwa kompleksitas komposisi biodiesel menjadi faktor utama dalam menentukan karakteristik keselamatan dan kinerja bahan bakar.

Penurunan nilai *flash point* yang teramati mengindikasikan pergeseran komposisi produk sebagai konsekuensi variasi durasi reaksi, yang cenderung meningkatkan fraksi komponen dengan volatilitas lebih tinggi. Implikasi ini menegaskan bahwa strategi optimasi tidak dapat semata diarahkan pada peningkatan *yield*, melainkan harus mencakup pengendalian distribusi komponen guna mempertahankan stabilitas termal dan aspek keselamatan bahan bakar. Dalam kerangka tersebut, rentang waktu reaksi 45–60 menit muncul sebagai kondisi operasional yang paling representatif untuk menyeimbangkan efisiensi konversi dengan kualitas biodiesel yang dihasilkan.

Temuan ini sekaligus menegaskan bahwa durasi reaksi berperan melampaui fungsi kinetika semata, yakni sebagai parameter yang menentukan evolusi distribusi spesies dalam sistem reaksi. Konsekuensinya, optimasi proses perlu dilakukan melalui pendekatan terpadu yang mempertimbangkan keterkaitan simultan antar parameter kinerja dan sifat fisikokimia. Kontribusi utama kajian ini terletak pada formulasi hubungan kuantitatif dan mekanistik antara waktu reaksi dan perubahan komposisi produk, yang secara bersamaan memengaruhi *yield* serta karakteristik bahan bakar.

Lebih lanjut, dinamika sistem menunjukkan bahwa keberadaan reaksi reversibel, disertai akumulasi senyawa antara seperti mono- dan *digliserida*, menjadi faktor dominan dalam mengontrol kualitas akhir biodiesel. Interaksi kompleks tersebut mengarah pada munculnya fenomena trade-off antara tingkat konversi dan performa bahan bakar, khususnya pada sistem berbasis limbah minyak goreng, sehingga menuntut pendekatan optimasi yang tidak parsial melainkan berbasis keseimbangan sistem.

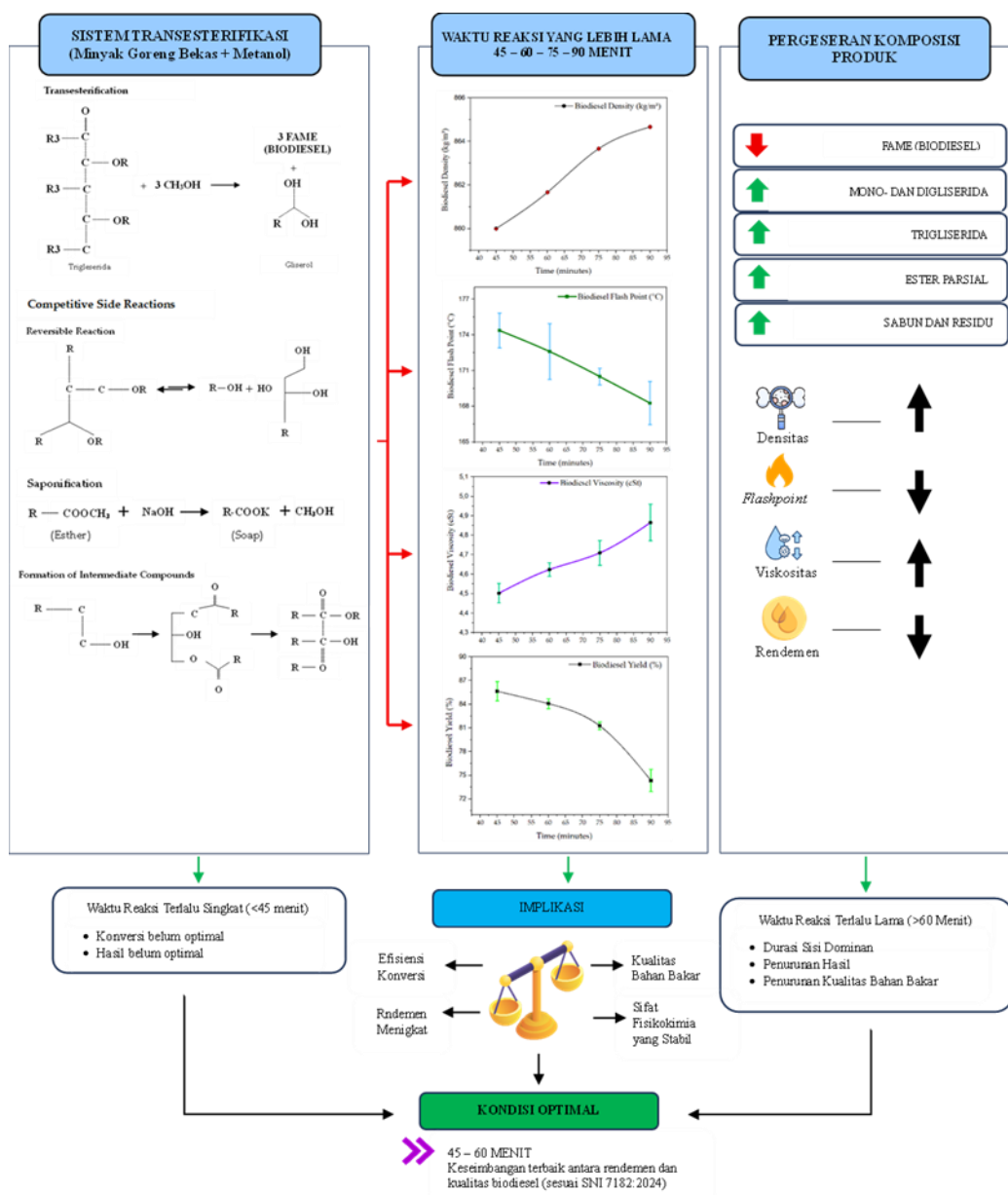
Analisis Terintegrasi Trade-Off Konversi–Kualitas dan Evolusi Komposisi

Keterkaitan antara efisiensi konversi dan karakteristik fisikokimia biodiesel menunjukkan bahwa perilaku sistem tidak dapat direduksi menjadi hubungan parameter tunggal. Penurunan *yield* dengan bertambahnya waktu reaksi terjadi secara simultan dengan peningkatan densitas dan viskositas serta penurunan *flash point*, yang mengindikasikan adanya pergeseran komposisi produk akibat meningkatnya kontribusi reaksi samping. Hubungan invers antara *yield* dan sifat bahan bakar menegaskan bahwa perpanjangan waktu reaksi mendorong akumulasi komponen non-ester dan residu, yang meningkatkan massa jenis dan viskositas, sekaligus memperbesar fraksi komponen volatil yang menurunkan stabilitas termal. Dalam kerangka ini, waktu reaksi berfungsi sebagai variabel pengendali distribusi spesies dalam sistem, sehingga optimasi tidak lagi relevan jika hanya berorientasi pada maksimisasi konversi,

melainkan harus mempertimbangkan keseimbangan antara kuantitas dan kualitas produk.

Rentang waktu 45–60 menit mengindikasikan kondisi operasi yang paling stabil, di mana reaksi utama masih dominan dan pembentukan produk antara relatif terkendali. Sebaliknya, pada durasi yang lebih panjang, intensifikasi mekanisme sekunder menggeser komposisi sistem ke arah yang kurang menguntungkan, sehingga menurunkan kualitas bahan bakar meskipun waktu reaksi diperpanjang. Hal ini mengonfirmasi adanya *trade-off* inheren antara tingkat konversi dan performa bahan bakar, yang menuntut pendekatan optimasi berbasis keseimbangan sistem.

Lebih lanjut, perubahan sifat fisikokimia biodiesel berimplikasi langsung terhadap karakteristik aliran fluida. Peningkatan viskositas berpotensi menurunkan efisiensi sistem injeksi pada mesin diesel, sehingga menunjukkan bahwa performa bahan bakar tidak hanya ditentukan oleh aspek kimia reaksi, tetapi juga oleh interaksi dengan fenomena rekayasa fluida. Oleh karena itu, pengembangan biodiesel memerlukan pendekatan multidisipliner yang mengintegrasikan kinetika reaksi dan mekanika fluida dalam perancangan sistem pembakaran berbasis energi terbarukan. Representasi konseptual dari interaksi tersebut dapat diamati pada Gambar 11.



Gambar 11. Kerangka Konseptual dari Pertukaran yang Didorong oleh Waktu Reaksi

PENUTUP

Waktu reaksi teridentifikasi sebagai variabel kunci yang secara fundamental mengendalikan perolehan biodiesel serta karakteristik fisikokimia yang dihasilkan. Nilai *yield* maksimum sebesar 85,64% dicapai pada durasi 45 menit, kemudian mengalami penurunan bertahap hingga 74,34% pada 90 menit. Tren ini menunjukkan bahwa perpanjangan waktu reaksi tidak meningkatkan perolehan biodiesel dan cenderung menurunkan efisiensi konversi. Penurunan tersebut diperkirakan berkaitan dengan perubahan dinamika reaksi selama proses transesterifikasi, meskipun mekanisme yang mendasarinya belum dianalisis secara langsung dalam penelitian ini. Penurunan *yield* tersebut berlangsung bersamaan dengan perubahan sifat fisikokimia biodiesel. Densitas meningkat dari 860 menjadi 865 kg/m³ dan viskositas *kinematika* dari 4,50 menjadi 4,87 cSt, sementara nilai *flash point* menurun dari 174,4°C menjadi 168,3°C. Perubahan tersebut mengindikasikan adanya perubahan komposisi produk yang berkontribusi terhadap perubahan sifat fisikokimia biodiesel. Namun, komposisi produk tidak dianalisis secara langsung sehingga mekanisme tersebut memerlukan verifikasi lebih lanjut. Nilai densitas, viskositas *kinematika*, dan *flash point* yang diperoleh berada dalam rentang persyaratan SNI 7182:2024 untuk parameter yang diuji. Hasil analisis menunjukkan adanya hubungan antara efisiensi konversi dan mutu bahan bakar pada durasi reaksi yang lebih panjang. Berdasarkan evaluasi terhadap parameter yang diamati, rentang waktu reaksi 45–60 menit menunjukkan keseimbangan terbaik antara perolehan biodiesel dan karakteristik fisikokimia. Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa pengendalian waktu reaksi merupakan aspek krusial dalam optimasi proses transesterifikasi, sekaligus memperjelas keterkaitan antara dinamika reaksi, evolusi komposisi produk, dan performa biodiesel yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. R. Putri, M. Irwan, and M. Nadir, "Pengaruh Jenis Katalis Pada Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Jelantah," *J. Pend. Kim. dan Ilmu. Kim.* (e-ISSN, vol. 7, no. 2, pp. 108–114, 2024, doi: [10.31602/dl.v7i2.15158](https://doi.org/10.31602/dl.v7i2.15158).
- [2] E. Lovisia, O. P. U. Gumay, A. Amin, T. Ariani, and W. Arini, "Sosialisasi dan pelatihan pembuatan biodiesel dari minyak jelantah di desa marga tani kecamatan jayaloka," *J. ABDIMAS Ilm. CITRA BAKTI*, vol. 3, no. 2, pp. 164–173, 2022, doi: [10.38048/jailcb.v3i2.985](https://doi.org/10.38048/jailcb.v3i2.985).
- [3] A. S. Pramudiyanto and S. W. A. Suedy, "Energi Bersih dan Ramah Lingkungan dari Biomassa untuk Mengurangi Efek Gas Rumah Kaca dan Perubahan Iklim yang Ekstrem," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 1, no. 3, pp. 86–99, 2020, doi: [10.14710/jebt.2020.9990](https://doi.org/10.14710/jebt.2020.9990).
- [4] G. Manikandan, P. R. Kanna, D. Taler, and T. Sobota, "Review of Waste Cooking Oil (WCO) as a Feedstock for Biofuel—Indian Perspective," *energies*, vol. 16, no. 4, pp. 1–17, 2023, doi: [10.3390/en16041739](https://doi.org/10.3390/en16041739).
- [5] K. Suryatini and N. Milati, "Pemanfaatan Potensi Minyak Goreng Bekas (Jelantah) sebagai Biodiesel," *J. Edukasi Mat. dan Sains*, vol. 12, no. 1, pp. 54–62, 2023, doi: [10.5281/zenodo.7902815](https://doi.org/10.5281/zenodo.7902815).
- [6] A. Mannu, S. Garroni, J. I. Porras, and A. Mele, "Available Technologies and Materials for Waste Cooking Oil Recycling," *Processes*, vol. 8, no. 3, pp. 1–13, 2020, doi: [10.3390/pr8030366](https://doi.org/10.3390/pr8030366).
- [7] H. Yaqoob *et al.*, "Potential of Waste Cooking Oil Biodiesel as Renewable Fuel in Combustion Engines : A Review," *Energies*, vol. 14, no. 9, pp. 1–20, 2021, doi: [10.3390/en14092565](https://doi.org/10.3390/en14092565).
- [8] T. Priscilla, M. Irwan, and Z. Arifin, "Sintesis Biodiesel Dari Minyak Jelantah Dalam Reaktor Ultrasonik," *JEBT J. Energi Baru Terbarukan*, vol. 5, no. 1, pp. 44 – 56, 2024, doi: [10.14710/jebt.2024.21938](https://doi.org/10.14710/jebt.2024.21938).
- [9] E. D. C. Sidabutar, I. M. I. W. C. Sujana, F. D. Oktavia, N. A. Putri, and M. P. Sari, "Pengaruh Parameter Operasi Pada Proses Transesterifikasi Minyak Jelantah Menggunakan Katalis Tulang Sapi Terhadap Yield Dan Densitas Biodiesel," *Indones. J. Pure Appl. Chem.*, vol. 8, no. 2, pp. 101–108, 2025, doi: [10.26418/indonesian.v8i2.96860](https://doi.org/10.26418/indonesian.v8i2.96860).
- [10] A. Prihanto and T. A. Bambang, "Pengaruh Temperatur, Konsentrasi Katalis Dan Rasio Molar Metanol- Minyak Terhadap Yield Biodisel Dari Minyak Goreng Bekas Melalui Proses Netralisasi- Transesterifikasi," *Metana Media Komun. Rekayasa Proses dan Teknol. Tepat Guna*, vol. 13, no. 1, pp. 30–36, 2017, doi: [10.14710/metana.v13i1.11340](https://doi.org/10.14710/metana.v13i1.11340).
- [11] W. Silaban, "Sosialisasi Pemanfaatan Limbah Minyak Jelantah Sebbagai Pupuk Organik Bagi Tanaman Pada Kelompok Ibu Dharma Wanita Dinas PU Kabupaten Simalungun," *J. Pengabd. Masy. Sapangambe Manoktok Hitei*, vol. 3, no. 1, pp. 12–15, 2023, doi: [10.36985/t1m06643](https://doi.org/10.36985/t1m06643).
- [12] J. Prasetyo, "Studi Pemanfaatan Minyak Jelantah Sebagai Bahan Baku Pembuatan Biodiesel," *J. Ilm. Tek. Kim.*, vol. 2, no. 2, p. 45, 2018, doi: [10.32493/jitk.v2i2.1679](https://doi.org/10.32493/jitk.v2i2.1679).
- [13] N. Suleman, Abas, and M. Paputungan, "Esterifikasi dan Transesterifikasi Stearin Sawit untuk Pembuatan Biodiesel," *J. Tek.*, vol. 17, no. 1, pp. 66–77, 2019, doi: [10.37031/jt.v17i1.54](https://doi.org/10.37031/jt.v17i1.54).

- [14] Muhammad Amirrul Hakim Lokman Nohhakim, Norshahidatul Akmar Mohd Shohaimi, M. L. Ibrahim, W. N. A. W. Mokhtar, and Ahmad Zamani Ab Halim, "Transesterification of Waste Cooking Oil Utilizing Heterogeneous K_2CO_3/Al_2O_3 and KOH/Al_2O_3 Catalysts," *Malaysian J. Chem.*, vol. 23, no. 2, 2021, [Online]. Available: <https://ikm.org.my/publications/malaysian-journal-of-chemistry/view-abstract.php?abs=J0031-A00287>
- [15] A. Kolakoti, M. Setiyo, and B. Waluyo, "Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: Characterization, Modeling and Optimization," *Mech. Eng. Soc. Ind.*, vol. 1, no. 1, pp. 22–30, 2021, doi: [10.31603/mesi.5320](https://doi.org/10.31603/mesi.5320).
- [16] K. Patel and S. K. Singh, "Sustainable biodiesel from used cooking oil: a comparative life cycle, energy, and uncertainty analysis," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 27, pp. 14755–14780, 2024, doi: [10.1007/s10668-024-05692-1](https://doi.org/10.1007/s10668-024-05692-1).
- [17] A. Carvalho, S. Catureba, E. Basile, J. Carlos, R. Maria, and F. Guerhardt, "Analysis of the costs and logistics of biodiesel production from used cooking oil in the metropolitan region of Campinas (Brazil)," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 88, pp. 373–379, 2018, doi: [10.1016/j.rser.2018.02.028](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.028).
- [18] S. Joshi, P. Hadiya, M. Shah, and A. Sircar, "Techno-economical and Experimental Analysis of Biodiesel Production from Used Cooking Oil," *Biophys. Econ. Resour. Qual.*, vol. 4, no. 2, pp. 1–6, 2019, doi: [10.1007/s41247-018-0050-7](https://doi.org/10.1007/s41247-018-0050-7).
- [19] G. Tampubolon, Y. Bow, and L. Trisnaliani, "Optimalisasi Proses Transesterifikasi dalam Pembuatan Biodiesel dari Minyak Jelantah Menggunakan Katalis Campuran Natrium Hidroksida dan Kalium Hidroksida," *Sinergi J. Ilm. Multidisiplin*, vol. 1, no. 2, pp. 2650–2673, 2025.
- [20] M. Sarno and M. Iuliano, "Biodiesel production from waste cooking oil," *Green Process. Synth.*, vol. 8, no. 1, pp. 828–836, 2019, doi: [10.1515/gps-2019-0053](https://doi.org/10.1515/gps-2019-0053).
- [21] Y. S. Erchamo, T. T. Mamo, G. A. Workneh, and Y. S. Mekonnen, "Improved biodiesel production from waste cooking oil with mixed methanol–ethanol using enhanced eggshell-derived CaO nano-catalyst," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–12, 2021, doi: [10.1038/s41598-021-86062-z](https://doi.org/10.1038/s41598-021-86062-z).
- [22] J. C. B. : E. B. production from used cooking oil using a novel surface functionalised T. 2 nano-catalyst Gardy, A. Hassanpour, X. Lai, M. H. Ahmed, and M. Rehan, "Biodiesel production from used cooking oil using a novel surface functionalised TiO_2 nano-catalyst," *Appl. Catal. B, Environ.*, vol. 207, pp. 297–310, 2017, doi: [10.1016/j.apcatb.2017.01.080](https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.01.080).
- [23] M. Hussein and M. Idris, "Studi Eksperimental Titik Nyala dan Viskositas Biodiesel Diproduksi dari Minyak Goreng Bekas," *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 3, no. 1, pp. 86–92, 2024, doi: [10.56862/irajtma.v3i1.101 IRA](https://doi.org/10.56862/irajtma.v3i1.101 IRA).
- [24] S. Oko, D. O. Kurniawan, and W. Harjanto, "Optimalisasi Waktu Reaksi dan Konsentrasi Katalis Fly Ash dalam Produksi Biodiesel dari Minyak Jelantah," *Metana Media Komun. Rekayasa Proses dan Teknol. Tepat Guna*, vol. 21, no. 1, pp. 1–8, 2025, doi: [10.14710/metana.v21i1.62467](https://doi.org/10.14710/metana.v21i1.62467).
- [25] D. R. Ramadhani, M. Zamhari, and R. Junaidi, "Optimalisasi Proses Transesterifikasi Minyak Jelantah Menjadi Biodiesel dengan Variasi Waktu dan Konsentrasi Katalis," *Chem. Eng. J. Storage*, vol. 5, no. 4, pp. 665–681, 2025, doi: [10.29103/cejs.v5i4.23757](https://doi.org/10.29103/cejs.v5i4.23757).
- [26] C. Rosidah, A. R. Aeni, G. N. Fadhillah, F. Yuliasari, and V. P. Fahrani, "Pengaruh Variasi Waktu Transesterifikasi dan Konsentrasi Katalis Terhadap Karakteristik Sifat Fisik Biodiesel Berbahan Minyak Jelantah," *J-TETA J. Tek. Terap.*, vol. 4, no. 2, pp. 87–94, 2025.
- [27] A. A. Budiman and S. Sami, "Review Artikel : Produksi Biodiesel Dari Minyak Goreng Bekas Dengan Metode Transesterifikasi Menggunakan Katalis," *J. Chem.*, vol. 12, no. 2, pp. 36–48, 2023, doi: [10.26740/ujc.v12n2.p36-48](https://doi.org/10.26740/ujc.v12n2.p36-48).
- [28] F. K. Khofifah, A. N. Nalawati, and A. P. Setiawan, "Pengaruh Penambahan KOH Dan Zeolit Alam Sebagai Katalisator Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Jelantah," *Natl. Multidiscip. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 536–542, 2024.
- [29] H. A. Azis, M. Mustam, N. Ramdani, I. I. Amin, N. Sari, and G. Gregorius, "Penggunaan Adsorben Bentonit pada Proses Pencucian Kering dalam Pemurnian Biodiesel Minyak Jelantah," *J. Tek. Kim. USU*, vol. 12, no. 2, pp. 108–115, 2023, doi: [10.32734/jtk.v12i2.11644](https://doi.org/10.32734/jtk.v12i2.11644).
- [30] A. Sartomo and D. M. Prabowoputra, "Factorial design of the effect of reaction temperature and reaction time on biodiesel production Production," in *AIP Conference Proceedings 2217*, 2020, pp. 1–7. doi: [10.1063/5.0000505](https://doi.org/10.1063/5.0000505).
- [31] E. D. Daryono, I. N. G. Wardana, C. Cahyani, and N. Hamidi, "Biodiesel production process without glycerol by-product with base catalyst: effect of reaction time and type of catalyst on kinetic energy and solubility," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, pp. 1–7. doi: [10.1088/1757-899X/1053/1/012058](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1053/1/012058).
- [32] L. Aisyah, C. S. Wibowo, S. A. Bethari, D.

- Ufidian, and R. Anggarani, "Monoglyceride contents in biodiesel from various plants oil and the effect to low temperature properties," in *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2023, pp. 1–7. doi: [10.1088/1757-899X/316/1/012023](https://doi.org/10.1088/1757-899X/316/1/012023).
- [33] E. Menalla, J. G. Serna, D. Cantero, and M. J. Cocero, "Hydrothermal hydrolysis of triglycerides : Tunable and intensified production of diglycerides, monoglycerides, and fatty acids," *Chem. Eng. J.*, vol. 493, pp. 1–11, 2024, doi: [10.1016/j.cej.2024.152391](https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152391).
- [34] J. Yao *et al.*, "Prediction of the flash points of binary biodiesel mixtures from molecular structures," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 65, 2020, doi: [10.1016/j.jlp.2020.104137](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104137).
- [35] J. Liu and B. Tao, "Fractionation of fatty acid methyl esters via urea inclusion and its application to improve the low-temperature performance of biodiesel," *Biofuel Res. J.*, vol. 9, no. 2, pp. 1617–1629, 2022, doi: [10.18331/BRJ2022.9.2.3](https://doi.org/10.18331/BRJ2022.9.2.3).