

OPTIMASI PRODUKSI BIODIESEL DARI MINYAK MENIR KEMIRI MELALUI ESTERIFIKASI DAN TRANSESTERIFIKASI DUA TAHAP

OPTIMIZATION OF BIODIESEL PRODUCTION FROM CANDLENUT WASTE OIL VIA TWO-STEP ESTERIFICATION AND TRANSESTERIFICATION

Veronica Putri Iswono, Natasya Geulla Shalomita, Mardhiyah Aliyatus Sya'ni, Adam Yonanda, Fajril Istiqfar Ruchdragani, Rini Kartika Dewi*

Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Malang
Jl. Raya Karanglo KM.2 Karangploso, Kota Malang, 417634, Indonesia

*Email: rini_kartika_dewi@lecturer.itn.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan bahan baku non pangan menjadi strategi penting dalam pengembangan biodiesel berkelanjutan, salah satunya minyak menir kemiri. Minyak ini memiliki kandungan asam lemak bebas (FFA) tinggi (10,05%) sehingga memerlukan proses dua tahap untuk menghindari reaksi penyabunan pada transesterifikasi basa. Penelitian ini bertujuan merekayasa produksi biodiesel melalui esterifikasi menggunakan H_2SO_4 dan transesterifikasi menggunakan KOH. Tahap esterifikasi menurunkan FFA melalui reaksi dengan metanol, sedangkan transesterifikasi mengkonversi trigliserida menjadi metil ester. Hasil menunjukkan bahwa FFA berhasil diturunkan menjadi 0,435–0,708%. Kadar ester tertinggi mencapai 98,98% (w/w), sementara kadar gliserol total sangat rendah (0,0017–0,0019% w/w). Nilai tersebut menunjukkan konversi yang tinggi dan kemurnian produk yang baik. Dengan demikian, proses dua tahap yang diterapkan efektif menghasilkan biodiesel berkualitas tinggi dari minyak menir kemiri dan berpotensi sebagai sumber energi terbarukan yang berkelanjutan.

Kata kunci biodiesel, esterifikasi, FFA, menir kemiri, transesterifikasi

Abstract

The utilization of non-edible feedstocks is an important strategy in developing sustainable biodiesel, one of which is candlenut (kemiri) waste oil. This oil contains a high free fatty acid (FFA) level (10.05%), requiring a two-step process to prevent saponification during base-catalyzed transesterification. This study aims to develop biodiesel production through esterification using H_2SO_4 followed by transesterification using KOH. The esterification step reduces FFA via reaction with methanol, while transesterification converts triglycerides into methyl esters. The results show that FFA was successfully reduced to 0.435–0.708%. The highest ester content reached 98.98% (w/w), while total glycerol content was very low (0.0017–0.0019% w/w), indicating high conversion efficiency and product purity. Therefore, the applied two-step process effectively produces high-quality biodiesel from candlenut waste oil and demonstrates strong potential as a sustainable renewable energy source.

Keywords biodiesel, esterification candlenut waste oil, FFA, transesterification

Pendahuluan

Krisis energi global serta meningkatnya emisi gas rumah kaca akibat penggunaan bahan bakar fosil mendorong pengembangan sumber energi alternatif yang bersifat terbarukan dan ramah lingkungan. Biodiesel merupakan salah satu bahan bakar alternatif yang menjanjikan karena memiliki sifat biodegradable, emisi gas buang yang lebih rendah, serta kompatibel dengan mesin diesel konvensional. Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian biodiesel terus berkembang dengan fokus pada peningkatan efisiensi proses, pemilihan bahan baku yang berkelanjutan, serta pengembangan katalis yang lebih efektif.

Pemanfaatan bahan baku non-pangan menjadi strategi penting dalam produksi biodiesel guna menghindari kompetisi dengan kebutuhan pangan sekaligus menekan biaya produksi. Berbagai studi menunjukkan bahwa biaya bahan baku dapat mencapai 70–95% dari total biaya produksi biodiesel, sehingga penggunaan limbah atau minyak non-edible menjadi alternatif yang sangat potensial. Minyak limbah(1), seperti minyak jelantah(2), minyak residu, serta minyak hasil samping agroindustri(3), telah banyak diteliti karena ketersediaannya melimpah dan bernilai ekonomi rendah.

Salah satu bahan baku non-pangan yang memiliki potensi besar adalah minyak menir kemiri. Kemiri (*Aleurites moluccana*)(4) merupakan tanaman tropis yang mengandung minyak cukup tinggi, yaitu sekitar 55–65% dari berat bijinya. Dalam proses pengolahan kemiri, dihasilkan berbagai fraksi produk seperti kemiri utuh,

kemiri pecah, cangkang, menir kemiri, dan bubuk kemiri. Berdasarkan hasil observasi lapangan dan wawancara dengan pelaku usaha pemecahan kemiri di wilayah Malang, dari 4 ton gelondongan kemiri per hari dihasilkan sekitar 30% limbah yang terdiri dari menir dan bubuk kemiri. Hingga saat ini, menir kemiri umumnya belum dimanfaatkan secara optimal dan cenderung dibuang karena memiliki nilai jual yang rendah serta membutuhkan biaya tambahan untuk pemisahan. Kondisi ini menunjukkan adanya peluang besar untuk meningkatkan nilai tambah limbah menir kemiri melalui pemanfaatannya sebagai bahan baku biodiesel.



Gambar 1. Profil menir kemiri

Minyak menir kemiri memiliki kandungan trigliserida yang tinggi sehingga berpotensi besar sebagai bahan baku biodiesel (5,6). Namun demikian, kelemahan utama minyak ini terletak pada kandungan asam lemak bebas (Free Fatty Acid/FFA) yang relatif tinggi (7). Hasil pengujian awal pada penelitian ini menunjukkan bahwa kadar FFA mencapai 10,05%, yang jauh melebihi batas toleransi untuk proses transesterifikasi basa (<2%). Kandungan FFA yang tinggi dapat memicu reaksi saponifikasi yang menyebabkan penurunan yield biodiesel serta menyulitkan proses pemisahan produk. Selain itu, kadar FFA yang tinggi juga diketahui dapat menghambat efektivitas reaksi transesterifikasi (8).

Untuk mengatasi kendala tersebut, pendekatan proses dua tahap melalui esterifikasi dan transesterifikasi telah banyak dikembangkan. Tahap esterifikasi menggunakan katalis asam, seperti asam sulfat (H_2SO_4), bertujuan untuk menurunkan kadar FFA melalui reaksi dengan metanol membentuk esiter. Setelah kadar FFA diturunkan hingga di bawah batas kritis, proses dilanjutkan dengan transesterifikasi menggunakan katalis basa, seperti kalium hidroksida (KOH), untuk mengkonversi trigliserida menjadi metil ester (biodiesel) dan gliserol sebagai produk samping (9). Kombinasi kedua proses ini terbukti efektif dalam meningkatkan konversi biodiesel, khususnya dari bahan baku dengan kandungan FFA tinggi (10,11).

Selain itu, parameter proses seperti rasio molar metanol terhadap minyak, konsentrasi katalis, suhu, dan waktu reaksi memiliki peran penting dalam menentukan kualitas biodiesel yang dihasilkan. Optimasi kondisi operasi dapat menghasilkan biodiesel dengan kadar ester yang tinggi serta kandungan gliserol yang rendah, yang merupakan indikator utama kualitas biodiesel sesuai standar internasional seperti EN 14214 (12). Penelitian lain juga melaporkan bahwa metode dua tahap mampu menurunkan kadar FFA secara signifikan hingga di bawah batas standar serta meningkatkan efisiensi konversi biodiesel (2,13).

Dalam konteks Indonesia, pengembangan biodiesel berbasis bahan baku limbah dan non-pangan menjadi semakin penting dalam mendukung ketahanan energi nasional dan keberlanjutan lingkungan. Secara umum, proses produksi biodiesel melibatkan tahapan pretreatment, esterifikasi, dan transesterifikasi untuk menghasilkan produk dengan kemurnian tinggi serta kandungan pengotor yang minimal. Penggunaan katalis homogen seperti H_2SO_4 dan KOH masih banyak dipilih karena efektivitasnya yang tinggi serta kemudahan aplikasinya dalam skala laboratorium maupun industri (14–16).

Penelitian ini memiliki kebaruan (novelty) yang terletak pada pemanfaatan minyak menir kemiri sebagai bahan baku non-pangan yang masih jarang dilaporkan, khususnya dengan karakteristik kadar FFA awal yang tinggi (10,05%). Selain itu, penelitian ini mengusulkan rekayasa proses dua tahap (esterifikasi–transesterifikasi) menggunakan kombinasi katalis H_2SO_4 dan KOH yang dioptimasi untuk menghasilkan biodiesel berkualitas tinggi. Kinerja proses ditunjukkan melalui keberhasilan penurunan kadar FFA secara signifikan serta pencapaian kadar ester yang tinggi (hingga 98,98% m/m) dan kandungan gliserol yang sangat rendah (0,0017% m/m).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merekayasa proses produksi biodiesel dari minyak menir kemiri melalui kombinasi proses esterifikasi dan transesterifikasi. Fokus penelitian adalah mengevaluasi penurunan kadar FFA, peningkatan kadar ester, serta penurunan kandungan gliserol sebagai indikator keberhasilan proses. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi biodiesel berbasis limbah non-pangan yang efisien, berkelanjutan, dan bernilai tambah tinggi.

Teori

Perkembangan Biodiesel

Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif berbasis ester yang dihasilkan melalui reaksi esterifikasi atau transesterifikasi antara trigliserida yang berasal dari minyak nabati atau lemak hewani dengan alkohol rantai

pendek, umumnya metanol, menggunakan bantuan katalis homogen maupun heterogen. Secara kimia, biodiesel tersusun atas metil ester asam lemak (fatty acid methyl esters/FAME) yang memiliki karakteristik fisik dan kimia mendekati bahan bakar diesel konvensional. Biodiesel memiliki keunggulan berupa angka setana yang tinggi, sifat pelumasan yang baik, serta emisi gas buang yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar fosil, sehingga berkontribusi dalam menurunkan dampak lingkungan (17).

Pengembangan biodiesel mulai mendapatkan perhatian global sejak krisis energi pada dekade 1970-an, yang mendorong pencarian sumber energi alternatif yang berkelanjutan. Mesin diesel sendiri pada awalnya dirancang oleh Rudolf Diesel dengan konsep penggunaan bahan bakar berbasis minyak nabati, sehingga biodiesel memiliki kompatibilitas tinggi dengan mesin diesel modern. Di Indonesia, penelitian biodiesel mulai berkembang pada tahun 1990-an melalui berbagai institusi seperti LEMIGAS, BPPT, PPKS, LRPI, dan Institut Teknologi Bandung.

Uji coba penggunaan biodiesel di Indonesia telah dilakukan sejak tahun 1994 melalui kerja sama antara LEMIGAS dan Pertamina, dengan pengujian campuran biodiesel 30% (B30) pada kendaraan diesel. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan biodiesel tidak menyebabkan kerusakan mesin, meskipun terjadi sedikit peningkatan konsumsi bahan bakar. Pengembangan ini terus berlanjut hingga implementasi program B30 biodiesel program Indonesia pada tahun 2020 sebagai bagian dari strategi ketahanan energi nasional. Hingga saat ini, industri biodiesel di Indonesia terus berkembang dengan keterlibatan berbagai pelaku industri yang tergabung dalam asosiasi seperti APROBI.

Pemanfaatan Limbah Kemiri sebagai Bahan Baku Biodiesel

Kemiri (*Aleurites moluccana*) merupakan salah satu komoditas perkebunan yang memiliki potensi besar dalam pengembangan energi terbarukan, khususnya sebagai sumber minyak nabati non-pangan. Biji kemiri diketahui memiliki kandungan minyak yang tinggi, yaitu sekitar 55–66% dari berat bijinya, sehingga memenuhi kriteria sebagai bahan baku biodiesel (18). Komposisi asam lemak dalam minyak kemiri didominasi oleh asam palmitat, stearat, oleat, linoleat, dan linolenat, yang berperan dalam menentukan sifat fisikokimia biodiesel yang dihasilkan (19).

Di sisi lain, proses pengolahan kemiri menghasilkan limbah dalam jumlah yang signifikan, seperti menir dan tempurung kemiri, yang umumnya belum dimanfaatkan secara optimal. Pengelolaan limbah kemiri masih terbatas akibat keterbatasan teknologi dan masih bergantung pada metode sederhana (20). Sebagai contoh, kawasan hutan Camba di Kabupaten Maros memiliki produksi kemiri yang mencapai puluhan ribu ton per tahun, yang turut menghasilkan limbah dalam jumlah besar.

Pemanfaatan limbah kemiri sebagai sumber energi menjadi salah satu solusi untuk meningkatkan nilai tambah serta mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Tempurung kemiri diketahui mengandung komponen lignoselulosa seperti holoselulosa dan lignin yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi biomassa (21). Namun demikian, pemanfaatan bagian minyak dari limbah kemiri, khususnya menir kemiri, memiliki potensi yang lebih langsung dalam produksi biodiesel karena kandungan trigliseridanya yang tinggi.

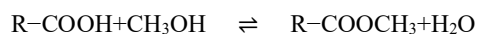
Dengan demikian, pemanfaatan minyak dari limbah menir kemiri sebagai bahan baku biodiesel tidak hanya memberikan alternatif sumber energi terbarukan, tetapi juga berkontribusi dalam pengelolaan limbah agroindustri secara berkelanjutan. Pendekatan ini sejalan dengan konsep circular economy, di mana limbah diolah kembali menjadi produk bernilai tambah tinggi melalui rekayasa proses yang tepat.

Teori Reaksi Esterifikasi dan Transesterifikasi

Produksi biodiesel secara umum melibatkan dua jenis reaksi utama, yaitu esterifikasi dan transesterifikasi, yang bertujuan untuk mengkonversi komponen minyak menjadi metil ester sebagai produk utama.

Reaksi Esterifikasi

Reaksi esterifikasi merupakan reaksi antara asam lemak bebas ($R-COOH$) dengan metanol (CH_3OH) yang menghasilkan metil ester ($R-COOCH_3$) dan air (H_2O) dengan bantuan katalis asam, umumnya asam sulfat (H_2SO_4). Reaksi ini bersifat reversibel sehingga kelebihan metanol diperlukan untuk menggeser kesetimbangan ke arah pembentukan ester. Secara umum, reaksi esterifikasi dapat dituliskan sebagai berikut:

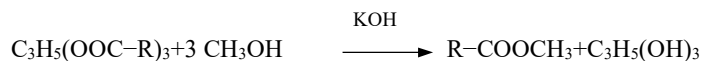


Tujuan utama dari tahap esterifikasi adalah untuk menurunkan kadar FFA dalam bahan baku hingga di bawah batas toleransi (<2%), sehingga dapat mencegah terjadinya reaksi penyabunan pada tahap transesterifikasi. Keberhasilan proses esterifikasi sangat dipengaruhi oleh rasio molar alkohol terhadap minyak, konsentrasi katalis, suhu reaksi, serta waktu reaksi.

Reaksi Transesterifikasi

Reaksi transesterifikasi merupakan reaksi antara trigliserida dengan alkohol rantai pendek (metanol) yang menghasilkan metil ester dan gliserol sebagai produk samping dengan bantuan katalis basa, seperti KOH. Secara

stoikiometri, satu molekul trigliserida bereaksi dengan tiga molekul metanol menghasilkan tiga molekul metil ester dan satu molekul gliserol. Reaksi ini berlangsung secara bertahap melalui pembentukan intermediat digliserida dan monogliserida. Keberhasilan reaksi sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi, seperti rasio molar metanol, konsentrasi katalis, suhu, serta keberadaan air dan asam lemak bebas.



Secara mekanisme, reaksi ini berlangsung melalui tiga tahap berturut-turut, yaitu konversi trigliserida menjadi digliserida, kemudian monogliserida, dan akhirnya menghasilkan gliserol. Setiap tahap menghasilkan satu molekul metil ester. Reaksi transesterifikasi sangat sensitif terhadap keberadaan air dan FFA, karena dapat menyebabkan terbentuknya sabun (saponifikasi) yang menghambat pemisahan produk.

State of the Art Penelitian Biodiesel

Penelitian biodiesel dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan perkembangan signifikan, khususnya dalam hal pemilihan bahan baku, optimasi proses, serta inovasi katalis. Penggunaan bahan baku non-pangan seperti minyak jelantah (22), minyak mikroalga (23), *rubber seed oil* (24), *candlenut seed oil* (25) dan limbah agroindustry (26) telah banyak dikaji sebagai upaya menekan biaya produksi dan meningkatkan keberlanjutan (27,28).

Pada aspek proses, metode dua tahap (esterifikasi–transesterifikasi) telah terbukti efektif dalam mengolah bahan baku dengan kandungan FFA tinggi. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu menurunkan kadar FFA secara signifikan sekaligus meningkatkan yield biodiesel hingga di atas 95% (11,29). Selain itu, pengembangan katalis heterogen juga menjadi fokus penelitian untuk meningkatkan efisiensi proses dan mempermudah pemisahan produk (30,31).

Di sisi lain, penelitian juga mulai mengarah pada integrasi proses, seperti penggunaan teknologi microwave, ultrasonik, serta reaktor berkelanjutan (continuous reactor) untuk meningkatkan laju reaksi dan efisiensi energi. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada bahan baku konvensional seperti minyak sawit dan minyak jelantah, sementara pemanfaatan limbah spesifik seperti minyak menir kemiri masih relatif terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini memiliki posisi penting dalam pengembangan biodiesel, khususnya dalam mengeksplorasi potensi minyak menir kemiri sebagai bahan baku alternatif dengan kandungan FFA tinggi. Selain itu, penelitian ini juga menekankan pada optimasi proses dua tahap menggunakan katalis homogen yang sederhana namun efektif, dengan fokus pada peningkatan kualitas biodiesel yang dihasilkan.

Metodologi Penelitian

a. Preparasi Bahan

Tahap persiapan bahan baku dilakukan dengan mengeringkan menir kemiri menggunakan oven pada suhu 105°C hingga siap untuk diproses lebih lanjut.

b. Pengambilan Minyak pada Menir Kemiri

Menir kemiri dipisahkan dari cangkangnya dan dipotong menjadi ukuran yang lebih kecil. Potongan menir kemudian digiling menggunakan mesin penggiling hingga diperoleh massa yang homogen. Massa hasil penggilingan selanjutnya diproses menggunakan tiga metode pemisahan minyak, yaitu pengepresan dengan tenaga manusia, pengepresan menggunakan alat press hidrolik, dan penyaringan menggunakan kain saring. Khusus untuk metode penyaringan, menir kemiri terlebih dahulu disangrai sebelum dilakukan proses pemisahan minyak.

c. Esterifikasi Asam Lemak Bebas

Sebanyak 12,64 mL metanol dipipet dan dimasukkan ke dalam gelas beker. Kemudian, 0,545 mL H₂SO₄ dipipet dan dicampurkan ke dalam metanol hingga homogen. Sebanyak 125 mL minyak hasil filtrasi menggunakan kertas saring dimasukkan ke dalam labu destilasi. Campuran metanol-H₂SO₄ kemudian ditambahkan ke dalam minyak dan direaksikan melalui proses refluks pada suhu 55–85°C dengan kecepatan pengadukan 100–250 rpm selama 50–70 menit. Setelah reaksi selesai, produk metil ester dipisahkan dari fase pengotor menggunakan corong pisah..

d. Pembuatan Biodiesel dengan Metode Transesterifikasi (Minyak : Methanol = 1 : 5)

Metil ester hasil esterifikasi dimasukkan ke dalam labu destilasi. Sebanyak 1 g KOH ditimbang dan dilarutkan dalam 25 mL metanol hingga terbentuk larutan kalium metanolat. Larutan kalium metanolat kemudian ditambahkan ke dalam metil ester hasil esterifikasi dan direaksikan melalui proses refluks pada suhu 55–85°C dengan kecepatan pengadukan konstan 100–250 rpm selama 50–70 menit. Setelah reaksi selesai, fase *crude biodiesel* dipisahkan dari fase gliserol menggunakan corong pisah. Biodiesel yang diperoleh kemudian dinetralkan dengan penambahan 2 tetes asam asetat glasial teknis dan dicuci menggunakan 50 mL akuades.

hangat untuk menghilangkan sisa metanol, katalis, gliserol, dan sabun. Pencucian dilakukan satu kali, kemudian biodiesel dipanaskan sambil diaduk menggunakan *hot plate* hingga diperoleh biodiesel yang jernih dan bebas air.

Analisa Biodiesel

A. Penentuan Kadar Asam Lemak Bebas (*Free Fatty Acid*/FFA)

Kadar asam lemak bebas (FFA) pada minyak kemiri dan biodiesel ditentukan melalui metode titrasi alkalimetri. Sebanyak 5 gram sampel ditimbang dan dilarutkan dalam 12,5 mL alkohol 95% panas, kemudian ditambahkan indikator fenolftalein. Larutan selanjutnya dititrasi menggunakan larutan KOH 0,1 N yang telah distandarisasi hingga tercapai titik akhir titrasi yang ditandai dengan perubahan warna larutan menjadi merah muda stabil.

B. Uji Bilangan Asam

Bilangan penyabunan biodiesel ditentukan menggunakan metode titrimetri. Sebanyak 4 gram sampel biodiesel ditimbang dan dimasukkan ke dalam Erlenmeyer, kemudian ditambahkan 10 mL campuran pelarut. Larutan yang diperoleh selanjutnya ditambahkan 1 tetes indikator fenolftalein dan dititrasi menggunakan larutan KOH alkoholik yang telah distandarisasi hingga tercapai titik akhir titrasi yang ditandai dengan perubahan warna larutan secara permanen.

C. Uji Kadar Gliserol Total

Pengujian dilakukan menggunakan metode iodometri-asam periodat. Sebanyak 5 gram biodiesel ditimbang dan ditambahkan 50 mL larutan KOH alkoholik. Campuran kemudian dididihkan selama 30 menit untuk proses saponifikasi. Selanjutnya, 45,5 mL kloroform dan 12,5 mL asam asetat glasial dimasukkan ke dalam labu ukur 500 mL. Setelah proses pemanasan selesai, isi labu saponifikasi dipindahkan secara kuantitatif ke dalam labu ukur menggunakan akuades sebagai pembilas. Larutan kemudian diencerkan hingga tanda batas, dikocok hingga homogen, dan didiamkan sampai terbentuk pemisahan lapisan yang sempurna. Sebanyak 3 mL larutan periodat dimasukkan ke dalam Erlenmeyer. Selanjutnya, 50 mL lapisan akuatik ditambahkan ke dalam Erlenmeyer tersebut, dikocok perlahan, lalu didiamkan selama 30 menit. Setelah itu, 1,5 mL larutan KI ditambahkan dan campuran didiamkan selama 1 menit. Larutan kemudian dititrasi menggunakan natrium tiosulfat yang telah distandarisasi hingga warna cokelat iodium hampir hilang. Sebanyak 1,5 mL indikator amilum ditambahkan, kemudian titrasi dilanjutkan hingga warna biru hilang sempurna. Analisis blanko dilakukan dengan prosedur yang sama menggunakan akuades sebagai pengganti lapisan akuatik.

D. Uji Bilangan Penyabunan dan Kadar Ester Biodiesel Ester Alkil

Sebanyak 5 gram biodiesel ditimbang ke dalam Erlenmeyer, kemudian ditambahkan 50 mL larutan KOH alkoholik. Erlenmeyer selanjutnya dipasang dengan kondensor dan campuran dipanaskan selama 1 jam hingga proses penyabunan berlangsung sempurna. Setelah pemanasan selesai, kondensor dibilas menggunakan sedikit akuades. Selanjutnya, 1 mL indikator fenolftalein ditambahkan, kemudian larutan dititrasi menggunakan HCl 0,5 N hingga terjadi perubahan warna dari merah muda menjadi tidak berwarna. Analisis blanko dilakukan dengan prosedur yang sama tanpa penambahan sampel biodiesel.

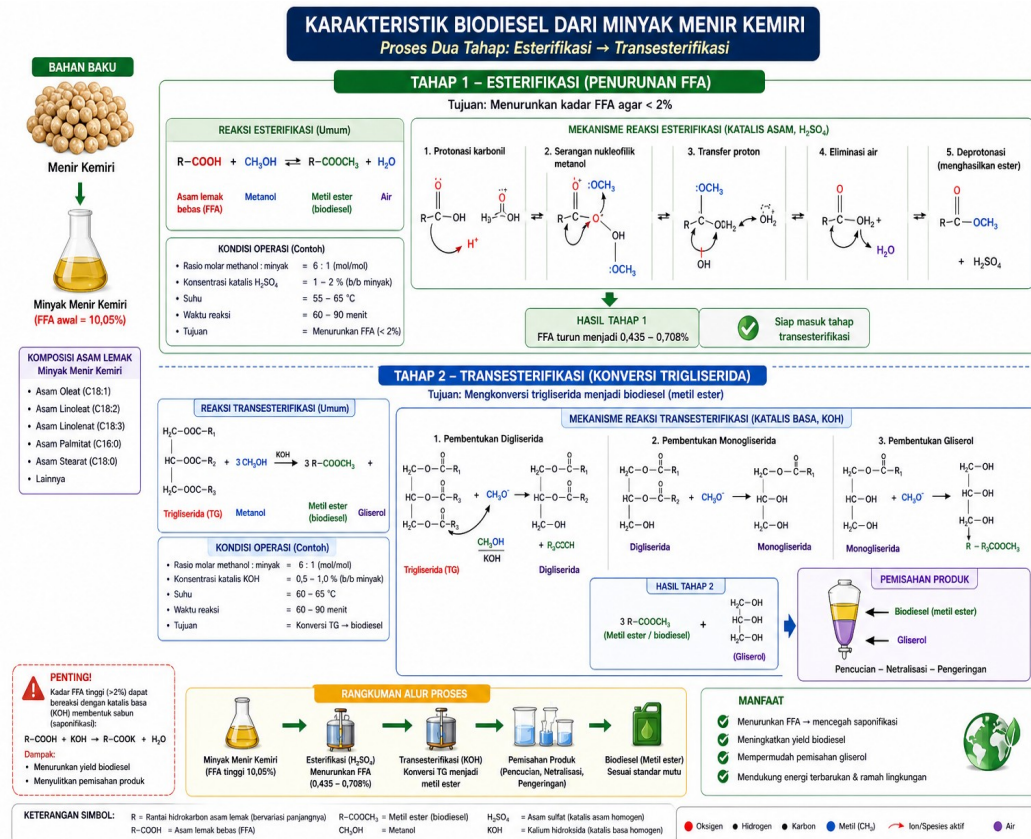
Hasil

1. Karakteristik Biodiesel dari Minyak Menir Kemiri

Berdasarkan Gambar 3, produksi biodiesel dari minyak menir kemiri dalam penelitian ini dilakukan melalui proses dua tahap, yaitu esterifikasi dan transesterifikasi. Pendekatan ini dipilih karena bahan baku memiliki kandungan asam lemak bebas (FFA) awal yang tinggi, yaitu sebesar 10,05%, sehingga tidak dapat langsung diproses menggunakan katalis basa. Proses esterifikasi terbukti efektif dalam menurunkan kadar FFA hingga berada pada kisaran 0,435–0,708%, yang menunjukkan bahwa sebagian besar asam lemak bebas telah berhasil dikonversi menjadi ester. Penurunan kadar FFA ini sangat penting karena keberadaan FFA dalam jumlah tinggi dapat menyebabkan reaksi saponifikasi pada tahap transesterifikasi, yang berdampak pada menurunnya yield biodiesel serta kesulitan dalam pemisahan produk. Dengan demikian, keberhasilan tahap esterifikasi menjadi faktor kunci dalam meningkatkan efisiensi keseluruhan proses produksi biodiesel.

2. Analisis Kadar Ester dan Gliserol

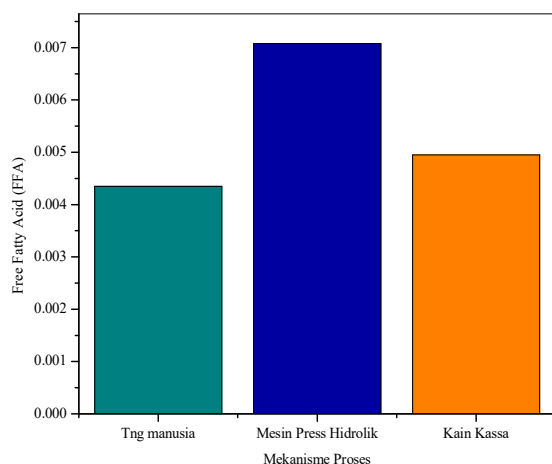
Berdasarkan Gambar 3, kadar ester merupakan parameter utama yang menunjukkan tingkat keberhasilan konversi trigliserida menjadi biodiesel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar ester tertinggi diperoleh pada sampel dengan menggunakan tenaga manusia sebesar 98,98% (w/w), sedangkan sampel dengan mesin press hidrolik dan kain kassa masing-masing sebesar 98,71% (w/w). Nilai ini telah memenuhi standar internasional (EN 14214 $\geq 96,5\%$), yang menunjukkan bahwa proses transesterifikasi berlangsung secara optimal. Selain itu, kadar gliserol total yang dihasilkan sangat rendah, yaitu sebesar 0,0017% (w/w) pada sampel dengan tenaga manusia serta 0,0019% (w/w) pada sampel mesin press hidrolik dan kain kassa. Rendahnya kandungan gliserol menunjukkan bahwa proses pemisahan dan pemurnian biodiesel berlangsung dengan baik. Secara teoritis, semakin tinggi konversi trigliserida menjadi metil ester, maka semakin sedikit gliserol yang tersisa dalam produk akhir.



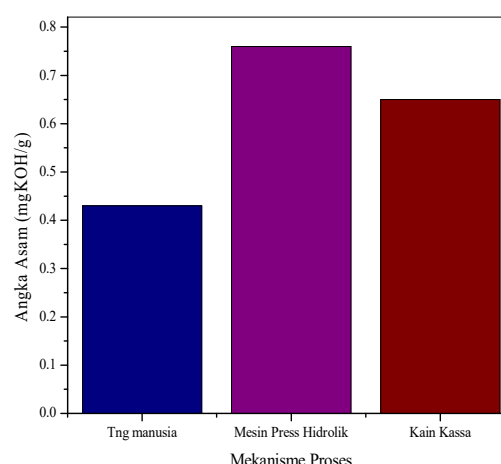
Hubungan antara kadar ester dan gliserol dalam penelitian ini menunjukkan korelasi yang konsisten, di mana tingginya kadar ester diikuti oleh rendahnya kandungan gliserol. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi operasi yang diterapkan mampu menghasilkan biodiesel dengan tingkat kemurnian yang tinggi.

3. Analisis Kadar FFA dan Angka Asam

Kadar FFA (Gambar 4) dan angka asam (Gambar 5) merupakan parameter yang saling berkaitan dalam menentukan kualitas biodiesel. Hasil analisis menunjukkan bahwa kadar FFA pada biodiesel berada pada kisaran 0,435–0,708%, sedangkan nilai angka asam terendah yang diperoleh adalah sebesar 0,43 mg KOH/g. Nilai angka asam tersebut menunjukkan bahwa kandungan asam lemak bebas dalam biodiesel relatif rendah. Berdasarkan SNI 7182:2015 tentang Biodiesel, batas maksimum angka asam yang diperbolehkan adalah 0,50 mg KOH/g biodiesel. Oleh karena itu, biodiesel dengan nilai angka asam sebesar 0,43 mg KOH/g telah memenuhi persyaratan mutu biodiesel yang ditetapkan dalam standar tersebut. Rendahnya nilai FFA dan angka asam mengindikasikan bahwa proses esterifikasi dan transesterifikasi berjalan efektif dalam mengkonversi asam lemak bebas menjadi metil ester. Selain itu, nilai angka asam yang rendah juga menunjukkan bahwa biodiesel memiliki tingkat korosivitas yang rendah, sehingga lebih aman digunakan dalam sistem bahan bakar mesin diesel.



Gambar 4. Hasil Free Fatty Acid (FFA) dari berbagai proses



Gambar 5. Hasil angka asam dari berbagai proses

Sebaliknya, apabila nilai FFA dan angka asam tinggi, maka biodiesel cenderung bersifat korosif dan berpotensi menyebabkan pembentukan deposit pada komponen mesin. Oleh karena itu, parameter ini menjadi indikator penting dalam menilai kestabilan dan kualitas biodiesel.

4. Analisis Densitas Biodiesel

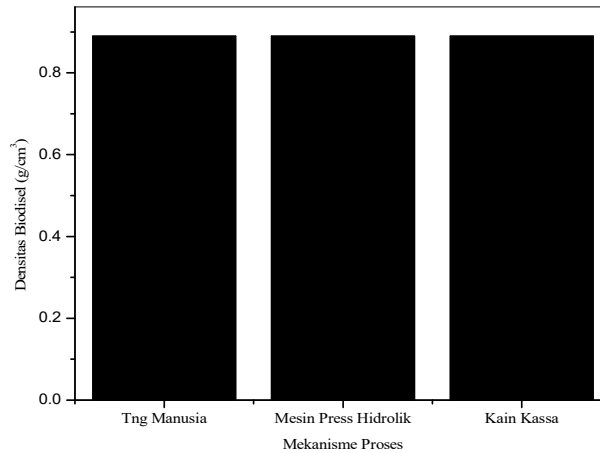
Densitas merupakan parameter fisik yang berpengaruh terhadap performa pembakaran bahan bakar. Hasil penelitian (Gambar 6) menunjukkan bahwa nilai densitas biodiesel pada seluruh sampel adalah sebesar 0,89 g/cm³. Nilai ini berada dalam rentang standar biodiesel menurut SNI (0,85–0,89 g/cm³), sehingga menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik.

Keseragaman nilai densitas pada ketiga sampel menunjukkan bahwa variasi kondisi proses yang diterapkan tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap parameter ini. Densitas biodiesel dipengaruhi oleh komposisi kimia, khususnya kandungan ester dan keberadaan senyawa pengotor seperti gliserol, air, dan sisa katalis.

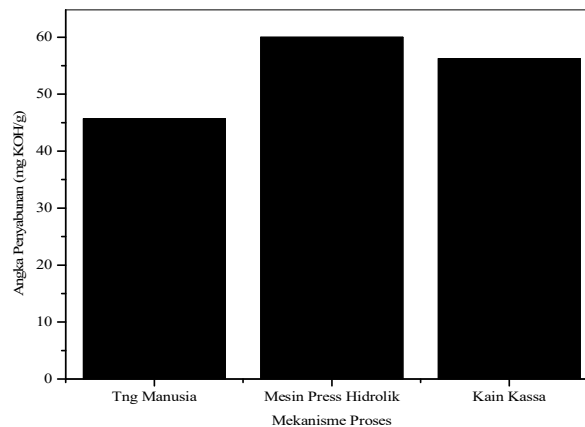
Nilai densitas yang sesuai standar menunjukkan bahwa biodiesel memiliki karakteristik atomisasi yang baik saat proses pembakaran. Densitas yang terlalu tinggi dapat menyebabkan pembakaran tidak sempurna, sedangkan densitas yang terlalu rendah dapat mempengaruhi energi yang dihasilkan. Oleh karena itu, nilai densitas yang diperoleh dalam penelitian ini mengindikasikan performa bahan bakar yang optimal.

5. Analisis Angka Penyabunan

Bilangan penyabunan merupakan parameter yang berkaitan dengan rata-rata panjang rantai asam lemak dalam biodiesel. Hasil penelitian (Gambar 7) menunjukkan bahwa nilai bilangan penyabunan terendah diperoleh sebesar 45,7 mg KOH/g. Nilai ini mengindikasikan bahwa biodiesel yang dihasilkan didominasi oleh senyawa dengan rantai karbon yang relatif panjang.



Gambar 6. Hasil densitas dari berbagai proses



Gambar 7. Hasil angka penyabunan dari berbagai proses

Perlu dicatat bahwa bilangan penyabunan tidak secara langsung mencerminkan kadar asam lemak bebas, melainkan memberikan gambaran mengenai komposisi asam lemak secara keseluruhan. Bilangan penyabunan menunjukkan jumlah KOH yang diperlukan untuk menyabunkan satu gram biodiesel sehingga nilainya dipengaruhi oleh karakteristik asam lemak penyusun biodiesel. Bilangan penyabunan dapat digunakan untuk menggambarkan berat molekul rata-rata asam lemak dalam suatu sampel, di mana nilai yang lebih rendah menunjukkan berat molekul rata-rata yang lebih besar. Nilai bilangan penyabunan yang relatif rendah pada penelitian ini menunjukkan bahwa biodiesel memiliki komposisi asam lemak yang stabil dan sesuai untuk digunakan sebagai bahan bakar (32).

Penggunaan katalis basa yang berlebih dalam proses transesterifikasi dapat memicu reaksi penyabunan yang menghasilkan sabun sebagai produk samping. Bilangan penyabunan yang semakin rendah mengindikasikan kualitas biodiesel yang semakin baik karena rendahnya kemungkinan terjadinya reaksi penyabunan yang dapat menurunkan kualitas produk (33). Namun, dalam penelitian ini nilai bilangan penyabunan yang diperoleh masih berada dalam rentang yang wajar, sehingga tidak menunjukkan adanya pembentukan sabun yang signifikan selama proses transesterifikasi.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis terhadap berbagai parameter kualitas biodiesel, dapat disimpulkan bahwa biodiesel yang dihasilkan dari minyak kemiri memiliki kualitas yang baik dan memenuhi persyaratan mutu biodiesel. Hal ini ditunjukkan oleh terjadinya penurunan kadar asam lemak bebas (FFA) yang signifikan dari 10,05% menjadi kurang dari 1% setelah melalui proses esterifikasi dan

transesterifikasi. Selain itu, biodiesel yang dihasilkan memiliki kadar ester yang tinggi, yaitu mencapai 98,98%, yang menunjukkan tingkat konversi trigliserida menjadi metil ester berlangsung secara efektif.

Kualitas biodiesel juga didukung oleh kandungan gliserol total yang sangat rendah, yaitu sekitar 0,002%, sehingga menunjukkan proses pemisahan produk berlangsung dengan baik. Nilai densitas yang diperoleh sebesar 0,89 g/cm³ masih berada dalam rentang yang dipersyaratkan oleh SNI 7182:2015, sedangkan angka asam sebesar 0,43 mg KOH/g telah memenuhi batas maksimum yang ditetapkan, yaitu 0,50 mg KOH/g biodiesel. Selain itu, nilai bilangan penyabunan yang relatif stabil menunjukkan bahwa biodiesel memiliki karakteristik asam lemak yang baik dan tidak mengalami pembentukan sabun yang signifikan selama proses produksi.

Secara keseluruhan, proses esterifikasi–transesterifikasi yang diterapkan terbukti mampu menghasilkan biodiesel berkualitas tinggi dari minyak menir kemiri. Pemanfaatan minyak menir kemiri sebagai bahan baku biodiesel tidak hanya menghasilkan bahan bakar alternatif yang memenuhi standar mutu, tetapi juga memberikan nilai tambah pada limbah agroindustri yang selama ini kurang dimanfaatkan. Oleh karena itu, minyak menir kemiri memiliki potensi yang besar untuk dikembangkan sebagai sumber bahan baku biodiesel dalam mendukung penyediaan energi terbarukan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Daftar Pustaka

1. Ambat I, Srivastava V, Sillanpää M. Recent advancement in biodiesel production methodologies using various feedstock: A review. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2018;90(February 2017):356–69. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.069>
2. Lopresto CG, Paletta R, Scarpello A, Calabrò V. Biodiesel production from waste cooking oils – Application of green chemistry principles to the multi-objective optimisation of alkaline transesterification. *Chemosphere*. 2025;387(September 2024).
3. Pikula K, Zakharenko A, Stratidakis A, Razgonova M, Nosyrev A, Mezhuev Y, et al. The advances and limitations in biodiesel production: feedstocks, oil extraction methods, production, and environmental life cycle assessment. *Green Chem Lett Rev*. 2020;13(4):11–30.
4. Yuliyati YB, Rostika Noviyanti A, Rizal M, Nurjanah S. KARAKTERISASI BIODIESEL DARI MINYAK KEMIRI SUNAK DENGAN KATALIS HETEROGEN SILIKA TERIMPREGNASI KALSIMUM OKSIDA (CaO/SiO₂) (Characterization of Biodiesel Made from Kemiri Sunak Oil using Heterogeneous Silica Catalyst Impregnated by Calcium Oxide). *J Penelit Has Hutan*. 2020;38(1):1–68.
5. Shaah MA, Hossain MS, Allafi F, Ab Kadir MO, Ahmad MI. Biodiesel production from candlenut oil using a non-catalytic supercritical methanol transesterification process: optimization, kinetics, and thermodynamic studies. *RSC Adv*. 2022;12(16):9845–61.
6. Maulana AR, Setyoningrum TM. Pembuatan Biodiesel dari Ampas Kelapa dengan Metode Transesterifikasi In-Situ dan Katalis Kalsium Oksida. *Eksergi*. 2019;16(1):13.
7. Saeed AAH, Harun NY, Bilad MR, Afzal MT, Parvez AM, Roslan FAS, et al. Moisture content impact on properties of briquette produced from rice husk waste. *Sustain*. 2021;13(6).
8. Puangsang N, Chanakeawsomboon I, Chantrapromma S, Palamanit A. Production of biodiesel from low-grade crude palm oil using hydrochloric acid. *EnvironmentAsia*. 2021;14(1):23–32.
9. Haryono, Noviyanti AR, Kurnia I. Yield and Characteristics of Biodiesel from Variations in the Mass Ratio of Waste Cooking Oil Mixtures with Different Waste Sources through Homogeneous Rendemen dan Karakteristik Biodiesel dari Variasi Rasio Massa Campuran Limbah Minyak Goreng dengan Perb. *J Teknol Lingkung*. 2025;26(2):164–72.
10. Zahid I, Ayoub M, Abdullah B Bin, Nazir MH, Zulqarnain, Kaimkhani MA, et al. Activation of nano kaolin clay for bio-glycerol conversion to a valuable fuel additive. *Sustain*. 2021;13(5):1–17.
11. Karmakar B, Halder G. Progress and future of biodiesel synthesis: Advancements in oil extraction and conversion technologies. *Energy Convers Manag* [Internet]. 2019;182(December 2018):307–39. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.066>
12. Farouk SM, Tayeb AM, Osman RM, Abdel-Hamid SMS. Sustainable production of biodiesel from waste cooking oil using magnesium oxide nano catalyst: An optimization study. *Sci Rep* [Internet]. 2024;14(1):1–11. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71930-1>
13. Kimia JT, Malang PN, Soekarno J, No H. Biodiesel Sebagai Sumber Energi Terbarukan: Proses Dan Teknologi Terkini. *Distilat J Teknol Separasi*. 2020;6(2):445–50.
14. Hasan N, Ratnam MV. Biodiesel Production from Waste Animal Fat by Transesterification Using H₂SO₄ and KOH Catalysts: A Study of Physiochemical Properties. *Int J Chem Eng*. 2022;2022.
15. Mulyadi, Meidinariasty A, Taufik M. PEMBUATAN BIODIESEL DARI CPO OFF GRADE MENGGUNAKAN KATALIS KOH DENGAN METODE RADIASI GELOMBANG MIKRO *Jurnal Multidisipliner KAPALAMADA* | Vol 2 . No 3 September 2023 *Jurnal Multidisipliner Kapalamada Perkembangan teknologi dan industri mendorong penggunaan*. *J Multidisipliner Kapalamada*. 2023;2(3):150–60.

16. Redjeki S. S, Rochaeni H. Pembuatan Biodiesel Dari Asam Lemak Hasil Ekstraksi Maserasi Biji Alpukat (*Persea americana* Mill.) Dengan Katalis KOH dan H₂SO₄ dan Perbandingan Minyak Metanol. War Akab. 2021;43(2):1–8.
17. Oko S, Mustafa, Kurniawan A, Willain D. Sintesis Biodiesel dari Minyak Kedelai Melalui Reaksi Transesterifikasi Dengan Katalis CaO/NaOH. J Teknol Vol [Internet]. 2021;13(1):1–6. Available from: <https://dx.doi.org/10.24853/jurtek.13.1.1-6>
18. Melya S, Sulhatun S, Suryati S, Masrulita M, Bahri S. Proses Pembuatan Minyak Kemiri Hitam Dengan Metode Penyangraian (Roasting). Chem Eng J Storage. 2022;1(4):67–78.
19. Angga Aditya Permana MFR. G-Tech : Jurnal Teknologi Terapan. G-Tech J Teknol Terap [Internet]. 2024;8(1):186–95. Available from: <https://ejournal.uniramalang.ac.id/index.php/g-tech/article/view/1823/1229>
20. Wijaya AK AA, Yulianti NL, Putu Gunadnya IB. Karakteristik Briket Biomassa dari Variasi Bahan Baku dan Persentase Perekat yang Berbeda. J BETA (Biosistem dan Tek Pertanian). 2021;9(2):202.
21. Wijaya M, Wiharto M, Danial M. Pembuatan Arang Aktif dari Limbah Kemiri. Pengabdi [Internet]. 2020;1(2):30–5. Available from: <https://www.ojs.unm.ac.id/pengabdi/article/view/15765>
22. Ramadhani DR, Zamhari M, Junaidi R, Kimia JT, Kimia T, Politeknik I, et al. Optimalisasi Proses Transesterifikasi Minyak Jelantah Menjadi Biodiesel dengan Variasi Waktu dan Konsentrasi Katalis. Chem Eng J Storage [Internet]. 2025;5(4):665–81. Available from: <https://doi.org/10.29103/cejs.v5i4.23757>
23. El-Sheekh MM. Biodiesel from Microalgae: Advantages and Future Prospective. Egypt J Bot. 2021;61(3):669–71.
24. Budiastuti H, Hanifah NA, Mardiani DU, Haryadi H, Rusdianasari R, Fudholi A. Biodiesel Production from Rubber Seed Oil as An Alternative Energy Source – A Review. Curr J Int J Appl Technol Res. 2022;3(2):120–34.
25. Siregar E, Simatupang L, Sembiring JH, Ginting E. Production of Biodiesel from Candlenut Seed Oil (*Aleurites Moluccana* Wild) Using a NaOH/CaO/Ca Catalyst with Microwave Heating. J Kim Sains dan Apl. 2024;27(1):21–7.
26. Vasaki M, Sithan M, Ravindran G, Paramasivan B, Ekambaram G, Karri RR. Biodiesel production from lignocellulosic biomass using *Yarrowia lipolytica*. Energy Convers Manag X [Internet]. 2022;13(December 2021):100167. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100167>
27. El-sheekh M, Abomohra AE fatah. Roduction from. 2004;
28. Dutta K, Daveray A, Lin JG. Evolution retrospective for alternative fuels: First to fourth generation. Renew Energy [Internet]. 2014;69:114–22. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.044>
29. Farooq M, Ramli A. Biodiesel production from low FFA waste cooking oil using heterogeneous catalyst derived from chicken bones. Renew Energy [Internet]. 2015;76:362–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.042>
30. Imaduddin M, Samik S. Review: Synthesis of Biodiesel With Heterogen Catalyst From Mollusca Animal Shells. UNESA J Chem. 2023;12(1):12–9.
31. Okechukwu OD, Joseph E, Nonso UC, Kenechi NO. Improving heterogeneous catalysis for biodiesel production process. Clean Chem Eng [Internet]. 2022;3(April):100038. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100038>
32. Fatmawati. Identification of saponification number on Pertamina's Biodiesel Waste in Tarakan Fatmawati a a. 2021;3(1):54–8.
33. Arimami YS, Syahrir M, Putri SE. Pengaruh Waktu Reaksi Terhadap Karakteristik Biodiesel Menggunakan Katalis ZnO/SiO₂ Daun Nanas Effect of Reaction Time on Biodiesel Characteristics Using ZnO/SiO₂ Pineapple Leaf Catalyst. J Chem. 2024;25(2):104–14.