

# PRODUKSI BIODIESEL DARI MINYAK JELANTAH MENGGUNAKAN KATALIS KARBON-KALSIUM OKSIDA BERBASIS TEMPURUNG KELAPA SAWIT: KARAKTERISASI KATALIS DAN EVALUASI MUTU BIODIESEL

**Anggun Rahmawati, Nur Hidayati**

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta  
Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Pabelan Kartasura 57102 Telp 0271 717417  
Email: nur.hidayati@ums.ac.id

## Abstrak

*Minyak jelantah (waste cooking oil, WCO) berpotensi sebagai bahan baku biodiesel, tetapi memerlukan katalis heterogen yang efisien dan berbiaya rendah. Penelitian ini mengembangkan katalis karbon–kalsium oksida (karbon–CaO) berbasis tempurung kelapa sawit untuk produksi biodiesel dari WCO serta mengkaji pengaruh variasi massa katalis terhadap hasil dan mutu biodiesel. Komposisi asam lemak WCO dianalisis dengan GC–MS dan digunakan untuk menghitung massa molekul rata-rata (301,97 g/mol) sebagai dasar penentuan rasio molar minyak:metanol. Katalis karbon–CaO disintesis dengan kadar CaO 10% dan dikarakterisasi menggunakan BET, XRD, dan FTIR. Reaksi transesterifikasi dilakukan pada rasio minyak:metanol 1:6, suhu 60°C, waktu 2 jam, dan variasi massa katalis 3, 5, dan 7 g. Kondisi optimum diperoleh pada katalis 10% CaO dengan massa 5 g, menghasilkan yield biodiesel 88,74%. Sifat fisis-kimis biodiesel memenuhi SNI 7182:2015 dan berada dalam kisaran standar internasional, sehingga sistem WCO–karbon–CaO ini berpotensi sebagai teknologi biodiesel yang berkelanjutan.*

**Kata kunci:** biodiesel; katalis padat; carbon-CaO; minyak jelantah

## Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan energi global akibat pertumbuhan penduduk dan urbanisasi masih didominasi oleh bahan bakar fosil, yang terkait dengan emisi gas rumah kaca, pencemaran udara, dan keterbatasan cadangan sumber daya tak terbarukan (Awogbemi et al., 2021; Komarnicka & Murawska, 2021). Pembakaran bahan bakar fosil menyumbang porsi utama emisi gas rumah kaca dan mempercepat perubahan iklim serta penurunan kualitas udara (Al-Moftah et al., 2021; Chen et al., 2021; Manisalidis et al., 2020). Dalam konteks ini, biodiesel dipandang sebagai bahan bakar alternatif terbarukan yang mudah terurai dan memiliki karakter pembakaran lebih bersih dibandingkan solar konvensional (Bhutto et al., 2023; Ghazaly & Hofny, 2022). Penggunaan bahan baku berkelanjutan seperti minyak non-pangan dan limbah minyak juga mengurangi kompetisi dengan kebutuhan pangan serta mendukung keberlanjutan lingkungan (Koniczna et al., 2021; Nyorere et al., 2024; Rustamov et al., 2023).

Minyak jelantah (*waste cooking oil*, WCO) merupakan salah satu bahan baku menjanjikan untuk biodiesel karena ketersediaannya melimpah dan berbiaya rendah, terutama di negara dengan sektor kuliner dan pedagang kaki lima yang besar (Asare et al., 2022; Mulyatun et al., 2023; Yusuf et al., 2023). Penggunaan berulang minyak goreng dapat menghasilkan senyawa degradasi yang bersifat toksik dan pro-inflamasi, sehingga menimbulkan risiko kesehatan (Jalaluddin et al., 2024; Patel et al., 2023; Siang et al., 2024). Pembuangan minyak jelantah secara tidak terkontrol juga menyebabkan penyumbatan saluran dan pencemaran badan air, serta membuka peluang praktik daur ulang ilegal sebagai minyak goreng (Aisah et al., 2023; Aljarmouzi & Dong, 2022; Solangi et al., 2022). Tantangan utama pemanfaatan WCO adalah kandungan asam lemak bebas (*free fatty acid*, FFA) dan air yang tinggi, yang memicu penyabunan pada transesterifikasi dan menurunkan *yield* biodiesel, khususnya bila digunakan katalis basa homogen (Javed et al., 2022; Lin et al., 2023; Maniam et al., 2023; Maroa & Inambao, 2021).

Biodiesel umumnya diproduksi melalui reaksi transesterifikasi antara trigliserida dan alkohol (misalnya metanol) untuk menghasilkan metil ester asam lemak (*fatty acid methyl esters*, FAME) dan gliserol sebagai produk samping (Das et al., 2023; Erchamo et al., 2021). Efisiensi reaksi sangat dipengaruhi katalis, yang secara umum dibedakan menjadi homogen dan heterogen. Katalis basa homogen seperti NaOH dan KOH memiliki aktivitas tinggi tetapi menimbulkan persoalan pemisahan, korosi peralatan, dan pembentukan limbah cair (R. A. Alsaiari et al., 2023;

Ruatpuia et al., 2022). Sebaliknya, katalis heterogen lebih mudah dipisahkan dan berpotensi digunakan ulang sehingga mengurangi dampak lingkungan dan biaya operasi, meskipun kadang menghadapi keterbatasan aktivitas dan stabilitas (Chooi et al., 2021).

Kalsium oksida (CaO) merupakan katalis basa heterogen yang banyak diteliti untuk sintesis biodiesel karena memiliki situs basa kuat, biaya relatif rendah, dan ketersediaan melimpah (Helwani et al., 2020; Kesić et al., 2016). CaO dapat diperoleh dari sumber alam maupun limbah seperti batu kapur, cangkang telur, cangkang moluska, dan limbah industri (Hamid et al., 2023; Mohammed et al., 2023). Namun, CaO memiliki luas permukaan rendah, berpotensi mengalami pelindian selama reaksi, serta mudah terkarbonasi dan terhidrasi ketika terpapar CO<sub>2</sub> dan uap air, yang menurunkan aktivitasnya pada siklus pemakaian berulang (Praikaew et al., 2021; Sulaiman et al., 2020). Penggunaan bahan pendukung (support) berluas permukaan tinggi diperlukan untuk meningkatkan dispersi dan stabilitas CaO.

Karbon aktif merupakan pendukung yang prospektif karena memiliki luas permukaan dan porositas tinggi, stabilitas termal baik, dan sifat permukaan yang dapat direkayasa untuk mengoptimalkan interaksi dengan fase aktif katalis (Alemán-Ramirez et al., 2023; Olagunju et al., 2022). Pengimpregnasian CaO pada karbon aktif dapat mengatasi keterbatasan CaO murni, meningkatkan jumlah situs basa yang terekspos, dan memperbaiki kinerja serta reusabilitas katalis (Nurcahyani & Sumari, 2024; Sulaiman et al., 2021). Pemilihan biomassa limbah sebagai prekursor karbon aktif semakin memperkuat konsep produksi biodiesel berbasis limbah. Tempurung kelapa sawit, sebagai limbah lignoselulosa yang melimpah di negara penghasil minyak sawit, merupakan prekursor karbon aktif yang terbarukan, berbiaya rendah, dan membantu mengurangi penumpukan limbah padat (Helwani et al., 2023; Meldha et al., 2023; Shakir et al., 2024). Karbon aktif tempurung kelapa sawit umumnya memiliki porositas dan luas permukaan yang sesuai untuk aplikasi katalis, sehingga cocok sebagai pendukung CaO (Narowska et al., 2019; Shakir et al., 2024). Pengembangan katalis karbon–CaO melalui impregnasi CaO pada karbon tempurung kelapa sawit diharapkan menggabungkan aktivitas basa CaO dan karakteristik tekstural karbon serta mendukung konversi limbah menjadi produk bernilai tambah (Hazmi et al., 2020; Sun et al., 2023; Weldehlase et al., 2023).

Berbagai penelitian telah mengevaluasi pemanfaatan CaO dan katalis berbasis CaO untuk biodiesel dari minyak jelantah maupun minyak nabati lain. Garg et al. (2025) melaporkan nanokatalis CaO hijau dengan yield biodiesel tinggi, sedangkan Hamid et al. (2023) dan Alsaiani et al. (2023) menegaskan kelayakan ekonomi CaO dari batu kapur dan cangkang telur. Namun, banyak studi masih berfokus pada katalis basa homogen (R. A. Alsaiani et al., 2023; Ruatpuia et al., 2022), sedangkan riset katalis CaO yang didukung karbon, khususnya berbasis karbon aktif tempurung kelapa sawit untuk transesterifikasi WCO, masih terbatas (Shakir et al., 2024). Selain itu, studi yang secara terpadu mengombinasikan WCO, katalis karbon–CaO berbasis tempurung kelapa sawit, karakterisasi katalis komprehensif (BET, XRD, FTIR), dan evaluasi mutu biodiesel terhadap SNI 7182:2015 juga masih jarang (Hazmi et al., 2020).

Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi katalis karbon–kalsium oksida yang disintesis dari tempurung kelapa sawit untuk produksi biodiesel dari minyak jelantah. Secara khusus, tujuan penelitian adalah: (1) menyiapkan katalis karbon–CaO dari tempurung kelapa sawit dengan variasi kadar CaO, (2) mengkarakterisasi sifat fisikokimia katalis menggunakan BET, XRD, dan FTIR, (3) mengkaji pengaruh kadar CaO dan massa katalis terhadap yield biodiesel pada reaksi transesterifikasi WCO dengan metanol, dan (4) mengevaluasi sifat bahan bakar biodiesel—massa jenis, viskositas kinematik, titik nyala, titik kabut, dan angka asam—serta membandingkannya dengan SNI 7182:2015 (Widayat et al., 2024). Kebaruan utama penelitian ini adalah integrasi pemanfaatan dua limbah, yaitu WCO dan tempurung kelapa sawit, dalam sistem katalis heterogen karbon–CaO berbiaya rendah yang dikarakterisasi secara menyeluruh dan dievaluasi kesesuaiannya dengan standar bahan bakar nasional

## Metodologi

### Bahan

Bahan utama penelitian adalah minyak jelantah sebagai bahan baku biodiesel dan karbon aktif tempurung kelapa sawit (ukuran 80–100 mesh) sebagai pendukung katalis. Minyak jelantah diperoleh dari limbah rumah tangga, sedangkan karbon aktif diproduksi oleh Acqua Solutions. Bahan kimia yang digunakan meliputi metanol (CH<sub>3</sub>OH) sebagai alkohol, kalsium oksida (CaO) sebagai prekursor fase basa aktif, kalium hidroksida (KOH) sebagai aktivator karbon, natrium hidroksida (NaOH) untuk titrasi, natrium sulfat anhidrat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) sebagai pengering biodiesel, asam klorida (HCl) untuk penyesuaian pH, aquades sebagai pelarut, etanol teknis untuk titrasi, serta indikator fenolftalein (PP). Semua bahan kimia diproduksi oleh Merck.

### Prosedur Eksperimental

#### Pemurnian Minyak Jelantah

Minyak jelantah disaring untuk menghilangkan kotoran padat, kemudian dicampur dengan air dan dipanaskan sambil diaduk hingga volume air berkurang sekitar setengah. Campuran dimasukkan ke corong pisah, didiamkan hingga terbentuk dua fase, dan fase minyak dipisahkan. Minyak kemudian disaring kembali dan digunakan sebagai bahan baku transesterifikasi.

### Aktivasi Karbon Tempurung Kelapa Sawit

Karbon tempurung kelapa sawit digiling, diayak hingga berukuran 80–100 mesh, kemudian 100 g karbon dicampur dengan 200 mL larutan KOH (125 g KOH dalam 250 mL aquades). Campuran diaduk hingga homogen dan diinkubasi semalaman pada suhu ruang. pH campuran disesuaikan mendekati netral dengan HCl encer, lalu didiamkan hingga terbentuk dua fase. Fase cair dibuang, sedangkan padatan dikeringkan pada 105°C selama 24 jam untuk memperoleh karbon teraktivasi.

### Sintesis Katalis Karbon–CaO

Karbon teraktivasi sebanyak 10 g dicampur dengan suspensi CaO dalam aquades dengan variasi kadar CaO 10% massa. Campuran diaduk menggunakan magnetic stirrer selama 5 jam pada pH sekitar 10. Padatan dipisahkan melalui penyaringan, dicuci dengan aquades hingga filtrat netral, dikeringkan pada 80°C selama 24 jam, kemudian dikalsinasi pada 700 °C selama 2 jam. Katalis didinginkan hingga suhu ruang dan disimpan dalam wadah tertutup.

### Reaksi Transesterifikasi Minyak Jelantah

Transesterifikasi dilakukan pada rasio molar minyak jelantah:metanol 1:6 dengan katalis karbon–CaO sebagai katalis basa heterogen. Kadar CaO dalam katalis sebanyak 10%, sedangkan massa katalis 3, 5, dan 7 g. Katalis dicampur dengan 80,3 mL metanol dan direfluks pada 60°C sambil diaduk. Minyak jelantah 100 mL yang telah dipanaskan hingga ±60°C ditambahkan ke dalam labu reaksi. Reaksi dijalankan pada 60°C selama 2 jam dengan pengadukan kontinu. Setelah reaksi, campuran didinginkan, disaring untuk memisahkan katalis, dan fase cair didiamkan dalam corong pisah hingga terbentuk lapisan biodiesel dan gliserol. Lapisan biodiesel dipisahkan dan volumenya diukur untuk menghitung *yield*.

### Pencucian dan Pengeringan Biodiesel

Biodiesel dicuci dengan aquades hangat (±50°C) pada perbandingan 1:1 (v/v), diaduk perlahan, lalu didiamkan hingga fase air terpisah. Proses diulangi hingga air pencuci tampak jernih. Untuk menurunkan kadar air, biodiesel dicampur dengan natrium sulfat anhidrat, diaduk 15–30 menit, kemudian disaring untuk memisahkan endapan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> terhidrasi.

### Karakterisasi Katalis

Analisis BET dilakukan menggunakan instrumen adsorpsi nitrogen Quantachrome (perangkat lunak TouchWin v1.22). Isoterm adsorpsi–desorpsi N<sub>2</sub> diukur pada suhu 77 K (temperatur nitrogen cair). Sebelum pengukuran, sampel dikeringkan dan didegassing di bawah vakum pada 200°C selama 2 jam. Luas permukaan spesifik dihitung dengan metode BET, sedangkan distribusi ukuran pori ditentukan dengan metode BJH (Barrett–Joyner–Halenda) berdasarkan cabang desorpsi isoterm.

Analisis XRD dilakukan pada suhu ruang menggunakan difraktometer Shimadzu XRD-7000 dengan radiasi Cu K $\alpha$  dan monokromator grafit, dioperasikan pada 40 kV dan 30 mA. Pola difraksi direkam pada rentang 2 $\theta$  10–90° dengan laju pindai 2°/menit untuk mengidentifikasi fase kristal CaO, CaCO<sub>3</sub>, dan Ca(OH)<sub>2</sub>.

Analisis FTIR dilakukan menggunakan spektrofotometer PerkinElmer Spectrum IR (versi 10.6.1) dengan mode ATR pada kondisi lingkungan. Spektra dicatat pada rentang bilangan gelombang 400–4000 cm<sup>-1</sup> untuk mengidentifikasi gugus fungsi utama pada permukaan katalis, khususnya pita O–H, C–H, karbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), dan ikatan Ca–O.

### Pengujian Sifat Fisik dan Kimia Biodiesel

Biodiesel pada kondisi optimum diuji massa jenis, viskositas kinematik, titik nyala, titik kabut, dan bilangan asam. Massa jenis diukur dengan piknometer, viskositas kinematik dengan viskometer sesuai prosedur standar, bilangan asam melalui titrasi larutan KOH standar terhadap sampel biodiesel dalam etanol dengan indikator fenolftalein. Titik nyala dan titik kabut diukur mengikuti metode uji yang diacu pada SNI 7182:2015, dan hasilnya dibandingkan dengan batas mutu yang dipersyaratkan.

### Hasil dan Pembahasan

#### Komposisi Asam Lemak Minyak Jelantah

Komposisi asam lemak WCO merupakan parameter kunci yang menentukan kelayakannya sebagai bahan baku biodiesel karena memengaruhi rendemen, sifat alir dingin, dan stabilitas oksidatif (Azman et al., 2021; Etim et al., 2020). WCO umumnya tersusun atas palmitat (C16:0), oleat (C18:1), dan linoleat (C18:2), dengan komposisi bergantung pada jenis minyak awal dan kondisi penggorengan (Azman et al., 2021; Ulfah et al., 2024). Rahmayanti et al. (2023) dan Siregar et al. (2024) melaporkan dominasi palmitat dan oleat dalam biodiesel berbasis minyak goreng bekas dan minyak biji kemiri.

Komposisi asam lemak WCO pada penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1. Hasil GC–MS menunjukkan dominasi asam lemak jenuh C16 dan C18 (hexadecanoic acid/C16:0 dan octadecanoic acid/C18:0) serta asam lemak tak jenuh 9-octadecenoic acid (C18:1) dan 9-hexadecenoic acid (C16:1). Pola ini sejalan dengan laporan Rahmayanti et al. (2023), Siregar et al. (2024), dan Azman et al. (2021), di mana asam lemak C16–C18 menjadi komponen utama WCO. Dominasi asam lemak jenuh berkontribusi terhadap peningkatan cetane number dan stabilitas oksidatif, sedangkan kandungan asam lemak tak jenuh moderat membantu menjaga sifat alir (Etim et al., 2020).

Tabel 1. Komposisi asam lemak pada bahan baku minyak jelantah

Asam Lemak	%Wt
Hexadecanoic	24,44
9 – Hexadecenoic	0,76
Octadecanoic	18,10
9 – Octadecenoic	30,04

Data pada Tabel 1 digunakan untuk menghitung massa molekul rata-rata minyak jelantah sebagai dasar perancangan proses. Massa molekul rata-rata WCO dihitung dari fraksi masing-masing asam lemak (berdasarkan area puncak GC–MS) dikalikan massa molekul trigliserida bersesuaian, kemudian dijumlahkan. Nilai yang diperoleh adalah 301,97 g/mol, yang digunakan untuk menentukan kebutuhan stoikiometrik metanol dan rasio molar minyak:metanol, sehingga perancangan proses lebih akurat dibandingkan asumsi satu jenis trigliserida. Penetapan profil asam lemak dan massa molekul rata-rata ini menjadi landasan untuk menganalisis hubungan antara struktur kimia WCO, kinerja katalis karbon–CaO, dan mutu biodiesel terhadap SNI 7182:2015 (Etim et al., 2020; Ulfah et al., 2024).

#### Karakteristik Tekstural Katalis

Hasil analisis BET pada katalis karbon–CaO disajikan pada Tabel 2. Pada kadar CaO 10%, luas permukaan spesifik sekitar 22,8 m<sup>2</sup>/g dengan kontribusi mikropori yang nyata. Peningkatan kadar CaO hingga 20% dan 30% menurunkan luas permukaan terukur dan mengindikasikan penutupan sebagian pori karbon oleh fase CaO. Pola ini konsisten dengan kecenderungan katalis berbasis CaO, di mana peningkatan muatan fase aktif sering disertai penurunan luas permukaan akibat aglomerasi partikel dan penyumbatan pori (Chooi et al., 2021; Malek et al., 2021). Secara umum, luas permukaan CaO murni dilaporkan 8,41–76 m<sup>2</sup>/g, bergantung metode sintesis dan perlakuan termal (E. M. M. and N. A. A. E. M. M. and N. A. A. Alsaiani, 2025; Malek et al., 2021), sedangkan katalis CaO/karbon dapat mencapai luas permukaan >100 m<sup>2</sup>/g karena sifat berpori penyangga karbon (Appiah et al., 2023; Chooi et al., 2021).

Tabel 2. Hasil analisis BET pada sampel katalis karbon–kalsium oksida

Parameter	Nilai
BET Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	22,841
Micropore Volume (cm <sup>3</sup> /g)	0,0044
Micropore Area (m <sup>2</sup> /g)	9,791

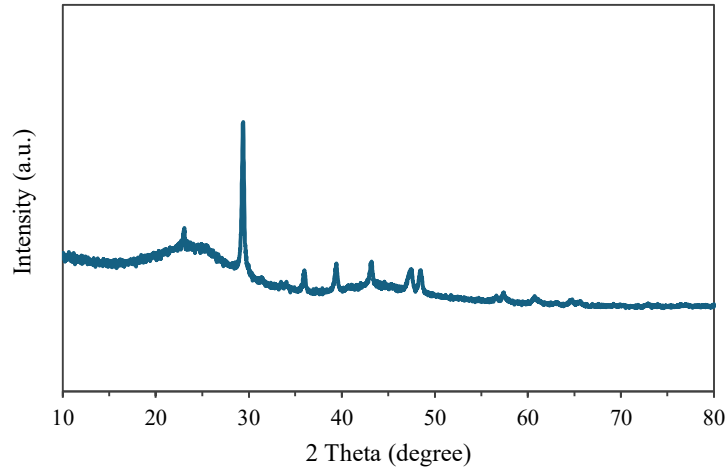
Meskipun luas permukaan katalis dalam penelitian ini tidak setinggi beberapa sistem CaO/karbon lain, keberadaan mikro dan mesoporositas tetap mendukung difusi reaktan dan perpindahan massa selama reaksi (Appiah et al., 2023). Hal ini tercermin dari yield biodiesel tertinggi pada kadar CaO 10%, ketika keseimbangan antara luas permukaan dan jumlah situs basa masih terjaga. Pada kadar CaO yang lebih tinggi, penutupan pori dan aglomerasi partikel meningkatkan hambatan difusi dan menurunkan efektivitas kontak antara minyak, metanol, dan katalis, meskipun jumlah situs basa nominal meningkat. Dengan demikian, data BET pada Tabel 2 mendukung adanya kondisi optimum kadar CaO, di mana tekstur pori dan situs basa berkontribusi sinergis terhadap kinerja katalitik.

#### Struktur Kristal Katalis

Pola XRD katalis karbon–CaO CaO ditunjukkan pada Gambar 1. Difraksi katalis menampilkan latar amorf khas karbon dengan puncak CaO yang relatif lemah. Puncak tambahan yang muncul dikaitkan dengan fase Ca(OH)<sub>2</sub> dan CaCO<sub>3</sub>, yang terbentuk akibat hidrasi dan karbonasi CaO selama paparan terhadap CO<sub>2</sub> dan uap air atmosfer (González et al., 2021; Sulaiman et al., 2020).

Transformasi parsial CaO menjadi CaCO<sub>3</sub> dan Ca(OH)<sub>2</sub> menurunkan jumlah situs basa kuat O<sup>2-</sup> yang berperan utama dalam transesterifikasi (Erchamo et al., 2021; Sulaiman et al., 2020). Namun, pola XRD masih menunjukkan puncak CaO yang dominan, sehingga pada siklus pemakaian pertama katalis masih mampu memberikan *yield* tinggi.

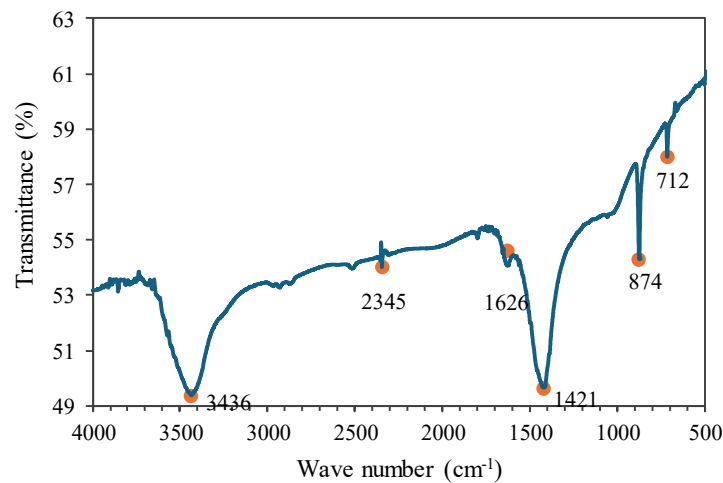
Kristalinitas CaO yang meningkat umumnya berkorelasi dengan penguatan sifat basa, tetapi dapat menurunkan luas permukaan efektif akibat aglomerasi kristalit (Malek et al., 2021; Pérez-Miqueo et al., 2021). Oleh karena itu, pengendalian kondisi sintesis dan penyimpanan katalis untuk meminimalkan hidrasi dan karbonasi, serta menjaga dispersi CaO pada penyangga karbon, penting untuk mempertahankan kinerja katalis karbon–CaO dalam jangka panjang (Chooi et al., 2021; Zhong et al., 2021).



Gambar 1. Pola XRD katalis karbon – CaO

#### Karakterisasi Gugus Fungsi Katalis

Spektra FTIR katalis karbon–CaO ditunjukkan pada Gambar 2. Pita lebar di sekitar  $3430\text{ cm}^{-1}$  dikaitkan dengan regangan O–H dari gugus hidroksil dan air teradsorpsi, sedangkan pita pada  $2870\text{--}2980\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan regangan C–H alifatik dari kerangka karbon. Pita kuat di sekitar  $1420$  dan  $873\text{ cm}^{-1}$  merupakan vibrasi gugus karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), sementara pita di daerah  $660\text{--}710\text{ cm}^{-1}$  berkaitan dengan vibrasi ikatan Ca–O pada fase CaO dan turunannya.



Gambar 2. Pola FTIR katalis karbon–CaO

Peningkatan intensitas pita karbonat dan hidroksida pada kadar CaO lebih tinggi mengindikasikan hidrasi dan karbonasi CaO menjadi  $\text{CaCO}_3$  dan  $\text{Ca(OH)}_2$  (González et al., 2021; Sulaiman et al., 2020). Transformasi ini menurunkan jumlah situs basa kuat di permukaan dan berpotensi mengurangi aktivitas katalitik, terutama pada pemakaian berulang (Erchamo et al., 2021). Namun, pada pemakaian pertama, keberadaan pita CaO yang masih jelas mendukung hasil XRD bahwa fase basa aktif masih cukup untuk mencapai yield biodiesel tinggi. Pengendalian sintesis dan penyimpanan untuk membatasi karbonasi dan hidrasi penting untuk menjaga stabilitas sifat basa CaO (Pérez-Miqueo et al., 2021; Zhong et al., 2021).

### Pengaruh Massa Katalis terhadap Yield Biodiesel

Pengaruh variasi massa katalis karbon–CaO terhadap yield biodiesel ditampilkan pada Tabel 3. *Yield* tertinggi (88,74%) diperoleh pada katalis dengan massa 5 g, pada rasio molar minyak:metanol 1:6, suhu 60°C, dan waktu reaksi 2 jam. Pada massa 3 g, yield lebih rendah karena jumlah situs basa belum mencukupi untuk konversi trigliserida optimum, sedangkan pada 7 g terjadi penurunan yield yang dikaitkan dengan peningkatan viskositas campuran, aglomerasi partikel, dan hambatan perpindahan massa antara fase minyak, metanol, dan katalis (Su et al., 2020).

Tabel 3. Yield biodiesel minyak jelantah dengan katalis karbon–kalsium oksida

Massa Katalis (g)	% Yield
3	87,31
5	88,74
7	80,88

Tren ini sejalan dengan kajian biodiesel WCO yang melaporkan batas optimum loading katalis dalam kisaran 1–10% (b/b); di atas nilai ini, penambahan katalis tidak lagi meningkatkan yield secara signifikan dan bahkan menurunkan kinerja akibat interaksi sterik dan pembentukan emulsi (Lü et al., 2020; Su et al., 2020). Sebagai pembandingan, Mutalib et al. (2020) melaporkan FAME yield 93,8% menggunakan katalis abu bagas tebu kaya SiO<sub>2</sub> dengan muatan CaO 40%, pada rasio metanol:minyak 20:1, suhu 65 °C, katalis 6% (b/b), dan waktu 3 jam. Dibandingkan kondisi tersebut, yield 88,74% dalam penelitian ini dicapai pada rasio metanol lebih rendah serta suhu dan waktu lebih moderat, sehingga menunjukkan bahwa katalis karbon–CaO berbasis tempurung kelapa sawit memiliki kinerja kompetitif untuk biodiesel WCO.

Secara umum, interaksi antara kadar CaO, massa katalis, dan kondisi operasi (rasio metanol:minyak, suhu, waktu) menentukan kinerja transesterifikasi (Lü et al., 2020). Hasil pada Tabel 3 menegaskan pentingnya optimasi parameter untuk menyeimbangkan jumlah situs basa aktif dengan sifat alir dan perpindahan massa pada sistem tiga fase minyak–metanol–katalis heterogen.

### Karakteristik Biodiesel dan Kesesuaiannya dengan Standar Mutu

Karakteristik biodiesel pada kondisi optimum dirangkum pada Tabel 4, meliputi massa jenis, viskositas kinematik, titik nyala, titik kabut, dan bilangan asam. Massa jenis biodiesel sebesar 0,88 g/cm<sup>3</sup> (880 kg/m<sup>3</sup>) berada dalam rentang tipikal biodiesel WCO (860–900 kg/m<sup>3</sup>) dan memenuhi SNI 7182:2015 serta standar EN 14214 dan ASTM D6751. Viskositas kinematik 4,1 mm<sup>2</sup>/s pada 40°C juga berada dalam kisaran 4,0–5,0 mm<sup>2</sup>/s yang lazim untuk biodiesel WCO, sehingga mendukung atomisasi dan pembakaran di mesin diesel.

Titik nyala biodiesel 138°C melampaui batas minimum 100°C SNI 7182:2015, menunjukkan tingkat keamanan tinggi saat penyimpanan dan penanganan. Titik kabut 15°C sedikit lebih tinggi dibandingkan kisaran cloud point biodiesel WCO yang umumnya –4 hingga 8°C, namun masih memenuhi batas SNI (≤18°C). Nilai ini mencerminkan pengaruh dominasi asam lemak jenuh C16–C18 yang meningkatkan titik kabut, sehingga biodiesel lebih sesuai untuk iklim tropis hingga sedang dan memerlukan perhatian pada operasi suhu rendah.

Tabel 4. Hasil pengujian biodiesel minyak jelantah katalis karbon–kalsium oksida

Parameter Uji	Persyaratan	Hasil	Satuan
Massa jenis pada 40 °C	0,85–0,89	0,88	g/cm <sup>3</sup>
Viskositas kinematik pada 40 °C	2,3–6,0	4,1	mm <sup>2</sup> /s
Titik nyala (flash point)	Min. 100	138	°C
Titik kabut (cloud point)	Maks. 18	15	°C
Angka asam	<0,8	0,73	mg-KOH/g

Bilangan asam 0,73 mg KOH/g berada dalam rentang 0,5–2,0 mg KOH/g yang umum dilaporkan untuk biodiesel WCO dan memenuhi batas SNI 7182:2015 maupun standar internasional. Nilai ini menunjukkan kandungan asam lemak bebas yang rendah, sehingga risiko korosi dan pembentukan deposit pada sistem bahan bakar berkurang. Secara keseluruhan, data Tabel 4 menunjukkan bahwa biodiesel hasil transesterifikasi WCO dengan katalis karbon–

CaO berbasis tempurung kelapa sawit tidak hanya memiliki yield tinggi, tetapi juga memenuhi standar mutu nasional dan internasional, sehingga layak dipertimbangkan sebagai bahan bakar alternatif berkelanjutan.

### Kesimpulan

Minyak jelantah dengan dominasi asam lemak C16–C18 memiliki massa molekul rata-rata sekitar 301,97 g/mol, yang digunakan untuk merancang rasio molar minyak:metanol pada transesterifikasi. Katalis heterogen karbon–CaO berbasis tempurung kelapa sawit berhasil disintesis dan dikarakterisasi; hasil BET, XRD, dan FTIR mengonfirmasi keberadaan fase CaO aktif yang terdispersi pada penyangga karbon serta adanya hidrasi dan karbonasi parsial. Katalis kemudian digunakan untuk mengkaji pengaruh variasi massa katalis dalam pembuatan biodiesel dari WCO, dengan kondisi optimum pada 5 g katalis (10% CaO), rasio minyak:metanol 1:6, suhu 60 °C, dan waktu 2 jam, menghasilkan yield 88,74%. Sifat fisis-kimis biodiesel yang dihasilkan memenuhi SNI 7182:2015 dan berada dalam kisaran standar internasional, sehingga biodiesel WCO berbasis katalis karbon–CaO ini berpotensi diaplikasikan sebagai bahan bakar alternatif yang berkelanjutan.

### Daftar Pustaka

- Aisah, F. N., Anggraini, N., Sa'diah, T. A., & Puspitasari, D. (2023). Pelatihan Pengolahan Limbah Minyak Jelantah Menjadi Lilin Aromaterapi Sebagai Produk Bernilai Ekonomi Tinggi Di RW XI Kelurahan Semolowaru. *Abdimas Terapan Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Terapan*, 1(2), 114–121. <https://doi.org/10.59061/abdimasterapan.v1i2.583>
- Al-Moftah, A. M. S. H., Marsh, R., & Steer, J. (2021). Thermal Decomposition Kinetic Study of Non-Recyclable Paper and Plastic Waste by Thermogravimetric Analysis. *Chemengineering*, 5(3), 54. <https://doi.org/10.3390/chemengineering5030054>
- Alemán–Ramirez, J. L., Reyes–Vallejo, O., Okoye, P. U., Sánchez–Albores, R. M., Maldonado–Álvarez, A., & Sebastián, P. J. (2023). Crystal Phase Evolution of High Temperature Annealed  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -CaO Catalysts for Biodiesel Production. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 17(4), 843–858. <https://doi.org/10.1002/bbb.2478>
- Aljarmouzi, A., & Dong, R. (2022). Sustainable Asphalt Rejuvenation by Using Waste Tire Rubber Mixed With Waste Oils. *Sustainability*, 14(14), 8246. <https://doi.org/10.3390/su14148246>
- Alsaiari, E. M. M. and N. A. A. E. M. M. and N. A. (2025). Synthesis of Biodiesel From Waste Cooking Oil by Using Seashells as Catalyst. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 47(4), 335–335. <https://doi.org/10.52568/001679/jcsp/47.04.2025>
- Alsaiari, R. A., Musa, E. M., & Rizk, M. C. (2023). Effects of Calcination Temperature of Eggshell-Derived CaO as a Catalyst for Biodiesel Production From Waste Cooking Oil. *South African Journal of Chemistry*, 77, 30–35. <https://doi.org/10.17159/0379-4350/2023/v77a05>
- Appiah, F. A., Nugloze, D., Sai-Obodai, L. S., Natewong, P., & Idem, R. (2023). Activated Carbon Produced From the Hydrothermal Treatment of Glucose With KOH Activation for Catalytic Absorption of CO<sub>2</sub> in a BEA-AMP Bi-Solvent Blend. *Acs Omega*, 8(10), 9346–9355. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07758>
- Asare, M. A., Souza, F. M. d., & Gupta, R. K. (2022). Waste to Resource: Synthesis of Polyurethanes From Waste Cooking Oil. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(50), 18400–18411. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c03718>
- Awogbemi, O., Kallon, D. V. V., Onuh, E. I., & Aigbodion, V. S. (2021). An Overview of the Classification, Production and Utilization of Biofuels for Internal Combustion Engine Applications. *Energies*, 14(18), 5687. <https://doi.org/10.3390/en14185687>
- Azman, N. S., Marliza, T. S., Asikin-Mijan, N., Hin, T. Y. Y., & Khairuddin, N. (2021). Production of Biodiesel From Waste Cooking Oil via Deoxygenation Using Ni-Mo/Ac Catalyst. *Processes*, 9(5), 750. <https://doi.org/10.3390/pr9050750>
- Bhutto, A. R., Hussain, T., Kumar, L., Bhangwar, S., & Shah, A. H. (2023). Comparative Investigation of Performance Analysis & Carbon Emission of Biodiesel and Conventional Fuel. *Journal of Applied Engineering & Technology (Jaet)*, 7(2), 55–69. <https://doi.org/10.55447/jaet.07.02.118>
- Chen, Y., Nie, X., Ye, J., Wang, Y., Chen, J., & Xu, J. (2021). Biodiesel From Microorganisms: A Review. *Energy Technology*, 9(10). <https://doi.org/10.1002/ente.202001053>
- Chooi, C. Y., Sim, J. H., Tee, S. F., & Lee, Z. H. (2021). Waste-Derived Green Nanocatalyst for Biodiesel Production: Kinetic-Mechanism Deduction and Optimization Studies. *Sustainability*, 13(11), 5849. <https://doi.org/10.3390/su13115849>

- Das, S., Anãl, J. M. H., Kalita, P., Saikia, L., & Rokhum, S. L. (2023). Process Optimization of Biodiesel Production Using Waste Snail Shell as a Highly Active Nanocatalyst. *International Journal of Energy Research*, 2023, 1–26. <https://doi.org/10.1155/2023/6676844>
- Erchamo, Y. S., Mamo, T. T., Workneh, G. A., & Mekonnen, Y. S. (2021). Improved Biodiesel Production From Waste Cooking Oil With Mixed Methanol–ethanol Using Enhanced Eggshell-Derived CaO Nano-Catalyst. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86062-z>
- Etim, A. O., Musonge, P., & Eloka-Eboka, A. C. (2020). Effectiveness of Biogenic Waste-derived Heterogeneous Catalysts and Feedstock Hybridization Techniques in Biodiesel Production. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 14(3), 620–649. <https://doi.org/10.1002/bbb.2094>
- Ghazaly, N. M., & Hofny, M. S. (2022). Injection and Combustion of Biodiesel at Different Blends: A Review. *Svu-International Journal of Engineering Sciences and Applications*, 3(2), 37–46. <https://doi.org/10.21608/svusrc.2022.130956.1043>
- González, J., Chen, L., Campuzano-Calderon, O., Núñez-Correa, S., López-Guajardo, E. A., Wang, J. A., & Montesinos-Castellanos, A. (2021). Modified Natural Dolomite and Its Influence on the Production of Glycerol Carbonate: Effects of Structural and Basicity Properties. *Materials*, 14(9), 2358. <https://doi.org/10.3390/ma14092358>
- Hamid, A., Jakfar, A., Romaniyah, S. B., Febriana, I. D., Abdullah, M. F. L., Rahmawati, Z., & Prasetyoko, D. (2023). Transesterification of Waste Cooking Oil Using CaO Catalyst Derived From Madura Limestone for Biodiesel Production and Its Application in Diesel Engine. *Automotive Experiences*, 6(1), 80–93. <https://doi.org/10.31603/ae.7879>
- Hazmi, B., Rashid, U., Taufiq-Yap, Y. H., Ibrahim, M. L., & Nehdi, I. A. (2020). Supermagnetic Nano-Bifunctional Catalyst From Rice Husk: Synthesis, Characterization and Application for Conversion of Used Cooking Oil to Biodiesel. *Catalysts*, 10(2), 225. <https://doi.org/10.3390/catal10020225>
- Helwani, Z., Amraini, S. Z., Asmura, J., Siregar, T. N., Triwahyuni, V. E., & Ali, A. (2023). Palm Frond Waste as a Carbon Source in the Synthesis of CaO/Biochar Catalysts for the Biodiesel Production Process. *Hecla J. Appl. Sci.*, 1(1), 8–13. <https://doi.org/10.60084/hjas.v1i1.9>
- Helwani, Z., Ramli, M., Saputra, E., Bahrudin, B., Yolanda, D., Fatra, W., Idroes, G. M., Muslem, M., Mahlia, T. M. I., & Idroes, R. (2020). Impregnation of CaO From Eggshell Waste With Magnetite as a Solid Catalyst (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CaO) for Transesterification of Palm Oil Off-Grade. *Catalysts*, 10(2), 164. <https://doi.org/10.3390/catal10020164>
- Jalaluddin, J., Suryani, A. I., Suryani, I., Megawati, M., Sakir, A., Halimatussakdiah, H., Arief, R. L., Salsabilla, R., & Tamimi, A. (2024). Community Service: Training on Produced Dishwashing Soap From Waste Cooking Oil for Strengthening Gampong Blang Ara Community Income. *Jpba*, 1(1). <https://doi.org/10.24815/jpba.v1i1.37629>
- Javed, F., Rizwan, M., Asif, M., Ali, S., Aslam, R., Akram, M. S., Zimmerman, W., & Rehman, F. (2022). Intensification of Biodiesel Processing From Waste Cooking Oil, Exploiting Cooperative Microbubble and Bifunctional Metallic Heterogeneous Catalysis. *Bioengineering*, 9(10), 533. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9100533>
- Kesić, Ž., Lukić, I., Zdujić, M., Mojović, L., & Skala, D. (2016). Katalizatori na bazi oksida kalcijuma u procesima sinteze biodizela: Presek stanja. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 22(4), 391–408. <https://doi.org/10.2298/CICEQ160203010K>
- Komarnicka, A., & Murawska, A. (2021). Comparison of Consumption and Renewable Sources of Energy in European Union Countries—Sectoral Indicators, Economic Conditions and Environmental Impacts. *Energies*, 14(12), 3714. <https://doi.org/10.3390/en14123714>
- Konieczna, A., Roman, K., Borek, K., & Grzegorzewska, E. (2021). GHG and NH<sub>3</sub> Emissions vs. Energy Efficiency of Maize Production Technology: Evidence From Polish Farms; A Further Study. *Energies*, 14(17), 5574. <https://doi.org/10.3390/en14175574>
- Lin, C., Lin, Y.-W., & Yang, H. (2023). Comparison of Engine Emission Characteristics of Biodiesel From High-Acid Oil and Used Cooking Oil Through Supercritical Methanol and Alkaline-Catalyst Transesterifications. *Processes*, 11(9), 2755. <https://doi.org/10.3390/pr11092755>
- Lü, Q., Pei, X., Wu, Y., Xu, M., Liu, D., & Zhao, L. (2020). Deactivation Mechanism of the Commercial V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–MoO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> Selective Catalytic Reduction Catalyst by Arsenic Poisoning in Coal-Fired Power Plants. *Energy & Fuels*, 34(4), 4865–4873. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c00066>
- Malek, M. N. F. A., Pushparaja, L., Hussin, N. M., Embong, N. H., Bhuyar, P., Rahim, M. H. A., & Maniam, G. P. (2021). Exploration Of Efficiency of Nano Calcium Oxide (Cao) as Catalyst For Enhancement of Biodiesel Production. *Journal of Microbiology Biotechnology and Food Sciences*, 11(1), e3935. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.3935>
- Maniam, G. P., Lim, H. S., & Hussin, N. M. (2023). Effect of Free Fatty Acid on Transesterification of Waste Cooking

- Oil. *Current Science and Technology*, 3(1), 57–63. <https://doi.org/10.15282/cst.v3i1.10290>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Maroa, S., & Inambao, F. L. (2021). A Review of Sustainable Biodiesel Production Using Biomass Derived Heterogeneous Catalysts. *Engineering in Life Sciences*, 21(12), 790–824. <https://doi.org/10.1002/elsc.202100025>
- Meldha, Z., Amri, I., & Nirwana, N. (2023). Peningkatan Kualitas Biobriket dari Tandan Kosong Kelapa Sawit Melalui Torefaksi dengan Penambahan Co-Firing dari Tempurung Kelapa dan Sludge CPO sebagai Perikat. *Journal of Bioprocess, Chemical and Environmental Engineering Science*, 4(2), 87–94. <https://doi.org/10.31258/jbchees.4.2.87-94>
- Mohammed, A. K., Alkhafaje, Z. A., & Rashid, I. M. (2023). Heterogeneously Catalyzed Transesterification Reaction Using Waste Snail Shell for Biodiesel Production. *Heliyon*, 9(6), e17094. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17094>
- Mulyatun, M., Istadi, I., & Widayat, W. (2023). Synthesis and Characterization of Physically Mixed V2O5.CaO as Bifunctional Catalyst for Methyl Ester Production From Waste Cooking Oil. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(2), 381–389. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.51047>
- Narowska, B., Kułażyński, M., Łukaszewicz, M., & Burchacka, E. (2019). Use of activated carbons as catalyst supports for biodiesel production. *Renewable Energy*, 135, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.006>
- Nurcahyani, M. U., & Sumari, S. (2024). Alkaline Earth Metal Oxide Supported on Zeolite as a Heterogeneous Basic Catalyst for Clean Fuel (Biodiesel) Production: A Mini Review. *E3s Web of Conferences*, 481, 01001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448101001>
- Nyorere, O., Umunna, M. F., Oluka, S., Erokare, T. E., Eje, B., & Adepoju, T. F. (2024). Review of Biodiesel Production From Transesterification of Esterified Carica Papaya Oil (CSO). *Poljoprivredna Tehnika*, 49(1), 43–57. <https://doi.org/10.5937/poljteh2401043n>
- Olagunju, O. A., Musonge, P., & Kiambi, S. L. (2022). Production and Optimization of Biodiesel in a Membrane Reactor, Using a Solid Base Catalyst. *Membranes*, 12(7), 674. <https://doi.org/10.3390/membranes12070674>
- Patel, S. J., Torgal, S., Purohit, T., Kumar, R., Singh, D. V., Kanchan, S., Soudagar, M. E. M., Ahamad, T., Kalam, M. A., & Patel, M. (2023). Impact of Variable Exhaust Valve Timing on Diesel Engine Characteristics Fueled With Waste Cooking Oil Biofuel Blends: A Numerical Analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering*, 239(3), 1329–1352. <https://doi.org/10.1177/09544089231190221>
- Pérez-Miqueo, I., Sáenz, O., & Montes, M. (2021). Highly Conductive Structured Catalytic Reactors for One-Step Synthesis of Dimethyl Ether. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(18), 6676–6686. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c05821>
- Praikaew, W., Kiatkittipong, W., Aiouache, F., Najdanovic-Visak, V., Termtanun, M., Lim, J. W., Lam, S. S., Kiatkittipong, K., Laosiripojana, N., Boonyasuwat, S., & Assabumrungrat, S. (2021). Mechanism Of  $\text{CaO}$  Catalyst Deactivation With Unconventional Monitoring Method for Glycerol Carbonate Production via Transesterification of Glycerol With Dimethyl Carbonate. *International Journal of Energy Research*, 46(2), 1646–1658. <https://doi.org/10.1002/er.7281>
- Ruatpuia, J. V., Halder, G., & Rokhum, S. L. (2022). Biodiesel Production Through Heterogeneous Catalysis Route: A Review. *Science Vision*, 22(1), 1–19. <https://doi.org/10.33493/scivis.22.01.01>
- Rustamov, S., Uzakov, G., & Davlonov, K. (2023). The Results of the Study of Obtaining Alternative Fuels From Biowaste in the Experimental Pyrolysis Device. *E3s Web of Conferences*, 390, 04015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339004015>
- Shakir, M. A., Ahmad, M. I., Zuknik, M. H., & Khalil, H. P. S. A. (2024). Effect of Activation Parameters on Palm Kernel Shell-Based Activated Carbon as Catalyst Support for Biodiesel From Discarded Beef Tallow. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1432(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1432/1/012002>
- Siang, A. O. L., Leman, A. M., Feriyanto, D., Abdulmalik, S. S., & Zakaria, S. (2024). Sustainable Biodiesel Production From Waste Cooking Oil and Crude Palm Oil Using a Custom Mini Pilot Plant. *International Journal of Innovation in Mechanical Engineering and Advanced Materials*, 6(1), 7. <https://doi.org/10.22441/ijimeam.v6i1.23734>
- Solangi, F. A., Memon, L. A., Samo, S. R., Luhur, M. R., Bhutto, A. A., & Ansari, A. M. (2022). Investigation of Performance and Emission Characteristics of CI Engine Using Diesel and Waste Cooking Oil Blends. *Energies*, 15(19), 7211. <https://doi.org/10.3390/en15197211>
- Su, Z., Ren, S., Chen, Z., Yang, J., Zhou, Y., Jiang, L., & Chen, Y. (2020). Deactivation Effect of CaO on Mn-Ce/Al Catalyst for SCR of NO With NH<sub>3</sub> at Low Temperature. *Catalysts*, 10(8), 873. <https://doi.org/10.3390/catal10080873>

- Sulaiman, N. F., Ramly, N. I., Mubin, M. H. A., & Lee, S. L. (2021). Transition Metal Oxide (NiO, CuO, ZnO)-doped Calcium Oxide Catalysts Derived From Eggshells for the Transesterification of Refined Waste Cooking Oil. *RSC Advances*, *11*(35), 21781–21795. <https://doi.org/10.1039/d1ra02076e>
- Sulaiman, N. F., Yacob, A. R., & Lee, S. L. (2020). Transesterification Reaction From Rice Bran Oil to Biodiesel Over Heterogeneous Base Calcium Oxide Nanoparticles Catalyst. *Science & Technology Indonesia*, *5*(3), 62. <https://doi.org/10.26554/sti.2020.5.3.62-69>
- Sun, J., Yu, H., Zhang, P., Qi, G., Chen, X., Liang, X., & Si, H. (2023). Steel Slag Decorated With Calcium Oxide and Cerium Oxide as a Solid Base for Effective Transesterification of Palm Oil. *Processes*, *11*(6), 1810. <https://doi.org/10.3390/pr11061810>
- Ulfah, M., Pasyami, P., Burmawi, B., & Amir, A. (2024). Synthesis of Sulphonated Carbon Catalyst From Coconut Shell and Its Application in Esterification of Free Fatty Acid in Used Cooking Oil. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, *19*(2), 134–143. <https://doi.org/10.23955/rkl.v19i2.34807>
- Weldeslase, M. G., Benti, N. E., Desta, M. A., & Mekonnen, Y. S. (2023). Maximizing Biodiesel Production From Waste Cooking Oil With Lime-Based Zinc-Doped CaO Using Response Surface Methodology. *Scientific Reports*, *13*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30961-w>
- Widayat, W., Arman, M. A. P., Syarief, E., Buchori, L., & Sulardjaka, S. (2024). Sintesis, Karakterisasi dan Pengujian Katalis CaO-MgO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dari Dolomit dan Pasir Besi untuk Pembuatan Biodiesel dari Minyak Goreng Bekas. *Teknik*, *45*(1), 91–100. <https://doi.org/10.14710/teknik.v45i1.56423>
- Yusuf, B. O., Oladepo, S. A., & Ganiyu, S. A. (2023). Biodiesel Production From Waste Cooking Oil via B-Zeolite-Supported Sulfated Metal Oxide Catalyst Systems. *Acs Omega*, *8*(26), 23720–23732. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01892>
- Zhong, L., Barreau, M., Caps, V., Papaefthimiou, V., Haevecker, M., Teschner, D., Baaziz, W., Borfecchia, E., Braglia, L., & Zafeiratos, S. (2021). Improving the Catalytic Performance of Cobalt for CO Preferential Oxidation by Stabilizing the Active Phase Through Vanadium Promotion. *Acs Catalysis*, *11*(9), 5369–5385. <https://doi.org/10.1021/acscatal.0c05482>