



Karakterisasi dan Optimasi penggunaan Katalis CaO/SiO_2 dari Biomassa untuk Sintesis Biodiesel dari Minyak Jelantah

Amalia Dian Fadilla¹, Meka Saima Perdani^{1*}, Hilman Imadul Umam², Christin Octaviani Sitanggang¹, dan Eti Ayu Nurhana¹

Sitasi: Fadilla, Amalia Dian; Perdani, Meka Saima; Umam, Hilman Imadul; Sitanggang, Christin Octaviani; Nurhana, Eti Ayu. (2025). Karakterisasi dan Optimasi penggunaan Katalis CaO/SiO_2 dari Biomassa untuk Sintesis Biodiesel dari Minyak Jelantah. J-TETA: Jurnal Teknik Terapan, V(4) N(2), hlm. 103-111



Copyright: © 2025 oleh para penulis. Karya ini dilisensikan di bawah Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

¹ Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang.

² Program Studi Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang.

* Korespondensi: meke.perdani@ft.unsika.ac.id

Abstract: *Environmentally friendly biodiesel can be produced from used cooking oil through transesterification with heterogeneous catalysts. This study synthesized CaO-SiO_2 catalysts from eggshells and rice husks through calcination and impregnation, with a reaction at 65°C, an oil:methanol ratio of 1:9, and a catalyst variation of 4–8%. FTIR, SEM, and BET characterizations showed the presence of CaO and Si-O-Si with porous morphology and surface area that support catalytic activity. The best results were achieved at 4% catalyst with a conversion of 63.64%, demonstrating the potential of biomass as a sustainable catalyst for biodiesel production.*

Keywords: Biodiesel; Catalyst; Eggshell; Rice Husk

Abstrak: Biodiesel merupakan bahan bakar ramah lingkungan dapat diproduksi dari minyak jelantah melalui transesterifikasi dengan katalis heterogen. Pada penelitian ini mensintesis katalis CaO-SiO_2 dari cangkang telur dan sekam padi melalui kalsinasi dan impregnasi, dengan reaksi pada 65°C, rasio minyak:metanol 1:9, serta variasi katalis 4, 6, dan 8%. Karakterisasi FTIR, SEM, dan BET menunjukkan keberadaan CaO dan Si-O-Si dengan morfologi berpori dan luas permukaan yang mendukung aktivitas katalitik. Hasil terbaik dicapai pada 4% katalis dengan konversi 63,64%, menunjukkan potensi biomassa sebagai katalis berkelanjutan untuk produksi biodiesel.

Kata kunci: Biodiesel; Katalis; Cangkang Telur; Sekam Padi

1. Pendahuluan

Penggunaan biodiesel sebagai bahan bakar alternatif terus meningkat dalam beberapa tahun terakhir. Biodiesel menurut *Standar American Institute of Testing and Material* (ASTM) diartikan sebagai bahan bakar cair yang berasal dari minyak nabati atau lemak hewani dan terdiri dari metil ester asam lemak rantai panjang untuk digunakan untuk mesin diesel [1]. Biodiesel menjanjikan sebagai bahan bakar masa depan karena lebih licin sehingga memperpanjang umur mesin, memiliki aroma gas buang lebih ringan [2] serta bersifat *biodegradable*, tidak beracun, beremisi rendah, ramah lingkungan, dan lebih mudah terbakar dibanding bahan bakar fosil [3]. Umumnya biodiesel diproduksi dari minyak nabati atau hewani [4]. Menurut Sinaga (2014) dalam [5], minyak nabati unggul sebagai bahan baku karena mudah diperoleh, proses produksinya cepat dan sederhana, serta konversinya tinggi hingga 95%. Minyak nabati yang sedang diusulkan di Indonesia saat ini adalah minyak kelapa sawit (CPO) dan minyak jarak pagar. Namun kedua bahan tersebut memiliki keterbatasan. CPO masih memiliki permintaan yang tinggi sebagai bahan pangan dan nilai ekonomi yang tinggi sehingga kurang menguntungkan jika diubah menjadi biodiesel. Sedangkan untuk minyak jarak area untuk

penanaman jarak pagar masih terbatas yang mengakibatkan produksi minyak jarak pagar tidak berjalan terus menerus [6]. Minyak goreng jelantah yang merupakan minyak nabati dari sektor pangan dan rumah tangga cukup banyak tersedia di Indonesia. Minyak jelantah ini tidak baik jika digunakan kembali untuk memasak karena mengandung asam lemak bebas dan radikal yang dapat membahayakan masyarakat. Jika minyak jelantah dibuang ke tanah, pori-pori tanah akan terhalang, mengeras, dan menurunkan kesuburan tanah. Selain itu, minyak juga akan terapung di permukaan air dan menghalangi cahaya matahari. Kondisi ini akan mengganggu proses fotosintesis pada tanaman dan mengurangi kadar oksigen yang diterima oleh organisme akuatik [7]. Oleh karena itu, minyak jelantah dipilih sebagai bahan baku utama pembuatan biodiesel karena dapat mengatasi masalah pembuangan limbah minyak, Kesehatan masyarakat dan menekan biaya produksi biodiesel [7, 8]. Produksi biodiesel dilakukan melalui transesterifikasi, yaitu reaksi trigliserida dalam minyak dengan metanol menggunakan katalis, menghasilkan metil ester (biodiesel) dan gliserol. Kandungan asam lemak pada minyak jelantah dapat diolah dengan proses esterifikasi dengan metanol untuk menghasilkan biodiesel [7]. Oleh karena itu, minyak jelantah dipilih sebagai bahan baku utama. Produksi biodiesel dilakukan melalui transesterifikasi, yaitu reaksi trigliserida dalam minyak dengan metanol menggunakan katalis, menghasilkan metil ester (biodiesel) dan gliserol.

Sejauh ini, katalis homogen seperti NaOH dan KOH telah digunakan, tetapi katalis ini memiliki beberapa kelemahan seperti terbentuknya produk samping serta kesulitan pemisahan produk dan potensi pencemaran akibat limbah. Untuk menangani kelemahan itu, penggunaan katalis heterogen (padat) mulai dikembangkan sebagai alternatif untuk katalis homogen [9]. Penggunaan katalis berbasis biomassa dapat menjadi alternatif yang lebih menjanjikan karena mendukung prinsip ekonomi sirkular dan mengurangi ketergantungan pada sumber daya konvensional [10]. Katalis biomassa terbuat dari bahan-bahan terbarukan dan berlimpah, seperti ampas tebu, kulit pisang, sekam padi, cangkang telur, cangkang kepiting dan tulang ayam [9-13].

Sekam padi dan cangkang telur merupakan biomassa menjanjikan untuk katalis transesterifikasi. Sekam padi kaya silika (SiO_2) yang setelah kalsinasi memiliki luas permukaan tinggi, stabilitas termal baik, serta gugus hidroksil aktif sebagai adsorben senyawa organik [15, 16]. Sedangkan Cangkang telur kaya akan CaO yang efektif sebagai katalis biodiesel melalui transesterifikasi dan memiliki kelarutan yang rendah dalam metanol [5]. Kombinasi CaO– SiO_2 dari biomassa ini menarik karena tersedia melimpah, murah, ramah lingkungan, dan menunjukkan aktivitas katalitik tinggi dalam proses transesterifikasi [10, 16]. Ayodeji (2018) melaporkan bahwa hasil biodiesel menggunakan katalis CaO dapat menghasilkan yield sebesar 97%. Sedangkan Hazmi (2020), Ur (2021), Nurhasyiri (2022), Embong (2023) dan Sulaiman (2024) melakukan penelitian pembuatan biodiesel menggunakan CaO– SiO_2 dengan campuran senyawa lain menghasilkan yield 83–98%. Oleh karena itu, penelitian ini akan dilakukan untuk sintesis SiO_2 dan CaO dari sekam padi dan cangkang telur sebagai katalis untuk mengetahui karakteristik serta pengoptimalan pemakaiannya untuk pengembangan biodiesel yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

2. Bahan dan Metode

2.1 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah minyak jelantah, cangkang telur ayam, sekam padi, metanol, NaOH, KOH dan aquades.

2.3 Metode

2.3.1 Preparasi Bahan

Minyak jelantah dipanaskan pada suhu 100-115°C agar airnya menguap, lalu dinetralkan dengan mencampurkan larutan NaOH 6% hingga pH-nya menggunakan pH meter menjadi 7-8 kemudian disaring melalui kertas saring untuk memisahkan kotoran padat serta gliserol [18]. Cangkang telur dibersihkan, dikeringkan pada suhu 110°C selama 24 jam. Setelah itu, cangkang dihaluskan dan diayak hingga berukuran 65 mesh. Bubuk cangkang telur dikalsinasi pada suhu 800°C selama 4 jam [16, 18-20] dan dikeringkan kembali dengan suhu 100°C selama 1 jam. Selanjutnya, bubuk diimpregnasi basah dengan larutan KOH 20% pada 60°C selama 2 jam. Hasilnya dipisahkan dengan kertas saring, dikeringkan pada 100°C selama 1 jam, dan dikalsinasi ulang pada suhu 450°C selama 4 jam [10, 18, 21]. Sekam padi direndam dalam air mendidih untuk menghilangkan kotoran dan memilah sekam padi yang memiliki kandungan silika yang tinggi (yang terendam) [22]. Sekam yang sudah kering, dikeringkan pada suhu 80°C selama 24 jam [17] lalu kalsinasi dengan suhu 800°C selama 5 jam dengan laju pemanasan 10°C/menit hingga terbentuk bubuk silika putih abu sekam padi (RHA). Kemudian, RHA dihaluskan menjadi ukuran 65 mesh agar dapat berkontribusi pada luas permukaan yang lebih besar dan digunakan sebagai katalis pendukung [23]. Bubuk kalsium

oksida (CaO) dan abu sekam padi (SiO_2) yang sudah jadi dicampurkan dengan perbandingan 2:1, lalu dikalsinasi kembali pada suhu 500°C selama 4 jam, yang bertujuan untuk membentuk struktur katalis yang lebih aktif serta meningkatkan efektivitasnya dalam reaksi [24].

2.3.2 Proses Transesterifikasi

Proses transesterifikasi dilakukan dengan rasio molar minyak:metanol 1:9 [16, 21, 25]. Sebanyak 100 ml minyak jelantah dipanaskan dalam labu leher tiga berserta reflux condenser hingga 65°C . Katalis CaO/SiO_2 (4%, 6%, 8% berat minyak) dicampur dengan metanol lalu dimasukkan ke labu leher tiga. Campuran diaduk pada 450 rpm selama 2,5 jam, kemudian didiamkan 12 jam dalam corong pisah hingga terbentuk tiga lapisan: biodiesel (atas), gliserol (tengah), dan katalis (bawah). Biodiesel dipisahkan dan dikumpulkan [18].

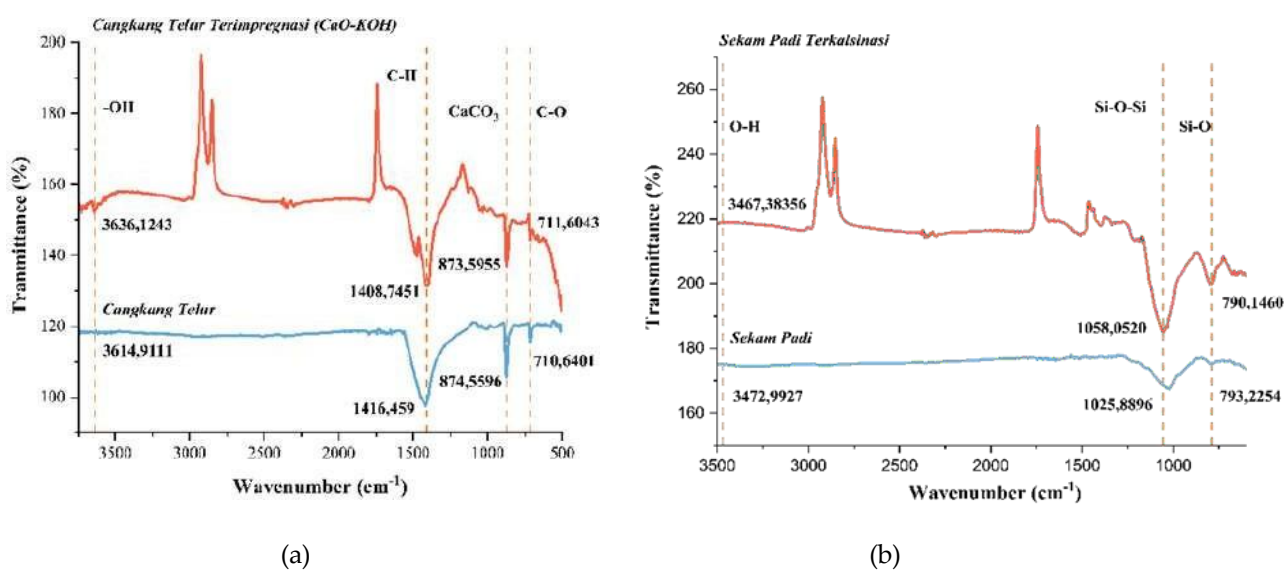
Hasil yang didapatkan akan dilakukan uji karakteristik melalui instrument FT-IR 4600 ATR PRO ONE untuk mengidentifikasi dan mengkonfirmasi keberadaan gugus fungsi yang aktif dalam sampel [26], SEM-EDS Hitachi SU3500 digunakan untuk mengetahui bentuk dan ukuran partikel katalis yang dihasilkan, BET digunakan untuk menganalisis karakteristik permukaan suatu sampel, seperti luas permukaan spesifik, volume pori, dan ukuran pori [28], serta perhitungan yield, densitas dan viskositas sesuai standar SNI 7182:2015.

3. Hasil

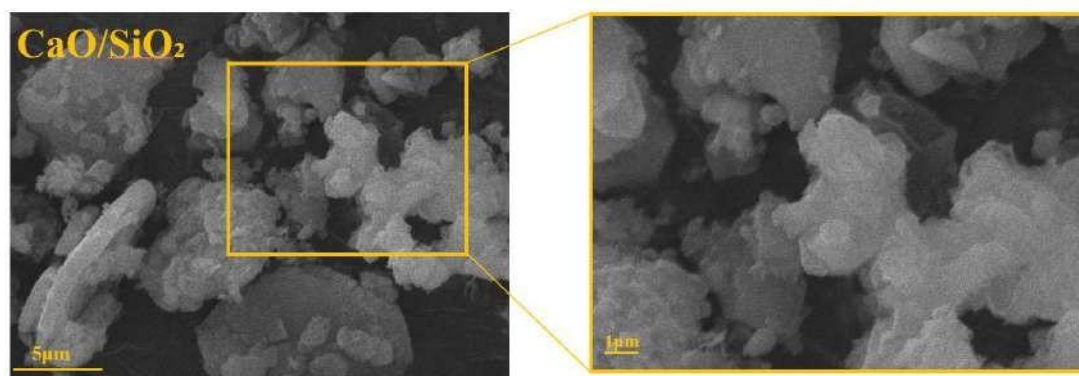
3.1 Hasil Uji Karakteristik

Hasil analisis (Gambar 2a), menunjukkan bahwa gugus C-H pada katalis berinteraksi dengan rantai karbon trigliserida saat transesterifikasi [29], sedangkan pergeseran bilangan gelombang menandakan modifikasi struktural oleh KOH [18]. CaCO_3 pada cangkang telur terdekomposisi menjadi CaO setelah kalsinasi, yang memiliki aktivitas katalitik lebih tinggi [30].

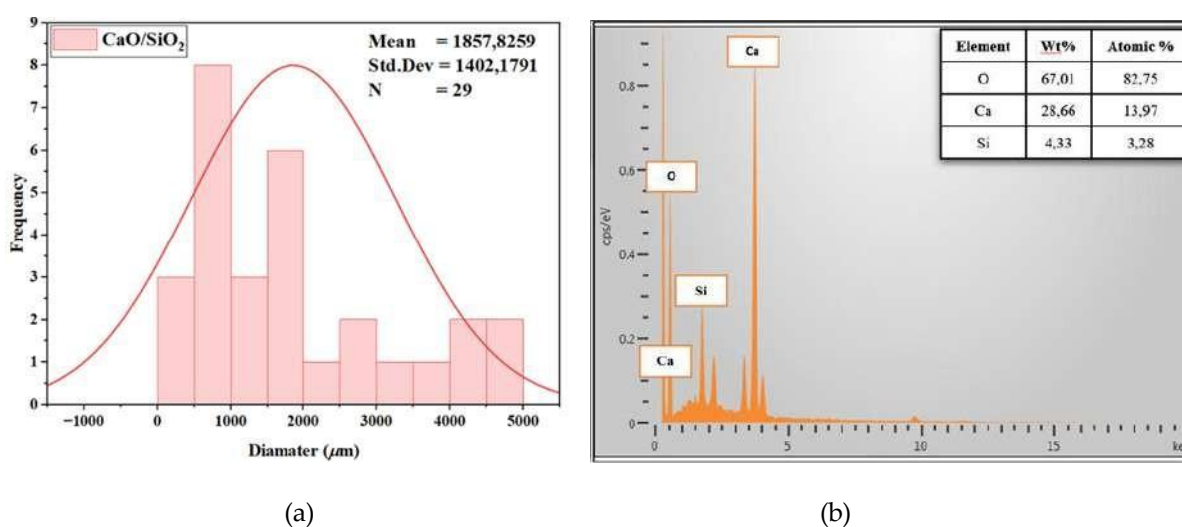
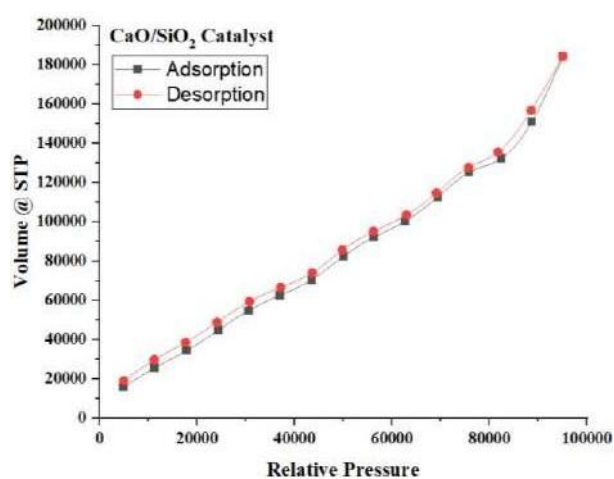
Keberadaan kelompok hidroksil masih terlihat pada 3636 cm^{-1} , namun intensitasnya menurun, yang menunjukkan pengurangan kadar air atau kelompok yang teradsorpsi karena proses kalsinasi. Spektrum CaO terimpregnasi menunjukkan penurunan signifikan puncak karbonat pada 1408 , 873 , dan 711 cm^{-1} dibandingkan cangkang telur, menandakan sebagian besar CaCO_3 telah berubah menjadi CaO. Spektrum Katalis SiO_2 (Gambar 2b.) menunjukkan gugus -OH pada $3472\text{--}3467\text{ cm}^{-1}$ yang menandakan air teradsorpsi, dengan intensitas berkurang setelah kalsinasi. Puncak pada $1025\text{--}1058\text{ cm}^{-1}$ dan $790\text{--}793\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan gugus Si-O-Si dan Si-O sebagai support katalis [31]. Silika (SiO_2) menjadi komponen dominan, dengan puncak khas pada 1051 cm^{-1} dan 793 cm^{-1} .



Gambar 2. (a) Hasil Uji FTIR Cangkang Telur; Hasil Uji FTIR Sekam Padi



Gambar 3. Hasil Analisis Karakterisasi SEM

Gambar 4. (a) Hasil Histogram Katalis CaO/SiO_2 ; (b) Spektrum EDS katalis CaO/SiO_2 Gambar 5. Hasil Isoterm adsorpsi-desorpsi N_2 pada suhu 77°C dari katalis CaO/SiO_2

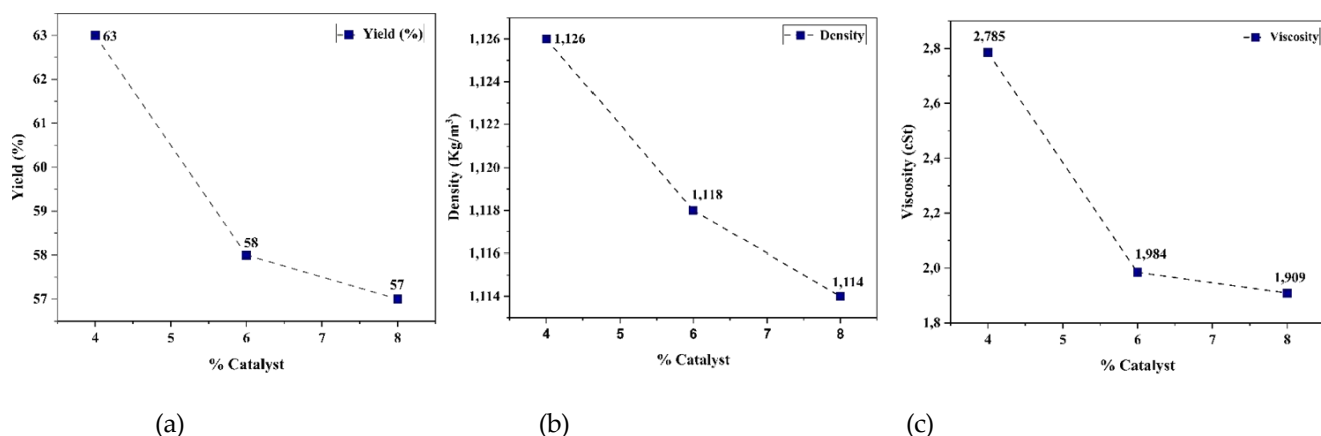
Tabel 1 . Hasil analisis BET katalis CaO/SiO₂

	CaO/SiO ₂	
	Adsorpsi	Desorpsi
Surface Area (m ² /g)	14.568	14.243
Pore Volume (cc/g)	0.026	0.025
Pore Radius Dv(r) (Å)	18.870	18.805
Total pore volume (cc/g)	2.851e-02	
Average pore Radius (Å)	2.74217e+01	
BET Surface Area (m ² /g)	20.794	

Hasil analisis SEM (Gambar 3) dengan skala 5 μm , menunjukkan permukaan kasar, berpori, dan tidak rata dengan partikel kecil yang terdispersi serta membentuk agregat. Morfologi ini meningkatkan luas permukaan dan potensi kontak dengan reaktan. [36, 37]. Grafik isoterm katalis CaO/SiO₂ (Gambar 5) menunjukkan struktur mesopori dengan ukuran pori 2,7 nm dan sedikit *loop* histeresis [29]. Nilai *surface area* 14,243–14,578 m²/g menunjukkan bahwa pencampuran CaO dengan SiO₂ dapat menurunkan luas permukaan karena pori-pori SiO₂ sebagian tertutup oleh CaO yang terdispersi atau mengisi pori-pori. Luas permukaan ini penting karena semakin besar luas permukaan katalis, semakin banyak sisi aktif yang tersedia untuk reaksi [15], hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya reaktan yang dapat bereaksi di permukaan untuk menghasilkan biodiesel [28]. *Pore volume* menunjukkan seberapa banyak ruang dalam material yang tersedia untuk diakses oleh reaktan. Nilai yang kecil ini mengindikasikan bahwa interaksi antar partikel atau pembentukan lapisan CaO pada SiO₂ menyebabkan hilangnya volume pori efektif, sedangkan *pore radius* rata-rata 18,8 Å menegaskan struktur mesopori (20– 500 Å). Nilai *total pore volume* memberikan informasi tentang total volume ruang kosong dalam material per gram katalis. *Surface Area* pada CaO/SiO₂ menunjukkan bahwa interaksi antara CaO dan SiO₂ menyebabkan penutupan sebagian permukaan aktif.

3.2 Pengaruh Perhitungan terhadap Yield, Densitas dan Viskositas Biodiesel

Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah katalis berpengaruh terhadap yield biodiesel. Variasi 4%, 6%, dan 8% menunjukkan bahwa konsentrasi katalis 4% menghasilkan yield tertinggi, menandakan efektivitas optimal tanpa menghambat reaksi. Pada konsentrasi 6% dan 8%, yield mengalami penurunan. Pengukuran densitas biodiesel menggunakan piknometer 5 ml (Gambar 6b) menunjukkan nilai tertinggi pada katalis 4%. Pada konsentrasi katalis 6% dan 8%, densitas menurun. Secara umum, penambahan jumlah katalis tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap densitas biodiesel. Nilai densitas crude biodiesel yang diperoleh masih belum memenuhi standar SNI 7182:2015 (0,85 – 0,89 g/ml pada suhu 40°C).

**Gambar 6.** (a) Yield; (b) Densitas; (c) Viskositas Biodiesel yang dihasilkan

Pengujian viskositas (Gambar 6c) menunjukkan nilai tertinggi pada katalis 4%. Secara umum, terjadi tren penurunan viskositas seiring peningkatan jumlah katalis. Nilai viskositas crude biodiesel yang diperoleh juga belum memenuhi standar SNI 7182:2015 (2,3–6 cSt pada suhu 40°C).

4. Pembahasan

4.1 Karakteristik FTIR

Gugus fungsi C-O berkontribusi terhadap interaksi dengan metanol dalam proses pembentukan metil ester (biodiesel) [18]. Gugus -OH berkontribusi dalam memberi sifat kebasaaan yang dapat mempercepat reaksi [35]. Melalui

proses impregnasi yang dilakukan telah berhasil mengubah karakteristik kimia material, sehingga menjadi lebih reaktif dan memiliki potensi untuk penggunaan katalitik. Impregnasi juga meningkatkan jumlah situs basa aktif, terlihat dari intensitas spektrum FTIR yang lebih tinggi pada katalis terimpregnasi [12]. Material hasil kalsinasi berpotensi sebagai sumber silika dalam berbagai aplikasi, seperti katalis atau adsorben. Proses kalsinasi membuat sebagian besar bahan organik terdekomposisi, sehingga menghasilkan silika (SiO_2) yang lebih murni dengan struktur lebih aktif secara katalitik. Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa katalis yang terbuat dari abu sekam padi yang diimpregnasi dengan KOH mampu menghasilkan biodiesel dengan tingkat konversi mencapai 95,7%, serta memiliki viskositas dan densitas sesuai standar SNI, serta kandungan asam lemak bebas yang rendah [15].

4.2 Karakterisasi BET

Bentuk isoterm pada katalis CaO umumnya termasuk dalam kategori IV pada klasifikasi IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*). Isoterm Tipe IV ini merupakan karakteristik material mesopori (pori-pori berukuran antara 2-50 nm) karena nilai pori yang masih direntang struktur mesopori yaitu 2.7 nm. Struktur mesopori sangat menguntungkan dalam katalisis karena memungkinkan molekul reaktan yang lebih besar untuk masuk dan berinteraksi dengan sisi aktif katalis. Fenomena *loop* histeresis yang kecil menunjukkan adanya pori yang sebagian tertutup akibat penyisipan CaO ke dalam struktur SiO_2 , sehingga tidak seluruh pori dapat dimanfaatkan untuk proses adsorpsi [36, 37]. *Surface area* yang dimiliki katalis meski tidak begitu besar, tetap memberikan cukup banyak situs aktif yang dapat digunakan untuk reaksi biodiesel [12, 26]. Nilai *total pore volume* masih cukup tinggi yang menegaskan bahwa katalis CaO/ SiO_2 memiliki potensi katalitik meskipun sebagian pori telah terisi oleh CaO.

4.3 Karakterisasi SEM-EDX

Permukaan katalis yang kasar, berpori, dan tidak rata dari hasil SEM berkontribusi pada peningkatan luas permukaan, sehingga lebih banyak situs aktif dapat berinteraksi dengan reaktan pada proses transesterifikasi [36, 37]. Ukuran partikel yang relatif kecil meningkatkan reaktivitas, sedangkan distribusi partikel yang lebar mendukung selektivitas katalis. Hasil analisis EDX menunjukkan unsur-unsur utama yang terdeteksi dalam sampel adalah Oksigen (67.01%), Silikon (4.66%), dan Kalsium (28.33%). Oksigen memiliki konsentrasi tertinggi, diikuti oleh Kalsium dan Silikon. Tingginya unsur oksigen dapat disebabkan karena unsur CaO maupun SiO_2 yang merupakan senyawa oksida alami yang mengandung oksigen dalam jumlah yang cukup besar. Dalam struktur SiO_2 , terdapat dua atom oksigen yang terikat, sementara dalam CaO terikat dengan satu atom oksigen [38]. Hasil analisis EDX dari penelitian sebelumnya mendukung pengamatan ini, yang menunjukkan kandungan oksigen berkisar antara 41,19% hingga 59,91% dalam campuran CaO/ SiO_2 [39]. Ukuran partikel katalis yang lebih kecil cenderung memiliki luas permukaan yang lebih besar, sehingga unsur oksigen yang terikat pada permukaan partikel juga lebih banyak terdeteksi. Penambahan SiO_2 dapat memperkecil ukuran partikel katalis yang menyebabkan oksigen tersebar lebih merata di permukaan dan meningkatkan stabilitas serta efisiensi katalis. Jadi ketika katalis CaO dan SiO_2 dicampur, CaO dapat terdispersi di atas permukaan SiO_2 , memanfaatkan area permukaan yang lebih luas dari SiO_2 untuk meningkatkan aktivitas katalitik. Interaksi antara CaO dan SiO_2 dapat meningkatkan stabilitas dan efisiensi katalis.

4.4 Pengaruh Terhadap Yield, Densitas dan Viskositas Biodiesel

Penurunan yield pada penggunaan katalis 6% dan 8% disebabkan oleh efek inhibisi yang terjadi selama proses transesterifikasi, seperti reaksi penyabunan (saponifikasi) yang responsif terhadap air, sehingga sebagian produk biodiesel akan terkontaminasi oleh katalis. Dengan kata lain, benturan yang terlalu sering dan berlebihan antara katalis dan biodiesel mengakibatkan sebagian biodiesel terserap katalis dan menurunkan hasil produk. Penambahan jumlah katalis dapat membuat campuran menjadi lebih kental dan meningkatkan konsumsi energinya sehingga menurunkan efisiensi reaksi [40]. Faktor lain seperti jenis minyak, suhu dan waktu reaksi, serta rasio metanol: minyak juga memengaruhi yield biodiesel [21].

Nilai densitas tertinggi pada katalis 4% terjadi karena interaksi reaktan-katalis lebih baik, sedangkan pada 6% dan 8% jumlah katalis yang berlebih menyebabkan perubahan struktur molekuler biodiesel sehingga densitas menurun. Crude biodiesel yang dihasilkan masih di atas standar SNI 7182:2015, sehingga perlu dilakukan pemurnian lebih lanjut. Biodiesel dengan densitas lebih tinggi dari standar dapat menyebabkan pembakaran tidak sempurna dan mempercepat keausan mesin [7].

Tren penurunan viskositas seiring dengan peningkatan jumlah katalis disebabkan kelebihan katalis mempercepat pemecahan trigliserida menjadi metil ester yang lebih encer. Selain jumlah katalis, faktor lain seperti jenis minyak, suhu, waktu reaksi, rasio metanol: minyak, serta keberadaan air juga berpengaruh terhadap viskositas. Hal ini menyebabkan crude biodiesel yang dihasilkan belum memenuhi standar mutu SNI 7182:2015.

5. Kesimpulan

Katalis CaO/SiO_2 dari cangkang telur dan sekam padi berhasil disintesis dengan struktur mesopori, permukaan berpori, dan aktivitas basa tinggi. Analisis FTIR, SEM, EDS, dan BET mengonfirmasi perubahan CaCO_3 menjadi CaO , keberadaan SiO_2 sebagai penyangga, serta interaksi CaO-SiO_2 yang meningkatkan stabilitas katalis. Pengujian menunjukkan bahwa konsentrasi katalis 4% menghasilkan yield, densitas, dan viskositas biodiesel terbaik dibandingkan 6% dan 8%. Namun, densitas dan viskositas crude biodiesel masih belum memenuhi standar SNI 7182:2015 sehingga diperlukan tahap pemurnian lebih lanjut. Secara keseluruhan, katalis CaO/SiO_2 berpotensi sebagai katalis heterogen ramah lingkungan untuk produksi biodiesel.

6. Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Kimia Universitas Singaperbangsa yang telah menyediakan fasilitas laboratorium sehingga penelitian ini dapat berjalan lancar. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Lembaga BRIN atas dukungan dan fasilitasi pengujian karakterisasi yang sangat membantu keberhasilan penelitian.

Referensi

- [1] R. A. Putri, A. Muhammad, dan I. Ishak, "Optimasi Proses Pembuatan Biodiesel Biji Jarak Pagar (*Jatropha Curcas* L.) Melalui Proses Ekstraksi Reaktif," *J. Teknol. Kim. Unimal*, vol. 6, no. 2, hal. 16, 2018, doi: 10.29103/jtku.v6i2.472.
- [2] I. B. Rahardja dan A. I. Ramadhan, "Analisis Kalori Biodiesel Crude Palm Oil (CPO) dengan Katalis Abu Tandan Kosong Kelapa Sawit (ATKKS)," hal. 1–12, 2019.
- [3] F. Dimawarnita, A. N. Arfiana, S. Mursidah, S. R. Maghfiroh, dan P. Suryadarma, "Produksi Biodiesel Berbasis Minyak Nabati Menggunakan Aspen Hysys," *J. Teknol. Ind. Pertan.*, vol. 31, no. 1, hal. 98–109, 2021, doi: 10.24961/j.tek.ind.pert.2021.31.1.98.
- [4] A. Yasyifa, R. Atin, A. Istiani, dan H. Anggorowati, "Enhancing Biodiesel Yield from Castor Seed Oil through Co-Solvent-Assisted Transesterification Using n-Hexane," vol. 22, no. 2, hal. 106–112, 2025.
- [5] D. Jaya, T. Wahyu Widayati, H. Salsabiela, dan M. F. Abdul Majid, "Production of biodiesel from waste cooking oil using heterogeneous catalyst," *Eksergi*, vol. 19, no. 1, hal. 29, 2022, doi: 10.31315/e.v0i0.6132.
- [6] H. S. Ahmad, N. Bialangi, dan Y. K. Salimi, "Inovasi Penelitian, Pendidikan dan Pembelajaran Sains," *J. Entropi*, vol. 11, no. 2, hal. 204–214, 2016.
- [7] dyah arum Wulandari *et al.*, "Pengolahan Minyak Jelantah Menjadi Biodiesel Sebagai Upaya Pemberdayaan Masyarakat Pesisir," *Pros. Semin. Nas. Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 2023, hal. 2023, 2023, [Daring]. Tersedia pada: <http://journal.unj.ac.id/unj/index.php/snppm>
- [8] A. Kapuji, S. Hadi, dan Z. Arifin, "Proses Pembuatan Biodiesel dari Minyak Jelantah," *J. Chemtech*, vol. 7, no. 1, hal. 1–6, 2021.
- [9] A. Syafitri, A. Mediniariasty, dan M. Yerizam, "Pemanfaatan Limbah Cangkang Telur dan Sekam Padi sebagai Katalis dalam Pembuatan Biodiesel dari Minyak Jelantah," *J. Pendidik. dan Teknol. Indones.*, vol. 4, no. 1, hal. 5–10, 2024, doi: 10.52436/1.jpti.368.
- [10] J. Vakros, "Biochars and their use as transesterification catalysts for biodiesel production: A short review," *Catalysts*, vol. 8, no. 11, 2018, doi: 10.3390/catal8110562.
- [11] A. Rezayan dan M. Taghizadeh, "Synthesis of magnetic mesoporous nanocrystalline $\text{KOH/ZSM-5-Fe}_3\text{O}_4$ for biodiesel production: Process optimization and kinetics study," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 117, no. June, hal. 711–721, 2018, doi: 10.1016/j.psep.2018.06.020.
- [12] K. Kusmiyati *et al.*, "Biodiesel production from reutealis trisperma oil using KOH impregnated eggshell as a heterogeneous catalyst," *Energies*, vol. 12, no. 19, 2019, doi: 10.3390/en12193714.
- [13] S. Oko dan M. Feri, "Pengembangan Katalis CaO Dari Cangkang Telur Ayam Dengan Impregnasi KOH Dan

- Aplikasinya Terhadap Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Jarak," *J. Teknol.*, vol. 11, no. 2, hal. 103–110, 2019.
- [14] L. Razzaq *et al.*, "Modeling viscosity and density of ethanol-diesel-biodiesel ternary blends for sustainable environment," *Sustain.*, vol. 12, no. 12, 2020, doi: 10.3390/su12125186.
- [15] A. N. Amenaghawon, K. Obahiagbon, V. Isesele, dan F. Usman, "Optimized biodiesel production from waste cooking oil using a functionalized bio-based heterogeneous catalyst," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 8, no. March, hal. 100501, 2022, doi: 10.1016/j.clet.2022.100501.
- [16] S. Amelia, S. Jamilatun, L. Mulia Shitopyta, M. W. Utami, dan I. Sriyana, "Degradasi Limbah Detergen dengan Metode Fotokatalis Menggunakan TiO₂ / Silica Gel Degradation of Detergent Waste by Photocatalyst Method using TiO₂ / Silica Gel," *J. Ilm. Tek. Kim.*, vol. 20, no. 3, hal. 2460–8203, 2023.
- [17] A. I. Nurhasyiri *et al.*, "SYNTHESIS OF RICE HUSK ASH CATALYST IMPREGNATED WITH CaO EGG SHELL AND KOH TO PRODUCE BIODIESEL FROM WASTE," *J. Kinet. Politek. Negeri Sriwij.*, vol. 13, no. 3, hal. 56–61, 2022.
- [18] D. Susvira, "Synthesis of Biodiesel from Waste Cooking Oil Using Heterogeneous Catalyst (CaO) Based on Duck Eggshell with Transesterification Reaction," *J. Kartika Kim.*, vol. 5, no. 1, hal. 40–43, 2022, doi: 10.26874/jkk.v5i1.122.
- [19] S. Palitsakun, K. Koonkuer, B. Topool, A. Seubsai, dan K. Sudsakorn, "Transesterification of Jatropha oil to biodiesel using SrO catalysts modified with CaO from waste eggshell," *Catal. Commun.*, vol. 149, hal. 106233, 2021, doi: 10.1016/j.catcom.2020.106233.
- [20] W. Ur Rahman, S. M. Yahya, Z. A. Khan, N. A. Khan, G. Halder, dan S. H. Dhawane, "Valorization of waste chicken egg shells towards synthesis of heterogeneous catalyst for biodiesel production: Optimization and statistical analysis," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 22, hal. 101460, 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101460.
- [21] D. Wicaksono dan R. D. Kusumaningtyas, "Synthesis of ZnO/CaO Catalyst from Eggshell Waste for Biodiesel Production," *J. Bahan Alam Terbarukan*, vol. 8, no. 1, hal. 65–71, 2019, doi: 10.15294/jbat.v8i1.20185.
- [22] S. Elfina, K. D. Pandiangan, N. Jamarun, F. Subriadi, H. Hafnimardiyanti, dan R. Roswita, "Transesterification of Palm Oil Catalyzed by CaO/SiO₂ Prepared from Limestone and Rice Husk Silica," *J. Multidiscip. Appl. Nat. Sci.*, vol. 4, no. 1, hal. 49–57, 2024, doi: 10.47352/jmans.2774-3047.185.
- [23] N. F. Sulaiman, Y. W. Leong, S. L. Lee, Z. W. Goh, S. S. M. Yahya, dan A. G. N. Sofiah, "Process optimization of rice husk ash supported catalyst in biodiesel synthesis using response surface methodology approach," *Fuel*, vol. 358, no. PA, hal. 130165, 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2023.130165.
- [24] S. N. M. Khazaai, S. Yiting, M. H. Mohd, M. L. Ibrahim, dan G. P. Maniam, "Application of waste catalyst, cao-sio₂ in the transesterification of palm oil," *Malaysian J. Anal. Sci.*, vol. 25, no. 3, hal. 490–497, 2021.
- [25] V. Mandari dan S. K. Devarai, "Biodiesel Production Using Homogeneous, Heterogeneous, and Enzyme Catalysts via Transesterification and Esterification Reactions: a Critical Review," *Bioenergy Res.*, vol. 15, no. 2, hal. 935–961, 2022, doi: 10.1007/s12155-021-10333-w.
- [26] R. M. Ali, M. R. Elkatory, M. A. Hassaan, K. Amer, dan A. S. Geiheini, "Highly Crystalline Heterogeneous Catalyst Synthesis from Industrial Waste for Sustainable Biodiesel Production," *Egypt. J. Chem.*, vol. 63, no. 4, hal. 1161–1178, 2020, doi: 10.21608/ejchem.2019.15471.1943.
- [27] Sudarta, "濟無No Title No Title No Title," 2022.
- [28] E. Kurniawan dan F. Perdana, "Proses Transesterifikasi Limbah Minyak Goreng Bekas Menggunakan Katalis Cao Dari Limbah Cangkang Bekicot (Achatina Fulica)," *J. Inov. Tek. Kim.*, vol. 7, no. 1, hal. 9, 2022, doi: 10.31942/inteka.v7i1.5579.
- [29] S. G. Durumin-iy, U. I. Ismail, dan J. State, "Exploring the Efficacy of Calcined Eggshell as a Heterogeneous Catalyst in Enhancing Biodiesel Production Through Transesterification of Jatropha Oil," vol. 10, no. 3, hal. 227–234, 2024.
- [30] J. A. Tavizón-Pozos, H. Cervantes-Cuevas, G. G. Garcia-Camacho, G. Chavez-Esquivel, dan D. R. Acosta-Najarro, "Biodiesel Production Using K-Sr/CaO and CaO Catalysts Derived from Eggshells by Canola Oil Transesterification," *ACS Omega*, 2025, doi: 10.1021/acsomega.4c09118.
- [31] A. Dessoky, T. Lutz, G. Bangga, dan E. Krämer, "Computational studies on Darrieus VAWT noise mechanisms employing a high order DDES model," *Renew. Energy*, vol. 143, hal. 404–425, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.04.133.
- [32] H. Haryono, S. Ishmayana, dan I. Fauziyah, "Synthesis and Characterization of Calcium Oxide Impregnated on

- Silica from Duck Egg Shells and Rice Husks as Heterogeneous Catalysts for Biodiesel Synthesis," *Baghdad Sci. J.*, vol. 20, no. 5, hal. 1976–1984, 2023, doi: 10.21123/bsj.2023.7895.
- [33] N. Nurhayati, A. Awaluddin, dan Y. Mulyani, "Response surface optimization of biodiesel synthesis from crude palm oil (CPO) using CaO/silica gel heterogeneous catalyst based on blood cockle shell and coconut fiber," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 14, no. 2, hal. 276–289, 2025, doi: 10.61435/ijred.2025.60855252-4940.
- [34] D. Niuniavaite, K. Baltakys, T. Dambrauskas, A. Eisinas, D. Rubinaite, dan A. Jaskunas, "Microstructure, thermal stability, and catalytic activity of compounds formed in CAO-SiO₂-cr(NO₃)₃-h₂o system," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 7, hal. 1–16, 2020, doi: 10.3390/nano10071299.
- [35] J. Sibarani, M. Zulfihardini, dan I. W. Suarsa, "Sintesis dan Karakterisasi Katalis CaO-Bentonit untuk Reaksi Transesterifikasi Minyak Jelantah Menjadi Biodiesel," *CAKRA Kim. (Indonesian E-Journal Appl. Chem.)*, vol. 8, no. 1, hal. 59–65, 2020, [Daring]. Tersedia pada: <https://ojs.unud.ac.id/index.php/cakra/article/view/62811/35949>
- [36] A. H. Al-Muhtaseb *et al.*, "Biodiesel production over a catalyst prepared from biomass-derived waste date pits," *Biotechnol. Reports*, vol. 20, 2018, doi: 10.1016/j.btre.2018.e00284.
- [37] C. L. Owens, E. Schach, T. Heinig, M. Rudolph, dan G. R. Nash, "Surface nanobubbles on the rare earth fluorcarbonate mineral synchysite," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 552, hal. 66–71, 2019, doi: 10.1016/j.jcis.2019.05.014.
- [38] D. E. Newbury dan N. W. M. Ritchie, "Testing the accuracy of low-beam-energy electron-excited X-ray microanalysis with energy-dispersive spectrometry," *J. Mater. Sci.*, hal. 19088–19111, 2024, doi: 10.1007/s10853-024-10285-4.
- [39] Y. A. Ndak, K. Sarifudin, dan Sudirman³, "Pengaruh Komposisi SiO₂ Pada Katalis Cao/SiO₂ Terhadap Karakter Morfologi Permukaan, Ukuran Partikel dan Rendamen Metil Ester Reaksi Transesterifikasi Minyak Jarak Yulita," *Beta Kim.*, vol. 1, no. November, hal. 64–77, 2021.
- [40] R. Ramadani, A. Azhari, R. Mulyawan, N. ZA, dan L. Hakim, "Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Biji Kepayang (Pangium Edule Reinw) Menggunakan Katalis Basa Heterogen Dari Limbah Cangkang Kerang Darah," *J. Biodiesel Res. Innov. (Journal BRAIN)*, vol. 1, no. 1, hal. 9, 2023, doi: 10.29103/jbrain.v1i1.13378.