



Efektivitas Katalis CaO/SiO₂ dari Limbah Sekam Padi dan Cangkang Telur dengan Variabel Waktu Reaksi untuk Sintesis Biodiesel

Effectiveness of CaO/SiO₂ Catalyst Derived from Rice Husk and Eggshell Waste with Reaction Time Variation for Biodiesel Synthesis

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

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jl. HS.Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Telukjambe Timur, Karawang, 41361, Indonesia

²Program Studi Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jl. HS.Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Telukjambe Timur, Karawang, 41361, Indonesia

*Email: meka.perdani@ft.unsika.ac.id

Article history:

Diterima : 1 Agustus 2025
Direvisi : 4 September 2025
Disetujui : 8 Oktober 2025
Mulai online : 27 Maret 2026

E-ISSN: 2337-4888

How to cite:

Christin Octaviani Sitanggang, Meka Saima Perdani, Hilman Imadul Umam, Amalia Dian Fadilla, Eti Ayu Nurhana. (2026). Efektivitas Katalis CaO/SiO₂ dari Limbah Sekam Padi dan Cangkang Telur dengan Variabel Waktu Reaksi untuk Sintesis Biodiesel. Jurnal Teknik Kimia USU, 15(1), 67-75.

ABSTRAK

Penelitian ini berfokus pada sintesis biodiesel yang menjadi bahan bakar alternatif untuk menggantikan minyak diesel yang dapat dihasilkan dari minyak nabati atau lemak hewani sebagai bahan bakar terbarukan dan berkelanjutan. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh waktu reaksi dalam pembuatan biodiesel terhadap efektivitas katalis CaO/SiO₂ dari limbah cangkang telur dan sekam padi pada proses transesterifikasi. Variabel kontrol dalam penelitian ini berupa bahan baku yang diambil dari hasil limbah sekam padi dan limbah cangkang telur ayam. Rasio mol pada minyak jelantah : metanol yang digunakan adalah 9:1. Variasi waktu reaksi yang digunakan adalah 30 menit, 60 menit, 90 menit, 120 menit, 150 menit dengan kecepatan pengadukan 450 rpm pada 65 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu yang optimal pada penelitian ini adalah 150 menit dengan hasil yield biodiesel 63,64%.

Kata kunci: sintesis biodiesel, cangkang telur ayam, sekam padi, CaO/SiO₂, transesterifikasi

ABSTRACT

This research focusses on the synthesis of biodiesel as an alternative fuel to replace diesel oil which can be produced from vegetable oil or animal fat as renewable and sustainable fuel. This study was conducted to determine the effect of stirring time in the manufacture of biodiesel on the effectiveness of the CaO/SiO₂ catalyst from egg shell waste and rice husks in the transesterification process. The control variables in this study were raw materials taken from rice husk waste and chicken egg shell waste, and the mole ratio of used cooking oil: methanol used was 9:1. The variation of stirring time used was 30 minutes, 60 minutes, 90 minutes, 120 minutes, 150 minutes with a stirring speed of 450 rpm at 65°C. The results showed that the optimal time in this study was 150 minutes with a biodiesel yield of 63.64%.

Keyword: synthesis biodiesel, chicken egg shell, rice husk, CaO/SiO₂, transesterification



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
<https://doi.org/10.32734/jtk.v15i1.22313>

1. Pendahuluan

Pertumbuhan jumlah penduduk dan perkembangan industri global menyebabkan peningkatan konsumsi energi secara signifikan. Di Indonesia, berdasarkan data Kementerian ESDM, konsumsi bahan bakar minyak mencapai 29,68 juta kiloliter pada tahun 2022, naik sekitar 27% dibandingkan tahun sebelumnya. Secara global, permintaan energi diproyeksikan meningkat hingga 53% pada tahun 2030 [1]. Ketergantungan yang

tinggi terhadap bahan bakar fosil tidak hanya menimbulkan kekhawatiran terhadap ketersediaan energi di masa depan, tetapi juga terhadap dampak lingkungan yang ditimbulkan [2]. Sebagai solusi alternatif yang berkelanjutan, biodiesel yang berasal dari sumber daya hayati terbarukan menjadi sorotan dalam upaya mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Selain bersifat ramah lingkungan, biodiesel juga berpotensi memberikan dampak ekonomi positif melalui pemanfaatan limbah organik [3]. Namun, proses produksi biodiesel masih menghadapi berbagai tantangan, terutama dalam hal efisiensi konversi dan biaya produksi. Oleh karena itu, pengembangan teknologi produksi yang lebih efisien menjadi krusial, salah satunya melalui penggunaan katalis heterogen [4], [5].

Katalis heterogen banyak dipilih dalam proses transesterifikasi karena tidak larut dalam reaktan, dapat digunakan kembali, serta tidak memerlukan kondisi reaksi yang kompleks [6]. Salah satu kombinasi katalis heterogen yang menjanjikan adalah kalsium oksida (CaO) dan silikon dioksida (SiO₂). Kalsium oksida dikenal sebagai katalis basa padat yang aktif, sementara SiO₂ memiliki karakteristik sebagai pendukung (*support*) yang meningkatkan kestabilan dan distribusi katalis [7].

Berbagai sumber bahan alami telah digunakan untuk sintesis CaO dan SiO₂, seperti kulit telur sebagai sumber CaO dan sekam padi sebagai sumber SiO₂ [8], [9]. Cangkang telur sebagai sumber CaO didasarkan pada kandungan kalsium karbonat yang sangat tinggi ($\pm 94\text{--}97\%$), sehingga berpotensi menghasilkan CaO berkualitas setelah proses kalsinasi. Sementara itu, sekam padi dipilih sebagai sumber SiO₂ karena ketersediaannya yang melimpah di Indonesia, dengan kandungan silika mencapai $\pm 80\text{--}90\%$ setelah perlakuan termal. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa rendemen biodiesel tinggi ($>90\%$) dapat dicapai dengan katalis dari limbah ini, seperti pada rasio metanol:minyak 12:1, suhu 65°C, dan waktu reaksi 90 menit [2], [10]. Meskipun demikian, integrasi dua sumber limbah tersebut ke dalam satu sistem katalis masih terbatas, dan studi tentang karakterisasi serta efektivitas katalis CaO/SiO₂ hasil sintesis dari limbah organik lokal masih perlu dikembangkan.

Selain itu, salah satu parameter penting yang dapat memengaruhi reaksi transesterifikasi yaitu waktu reaksi. Pada katalis heterogen seperti CaO/SiO₂, waktu reaksi sangat berperan dalam meningkatkan kontak antarfasa (minyak, gliserol, dan katalis) sehingga reaksi dapat berlangsung lebih cepat dan efisien. Waktu reaksi yang terlalu singkat akan menyebabkan reaksi belum berjalan secara optimal, sedangkan jika terlalu lama, maka dapat menurunkan hasil yield biodiesel karena memungkinkan terjadinya saponifikasi. Studi terhadap variabel waktu reaksi menjadi penting dalam mendapatkan kondisi operasi pada reaksi yang paling optimal [2], [11].

Pemilihan limbah biomassa seperti cangkang telur dan sekam padi ini tidak hanya murah dan mudah diperoleh, tetapi juga berkontribusi pada prinsip ekonomi sirkular dengan memanfaatkan limbah lokal yang selama ini kurang dimanfaatkan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengarakterisasi katalis heterogen CaO/SiO₂ dari cangkang telur dan sekam padi, serta menguji efektivitasnya dalam proses transesterifikasi minyak jelantah menjadi biodiesel. Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan teknologi produksi biodiesel yang murah dan ramah lingkungan.

2. Metode

Bahan

Limbah sekam padi diperoleh dari penggilingan padi di Desa Margasari, Kecamatan Karawang Timur, Kabupaten Karawang. Sedangkan limbah cangkang telur dan minyak jelantah diperoleh dari sisa limbah penjual makanan di wilayah Karawang. Bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini adalah kalium hidroksida (KOH), natrium hidroksida (NaOH) 6%, dan metanol.

Peralatan

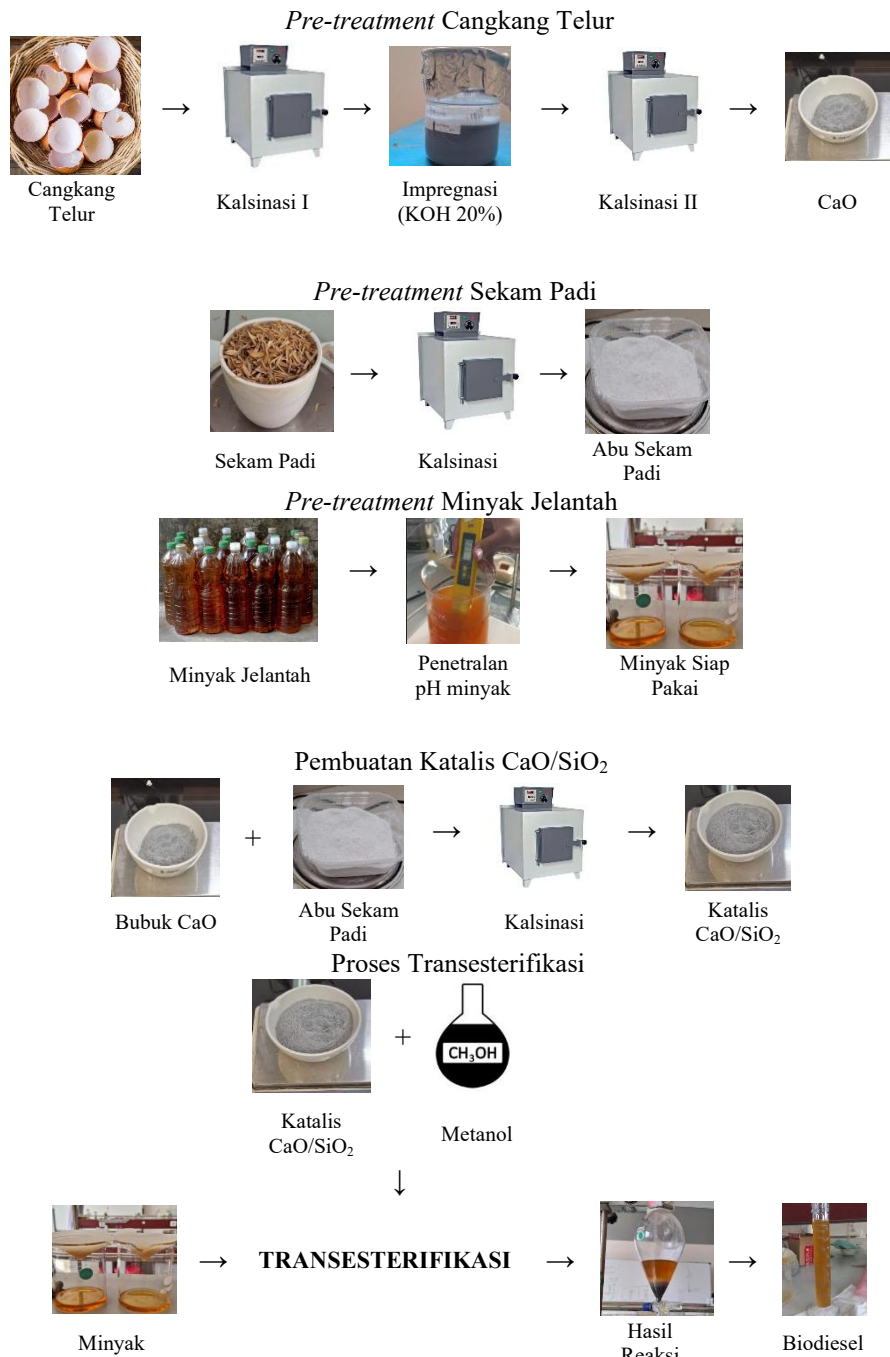
Peralatan yang digunakan pada penelitian ini yaitu labu leher tiga berukuran 500 mL yang dilengkapi dengan kondensor reflux, termometer, dan *hotplate magnetic stirrer* sebagai rangkaian pada reaksi transesterifikasi. Sementara itu, peralatan analisis yang digunakan meliputi *Fourier Transform Infrared* (FT-IR) 4600 ATR PRO ONE, *Scanning Electron Microscope* (SEM) Hitachi SU3500, *Brunauer-Emmett-Teller* (BET), piknometer, dan viskometer Ostwald.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1, dimana tahapan awal pada cangkang telur dibersihkan terlebih dahulu dan dikeringkan pada suhu 110 °C selama 24 jam. Cangkang telur yang telah kering dihaluskan dan diayak dengan ukuran 65 mesh. Selanjutnya, dilakukan proses kalsinasi pertama pada suhu 800 °C selama 4 jam. CaO yang telah terbentuk akan diimpregnasi dengan KOH sebesar 20% terhadap massa CaO pada suhu 60 °C selama 2 jam. Setelah diimpregnasi, cangkang telur dikeringkan selama 1 jam pada suhu 100 °C dan dikalsinasi kembali pada suhu 450 °C selama 4 jam.

Sekam padi direndam dengan air panas lalu dipisahkan dari bagian yang tenggelam. Sekam padi dikeringkan dan dikalsinasi pada suhu 800 °C selama 5 jam hingga terbentuk abu sekam padi. Selanjutnya, abu sekam padi dihaluskan hingga membentuk permukaan yang sama dan dapat digunakan sebagai katalis pendukung. Hasil ekstraksi sekam padi dan cangkang telur dihomogenkan dengan perbandingan massa 2:1. Campuran CaO/SiO₂ dikalsinasi pada suhu 800 °C selama 4 jam untuk mengaktifkan katalis, membantu pembentukan struktur katalis yang diinginkan, dan meningkatkan aktivitas katalitiknya.

Minyak jelantah dipanaskan terlebih dahulu untuk menghilangkan kadar air, kemudian ditambahkan larutan NaOH sebesar 6% dari massa minyak untuk menetralkan pH minyak. Selanjutnya, minyak disaring untuk memisahkan kotoran dan diperoleh minyak siap pakai. Proses produksi biodiesel dilakukan dengan reaksi transesterifikasi. Proses transesterifikasi berlangsung antara minyak dan metanol dengan perbandingan rasio molar 1:9 dan penambahan 4% katalis CaO/SiO₂ dari berat minyak. Proses transesterifikasi dilakukan dengan variasi waktu reaksi selama 30, 60, 90, 120, dan 150 menit pada kecepatan pengadukan 450 rpm dan suhu reaksi 65 °C. Selanjutnya, campuran akan dimasukkan ke dalam corong pisah selama satu malam untuk memisahkan biodiesel, gliserol, dan katalis, lalu disaring untuk mendapatkan hasil biodiesel.

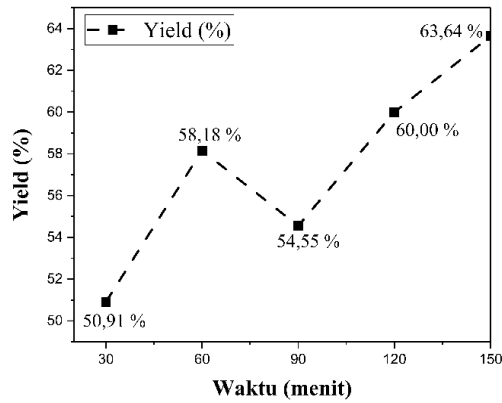


Gambar 1. Skema metode produksi biodiesel

3. Hasil dan Pembahasan

Pengaruh Waktu reaksi terhadap Yield Biodiesel

Penggunaan katalis sebanyak 2 gram menghasilkan peningkatan hasil biodiesel secara bertahap seiring dengan bertambahnya waktu reaksi. Berdasarkan hasil uji yield yang ditunjukkan pada Gambar 2, dalam 30 menit pertama, yield mencapai 50,91% dan terus meningkat hingga mencapai nilai tertinggi sebesar 63,64% pada menit ke-150. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah katalis yang lebih sedikit dan waktu reaksi yang lebih lama dapat meningkatkan efisiensi reaksi transesterifikasi.



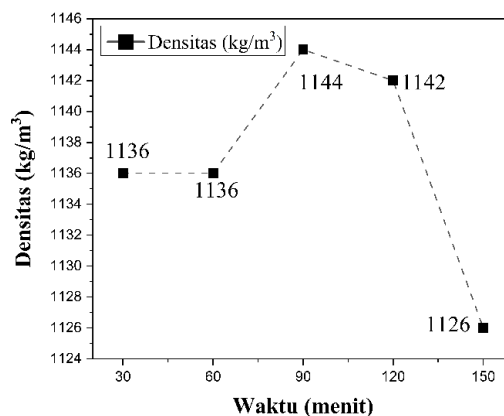
Gambar 2. Pengaruh waktu reaksi terhadap yield

Waktu reaksi berperan penting dalam memastikan pencampuran yang optimal antara minyak dan alkohol, dua fase yang tidak dapat bercampur [12]. Jika waktu reaksi terlalu singkat, reaksi tidak berjalan sempurna sehingga yield rendah. Sebaliknya, waktu reaksi yang terlalu lama dapat menyebabkan reaksi samping seperti saponifikasi atau degradasi metil ester yang justru dapat menurunkan yield.

Pada tahap awal, yield meningkat dengan cepat karena reaksi berlangsung secara aktif. Namun, pada menit ke-90 terjadi penurunan yield menjadi 54,55%. Fluktuasi ini disebabkan oleh terbentuknya emulsi sementara pada biodiesel, gliserol, dan metanol yang menyulitkan proses pemisahan sehingga yield terukur lebih rendah. Seiring berjalannya waktu, emulsi tersebut pecah dan reaksi berlangsung hingga mencapai nilai tertinggi sebesar 63,64% pada menit ke-150 [13]. Waktu reaksi yang terlalu lama juga meningkatkan potensi reaksi samping. Jika katalis basa seperti NaOH atau KOH digunakan, energi kinetik berlebih dalam sistem dapat mempercepat pembentukan sabun, yang menyulitkan pemisahan biodiesel dari gliserol sebagai produk sampingan [14]. Oleh karena itu, optimasi waktu reaksi sangat penting untuk memperoleh yield biodiesel yang maksimal tanpa menimbulkan reaksi samping yang merugikan [15]

Pengaruh Waktu reaksi Terhadap Densitas

Pengujian densitas biodiesel bertujuan untuk memastikan kemurnian biodiesel. Nilai densitas diukur pada suhu 40 °C dan tekanan ruangan. Berdasarkan hasil uji densitas yang ditunjukkan pada Gambar 3, densitas biodiesel mengalami fluktuasi seiring dengan meningkatnya waktu reaksi. Densitas terendah terdapat pada waktu reaksi 150 menit dengan jumlah katalis sebanyak 2 g, yaitu sebesar 1126 kg/m³.



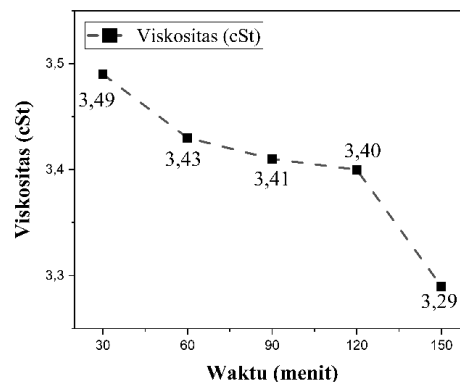
Gambar 3. Pengaruh waktu reaksi terhadap densitas

Fluktuasi pada menit ke-90 terjadi akibat adanya gliserol yang terdispersi dalam biodiesel sehingga nilai densitas sementara meningkat. Namun, pada waktu reaksi yang lebih lama, gliserol semakin terpisah dari biodiesel sehingga densitas menurun. Hal ini menunjukkan bahwa waktu reaksi berpengaruh terhadap densitas biodiesel selama proses transesterifikasi. Waktu reaksi memengaruhi densitas biodiesel saat proses transesterifikasi. Semakin lama waktu reaksi maka suhu proses meningkat dan densitas menurun, hal ini sejalan dengan penelitian [16], yaitu dari 951,43 kg/m³ pada waktu reaksi 2 menit menjadi 913,53 kg/m³ pada waktu reaksi 6 menit.

Penurunan densitas tersebut mencerminkan reaksi transesterifikasi yang sedang berlangsung, dimana densitas yang semula tinggi karena trigliserida belum bereaksi secara sempurna. Pengadukan yang semakin lama akan menghasilkan pencampuran yang lebih homogen, namun apabila terlalu singkat atau terlalu lama, reaksinya mungkin tidak optimal atau terjadi pemisahan fasa [17]. Pada menit ke-150 terjadi penurunan densitas yang cukup signifikan, yang menunjukkan bahwa fraksi biodiesel dengan densitas lebih rendah semakin dominan dalam campuran. Hal ini menandakan reaksi transesterifikasi semakin homogen dan konversi trigliserida menuju biodiesel berlangsung lebih optimal. Namun, karena hasil yang telah dilakukan masih dalam bentuk crude oil biodiesel, maka hasil densitasnya masih belum memenuhi standar SNI 7182:2015 (0,85–0,89 g/mL pada suhu 40 °C).

Pengaruh Waktu reaksi terhadap Viskositas

Berdasarkan hasil uji viskositas yang ditunjukkan pada Gambar 4, viskositas biodiesel menurun dari 3,49 cSt menjadi 3,29 cSt. Hal ini menunjukkan bahwa viskositas biodiesel yang dihasilkan memenuhi baku mutu yang ditetapkan oleh SNI 7182:2015, yang menetapkan kisaran viskositas 2,3 – 6 cSt pada suhu 40 °C.



Gambar 4. Pengaruh waktu reaksi terhadap viskositas

Penurunan viskositas ini menunjukkan bahwa proses pengadukan berpengaruh terhadap kestabilan fluida biodiesel. Pengadukan yang lebih lama memungkinkan terjadinya distribusi molekul yang lebih merata, sehingga mengurangi hambatan aliran dan menurunkan viskositas. Namun, dari pola penurunan yang terjadi, dapat diamati bahwa setelah titik tertentu, laju penurunan viskositas semakin berkurang, yang mengindikasikan bahwa sistem mulai mencapai keseimbangan.

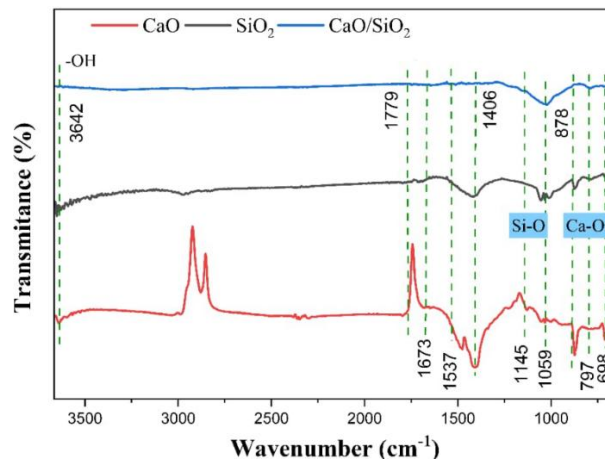
Karakterisasi Katalis CaO/SiO₂ dari Hasil FT-IR

Identifikasi senyawa kimia menggunakan spektrofotometer *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsional pada material utama, yaitu cangkang telur (CaO), sekam padi (SiO₂), dan CaO/SiO₂. Spektrum hasil analisis FTIR dapat dilihat pada Gambar 5.

Cangkang telur yang sudah diimpregnasi dengan KOH selama 2 jam dan dikalsinasi selama 4 jam pada suhu 450°C. Bilangan gelombang perengangan O-H ditemukan pada 3642,3357 cm⁻¹. Keberadaan gugus ini menandakan adanya situs aktif pada permukaan katalis yang dapat meningkatkan interaksi awal dengan metanol dan minyak dalam proses transesterifikasi. Gugus hidroksil (O–H) pada permukaan CaO/SiO₂ berperan penting dalam proses reaksi dan mendukung aktivitas katalitik [8], [18].

Bilangan gelombang pada 1479–1406 cm⁻¹ mengindikasikan keberadaan gugus karbonat (CaCO₃) yang terbentuk akibat interaksi CaO dengan CO₂ atmosfer. Hal ini diperkuat dengan adanya penyerapan luas pada 878 cm⁻¹ yang juga berhubungan dengan gugus C–O. Hasil sintesis SiO₂ menunjukkan beberapa bilangan gelombang khas yang mengindikasikan pembentukan silika dari bahan baku sekam padi. Bilangan gelombang khas SiO₂ teridentifikasi sekitar 1145–1059 cm⁻¹, yang mengindikasikan adanya regangan asimetris

(*asymmetric stretching*) Si–O–Si. Puncak ini merupakan ciri utama struktur silika *amorf* hasil ekstraksi dari sekam padi, sehingga mengonfirmasi keberhasilan pembentukan fase silika dalam material katalis [3], [19].



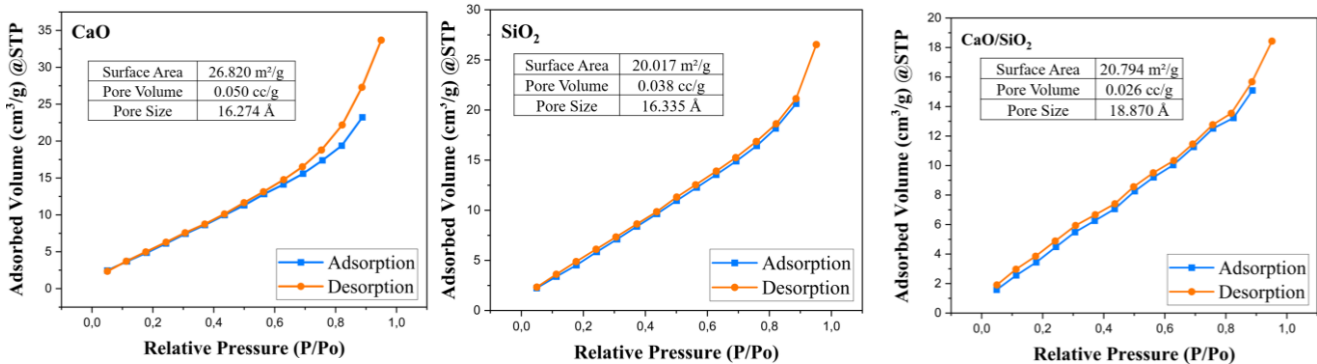
Gambar 5. Hasil FT-IR CaO, SiO₂, katalis CaO/SiO₂

Munculnya ikatan Ca-O-Si dalam material CaO/SiO₂ memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap sifat katalitiknya. Dalam reaksi transesterifikasi, gugus basa kuat yang berasal dari CaO dapat mengaktivasi molekul metanol, dan permukaan silika dapat berperan sebagai pendukung dalam menjaga Ca²⁺ secara merata. Bilangan gelombang yang masih muncul dalam spektrum FT-IR menunjukkan masih adanya basa yang penting untuk efisiensi reaksi. Penggabungan dari material CaO dan SiO₂ menghasilkan material komposit yang memiliki potensi tinggi sebagai katalis basa heterogen dan memungkinkan untuk digunakan dalam aplikasi reaksi kimia dengan regenerasi katalis yang lebih baik.

Karakterisasi Katalis CaO/SiO₂ dari Hasil BET

Hasil analisis katalis CaO, SiO₂, dan CaO/SiO₂ menggunakan analisis *Brunauer –Emmett –Teller* (BET) menunjukkan karakteristik tekstur katalis, meliputi luas permukaan spesifik, volume pori, dan radius pori, yang berperan penting dalam efektivitas reaksi transesterifikasi. Bentuk analisis ini menunjukkan pola yang mirip dengan isotherm tipe IV menurut klasifikasi *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), dan pola ini menggambarkan permukaan material yang memiliki pori terbuka dan cukup besar seperti mesopori (2–50 nm) hingga makropori (lebih dari 50 nm).

Grafik isotherm adsorpsi dan desorpsi pada Gambar 6 menunjukkan bahwa jumlah gas yang teradsorpsi meningkat seiring dengan meningkatnya tekanan relatif (P/P₀). Pada tekanan tinggi, volume adsorpsi gas mencapai titik maksimum, yang menandakan bahwa sebagian besar pori telah terisi penuh oleh gas nitrogen. Kurva desorpsi yang mengikuti pola serupa dengan adsorpsi menunjukkan bahwa struktur pori cukup stabil, tanpa indikasi perubahan signifikan selama proses adsorpsi dan desorpsi.



Gambar 6. Hasil N₂ adsorption-desorption isotherm CaO, SiO₂, katalis CaO/SiO₂

Hasil analisis BET katalis ditunjukkan pada Tabel 1 bahwa data yang diperoleh menunjukkan bahwa CaO memiliki luas permukaan, volume pori, dan jari-jari pori yang lebih tinggi, yaitu 26,820 m²/g, 0,05211 cc/g, dan 38,86 nm. Penggabungan antara CaO dan SiO₂ menyebabkan penurunan pada luas permukaan, volume pori, dan jari-jari pori. Hal tersebut terjadi karena pengisian pori-pori pada SiO₂ oleh partikel CaO selama proses impregnasi menyebabkan sebagian pori tertutup. Jari-jari pori dengan rata-rata yang lebih besar akan

memudahkan difusi molekuler reaktan sehingga reaktan molekuler dengan mudah menyerap ke dalam katalis dan sebagian besar situs aktif akan digunakan selama reaksi transesterifikasi [4]. Namun, katalis tersebut masih berada dalam rentang mesopori (2-50 nm), dimana hal tersebut sesuai untuk transesterifikasi dan mampu mengakomodasi molekul yang besar seperti trigliserida [20]. Penurunan jari-jari pori dapat terjadi akibat terjadinya rekonstruksi struktur pori ketika penggabungan katalis.

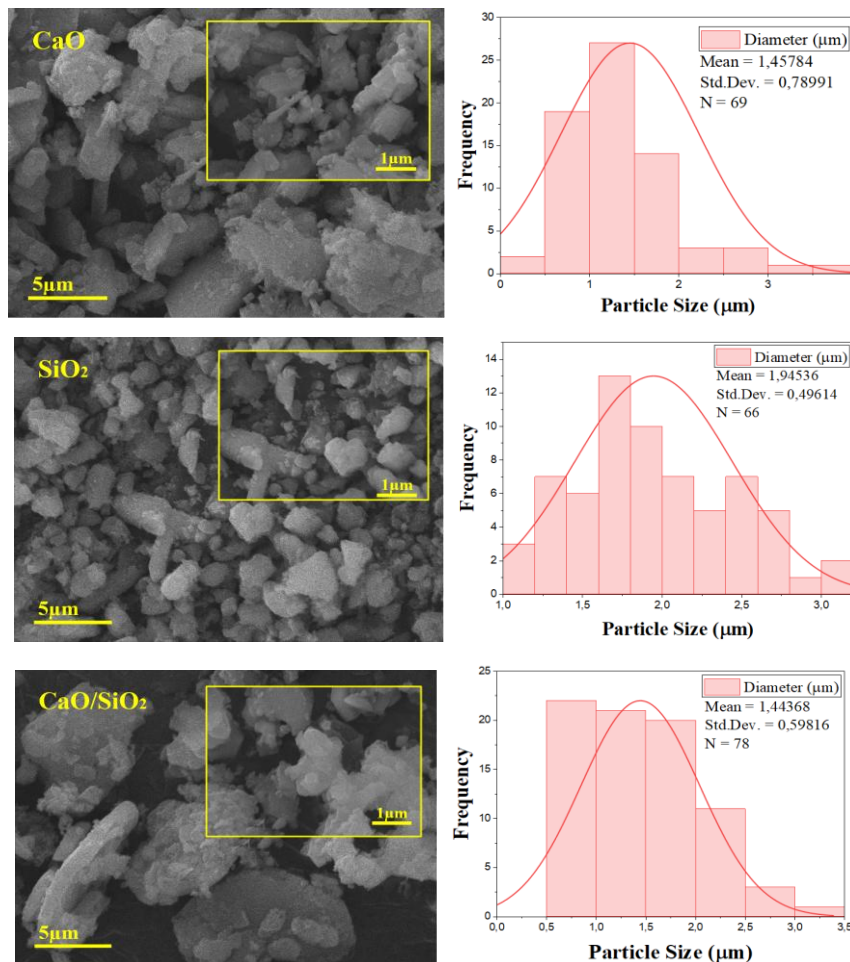
Tabel 1. Hasil analisis luas permukaan, volume pori, jari-jari pori pada CaO, SiO₂, CaO/SiO₂

Katalis	Luas Permukaan (m ² /g)	Volume Pori (cc/g)	Jari-jari Pori (nm)
CaO	26,820	5,211×10 ⁻²	38,86
SiO ₂	26,017	4,103×10 ⁻²	31,5422
CaO/ SiO ₂	20,794	2,851×10 ⁻²	31,5422

Karakterisasi Katalis CaO/SiO₂ dari Hasil SEM

Hasil analisis SEM pada katalis CaO/SiO₂ menunjukkan adanya interaksi antara kedua jenis partikel tersebut. Partikel CaO tampak terdispersi di antara struktur silika, dan meskipun masih terjadi aglomerasi, intensitasnya lebih rendah dibandingkan dengan CaO murni. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan SiO₂ mampu menghambat proses aglomerasi yang berlebihan melalui stabilisasi permukaan dan peningkatan jarak antarpartikel aktif. Morfologi campuran ini menghasilkan struktur yang lebih padat tetapi masih memiliki keteraturan dan porositas yang lebih baik dibandingkan dengan CaO murni.

Hasil analisis yang ditunjukkan pada Gambar 7 menunjukkan distribusi ukuran partikel katalis CaO, SiO₂, dan CaO/SiO₂ yang diameter partikelnya berada pada kisaran 1–5 μm, yang diukur menggunakan program ImageJ dengan 78 partikel terpilih. Katalis CaO/SiO₂ ini menunjukkan morfologi yang mendukung penerapannya dalam reaksi katalitik heterogen. Struktur berpori dan luas permukaan yang tinggi memungkinkan molekul reaktan berinteraksi secara efektif.



Gambar 7. Hasil SEM CaO, SiO₂, katalis CaO/SiO₂

4. Kesimpulan

Karakterisasi katalis CaO/SiO₂ menunjukkan bahwa metode kombinasi dengan menghomogenkan cangkang telur dan sekam padi berhasil menghasilkan material dengan struktur yang mengandung aktivitas katalitik dalam reaksi transesterifikasi. Hal ini didukung oleh hasil analisis SEM yang mengonfirmasi adanya distribusi unsur Ca dan Si yang merata, yang mendukung pembentukan struktur komposit yang homogen. Hasil analisis BET menunjukkan bahwa katalis CaO/SiO₂ termasuk dalam struktur mesopori dan menunjukkan nilai tinggi dalam aktivasi katalitik. Spektrum FTIR mengonfirmasi terbentuknya gugus fungsi khas Si-O-Si dan Ca-O yang menunjukkan bahwa cangkang telur dan sekam padi berhasil diekstraksi menjadi katalis.

Berdasarkan hasil analisis sintesis biodiesel, diperoleh kondisi optimum terjadi pada waktu reaksi 150 menit dengan konsentrasi katalis sebesar 4% yang menghasilkan yield tertinggi sebesar 63,64%. Peningkatan waktu reaksi juga diikuti dengan penurunan nilai densitas dan viskositas yang menunjukkan reaksi transesterifikasi berlangsung lebih sempurna. Namun, nilai densitas dan viskositas yang diperoleh masih melebihi batas yang ditetapkan dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) biodiesel, yaitu densitas 0,85–0,89 g/mL dan viskositas 2,3–6,0 cSt pada suhu 40 °C. Hal ini dikarenakan produk yang dihasilkan masih berupa *crude* biodiesel sehingga diperlukan proses pemurnian lebih lanjut agar memenuhi standar mutu yang berlaku.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Kimia Universitas Singaperbangsa Karawang atas dukungan akademik dan fasilitas laboratorium yang disediakan selama proses penelitian dan kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) atas kontribusinya dalam pelaksanaan karakterisasi katalis.

6. Konflik Kepentingan

Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) pada publikasi artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] L. Cozzi dan T. Gould, *World Energy Outlook 2021*. 2021.
- [2] D. Singh, D. Sharma, S. L. Soni, C. S. Inda, S. Sharma, P. K. Sharma, A. Jhalani, “A comprehensive review of biodiesel production from waste cooking oil and its use as fuel in compression ignition engines: 3rd generation cleaner feedstock,” *J. Clean. Prod.*, vol. 307, no. May 2020, p. 127299, 2021.
- [3] S. S. Owoeye, D. O. Folorunso, F. Aramide, S. G. Borisade, dan O. Olaniran, “Processing and characterization of biogenic SiO₂ and CaO from rice husks and eggshell waste materials,” *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 26, no. 3, pp. 1505–1516, 2024.
- [4] M. Mofijur, Sk. Y. A. Siddiki, Md. B. A. Shuvho, F. Djavanroodi, I. M. R. Fattah, H. C. Ong, M. A. Chowdhury, T. M. I. Mahlia, “Effect of nanocatalysts on the transesterification reaction of first, second and third generation biodiesel sources- A mini-review,” *Chemosphere*, vol. 270, p. 128642, 2021.
- [5] R. Manurung, S. Z. D. M. Parinduri, R. Hasibuan, B. H. Tarigan, dan A. G. A. Siregar, “Synthesis of nano-CaO catalyst with SiO₂ matrix based on palm shell ash as catalyst support for one cycle developed in the palm biodiesel process,” *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 7, no. March, p. 100345, 2023.
- [6] I. M. R. Fattah, H. C. Ong, T. M. I. Mahlia, M. Mofijur, “State of the art of catalysts for biodiesel production,” *Front. Energy Res.*, vol. 8, pp. 0–17, 2020.
- [7] 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, pp. 1976–1984, 2023.
- [8] S. Elfina, K. D. Pdaniangan, N. Jamarun, F. Subriadi, H. Hafnimardiyanti, dan R. Roswita, “Transesterification of palm oil catalyzed by CaO/SiO₂ prepared from limestone dan rice husk silica,” *J. Multidiscip. Appl. Nat. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 49–57, 2024.
- [9] 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,” *Beta Kim.*, vol. 1, no. November, pp. 64–77, 2021.
- [10] 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, pp. 490–497, 2021.
- [11] A. Ahmed Elgharbawy, W. Sadik, O. Sadek, dan M. Kasaby, “Transesterification reaction conditions and low-quality feedstock treatment processes for biodiesel production- A review,” *J. Pet. Min. Eng.*, vol. 23, no. 1, pp. 98–103, 2021.
- [12] J. Yamin, Z. Al-Hamamre, dan A. Sdanouqa, “Modelling and optimisation of biodiesel production using waste cooking oil using the response surface methodology,” *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 1–

23, 2024.

- [13] F. Zheng dan H. M. Cho, “Study on biodiesel production: feedstock evolution, catalyst selection, and influencing factors analysis,” *Energies*, vol. 18, no. 10, 2025.
- [14] A. S. Silitonga, T.M.I. Riayatsyah, Md. A. Kalam, A. Sarifudin, I.M.R. Fattah, O. Muraza, N. S. D. Putra, A. R. Sebayang, A. H. Sebayang, H. Hermawan, “Status, developments, and sustainability of biowaste feedstock: A review of current progress,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 217, p. 115769, 2025.
- [15] S. Suherman, I. Abdullah, M. Sabri, dan A. S. Silitonga, “Evaluation of physicochemical properties composite biodiesel from waste cooking oil and *Schleichera oleosa* oil,” *Energies*, vol. 16, no. 15, pp. 1–20, 2023.
- [16] R. P. Samudra, B. Susilo, L. C. Hawa, dan W. N. F. Azra, “Transesterification of kapok (*Ceiba pentandra*) oil using sonication,” *BIO Web Conf.*, vol. 123, pp. 1–8, 2024.
- [17] S. S. Almady, A. I. Moussa, M. M. Deef, M. F. Zayed, S. M. Al-Sager, dan A. M. Aboukarima, “Biodiesel production through the transesterification of non-edible plant oils using glycerol separation technique with ac high voltage,” *Sustain.*, vol. 16, no. 7, 2024.
- [18] 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, pp. 1976–1984, 2023, doi: 10.21123/bsj.2023.7895.
- [19] A. Rodriguez-Otero, V. Vargas, A. Galarnau, J. Castillo, J. H. Christensen, dan B. Bouyssiere, “Sustainable harnessing of SiO₂ nanoparticles from rice husks: A review of the best synthesis and applications,” *Processes*, vol. 11, no. 12, 2023.
- [20] S. Basumatary, B. Nath, B. Das, P. Kalita, dan B. Basumatary, “Utilization of renewable and sustainable basic heterogeneous catalyst from *Heteropanax fragrans* (Kesseru) for effective synthesis of biodiesel from *Jatropha curcas* oil,” *Fuel*, vol. 286, p. 119357, 2021.