

Analisis Pengaruh Variasi Katalis CaO Dari Tulang Sapi Terhadap Konversi Minyak Jelantah Menjadi Biodiesel Melalui Transesterifikasi

Elizabeth Desfelia Ciciolini Sidabutar¹, Rizqy Romadhona Ginting¹, Fika Dwi Oktavia¹,
Yongki Christandi Batubara², Arini Anestesia Purba³, Hendrik Vicarlo Saragih Manihuruk⁴,
Arturito Tri Setiawan¹, Zain Achmad Kahfi¹, Vanessa Keysia Imanuella Mampow¹, dan
Naufal Rakha Ramdhani¹

¹Teknik Kimia, Fakultas Rekayasa dan Teknik Industri, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia

²Teknik Mesin, Fakultas Rekayasa dan Teknik Industri, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia

³Teknik Industri, Fakultas Rekayasa dan Teknik Industri, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia

⁴Teknik Logistik, Fakultas Rekayasa dan Teknik Industri, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia

elizabeth.sidabutar@lecturer.itk.ac.id, rizqy.ginting@lecturer.itk.ac.id, fika.oktavia@lecturer.itk.ac.id,

yongki.batubara@lecturer.itk.ac.id, arini.anestesia@lecturer.itk.ac.id, hendrik.manihuruk@lecturer.itk.ac.id,

05221075@student.itk.ac.id, 05221022@student.itk.ac.id, 05221062@student.itk.ac.id, 05221070@student.itk.ac.id

Abstrak

Produksi biodiesel dari minyak jelantah masih menghadapi kendala akibat tingginya kandungan asam lemak bebas (*free fatty acid*, FFA) yang dapat memicu reaksi saponifikasi dan menurunkan efektivitas katalis. Penggunaan katalis heterogen CaO berbasis limbah tulang sapi menjadi alternatif potensial karena memiliki toleransi lebih baik terhadap FFA. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh rasio molar metanol:minyak 5:1 dan 12:1, suhu kalsinasi katalis CaO 800°C dan 1000°C, waktu kalsinasi 3, 5, dan 7 jam, serta konsentrasi katalis 4 wt% dan 6 wt% terhadap yield biodiesel dari minyak jelantah. Katalis CaO disintesis dari tulang sapi melalui proses kalsinasi dan digunakan pada reaksi transesterifikasi selama 1 jam. Yield biodiesel digunakan sebagai indikator utama untuk mengevaluasi pengaruh parameter kalsinasi dan kondisi transesterifikasi. Hasil menunjukkan bahwa rasio molar 12:1 menghasilkan konversi lebih tinggi dibandingkan 5:1. Kondisi optimum diperoleh pada suhu kalsinasi 1000°C selama 5 jam dengan konsentrasi katalis 4–6 wt%, menghasilkan yield maksimum sebesar 73%. Peningkatan yield dari 46% menjadi 73% menunjukkan bahwa suhu kalsinasi yang lebih tinggi meningkatkan pembentukan CaO aktif dan situs basa O²⁻ yang berperan dalam pembentukan ion metoksida selama reaksi transesterifikasi. Katalis CaO berbasis tulang sapi efektif untuk produksi biodiesel tanpa esterifikasi awal.

Kata kunci : biodiesel, minyak jelantah, katalis CaO, kalsinasi, transesterifikasi.

Abstract

Biodiesel production from waste cooking oil is challenged by its high free fatty acid (FFA) content, which can promote saponification and reduce catalyst performance. Heterogeneous CaO catalyst derived from bovine bone waste offers a promising alternative due to its higher tolerance toward FFA. This study investigated the effects of methanol-to-oil molar ratios (5:1 and 12:1), catalyst calcination temperatures (800°C and 1000°C), calcination times (3, 5, and 7 h), and catalyst concentrations (4 and 6 wt%) on biodiesel yield from waste cooking oil. CaO catalyst was synthesized from bovine bones through calcination and applied in a 1 h transesterification reaction. Biodiesel yield was used to evaluate the influence of calcination and reaction conditions. The results showed that the 12:1 molar ratio provided higher conversion than the 5:1 ratio. The optimum condition was obtained at a calcination temperature of 1000°C for 5 h with a catalyst concentration of 4–6 wt%, yielding a maximum biodiesel yield of 73%. The increase in yield from 46% to 73% indicates enhanced formation of active CaO and O²⁻ basic sites, which facilitate methoxide ion generation during transesterification. These findings demonstrate the potential of bovine bone-derived CaO catalyst for biodiesel production without esterification.

Keywords: biodiesel, waste cooking oil, CaO catalyst, calcination, transesterification.

1. Pendahuluan

Energi berkelanjutan merupakan prasyarat penting bagi pembangunan, sehingga transisi dari bahan bakar fosil menuju sumber energi yang lebih bersih menjadi semakin mendesak (Azni dkk., 2023). Proyeksi menunjukkan bahwa pada tahun 2030 produksi minyak global hanya mencapai sekitar 100 juta barel per hari, sementara kebutuhan

Info Makalah:

Dikirim : 02-15-26;

Revisi 1 : 05-07-26;

Diterima : 05-16-26.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-81254784059

e-mail : elizabeth.sidabutar@lecturer.itk.ac.id

diperkirakan melebihi kapasitas tersebut hingga menimbulkan defisit ±10 juta barel per hari (Al-Yasiri, 2021). Kondisi ini menegaskan perlunya sumber energi alternatif yang tidak hanya lebih bersih, tetapi juga mampu memperkuat ketahanan energi global, terutama ketika permintaan energi diproyeksikan meningkat 53% dan permintaan minyak sebesar 6% pada tahun yang sama (Wan Osman dkk., 2024). Tekanan terhadap lingkungan juga terus meningkat, terutama di negara-negara besar seperti Tiongkok, India, dan Amerika Serikat yang

mengalami penurunan sumber daya alam serta lonjakan emisi gas rumah kaca (Wang & Azam, 2024). Di Indonesia, ketergantungan serupa terlihat dari emisi nasional yang mencapai 2.127,22 juta ton CO₂e pada tahun 2022 dan meningkat 10% dibandingkan tahun sebelumnya, sehingga memperkuat urgensi pengembangan energi alternatif yang lebih berkelanjutan (Hanifah & Purbadharmaja, 2025).

Dalam konteks tersebut, biodiesel menjadi salah satu opsi energi terbarukan yang paling relevan karena dapat menggantikan sebagian peran solar tanpa memerlukan modifikasi signifikan pada mesin diesel, serta menawarkan keunggulan teknis seperti sifatnya yang biodegradable, tidak beracun, dan memiliki titik nyala tinggi (Udayakumar dkk., 2024). Biodiesel berbasis minyak jelantah bahkan dilaporkan mampu menurunkan emisi CO hingga 96% dan meningkatkan efisiensi pembakaran sebesar 12,7% dibandingkan solar (Nugroho dkk., 2024). Potensi ketersediaan bahan bakunya juga sangat besar, mengingat sekitar 30% konsumsi minyak goreng per kapita berpotensi menjadi limbah yang dapat dimanfaatkan sebagai *feedstock* biodiesel (Singh dkk., 2021). Di Indonesia, konsumsi minyak goreng mencapai 16,2 juta kiloliter per tahun, menghasilkan ±3 juta kiloliter minyak jelantah atau sekitar 18,5% dari total konsumsi (Ministry of Energy and Mineral Resources [ESDM], 2021). Namun, tingkat pemanfaatannya masih rendah, yaitu sekitar 570.000 kiloliter atau ±19% dari total potensi, sehingga menunjukkan perlunya optimalisasi sistem pengumpulan dan pemrosesan minyak jelantah untuk mendukung ketahanan energi serta mengurangi beban limbah domestik (El-Araby dkk., 2024).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa performa katalis CaO pada produksi biodiesel masih sangat dipengaruhi oleh kondisi preparasi katalis dan parameter reaksi transesterifikasi. Nadya, dkk. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan katalis campuran CaO–NaOH dengan rasio katalis 3:1 dan waktu reaksi 80 menit menghasilkan *yield* biodiesel sebesar 85,16%. *Yield* yang relatif tinggi tersebut dipengaruhi oleh penggunaan NaOH sebagai katalis basa homogen yang dikombinasikan dengan CaO, sehingga aktivitas katalitik tidak hanya berasal dari CaO murni. Sementara itu, Ayoola dkk. (2018) menggunakan katalis CaO berbasis tulang kalkun yang dikalsinasi pada 800°C selama 3 jam dan menghasilkan *yield* biodiesel sekitar 68–69% pada beberapa kondisi reaksi.

Penelitian ini berupaya mengoptimalkan proses transesterifikasi minyak jelantah melalui evaluasi sejumlah parameter operasi secara lebih komprehensif. Variasi yang dianalisis meliputi suhu kalsinasi katalis pada 800 dan 1000°C, massa katalis 4 wt% dan 6 wt%, serta durasi kalsinasi 3, 5, dan 7 jam untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap *yield* biodiesel yang dihasilkan. Parameter-parameter tersebut dipilih karena berperan penting dalam pembentukan fase CaO aktif dan jumlah situs basa katalis yang mempengaruhi aktivitas transesterifikasi. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kondisi preparasi katalis yang kurang optimal dapat menurunkan aktivitas katalitik dan menghasilkan konversi biodiesel yang rendah. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh parameter kalsinasi katalis CaO berbasis tulang sapi terhadap peningkatan *yield* biodiesel dari minyak jelantah serta efektivitas proses transesterifikasi.

2. Metode

2.1. Preparasi Bahan Baku dan Katalis CaO dari Tulang Sapi

Tulang sapi diperoleh dari limbah yang berlokasi di kawasan Kampung Timur, Balikpapan Utara. Sedangkan minyak jelantah diperoleh dari industri kerupuk di kawasan Prapatan, Balikpapan Selatan. Tulang sapi segar terlebih dahulu dibersihkan dari jaringan organik melalui pencucian dengan air mengalir kemudian dijemur, setelah itu tulang tersebut dipotong hingga menjadi potongan-potongan tulang yang kemudian direbus menggunakan *pressure cooker* selama ±3 jam untuk menghilangkan residu lemak dan jaringan lunak. Tulang yang telah bersih dikeringkan pada oven dengan suhu 110 °C selama 2-5 jam hingga kering, kemudian dihancurkan menggunakan *hammer* dan mortar hingga berukuran kecil. Serbuk tulang kemudian dihaluskan dengan *ball mill* dan diayak menggunakan *sieve shaker* berukuran 100 mesh. Tahap kalsinasi dilakukan dengan memanaskan serbuk tulang di dalam *furnace* pada suhu 800 °C dan 1000 °C dengan variasi waktu tahan 3, 5, dan 7 jam. Serbuk CaO hasil kalsinasi disimpan dalam wadah kedap udara untuk mencegah rekarbonasi.



Gambar 1. Preparasi Katalis CaO dari Tulang Sapi

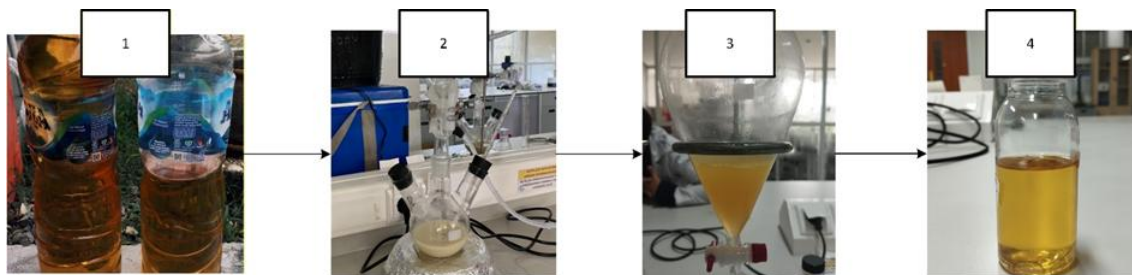
2.2. Persiapan Bahan Baku Minyak Jelantah

Minyak jelantah disaring menggunakan kertas saring untuk menghilangkan kotoran fisik dan residu padat. Minyak yang telah disaring kemudian diuji kandungan asam lemak bebas (FFA) melalui titrasi menggunakan larutan NaOH 0,1 N untuk memastikan kelayakan minyak sebagai bahan baku transesterifikasi (Buchori dkk., 2021). Adapun FFA dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\%FFA = \frac{V_{NaOH} \times N_{NaOH} \times Mr_{Minyak\ Jelantah}}{m_{sampel}} \quad (1)$$

2.3. Proses Transesterifikasi Biodiesel

Reaksi transesterifikasi dilakukan dengan mencampurkan minyak jelantah dan metanol sesuai variasi rasio molar (5:1 dan 12:1) serta penambahan katalis CaO sebesar 4 wt% dan 6 wt%. Campuran direaksikan dalam *batch reactor glassware* yang dilengkapi *hot plate stirrer* dengan kecepatan pengadukan 600 rpm pada suhu tetap 65 °C selama 1 jam. Setelah reaksi selesai, campuran dipindahkan ke corong pemisah dan dibiarkan mengendap selama 12 jam hingga terbentuk dua fase: fase atas methanol biodiesel dan fase bawah berupa biodiesel serta sisa gliserol.



Gambar 2. Proses Transesterifikasi Pembuatan Biodiesel

Selanjutnya, biodiesel dipisahkan dan disaring menggunakan kertas saring untuk menghilangkan partikel katalis yang tersisa. Selanjutnya dilakukan pencucian menggunakan air hangat secara perlahan hingga lapisan air bilasan menjadi jernih. Biodiesel kemudian dipanaskan pada suhu 1000 °C selama 30-60 menit untuk menghilangkan sisa air. Produk akhir disimpan dalam botol tertutup sebelum dilakukan karakterisasi.

2.4. Analisis Karakteristik Biodiesel

Karakteristik biodiesel yang dihasilkan dianalisis melalui kandungan asam lemak bebas (FFA) dan perhitungan *yield*. *Yield* biodiesel dihitung berdasarkan massa biodiesel yang diperoleh setelah pemurnian dibandingkan massa minyak awal (Haryanto,dkk , 2015). Rumus perhitungan adalah:

$$\%Yield = \frac{m_{biodiesel}}{m_{minyak}} \quad (2)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis FFA (*Free Fatty Acid*) Konten pada Minyak Jelantah

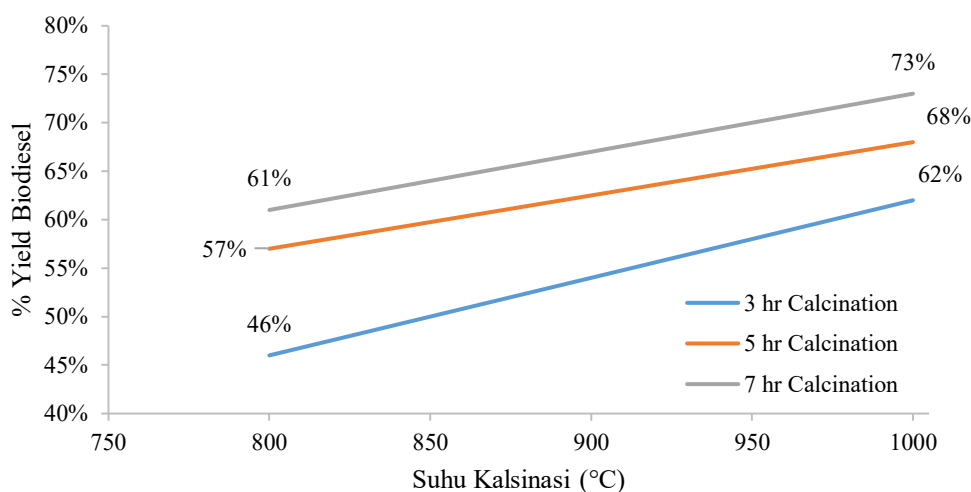
Analisis kadar asam lemak bebas pada minyak jelantah dilakukan untuk mengetahui tingkat degradasi minyak akibat proses pemanasan berulang selama penggorengan. Berdasarkan hasil titrasi pada penelitian ini, menggunakan larutan NaOH 0,1 N, diperoleh volume rata-rata titran sebesar 1,033 mL dengan nilai FFA sebesar 1,82%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa minyak jelantah yang digunakan telah mengalami peningkatan kandungan asam lemak bebas dibandingkan dengan minyak segar. Mohammad dkk. (2015) menyatakan bahwa minyak goreng segar umumnya memiliki nilai FFA di bawah 0,5%, sedangkan penggunaan berulang pada proses penggorengan dapat meningkatkan nilai FFA akibat reaksi hidrolisis dan oksidasi termal.

Peningkatan kadar FFA pada minyak goreng bekas juga ditunjukkan oleh Paase dkk. (2019), di mana proses penggorengan berulang meningkatkan kadar FFA hingga 2–5% akibat degradasi trigliserida selama pemanasan. Meskipun demikian, nilai FFA sebesar 1,82% pada penelitian ini masih tergolong moderat dan masih memungkinkan minyak digunakan langsung pada proses transesterifikasi menggunakan katalis basa heterogen. Azizah, dkk. (2024) menjelaskan bahwa reaksi saponifikasi pada proses transesterifikasi umumnya menjadi signifikan pada minyak dengan kadar FFA di atas 3%, karena asam lemak bebas dapat bereaksi dengan katalis basa membentuk sabun yang menghambat pemisahan biodiesel dan gliserol.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Eze dan Harvey (2018), yang menunjukkan bahwa minyak dengan kandungan FFA sebesar 1–3% masih dapat digunakan sebagai bahan baku biodiesel tanpa proses esterifikasi awal. Pada penelitian ini, minyak jelantah dengan FFA sebesar 1,82% masih dapat ditransesterifikasi menggunakan katalis CaO berbasis tulang sapi dan menghasilkan biodiesel dengan *yield* yang cukup baik. Hal tersebut menunjukkan bahwa kandungan FFA pada minyak belum cukup tinggi untuk menyebabkan reaksi saponifikasi yang dominan selama proses transesterifikasi.

3.2 Pengaruh Suhu Kalsinasi Terhadap *Yield* Biodiesel

Penelitian ini melakukan 2 variabel percobaan pada suhu kalsinasi, yaitu 800°C dan 1000°C, dari hasil percobaan ini dapat dilihat dari grafik berikut.



Gambar 3. Pengaruh Suhu Kalsinasi Terhadap *Yield* Biodiesel
(Berat Katalis = 4wt%, Waktu Transesterifikasi = 1hr, Rasio Molar = 12:1; T = 65°C)

Dari hasil yang diperoleh variasi suhu kalsinasi memberikan dampak yang signifikan terhadap aktivitas katalis CaO yang dihasilkan dari tulang sapi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3, Berdasarkan data percobaan, peningkatan suhu kalsinasi dari 800°C menjadi 1000°C secara konsisten meningkatkan *yield* biodiesel untuk seluruh waktu kalsinasi (3, 5, dan 7 jam). Pada suhu 800°C, *yield* biodiesel masing-masing tercatat sebesar 46%, 57%, dan 61%, sedangkan pada suhu 1000°C meningkat menjadi 62%, 68%, dan 73%. Kenaikan ini menunjukkan bahwa suhu kalsinasi yang lebih tinggi menghasilkan katalis dengan situs basa yang lebih banyak dan lebih aktif.

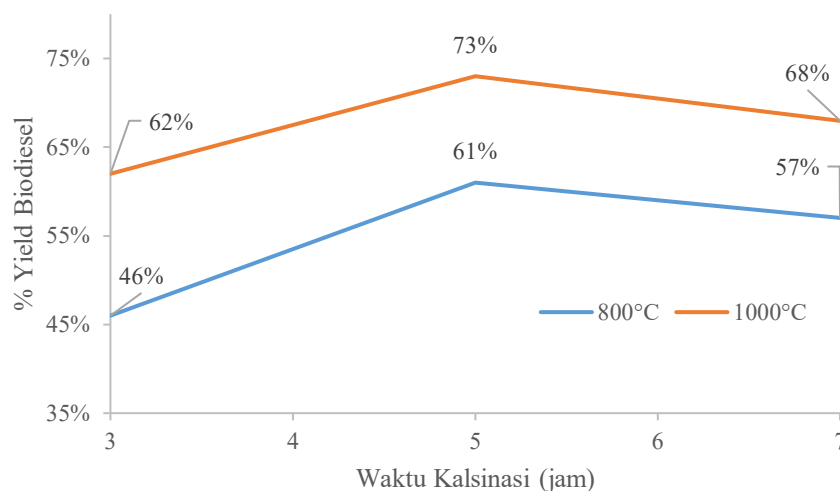
Konversi CaCO₃ yang tidak sempurna pada 800°C menyebabkan terbentuknya CaO dalam jumlah terbatas sehingga aktivitas katalis relatif lebih rendah. Hal ini sejalan dengan temuan Corro dkk. (2016), yang menyatakan bahwa struktur CaO yang terbentuk pada suhu <900°C masih didominasi CaCO₃ sehingga basa kuat O²⁻ belum terbentuk secara optimal (Corro dkk., 2016). Pada suhu 1000°C, proses dekarbonasi berlangsung lebih sempurna sehingga CaO yang dihasilkan lebih murni, memiliki kristalinitas lebih tinggi, serta memberikan jumlah situs basa

yang lebih besar. Aktivitas katalitik CaO yang tinggi inilah yang meningkatkan pembentukan ion metoksida (CH_3O^-), yang berperan sebagai nukleofil utama dalam reaksi transesterifikasi biodiesel.

Hasil variabel pada penelitian ini menunjukkan bahwa suhu kalsinasi merupakan faktor paling menentukan dalam meningkatkan aktivitas katalis CaO dari tulang sapi. Suhu 1000°C menghasilkan CaO dengan konversi mineral yang lebih sempurna, porositas lebih tinggi, serta distribusi situs basa yang lebih aktif, sehingga mampu menghasilkan *yield* biodiesel tertinggi pada seluruh variasi waktu kalsinasi. Kondisi ini menegaskan bahwa optimasi suhu kalsinasi memiliki peran penting dalam menentukan performa katalis CaO berbasis tulang sapi dalam proses transesterifikasi biodiesel.

3.3. Pengaruh Waktu Kalsinasi Terhadap *Yield* Biodiesel

Hasil kalsinasi katalis CaO menghasilkan *yield* yang bervariasi pada percobaan yang telah dilakukan, hal ini dapat dilihat dari grafik berikut.



Gambar 4 Pengaruh Waktu Kalsinasi Terhadap *Yield* Biodiesel
(Berat Katalis = 4wt%; Waktu Transesterifikasi = 1 hr; Rasio Molar = 12:1; T = 65°C)

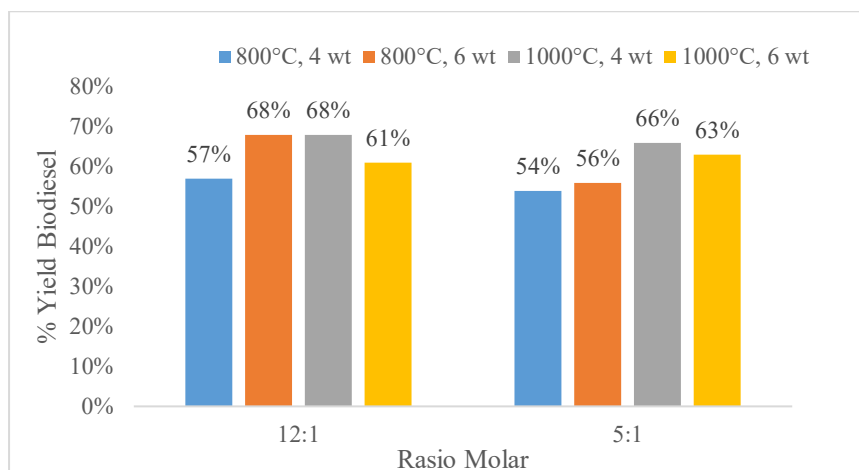
Variasi waktu kalsinasi menunjukkan pengaruh yang cukup jelas terhadap aktivitas katalis CaO yang dihasilkan dari tulang sapi. Berdasarkan Gambar 4, peningkatan waktu kalsinasi dari 3 jam menjadi 5 jam memberikan peningkatan signifikan pada *yield* biodiesel untuk kedua suhu kalsinasi. Pada suhu 800°C , *yield* meningkat dari 46% menjadi 61%, sedangkan pada suhu 1000°C *yield* meningkat dari 62% menjadi 73%. Hal ini menunjukkan bahwa durasi 5 jam merupakan waktu optimum untuk memungkinkan proses transformasi mineral berlangsung lebih sempurna, termasuk dekarbonasi CaCO_3 yang belum selesai pada durasi 3 jam.

Penambahan waktu kalsinasi memberikan lebih banyak waktu bagi CaCO_3 untuk terdekomposisi menjadi CaO aktif, konsisten dengan mekanisme reaksi dekarbonisasi. Kalsium karbonat dalam tulang hewan memerlukan waktu tertentu untuk mencapai dekarbonasi yang stabil pada suhu yang mendekati energi aktivasi untuk proses dekomposisi. Dengan waktu kalsinasi yang lebih panjang, akan terbentuk lebih banyak fraksi CaO, yang berarti meningkatnya jumlah situs basa O^{2-} dapat mempercepat pembentukan ion metoksida selama reaksi transesterifikasi (Bai dkk., 2019).

Namun, peningkatan waktu kalsinasi dari 5 jam menjadi 7 jam tidak lagi meningkatkan *yield* secara signifikan. Pada suhu 800°C , *yield* justru turun sedikit dari 61% menjadi 57%, sedangkan pada suhu 1000°C mengalami penurunan dari 73% menjadi 68%. Fenomena ini menunjukkan bahwa kalsinasi berlebih dapat menyebabkan terjadinya sintering, yakni penyatuan partikel CaO menjadi struktur lebih besar yang mengurangi luas permukaan dan jumlah situs basa aktif. Mekanisme sintering ini umum terjadi pada katalis berbasis CaO pada suhu tinggi, sebagaimana dilaporkan juga oleh (Wong dkk., 2015), yang menyebutkan bahwa paparan suhu tinggi dalam durasi lama dapat menurunkan aktivitas katalis akibat penurunan area aktif CaO (Mohadesi dkk., 2021; Wang dkk., 2015).

Selain itu, waktu kalsinasi yang terlalu lama dapat memperkuat transisi fase Ca-P dari hidroksiapatit menjadi β -TCP (β -trikalsium fosfat). Fase β -TCP stabil secara termal, tetapi bersifat lebih inert dan tidak memberikan kontribusi terhadap basicity katalis. Hal ini menjelaskan mengapa penambahan waktu dari 5 jam ke 7 jam tidak meningkatkan *yield* tetapi cenderung menurun karena fraksi CaO aktif tidak lagi bertambah, sementara potensi sintering meningkat (Hussain dkk., 2021). Secara keseluruhan, pola grafik menunjukkan bahwa waktu kalsinasi 5 jam merupakan kondisi optimum untuk menghasilkan katalis CaO yang aktif baik pada suhu 800°C maupun 1000°C . Pada durasi ini, CaCO_3 telah terdekomposisi secara signifikan, fase organik telah hilang, dan CaO terbentuk dalam jumlah maksimal sebelum terjadi sintering. Waktu kalsinasi yang lebih lama tidak meningkatkan aktivitas katalis, bahkan dapat menurunkannya, sebagaimana ditunjukkan oleh penurunan *yield* biodiesel pada kedua suhu kalsinasi.

3.4. Pengaruh Rasio Molar Minyak dengan Metanol pada *Yield* Biodiesel



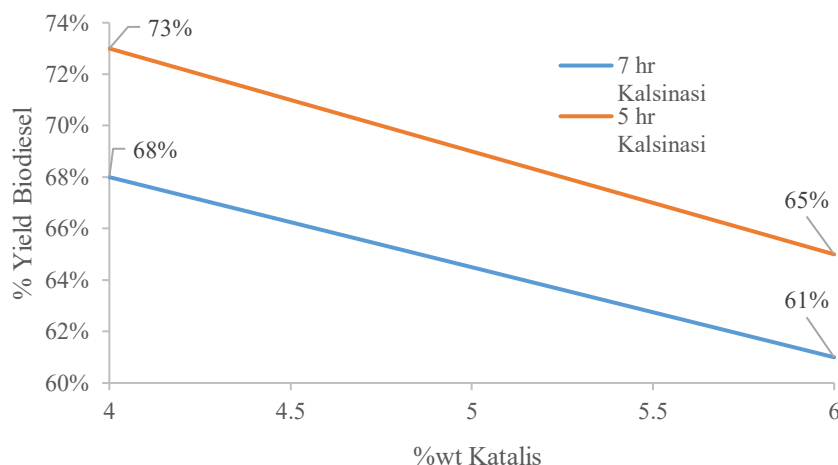
Gambar 5. Pengaruh Rasio Molar Terhadap *Yield* Biodiesel
(Waktu Transesterifikasi = 1 hr; T = 65°C; Lama Kalsinasi = 7 hr)

Variasi rasio molar minyak–metanol memberikan pengaruh yang jelas terhadap *yield* biodiesel yang dihasilkan. Berdasarkan Gambar 4.4, rasio molar 12:1 menghasilkan *yield* yang lebih tinggi dibandingkan rasio 5:1 pada seluruh kondisi suhu dan massa katalis. Pada suhu 800°C dengan 4 wt% katalis, *yield* meningkat dari 54% (5:1) menjadi 57% (12:1). Pada 6 wt%, kenaikan terlihat lebih signifikan, yaitu dari 56% menjadi 68%. Hal serupa terjadi pada katalis yang dikalsinasi pada 1000°C, di mana *yield* meningkat dari 66% menjadi 68% (4 wt%) dan dari 61% menjadi 63% (6 wt%). Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah metanol relatif terhadap minyak memberikan efek positif terhadap konversi trigliserida menjadi metil ester.

Hasil ini sejalan dengan penelitian Buchori dkk. (2021), yang menunjukkan bahwa rasio 12:1 menghasilkan konversi biodiesel yang lebih tinggi pada sistem katalis CaO berbasis tulang hewan karena terbentuk lebih banyak spesies metoksi (CH_3O^-) di permukaan CaO. Spesies inilah yang menyerang gugus karbonil trigliserida sehingga meningkatkan laju pembentukan metil ester (Buchori dkk., 2021). Namun, peningkatan rasio metanol tidak selalu berbanding lurus dengan kenaikan *yield*. Pada rasio berlebih (di atas 12:1), literatur menunjukkan bahwa gliserol cenderung larut dalam metanol sehingga menghambat pemisahan fase, meningkatkan viskositas campuran reaksi, serta menyebabkan deaktivasi katalis CaO akibat pelarutan sebagian Ca^{2+} dalam kondisi metanol berlebih (Aziz dkk., 2020). Efek-efek ini berpotensi menurunkan *yield*. Meskipun penelitian ini hanya membandingkan rasio 12:1 dan 5:1, pola tersebut sudah tampak: rasio 5:1 memberikan *yield* lebih rendah karena jumlah metanol yang tidak cukup untuk menggeser kesetimbangan reaksi ke arah produk.

3.5. Pengaruh Berat Katalis terhadap *Yield* Biodiesel

Pada hasil transesterifikasi biodiesel yang diperoleh berat katalis memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *yield* yang dihasilkan dengan variasi percobaan 4%wt dan 6%wt, hal ini dapat dilihat dari grafik berikut.



Gambar 6. Pengaruh Rasio Molar terhadap *Yield* Biodiesel
(Suhu Kalsinasi = 1000°C; Waktu Transesterifikasi = 1 hr; Rasio Molar = 12:1; T = 65°C)

Variasi berat katalis CaO memberikan pengaruh terhadap *yield* biodiesel yang dihasilkan. Berdasarkan Gambar .6 peningkatan massa katalis dari 4 wt% menjadi 6 wt% justru menurunkan *yield* biodiesel pada kedua durasi kalsinasi (5 jam dan 7 jam). Pada kondisi 5 jam kalsinasi, *yield* menurun dari 68% menjadi 61%, sedangkan pada 7 jam kalsinasi turun dari 73% menjadi 65%. Fenomena ini menunjukkan bahwa penggunaan katalis berlebih tidak selalu meningkatkan performa transesterifikasi, bahkan dapat menghambat proses.

Hasil penelitian ini sejalan dengan beberapa penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa peningkatan jumlah katalis tidak selalu meningkatkan *yield* biodiesel (Buchori dkk., 2021). Penggunaan katalis CaO berbasis tulang hewan pada konsentrasi yang terlalu tinggi dapat meningkatkan viskositas campuran reaksi dan menghambat kontak efektif antara metanol dan trigliserida, sehingga konversi biodiesel cenderung menurun. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Ayoola dkk. (2018), di mana peningkatan jumlah katalis CaO berbasis tulang menyebabkan terjadinya aglomerasi partikel katalis yang mengurangi luas permukaan aktif dan menurunkan efektivitas transesterifikasi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan katalis dalam jumlah berlebih dapat menghambat difusi reaktan menuju situs basa aktif CaO sehingga *yield* biodiesel tidak meningkat secara signifikan.

Secara mekanistik, jumlah katalis yang terlalu tinggi menyebabkan peningkatan viskositas campuran reaksi dan menghambat efektivitas pencampuran antara minyak dan metanol. Hal ini dapat mengurangi frekuensi tumbukan efektif antara trigliserida, metanol, dan situs aktif CaO sehingga menurunkan konversi metil ester. Penggunaan katalis CaO berlebih dapat menyebabkan difusi reaktan menjadi tidak optimal akibat terbentuknya suspensi yang terlalu padat (Buchori dkk., 2021).

Selain itu, berat katalis yang lebih tinggi meningkatkan kemungkinan pembentukan sabun (saponifikasi) pada permukaan katalis, terutama ketika katalis memiliki kekuatan basa tinggi seperti CaO. Reaksi samping ini mengonsumsi sebagian metanol dan asam lemak bebas sehingga menurunkan jumlah trigliserida yang berhasil dikonversi menjadi biodiesel. Hasil *review* dari Hussain dkk. (2021) juga menunjukkan bahwa katalis berbasis CaO dari biomineral menunjukkan penurunan aktivitas pada konsentrasi berlebih karena meningkatnya kompetisi reaksi samping di permukaan katalis (Hussain dkk., 2021). Faktor lain yang turut berkontribusi adalah potensi terjadinya aglomerasi partikel katalis pada massa yang lebih besar. Aglomerasi ini dapat mengurangi luas permukaan aktif CaO yang tersedia, sehingga mengurangi jumlah situs basa O^{2-} yang dapat berinteraksi dengan metanol (Buchori dkk., 2021; Corro dkk., 2016).

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi rasio molar metanol : minyak, suhu dan waktu kalsinasi, serta massa katalis berpengaruh terhadap *yield* biodiesel yang dihasilkan dari minyak jelantah. Kondisi terbaik diperoleh pada rasio molar 12:1 dengan katalis CaO berbasis tulang sapi yang dikalsinasi pada suhu 1000°C selama 5 jam, menghasilkan *yield* biodiesel maksimum sebesar 73%. Peningkatan *yield* biodiesel menunjukkan bahwa suhu dan waktu kalsinasi yang lebih tinggi mampu meningkatkan proses dekarbonasi $CaCO_3$ menjadi CaO aktif serta memperbesar jumlah situs basa O^{2-} pada permukaan katalis. Situs basa tersebut berperan dalam pembentukan ion metoksida (CH_3O^-) yang menjadi spesies aktif dalam reaksi transesterifikasi. Namun, peningkatan massa katalis secara berlebih cenderung menurunkan *yield* akibat meningkatnya viskositas campuran dan potensi aglomerasi partikel katalis. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa katalis CaO berbasis tulang sapi berpotensi digunakan sebagai katalis heterogen dalam produksi biodiesel dari minyak jelantah tanpa proses esterifikasi awal.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas pendanaan dari Institut Teknologi Kalimantan melalui skema penelitian pada tahun anggaran 2026.

Daftar Notasi

ρ = densitas [g/ml]

φ = viskositas [cst]

Daftar Pustaka

- Al-Yasiri, A. (2021). Global energy demand for different energy sources: Current status and future prospects. *Akkad Journal of Contemporary Economic Studies*, 1(4), 186-196.
- Ayoola, A. A., Fayomi, O. S. I., & Usoro, I. F. (2018). Data on PKO biodiesel production using CaO catalyst from turkey bones. *Data in Brief*, 19, 789–797. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.05.103>
- Aziz, H. A., Abas, N. A., Ping, B. T. Y., & Idris, Z. (2020). Transesterification of Palm-based Methyl Palmitate into Esteramine Catalyzed by Calcium Oxide Catalyst. *Journal of Surfactants and Detergents*, 23(2), 251–262. <https://doi.org/10.1002/jsde.12373>
- Azizah, Z., Wardhana, W., & Fitri, M. A. (2024). PEMANFAATAN IKAN PATIN MENJADI BAHAN BAKU BIODIESEL. *Jurnal Chemurgy*, 8(1), 68. <https://doi.org/10.30872/cm.g.v8i1.11495>

- Azni, M. A., Ahmad, N., Mohammed, W. M. W., & Rahman, R. A. (2023). Review of the effects of fossil fuels and the need for hydrogen fuel cell policy in Malaysia. *Sustainability*, 15, 4033. <https://doi.org/10.3390/su15054033>
- Bai, H., Liu, X., Bao, F., & Zhao, Z. (2019). Synthesis of micronized CaO assisted by NH₄HCO₃ with Ca(OH)₂ and its application in heterogeneously catalyzing transesterification reaction for producing biodiesel. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 66(12), 1604–1609. <https://doi.org/10.1002/jccs.201900023>
- Buchori, L., Anggoro, D. D., & Ma'Ruf, A. (2021). Biodiesel synthesis from the used cooking oil using CaO catalyst derived from waste animal bones. *Chemistry and Chemical Technology*, 15(4), 583-590. <https://doi.org/10.23939/CHCHT15.04.583>
- Corro, G., Sánchez, N., Pal, U., & Bañuelos, F. (2016). Biodiesel production from waste frying oil using waste animal bone and solar heat. *Waste Management*, 47, 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.001>
- El-Araby, R., dkk. (2024). Biofuel production: Exploring renewable energy solutions for a greener future. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 17, 129, 1-32.
- Eze, V. C., & Harvey, A. P. (2018). Continuous reactive coupling of glycerol and acetone – A strategy for triglyceride transesterification and in-situ valorisation of glycerol by-product. *Chemical Engineering Journal*, 347, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.04.078>
- Hanifah, P. R., & Purbadharmaja, I. B. P. (2025). Analisis pengaruh konsumsi listrik dan konsumsi bahan bakar fosil terhadap eksternalitas negatif emisi gas rumah kaca di Indonesia. *Jurnal Visi Manajemen*, 11(2), 298-314.
- Haryanto, A., Silviana, U., Triyono, S., & Prabawa, S. (2015). Produksi biodiesel dari transesterifikasi minyak jelantah dengan bantuan gelombang mikro: Pengaruh intensitas daya dan waktu reaksi terhadap rendemen dan karakteristik biodiesel. *Agritech*, 35(2), 234–240. <https://doi.org/10.22146/agritech.13792>
- Hussain, F., Alshahrani, S., Abbas, M. M., Khan, H. M., Jamil, A., Yaqoob, H., Soudagar, M. E. M., Imran, M., Ahmad, M., & Munir, M. (2021). Review waste animal bones as catalysts for biodiesel production; a mini review. In *Catalysts* (Vol. 11, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/catal11050630>
- Ministry of Energy and Mineral Resources. (2021). Statistik minyak goreng nasional 2021. ESDM Press.
- Mohadesi, M., Gouran, A., & Dehghan Dehnavi, A. (2021). Biodiesel production using low cost material as high effective catalyst in a microreactor. *Energy*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119671>
- Mohamad, M., Ngadi, N., & Lani, N. S. (2015). Production of Biodiesel from Cooking Oil Using CaO Catalyst. *Advanced Materials Research*, 1113, 518– 522. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1113.518>
- Nadya, S., Mas'udah, & Santosa, S. (2023). Pengaruh rasio katalis CaO-NaOH dan waktu reaksi transesterifikasi terhadap kualitas biodiesel dari minyak sawit. *Distilat*, 9(3), 330-337.
- Nugroho, A. P., Rahmatullah, B., Abduh, M., & Amelia, R. (2024). Optimization of biodiesel from waste cooking oil using modified catalysts and its emission characteristics. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 5(2), 45-55.
- Singh, D., Sharma, D., Soni, S. L., Inda, C. S., Sharma, S., & Jhalani, A. (2021). A comprehensive review on biodiesel production from waste cooking oil. *Fuel*, 307, 121-129.
- Udayakumar, M., Aravind, V. S., Prakash, M., & Suresh, S. (2024). Biodiesel production, fuel properties, engine performance and emission characteristics: A comprehensive review. *Renewable Energy Reviews*, 92(1), 1-25.
- Wan Osman, N. H., Rahman, N. A., & Hassan, M. H. (2024). Advances in biodiesel production and purification: Current technologies and future directions. *Energy Conversion and Management*, 305, 117-134.
- Wang, Q., & Azam, M. (2024). Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption and environmental impact: Evidence from major economies. *Geoscience Frontiers*, 15(1), 1-15.
- Wong, Y. C., Tan, Y. P., Taufiq-Yap, Y. H., Ramli, I., & Tee, H. S. (2015). Biodiesel production via transesterification of palm oil by using CaO–CeO₂ mixed oxide catalysts. *Fuel*, 162, 288–293. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.012>