

Pemanfaatan Cangkang Kemiri Sebagai Katalis CaO (*Candlenut Shell*) yang Terimpregnasi KOH dalam Produksi Biodiesel Minyak Jelantah melalui Reaksi Transesterifikasi

Nur Sha'in*, Anerasari Meidinariasty, Akbar Ismi Aziz Pramito

Program Studi Teknologi Kimia Industri, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang

* Koresponden email : nurshain07@gmail.com

Diterima: 25 Oktober 2025

Disetujui: 4 November 2025

Abstract

The growing demand for environmentally friendly and renewable alternative fuels, with biodiesel being a prominent candidate. Waste cooking oil (WCO), a widely available household waste, is a promising feedstock but requires an efficient catalyst to improve the transesterification process. The objective of this research was to investigate the effect of CaO catalyst derived from candlenut shells impregnated with KOH, and to determine the optimum methanol-to-oil molar ratio and catalyst concentration. The results showed that the optimum condition was achieved at a 1:6 molar ratio with 1.5% catalyst, producing biodiesel with a density of 0.877 g/mL, viscosity of 4.6 cSt, acid value of 0.25 mg KOH/g, cetane number of 54.7, and yield of 85%, all in accordance with the Indonesian National Standard (SNI 7182:2015). GC-MS analysis revealed a total fatty acid methyl ester (FAME) content of 99.57%, dominated by compounds such as methyl oleate, methyl stearate, and methyl linoleate, indicating near-complete conversion. These findings confirm the potential of CaO-KOH catalyst from candlenut shell waste as an effective heterogeneous catalyst for producing high-quality and sustainable biodiesel.

Keywords: *biodiesel, waste cooking oil, candlenut shell, cao-koh catalyst, transesterification, gc-ms*

Abstrak

Kebutuhan akan bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan dan dapat diperbarui, salah satunya biodiesel. Minyak jelantah sebagai limbah rumah tangga yang melimpah memiliki potensi sebagai bahan baku biodiesel, namun memerlukan katalis yang efektif untuk meningkatkan efisiensi proses transesterifikasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan katalis CaO dari cangkang kemiri yang diimpregnasi KOH serta menentukan rasio molar metanol terhadap minyak dan kadar katalis optimum. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi optimum, yaitu rasio mol 1:6 dan katalis 1,5%, diperoleh biodiesel dengan densitas 0,877 g/mL, viskositas 4,6 cSt, angka asam 0,25 mg KOH/g, angka setana 54,7, dan yield sebesar 85%, yang semuanya sesuai dengan standar SNI 7182:2015. Hasil analisis GC-MS menunjukkan kandungan total metil ester (FAME) sebesar 99,57%, terdiri atas senyawa utama seperti methyl oleate, methyl stearate, dan methyl linoleate, yang menandakan konversi transesterifikasi berlangsung hampir sempurna. Hasil ini menunjukkan bahwa katalis CaO-KOH dari limbah cangkang kemiri berpotensi besar sebagai katalis heterogen untuk produksi biodiesel yang berkualitas dan berkelanjutan.

Kata Kunci: *biodiesel, minyak jelantah, cangkang kemiri, katalis cao-koh, transesterifikasi, gc-ms*

1. Pendahuluan

Biodiesel merupakan bahan bakar yang dibuat dari bahan nabati atau hewani yang diproses menjadi ester metil asam lemak (FAME). Biodiesel dari minyak nabati sebagai campuran energi secara global yang telah mengalami perkembangan produktivitas yang cukup signifikan. Minyak jelantah merupakan salah satu bahan baku potensial untuk pembuatan biodiesel karena mengandung trigliserida yang dapat diubah menjadi metil ester melalui reaksi transesterifikasi [1]. Produksi biodiesel dapat diproses menjadi 2 tahap yaitu proses transesterifikasi dan esterifikasi-transesterifikasi. Minyak jelantah termasuk minyak yang memiliki kadar asam lemak bebas yang meningkat karena mengalami proses pemanasan yang terus menerus, sehingga pembuatan biodiesel dari minyak jelantah ini menggunakan dua tahapan yaitu proses esterifikasi dan proses transesterifikasi [2].

Katalis yang digunakan dalam transesterifikasi berfungsi untuk mempercepat reaksi dan menurunkan energi aktivasi dalam produksi biodiesel. Terdapat dua jenis katalis yaitu katalis homogen (seperti NaOH dan KOH) yang efektif tetapi sulit dipisahkan dan menghasilkan limbah, dan katalis heterogen (seperti

CaO) yang lebih ramah lingkungan karena mudah dipisahkan dan dapat digunakan ulang. Kalsium Oksida (CaO) dapat diperoleh dari cangkang kemiri, yang digunakan sebagai katalis heterogen yang efektif untuk produksi biodiesel.

CaO yang berasal dari cangkang telur ayam negeri dalam transesterifikasi minyak jarak pagar menghasilkan metil ester sebesar 82,62% dengan konsentrasi katalis 10% (b/b) pada suhu 60°C selama 120 menit [3]. CaO yang disintesis dari fly ash dalam transesterifikasi minyak sawit *off-grade*, menghasilkan biodiesel dengan *yield* 71,77% pada suhu 70°C dengan rasio mol minyak terhadap metanol 1:6. Penggunaan CaO memiliki kendala seperti reaktivitas terhadap air dan FFA yang dapat membentuk sabun dan menurunkan efisiensi, sehingga perlu dilakukan modifikasi atau aktivasi termal untuk meningkatkan kinerja katalis [4]. CaO dapat diperoleh dari berbagai sumber alami dan limbah industri, termasuk batu kapur, cangkang telur, cangkang kerang, *fly ash*, tulang hewan, dolomit, dan slag baja.

Cangkang kemiri mengandung mineral seperti kalium (K), kalsium (Ca), dan Magnesium (Mg) yang dapat berperan sebagai katalis basa sehingga membantu dalam proses transesterifikasi biodiesel pada minyak dengan kandungan asam lemak bebas tinggi. Kandungan tersebut memiliki aktivitas yang tinggi dan stabilitas termal yang baik. Cangkang kemiri yang mengandung senyawa kalsium karbonat (CaCO_3) yang dikonversi menjadi Kalsium Oksida (CaO) melalui proses kalsinasi. CaO adalah basa kuat yang sangat efektif sebagai katalis dalam berbagai reaksi kimia, termasuk transesterifikasi untuk membuat biodiesel, tetapi CaCO_3 dalam bentuk alaminya tidak memiliki sifat katalitik yang kuat. CaO yang terbentuk dengan menghilangkan karbon dioksida (CO_2), memiliki luas permukaan yang lebih besar dan lebih reaktif.

CaO dapat digunakan sebagai katalis dalam transesterifikasi minyak goreng menjadi jelantah [5]. Selain itu, penelitian lain juga menunjukkan bahwa katalis CaO yang terimpregnasi dengan KOH dapat meningkatkan aktivitas katalitik dalam produksi biodiesel dari minyak goreng bekas. Dengan demikian, penelitian tentang penggunaan cangkang kemiri sebagai sumber CaO untuk katalis dalam produksi biodiesel masih terbatas dengan penggunaan yang ada.

Adapun bahan yang dapat digunakan sebagai bahan impregnasi untuk katalis basa heterogen seperti CaO selain KOH dan NaOH dalam produksi biodiesel yaitu Kalium karbonat (K_2CO_3), Natrium karbonat (Na_2CO_3), Kalium Fluorida (KF), Amina Organik, Kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dan Metal oksida lain. Penggunaan katalis CaO yang diimpregnasi dengan 7% KOH mampu menghasilkan biodiesel dengan hasil sebesar 87,17%, viskositas 2,89 cSt, densitas 0,819 g/mL, dan kadar air sebesar 0,032% [6]. Sementara itu, proses impregnasi KOH pada CaO dapat meningkatkan luas permukaan katalis hingga 71,22 m²/g serta meningkatkan tingkat alkalinitas menjadi 2,59 mmol/g, yang turut mendukung peningkatan efisiensi katalis [7]. Pemanfaatan cangkang telur sebagai sumber CaO dan mengimpregnasinya dengan KOH, menghasilkan katalis heterogen yang mampu memberikan *yield* biodiesel hingga 84,57% [8].

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa instrument laboratorium, yaitu magnetic stirrer dengan hot plate untuk pengadukan dan pemanasan, furnace untuk kalsinasi, oven listrik untuk pengeringan, serta neraca analitik untuk penimbangan. Peralatan pendukung meliputi buret, erlenmeyer, beaker glass, batang pengaduk, termometer, statif dan klem, cawan porselen, cawan Petri, desikator, corong pemisah (1000 mL), dan ayakan 100 mesh. Bahan penelitian terdiri atas cangkang kemiri sebagai sumber katalis CaO, minyak goreng bekas sebagai bahan baku biodiesel, serta bahan kimia berupa KOH ($\geq 85\%$, Merck), metanol ($\geq 99,8\%$, Merck), H_2SO_4 (98%, Merck), NaOH 0,1 N, etanol 95% (Merck), indikator, fenoltalein (PP), dan aquadest yang digunakan sesuai kebutuhan proses sintesis maupun analisis.

Penelitian ini dilakukan melalui lima tahapan utama, yaitu pertama, pembuatan katalis CaO dari cangkang kemiri yang meliputi proses pencucian, pengeringan, penghalusan, pengayakan, dan kalsinasi. Kedua, katalis CaO diimpregnasi dengan KOH untuk meningkatkan aktivitas katalitiknya. Tahap ketiga adalah pretreatment minyak jelantah dengan metode degumming, dilanjutkan pencucian, pemanasan, serta pengujian kadar asam lemak bebas (FFA). Tahap keempat berupa reaksi transesterifikasi antara minyak jelantah dan metanol dengan bantuan katalis CaO–KOH pada kondisi tertentu hingga terbentuk biodiesel dan gliserol. Tahap terakhir adalah analisis karakteristik biodiesel yang mencakup komposisi metil ester (FAME), viskositas, densitas, angka asam, titik nyala, serta angka setana sesuai standar SNI 7182:2015. Penelitian ini menggunakan dua variabel bebas, yaitu rasio molar minyak:metanol (1:6 dan 1:12) serta konsentrasi katalis CaO–KOH (0,5–2,5% b/b minyak).

Untuk memastikan konsistensi percobaan, variabel tetap dijaga pada kondisi tertentu, meliputi suhu kalsinasi katalis 900 °C selama 8 jam, waktu impregnasi katalis 5 jam pada suhu ruang, suhu reaksi transesterifikasi 60 °C, waktu reaksi 1,5 jam (± 75 menit), dan kecepatan pengadukan 300 rpm. Dengan

demikian, hasil yang diperoleh hanya menunjukkan pengaruh variasi rasio molar minyak:metanol dan konsentrasi katalis.

Pembuatan katalis dilakukan dengan memanfaatkan cangkang kemiri sebagai sumber CaO. Cangkang terlebih dahulu dicuci, dikeringkan pada suhu 110 °C selama 4 jam, digiling, dan diayak hingga lolos 100 mesh. Serbuk yang diperoleh kemudian dikalsinasi pada suhu 900 °C selama 8 jam untuk menghasilkan CaO. Proses impregnasi dilakukan dengan melarutkan 20 g KOH dalam aquadest, lalu dicampurkan ke dalam 100 g serbuk CaO. Campuran diaduk selama 30 menit, didiamkan selama 24 jam, dikeringkan pada suhu 110 °C selama 2 jam, dan selanjutnya dikalsinasi ulang pada 600 °C selama 3 jam. Katalis CaO–KOH yang diperoleh disimpan dalam desikator sebelum digunakan.

Minyak goreng bekas yang menjadi bahan baku biodiesel terlebih dahulu melalui tahap pretreatment berupa degumming. Minyak dipanaskan pada suhu 70 °C, ditambahkan asam fosfat (0,2% v/v), lalu diaduk selama 10 menit. Selanjutnya ditambahkan aquadest panas (3% v/v) dan didiamkan selama 24 jam hingga terbentuk lapisan gum yang kemudian dipisahkan. Minyak dicuci kembali dengan aquadest panas, lalu dipanaskan pada suhu 110 °C selama 15 menit untuk menghilangkan sisa air. Kadar asam lemak bebas (FFA) dianalisis dengan metode titrasi menggunakan larutan NaOH 0,1 N dengan indikator fenolftalein.

Proses transesterifikasi dilakukan dengan mencampurkan minyak jelantah yang sudah dipretreatment dengan metanol dan katalis CaO–KOH pada suhu 60 °C, dengan rasio molar minyak:metanol 1:6 dan 1:12 serta variasi katalis 0,5–2,5% (b/b). Reaksi dijalankan selama 75 menit menggunakan pengadukan 300 rpm. Setelah reaksi selesai, campuran didiamkan selama 12 jam dalam corong pemisah hingga terbentuk dua lapisan, yaitu biodiesel (lapisan atas) dan gliserol (lapisan bawah). Lapisan biodiesel dipisahkan, dicuci dengan air hangat hingga bersih, kemudian dikeringkan pada suhu 105 °C selama 45 menit untuk menghilangkan sisa air.

Biodiesel yang dihasilkan kemudian diuji karakteristiknya meliputi: komposisi metil ester (FAME) dengan GC-MS, viskositas kinematik dengan viskometer Cannon-Fenske, densitas menggunakan piknometer, angka asam melalui titrasi KOH 0,1 N, titik nyala dengan metode pemanasan terbuka, serta angka setana dengan mesin CFR sesuai standar SNI 7182:2015.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian proses pembuatan biodiesel dengan pemanfaatan limbah biomassa yaitu cangkang kemiri sebagai katalis CaO yang terimpregnasi KOH kan membahas mengenai analisa biodiesel yang meliputi viskositas, densitas, angka asam, titik nyala, angka setana dan nilai yield. Biodiesel yang diperoleh akan dilihat kualitas nya berdasarkan Analisa yang dilakukan untuk dibandingkan dengan syarat mutu biodiesel menurut SNI 7182 : 2015.

Karakterisasi Katalis menggunakan XRF

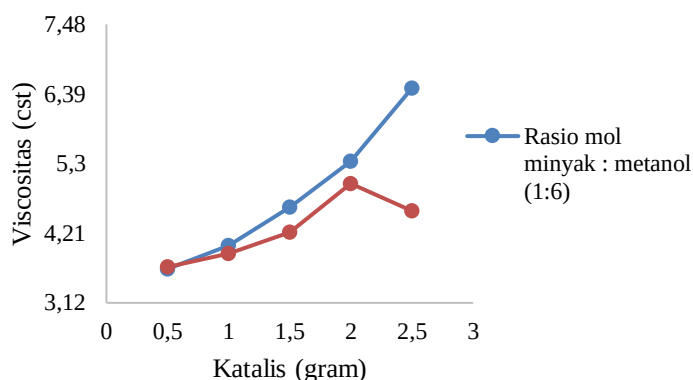
Hasil analisis XRF pada katalis memperlihatkan bahwa kalsium oksida (CaO) merupakan komponen dominan dengan kadar 77,15%, diikuti oleh kalium oksida (K₂O) sebesar 9,53%, aluminium oksida (Al₂O₃) 8,33%, dan silika (SiO₂) 2,21%, sedangkan oksida lainnya berada di bawah 1%. Tingginya kandungan CaO menandakan keberhasilan kalsinasi dalam mengonversi kalsium karbonat (CaCO₃) dari cangkang kemiri menjadi CaO aktif. Kadar CaO di atas 75% menunjukkan kemurnian yang sesuai untuk katalis basa heterogen pada produksi biodiesel [9]. Kandungan Al₂O₃ (8,33%) dan SiO₂ (2,21%) pada katalis umumnya berasal dari mineral inheren pada bahan baku. Meskipun tidak memiliki peran katalitik langsung, kedua oksida tersebut berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas struktural dan luas permukaan spesifik katalis, sehingga memfasilitasi dispersi situs aktif CaO. Oksida minor seperti P₂O₅, SO₃, dan SrO (<1%) menunjukkan pengaruh yang dapat diabaikan terhadap performa katalis.

Ketidakhadiran logam berat toksik seperti PbO, HgO, atau CdO mengindikasikan bahwa katalis ini aman diaplikasikan dalam produksi biodiesel, baik dari perspektif keberlanjutan lingkungan maupun mutu produk. Analisis XRF juga mengonfirmasi bahwa proses kalsinasi dan impregnasi berlangsung efektif, mengonversi CaCO₃ dari cangkang kemiri menjadi CaO aktif, yang aktivitas dasarnya diperkuat dengan keberadaan K₂O.

Analisa Viskositas

Grafik **Gambar 1** menunjukkan adanya hubungan positif antara peningkatan jumlah katalis dan kenaikan viskositas biodiesel pada kedua rasio metanol yang diuji. Pada penggunaan katalis rendah sekitar 0,5 g, viskositas biodiesel tetap stabil pada kedua rasio metanol yang diuji. Kondisi ini menunjukkan bahwa reaksi transesterifikasi berlangsung efektif, di mana konversi trigliserida menjadi metil ester tercapai hampir sempurna dengan pembentukan senyawa samping, seperti sabun, yang dapat ditekan seminimal

mungkin. Jumlah katalis ini menyediakan situs basa yang memadai untuk mengaktifkan molekul metanol dan mempercepat serangan ion metoksida pada trigliserida tanpa memicu reaksi samping yang berarti. Hal ini penting karena penggunaan katalis berlebih sering menyebabkan pembentukan sabun akibat reaksi dengan asam lemak bebas (FFA), yang larut dalam biodiesel dan meningkatkan viskositasnya. Pada katalis 0,5 g, proses tetap terkendali sehingga viskositas biodiesel memenuhi standar SNI 7182:2015. Penggunaan katalis rendah secara terukur mampu menghasilkan biodiesel berkualitas dengan viskositas optimal, mendukung efisiensi kerja mesin diesel dan pemenuhan standar mutu internasional [10]



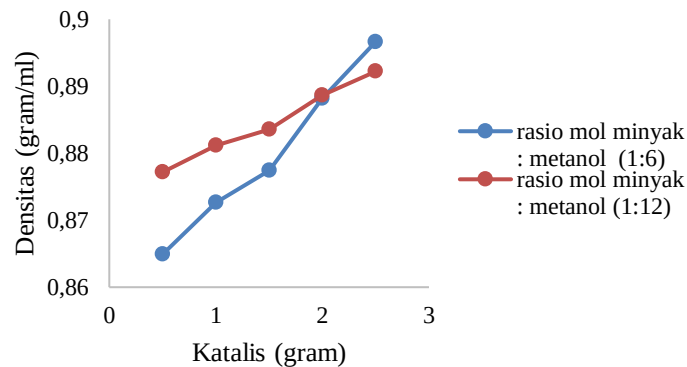
Gambar 1. Pengaruh katalis dan rasio mol minyak : metanol terhadap viskositas

Perbedaan viskositas antara rasio metanol 1:6 dan 1:12 menggambarkan pentingnya jumlah metanol dalam menentukan kualitas biodiesel. Pada rasio 1:6, penambahan katalis diiringi dengan peningkatan viskositas yang cukup tajam karena ketersediaan metanol tidak mencukupi kebutuhan stoikiometri untuk mengonversi seluruh trigliserida menjadi metil ester. Sebaliknya, pada rasio metanol 1:12, metanol yang berlebih mampu menghasilkan ion metoksida dalam jumlah cukup untuk mengonversi trigliserida secara menyeluruh menjadi metil ester. Pada rasio metanol 1:12, grafik menunjukkan bahwa viskositas biodiesel mencapai puncak pada penggunaan katalis 2 g dan menurun ketika dosis katalis dinaikkan menjadi 2,5 g. Kenaikan awal ini disebabkan oleh kelebihan katalis pada 2 g yang memicu reaksi samping antara katalis basa dan asam lemak bebas (FFA), menghasilkan senyawa sabun (soap) yang terlarut dalam biodiesel. Sifat koloid sabun ini menyebabkan peningkatan kekentalan. Namun, pada katalis 2,5 g, jumlah katalis yang lebih besar justru memungkinkan reaksi transesterifikasi berlangsung lebih sempurna, sehingga trigliserida dan produk antara lebih banyak terkonversi menjadi metil ester. Akibatnya, kandungan residu seperti monogliserida dan digliserida yang meningkatkan viskositas berkurang, menghasilkan biodiesel dengan kekentalan yang lebih rendah.

Sebaliknya, pada rasio metanol 1:6, viskositas biodiesel terus meningkat seiring bertambahnya jumlah katalis dan bahkan melampaui batas atas SNI 7182:2015, yaitu >6,3 cSt pada suhu 40 °C. Standar ini, yang mengacu pada ASTM D6751 dan EN 14214, mensyaratkan rentang viskositas biodiesel antara 2,3–6,0 cSt. Nilai yang melebihi batas ini mengindikasikan keberadaan trigliserida yang belum bereaksi, produk antara (mono- dan digliserida), atau sabun yang tidak sepenuhnya terpisah pada tahap pemurnian. Biodiesel dengan viskositas tinggi ini dapat mengganggu atomisasi bahan bakar, meningkatkan konsumsi, serta menurunkan efisiensi pembakaran mesin diesel.

Analisa Densitas

Grafik **Gambar 2** menunjukkan peningkatan densitas biodiesel seiring kenaikan persentase katalis pada kedua rasio (1:6 dan 1:12). Pada rasio 1:12, densitas awalnya lebih tinggi dibanding rasio 1:6, namun pada konsentrasi katalis 2,5%, rasio 1:6 sedikit melampaui densitas rasio 1:12. Hal ini mengindikasikan bahwa rasio katalis dan reaktan mempengaruhi sifat fisik akhir biodiesel. Densitas merupakan parameter penting karena berhubungan dengan nilai kalor, aliran bahan bakar, dan efisiensi pembakaran. Densitas biodiesel yang terlalu tinggi atau rendah dapat mengganggu injeksi bahan bakar dan performa mesin. Standar ASTM D6751 dan EN 14214 menetapkan densitas ideal biodiesel sekitar 0,86-0,90 g/mL, yang sesuai dengan rentang nilai pada grafik. Penambahan katalis CaO yang terimpregnasi KOH pada cangkang kemiri meningkatkan densitas secara bertahap.



Gambar 2. Pengaruh katalis dan rasio mol minyak : metanol terhadap densitas

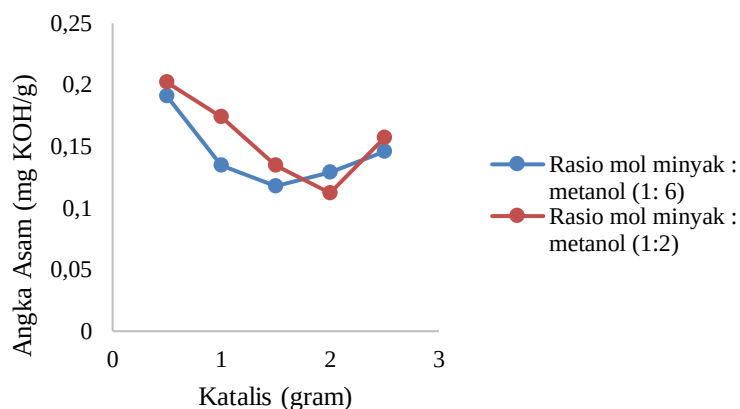
Hal ini terjadi karena katalis mempercepat transesterifikasi sehingga menghasilkan ester metil yang berstruktur lebih padat dan homogen, meningkatkan kepadatan massa bahan bakar. Efek ini juga diamati pada rasio 1:6, dimana peningkatan densitas lebih tajam mendekati 2,5% katalis. Pada konsentrasi rendah (0,5%-1%), densitas pada rasio 1:12 lebih tinggi dibanding rasio 1:6, mungkin karena rasio reaktan yang lebih tinggi menghasilkan produk awal yang lebih padat. Namun pada konsentrasi katalis maksimum, rasio 1:6 menghasilkan densitas sedikit lebih besar. Ini menandakan bahwa keseimbangan optimal antara katalis dan reaktan dapat meningkatkan struktur produk secara lebih efektif.

Rasio molar bahan baku dan metanol menentukan kesetimbangan reaksi. Rasio 1:12 lebih tinggi artinya metanol berlebih, bisa menyebabkan pelarutan katalis lebih baik di awal reaksi, meningkatkan kepadatan produk pada tahap awal. Namun pada konsentrasi katalis lebih tinggi, rasio 1:6 memungkinkan interaksi katalis dan reaktan yang lebih optimal sehingga densitas meningkat. Densitas yang meningkat biasanya berkorelasi dengan viskositas, dimana kedua sifat ini penting untuk performa bahan bakar. Namun kenaikan densitas yang terlalu tinggi dapat menyebabkan masalah aliran bahan bakar. Oleh karena itu, rasio dan konsentrasi katalis harus diatur agar biodiesel memenuhi standar kualitas tanpa mengorbankan performa. CaO dari limbah cangkang kerang menghasilkan densitas biodiesel sekitar 0,88 g/mL dengan efisiensi reaksi tinggi [11]. Hal ini mendukung temuan bahwa katalis biomassa terimpregnasi KOH dapat menghasilkan biodiesel dengan densitas stabil dan sesuai standar. Hasil grafik dan studi terkait menunjukkan bahwa penggunaan CaO cangkang kemiri yang terimpregnasi KOH dapat dioptimalkan untuk menghasilkan biodiesel dengan densitas ideal. Penyesuaian rasio katalis dan reaktan penting agar biodiesel yang dihasilkan memiliki kualitas fisik yang sesuai standar dan stabil untuk digunakan sebagai bahan bakar.

Analisa Angka Asam

Grafik **Gambar 3** menampilkan angka asam (mg KOH/g) dari biodiesel terhadap variasi persentase katalis pada dua rasio (1:6 dan 1:12). Secara umum, angka asam menurun seiring penambahan katalis dari 0,5 % ke 1,5 %, kemudian cenderung stabil atau sedikit meningkat di konsentrasi 2,5 %. Ini mencerminkan proses transesterifikasi yang berlangsung hampir sempurna di konsentrasi optimum sebelum muncul efek samping seperti soap formation. Angka asam mencerminkan jumlah asam lemak bebas (FFA) dalam biodiesel. Nilai harus berada di bawah 0,50 mg KOH/g agar sesuai standar ASTM D664 dan EN 14214, guna mencegah korosi mesin dan meningkatkan stabilitas penyimpanan.

Grafik tersebut menunjukkan nilai sekitar 0,11–0,20, yang sudah lebih rendah dari bahan awal namun masih perlu diperbaiki. Pada konsentrasi katalis rendah (0,5 % ke 1,5 %), terjadi penurunan signifikan angka asam. Ini menunjukkan bahwa katalis (CaO terimpregnasi KOH) efektif mendorong reaksi esterifikasi FFA dan transesterifikasi trigliserida, sehingga menurunkan keasaman produk biodiesel. Setelah titik optimum (sekitar 1,5 %), penambahan katalis tidak menurunkan angka asam lebih jauh, bahkan sedikit naik di 2,5 %. Fenomena ini sering terjadi karena kelebihan basa menyebabkan pembentukan sabun (soap), yang bisa meningkatkan keasaman relatif atau menyulitkan pemurnian produk akhir. Rasio 1:12 menunjukkan angka asam sedikit lebih tinggi di setiap konsentrasi dibanding rasio 1:6. Ini mungkin karena kelebihan metanol mengencerkan reaksi, sehingga katalis kurang aktif dalam mengonversi FFA. Di sisi lain, rasio 1:6 dengan reaktan lebih terfokus meningkatkan interaksi dengan katalis, menurunkan angka asam lebih efisien.

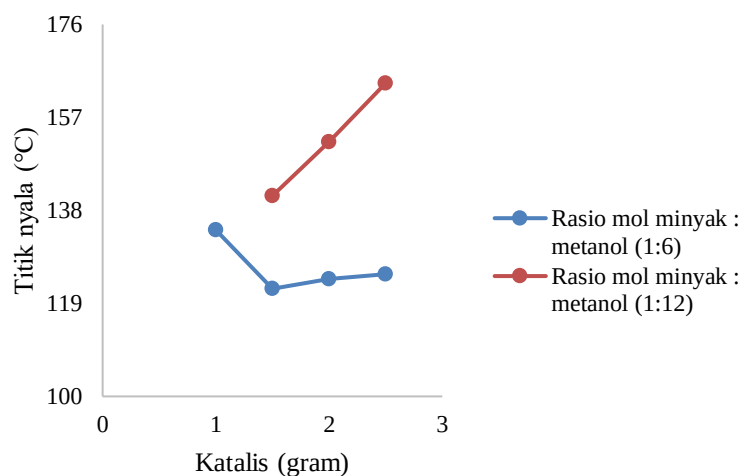


Gambar 3. Pengaruh katalis dan rasio mol minyak : metanol terhadap angka asam

Sebuah studi penggunaan CaO terimpregnasi KOH dari cangkang biomassa (telur atau snail shell) menyatakan bahwa angka asam akhir biodiesel sekitar 0,6–0,8 mg KOH/g agar memenuhi standar ASTM D664 . Nilai grafik (0,11–0,20) mungkin lebih rendah karena pre-treatment bahan baku atau reaksi ganda transesterifikasi. Penggunaan eggshell-derived hydrated CaO untuk minyak dengan nilai keasaman tinggi, melaporkan konversi FAME hingga 94,4% dengan katalis 2,5 % dan kondisi terkontrol—hasil yang mendukung tren grafik penurunan angka asam di konsentrasi tersebut [12]. Kelebihan FFA mengurangi aktivitas katalis, karena CaO-base tidak efektif tanpa esterifikasi awal. Hal ini menyebabkan titik optimum katalis menjadi terbatas dan kelebihan bisa menurunkan kualitas produk akhir [13] . Hasil grafik menyarankan bahwa konsentrasi katalis sekitar 1,0–1,5 % adalah optimal untuk menurunkan angka asam secara efektif, tanpa risiko soap formation. Jika visibilitas produk rendah di 2,5 %, perlu dilakukan washing lebih intensif atau pengaturan ulang rasio metanol.

Analisa Titik Nyala

Grafik **Gambar 4** pada penelitian ini menunjukkan adanya variasi titik nyala biodiesel akibat perbedaan jumlah katalis dan rasio mol metanol terhadap minyak nabati. Pada rasio metanol 1:12, peningkatan dosis katalis dari 1,5 gr hingga 2,5 gr menghasilkan kenaikan titik nyala yang signifikan, yakni dari sekitar 138 °C menjadi 163 °C. Sebaliknya, pada rasio 1:6, titik nyala cenderung stabil dalam rentang 119–135 °C, bahkan mengalami sedikit penurunan pada dosis katalis 1,5 gr. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa hampir seluruh titik data pada rasio 1:12 memenuhi kriteria ini, sedangkan pada rasio 1:6 terdapat beberapa titik yang berada pada batas bawah atau mendekati nilai minimum. Pada rasio 1:12, peningkatan katalis berdampak positif terhadap kemurnian biodiesel, diikuti oleh titik nyala yang lebih tinggi dan kadar metanol residu yang minimal. Sebaliknya, pada rasio 1:6, titik nyala rendah mencerminkan konversi yang belum optimal serta kandungan metanol yang masih cukup tinggi.



Gambar 4. Pengaruh katalis dan rasio mol minyak : metanol terhadap angka asam

Rasio mol metanol merupakan faktor penting yang turut menentukan kemurnian dan mutu biodiesel. Rasio 1:12 memberikan kelebihan metanol yang cukup untuk mendorong reaksi transesterifikasi ke arah pembentukan metil ester yang lebih sempurna, sehingga kadar trigliserida dan monogliserida yang dapat menurunkan titik nyala semakin berkurang. Pada rasio 1:6, keterbatasan jumlah metanol menghambat konversi, menyisakan metanol serta produk antara yang menyebabkan titik nyala lebih rendah. Rasio metanol tinggi efektif menurunkan residu metanol dan meningkatkan titik nyala biodiesel sesuai standar internasional [14]. Secara umum, temuan ini mengindikasikan bahwa kombinasi penggunaan katalis sebesar 2–2,5 g dan rasio metanol 1:12 memberikan titik nyala tertinggi, jauh di atas batas minimal SNI 7182:2015, sehingga memenuhi standar keamanan dan mutu biodiesel. Sebaliknya, titik nyala yang rendah pada rasio 1:6 menandakan perlunya optimasi jumlah katalis dan rasio metanol untuk meminimalkan kandungan metanol tersisa. Peningkatan titik nyala mencerminkan biodiesel yang lebih murni, yang berimplikasi pada efisiensi pembakaran mesin dan keamanan penyimpanan sesuai spesifikasi standar.

Analisa Angka Asam

Hasil analisis angka setana menunjukkan bahwa seluruh sampel biodiesel memenuhi persyaratan SNI 7182:2015, yang mensyaratkan nilai minimum 51 untuk menjamin kualitas pembakaran yang optimal. Angka setana tertinggi diperoleh pada rasio mol minyak:metanol 1:6 dengan penggunaan katalis 1,5 gr yaitu 54,7, sedangkan pada rasio 1:12 dengan jumlah katalis yang sama diperoleh angka setana sebesar 52,5. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa variasi rasio metanol memberikan pengaruh signifikan terhadap komposisi akhir metil ester (FAME), khususnya pada distribusi fraksi jenuh dan tak jenuh yang menentukan karakteristik penyalan bahan bakar. Penggunaan rasio 1:6 menghasilkan angka setana yang lebih tinggi karena jumlah metanol yang digunakan mendekati kebutuhan stoikiometri, sehingga reaksi transesterifikasi lebih selektif menghasilkan FAME jenuh, seperti metil palmitat dan metil stearat, yang diketahui memiliki angka setana lebih tinggi. Sebaliknya, rasio 1:12 dengan kelebihan metanol dapat menggeser kesetimbangan reaksi, meningkatkan pembentukan FAME tak jenuh yang umumnya memiliki angka setana lebih rendah, serta meninggalkan residu metanol dalam jumlah kecil yang berdampak pada penurunan nilai *cetane number*.

Tabel 1. Pengaruh katalis dan rasio mol minyak : metanol terhadap angka asam

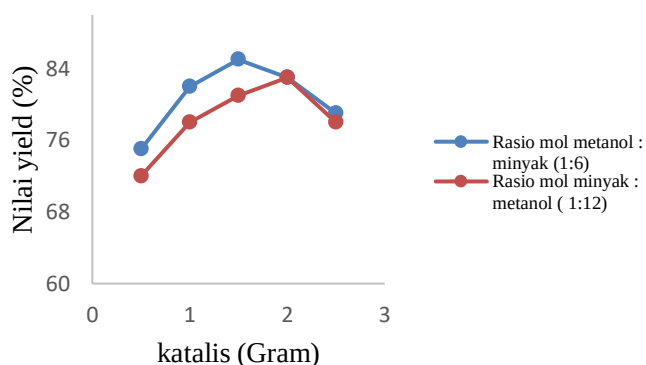
Rasio mol minyak : metanol	Katalis (Gram)	Angka setana
1: 6	1,5	54,7
1: 12	1,5	52,5

Jumlah katalis 1,5 gr pada kedua rasio terbukti memadai untuk mengaktifkan transesterifikasi secara efisien tanpa memicu pembentukan sabun berlebih yang dapat mengganggu kemurnian biodiesel. Kondisi ini memungkinkan terbentuknya biodiesel dengan angka setana di atas batas minimum standar, memastikan proses pembakaran yang efisien dan stabilitas operasional mesin diesel. Perbedaan angka setana antar rasio metanol ini menggarisbawahi adanya interaksi antara jumlah katalis dan rasio metanol terhadap distribusi FAME yang dihasilkan. Tingginya angka setana pada rasio 1:6 mendukung sifat penyalan cepat dan pembakaran lebih bersih pada mesin diesel, yang dapat mengurangi risiko knocking dan meningkatkan efisiensi termal. Sementara itu, meskipun angka setana pada rasio 1:12 masih berada dalam rentang standar, penurunan nilai ini perlu diperhatikan terutama pada aplikasi yang memerlukan kecepatan penyalan optimal. Secara keseluruhan, hasil penelitian menegaskan bahwa pengaturan rasio mol minyak:metanol yang sesuai, dengan jumlah katalis 1,5 g, mampu menghasilkan biodiesel berkualitas tinggi dengan angka setana memenuhi SNI 7182:2015. Rasio 1:6 terbukti lebih optimal dalam menghasilkan angka setana yang tinggi, sementara rasio 1:12 tetap berada dalam batas aman meskipun mengalami sedikit penurunan. Oleh karena itu, optimasi rasio metanol dan jumlah katalis menjadi kunci untuk memastikan biodiesel yang dihasilkan memiliki kualitas pembakaran yang baik, efisiensi tinggi, dan kompatibilitas dengan mesin diesel modern.

Analisa Yield

Grafik **Gambar 5** menunjukkan bahwa nilai yield meningkat dari katalis 0,5 % ke 1,5 %, mencapai puncaknya di sekitar 1,5 %, mencapai puncaknya di sekitar 1,5–2 %, lalu menurun sedikit pada 2,5 %. Ini mengindikasikan keberadaan titik optimal katalis—penambahan katalis hingga batas tertentu mempercepat reaksi transesterifikasi, tetapi kelebihan dapat menyebabkan efisiensi menurun. Rasio 1:6 secara konsisten

menghasilkan yield yang lebih tinggi dibanding rasio 1:12, terutama di 1–1,5 %. Ini menunjukkan bahwa rasio metanol ke minyak yang moderat memberikan interaksi optimal antara katalis dengan reaktan, memaksimalkan konversi menjadi ester. Katalis CaO pada 3 % dan rasio metanol-minyak 9:1 menghasilkan yield hingga 93,35 %. Meski konsentrasi katalis berbeda, pola optimalisasi rasio dan konsentrasi sangat konsisten dengan grafik yield Studi KOH-impregnated CaO/biochar dari biomassa seperti snail shell dan eggshell menunjukkan yield hingga 98,4 %–98,6 % pada katalis 2–3 % [15]. Efek ini mendukung kenaikan yield di grafik Anda hingga 1,5–2 %, sebelum potensi penurunan bila katalis terlalu tinggi. CaO aktif bersifat kuat basa yang memecah trigliserida menjadi metil ester (FAME).



Gambar 5. Pengaruh katalis dan rasio mol minyak : metanol terhadap yield

Impregnasi KOH memperluas luas permukaan, meningkatkan jumlah situs aktif untuk metanol memproduksi metoksida. Efisiensi konversi optimal terjadi saat katalis cukup—seperti saat yield maksimum terlihat di grafik. Pada 2,5 %, nilai yield turun di kedua rasio. Ini konsisten dengan risiko pencucian katalis (leaching) dan terbentuknya sabun (soap) pada kandungan katalis berlebih—yang menghambat pemisahan ester dan menurunkan efisiensi reaksi. Dari grafik, yield tertinggi sekitar 1,5–2 % katalis dengan rasio 1:6. Ini sesuai dengan banyak penelitian, seperti ACS Omega (2024), yang memperlihatkan bahwa 2 % katalis CaO–KOH memberi yield mendekati 98 %. Data literatur menunjukkan penggunaan rasio metanol tinggi ($\geq 9:1$) dan temperatur sekitar 60–65 °C selama 90–180 menit untuk efisiensi penuh. Grafik yang optimal pada 1,5–2 % katalis kemungkinan mengikuti kondisi serupa. Untuk mendalami optimasi yield, disarankan menguji konsentrasi katalis dalam rentang sempit sekitar 1,0–2,5 %, ditambah variasi rasio metanol 6:1–12:1, temperatur 60–70 °C, dan waktu reaksi 60–180 menit. Ini akan memverifikasi titik optimum dan menghindari inefisiensi overloading.

4. Kesimpulan

Analisa katalis menggunakan XRF menunjukkan bahwa katalis berbasis CaO- KOH memiliki komposisi dominan CaO (77,15%) yang bertindak sebagai fase aktif utama dengan sifat basa kuat, didukung oleh K_2O (9,53%) yang meningkatkan jumlah situs basa. Kombinasi ini efektif mempercepat proses transesterifikasi minyak jelantah menjadi biodiesel. Variasi jumlah katalis CaO-KOH dan rasio mol minyak:metanol berpengaruh signifikan terhadap mutu biodiesel dari minyak jelantah. Kondisi terbaik dicapai pada penggunaan 1,5% katalis CaO terimpregnasi KOH dengan rasio 1:6, menghasilkan biodiesel yang memenuhi standar SNI 7182:2015 meliputi angka setana sebesar 54,7, titik nyala >120 °C, angka asam <0,5 mg KOH/g, serta viskositas dan densitas dalam rentang yang dipersyaratkan dan memiliki kandungan metil ester $\pm 99,57\%$. Hasil ini menunjukkan reaksi transesterifikasi berlangsung hampir sempurna, serta mendukung pemanfaatan limbah cangkang kemiri sebagai katalis $kg/m^2.jam$, dan fluks permeasi total $0,84 kg/m^2.jam$ pada konsentrasi umpan 98 %-b etanol dan temperatur 60 °C.

5. Referensi

- [1] F. I. Darmawan and I. W. Susila, “Proses produksi biodiesel dari minyak jelantah dengan metode dry-wash system,” *Jtm*, vol. 2, no. 1, pp. 80–87, 2013.
- [2] H. Hadrah, M. Kasman, and F. M. Sari, “Analisis Minyak Jelantah Sebagai Bahan Bakar Biodiesel dengan Proses Transesterifikasi,” *J. Daur Lingkung.*, vol. 1, no. 1, p. 16, 2018, doi: 10.33087/daurling.v1i1.4.
- [3] Z. Darwis, A. Afrizal, and E. R. Sriutami, “Optimasi Konsentrasi Katalis CaO dari Cangkang Telur Ayam Negeri Dalam Reaksi Transesterifikasi Minyak Jarak Pagar (*Jatropha curcas* L) Sebagai

- Bahan Biodiesel,” *JRSKT J. Ris. Sains dan Kim. Terap.*, vol. 2, no. 1, pp. 142–146, 2012, doi: 10.21009/jrskt.021.04.
- [4] S. maulana, agustina, “Proses Aktivasi Arang Aktif Dari Cangkang Kemiri (Aleurites Moluccana) Dengan Variasi Jenis Dan Konsentrasi Aktivator Kimia,” *Jur. Teknol. Ind. Pertan. Fak. Pertan. Univ. Lambung Mangkurat*, vol. 42, no. 3, pp. 247–256, 2017.
- [5] D. Paranita, D. Donda, and M. Sebayang, “Blending Arang Aktif Cangkang Kemiri Dan Cangkang Sawit Dalam Penjernihan Minyak Goreng Bekas,” *J. Al Ulum LPPM Univ. Al Washliyah Medan*, vol. 11, no. 1, pp. 16–20, 2023, doi: 10.47662/alulum.v11i1.433.
- [6] S. Oko, I. Syahrir, and M. Irwan, “The utilization of CAO catalyst impregnated with KOH in biodiesel production from waste cooking oil,” *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 7, no. 11, pp. 115–118, 2018.
- [7] S. Oko, Mustafa, A. Kurniawan, and D. Willain, “Sintesis Biodiesel dari Minyak Kedelai Melalui Reaksi Transesterifikasi Dengan Katalis CaO/NaOH,” *J. Teknol. Vol.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–6, 2021, [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.24853/jurtek.13.1.1-6>
- [8] 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.
- [9] W. M. Kadir, K. T. Wondimu, and G. S. Weldegurum, “Optimization and characterization of biodiesel from waste cooking oil using modified CaO catalyst derived from snail shell,” *Heliyon*, vol. 9, no. 5, p. e16475, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16475.
- [10] V. D. H. Putri and Samik, “Synthesis and Characterization of K₂O/ACT Catalyst for Biodiesel Production from Beef Fat Waste,” *J. Pijar Mipa*, vol. 19, no. 2, pp. 314–318, 2024, doi: 10.29303/jpm.v19i2.6421.
- [11] A. Hameed, S. R. Naqvi, U. Sikandar, and W. H. Chen, “One-Step Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using CaO Promoted Activated Carbon Catalyst from Prunus persica Seeds,” *Catalysts*, vol. 12, no. 6, 2022, doi: 10.3390/catal12060592.
- [12] Z. Weng *et al.*, “Green Production of Biodiesel from High Acid Value Oil via Glycerol Esterification and Transesterification Catalyzed by Nano Hydrated Eggshell-Derived CaO,” *Energies*, vol. 16, no. 18, 2023, doi: 10.3390/en16186717.
- [13] W. Kingkam *et al.*, “Preparation of CaO@CeO₂ Solid Base Catalysts Used for Biodiesel Production,” *Catalysts*, vol. 14, no. 4, 2024, doi: 10.3390/catal14040240.
- [14] A. T. Doppalapudi, A. K. Azad, M. M. K. Khan, and A. M. T. Oo, “Optimization and simulation of Tucuma and Ungurahui biodiesel process parameters and their effects on fuel properties,” *Energy Convers. Manag. X*, vol. 24, no. September, p. 100721, 2024, doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100721.
- [15] S. F. Basumatary *et al.*, “Advances in CaO-based catalysts for sustainable biodiesel synthesis,” *Green Energy Resour.*, vol. 1, no. 3, p. 100032, 2023, doi: 10.1016/j.gerr.2023.100032.