



Sintesis Biodiesel Menggunakan Katalis Heterogen CaO Batu Kapur dengan *Support Fly Ash* Pabrik Kelapa Sawit Teraktivasi Termal

Synthesis of Biodiesel using a CaO Heterogeneous Catalyst from Limestone Supported by Thermally Activated Fly Ash Palm Oil Mill

Rita Youfa¹, Elda Pelita², Dyah Nirmala¹, Desniorita³, Regna Tri Jayanti³, Anang Baharuddin Sahaq³, Resi Levi Permadani^{3*}

¹Teknik Kimia Bahan Nabati, Politeknik ATI Padang, Jl Bungo Pasang, Kota Padang, 25171

²Analisis Kimia, Politeknik ATI Padang, Jl Bungo Pasang, Kota Padang, 25171

³Teknologi Rekayasa Bioproses Energi Terbarukan, Politeknik ATI Padang, Jl Bungo Pasang, Kota Padang, 25171

*Corresponding Author: resilp@poltekatipdg.ac.id

Received: 27th May 2025; Revised: 16th December 2025; Accepted: 24th December 2025

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk membuat biodiesel dari *Refined Bleached Deodorized Palm Oil* (RBDPO) menggunakan katalis heterogen berbasis kalsium oksida (CaO) dari batu kapur yang dimodifikasi dengan *fly ash* (FA) pabrik kelapa sawit sebagai *support* katalis. Bahan baku batu kapur diaktivasi terlebih dulu untuk mendapatkan katalis CaO. Selanjutnya bahan baku FA juga dilakukan aktivasi dengan suhu kalsinasi 500°C. Sintesis katalis CaO-FA menggunakan metode impregnasi basah kemudian dikalsinasi pada suhu 600°C. Katalis CaO-FA diaplikasikan untuk proses transesterifikasi RBDPO dengan metanol pada berbagai rasio molar. Pada penelitian ini dikaji pengaruh variasi komposisi katalis CaO-FA dengan rasio 1:1; 2:1; dan 3:1 serta rasio molar metanol:RBDPO 8:1; 10:1 dan 12:1 terhadap yield biodiesel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio katalis CaO-FA dan rasio molar metanol:RBDPO mempengaruhi secara signifikan yield biodiesel dan komposisi *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) yang dihasilkan. Analisis *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) menunjukkan bahwa komposisi CaO-FA 3:1 dengan rasio molar metanol:RBDPO 8:1 menghasilkan biodiesel dengan kandungan metil palmitat (C₁₇H₃₄O₂) tertinggi sebesar 88,99% yang sesuai dengan karakteristik biodiesel berkualitas tinggi. Hasil penelitian ini memberikan wawasan penting dalam pengembangan katalis heterogen berbasis CaO-FA untuk produksi biodiesel yang ekonomis dan ramah lingkungan, selaras dengan program pemerintah untuk meningkatkan penggunaan energi terbarukan.

Kata kunci: Biodiesel, CaO, *Fly ash*, Katalis, RBDPO

ABSTRACT

This study aims to produce biodiesel from Refined Bleached Deodorized Palm Oil (RBDPO) using a heterogeneous catalyst based on calcium oxide (CaO) derived from limestone and modified with palm oil mill fly ash (FA) as a catalyst support. The limestone feedstock was first activated to obtain the CaO catalyst. Subsequently, the FA material was activated through calcination at 500°C. The CaO-FA catalyst was synthesized using the wet impregnation method and then calcined at 600°C. This catalyst was applied in the transesterification of RBDPO with methanol at various molar ratios. The study investigated the effect of different CaO-FA catalyst compositions (1:1, 2:1, and 3:1), and methanol:RBDPO molar ratios (8:1, 10:1, and 12:1) on biodiesel yield. The results demonstrated that both the CaO-FA catalyst ratios and the methanol:RBDPO molar ratios significantly influenced the biodiesel yield and the resulting Fatty Acid Methyl Ester (FAME) composition. Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) analysis revealed that the 3:1 CaO-FA composition with an 8:1 methanol:RBDPO molar ratio produced biodiesel with the highest methyl palmitate (C₁₇H₃₄O₂) content of 88.99%, which meets the characteristics of high-quality biodiesel. These findings provide valuable insights into the development of CaO-FA-based heterogeneous catalysts for cost-effective and environmentally friendly biodiesel production, in line with government initiatives to promote renewable energy utilization.

Keywords: Biodiesel, CaO, Catalyst, *Fly ash*, RBDPO

Copyright © 2026 by Authors, Published by JITK. This is an open-access article under the CC BY-SA License (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>).

How to cite: Youfa, R., Pelita, E., Nirmala, D., Desniorita, D., Jayanti, R. T., Sahaq, A. B., & Permadani, R. L. Sintesis Biodiesel Menggunakan Katalis Heterogen CaO Batu Kapur Dengan Support Fly Ash Pabrik Kelapa Sawit Teraktivasi Termal. *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*, 10(1).

Permalink/DOI: 10.32493/jitk.v10i1.49286



PENDAHULUAN

Biodiesel sebagai bahan bakar alternatif yang terbarukan dan ramah lingkungan telah menjadi fokus penelitian global, terutama di negara-negara dengan sumber daya minyak nabati melimpah seperti Indonesia (Mahlia et al., 2019). *Refined Bleached Deodorized Palm Oil* (RBDPO) merupakan salah satu bahan baku potensial untuk produksi biodiesel di Indonesia, mengingat Indonesia adalah produsen minyak kelapa sawit terbesar di dunia. Peningkatan kebutuhan biodiesel, menciptakan permintaan akan katalis yang efisien dan ekonomis untuk produksi biodiesel (Farobie & Hartulistiyoso, 2021), (Wirawan et al., 2024). Provinsi Sumatera Barat memiliki sumber daya batu kapur yang melimpah dan banyaknya jumlah pabrik kelapa sawit yang menghasilkan jumlah limbah *fly ash* (FA) yang signifikan dari operasi boiler. Pemanfaatan bahan-bahan lokal ini untuk mengembangkan katalis heterogen menawarkan keuntungan ekonomi dan lingkungan sekaligus mendukung tujuan kemandirian energi nasional.

Proses produksi biodiesel umumnya melibatkan reaksi transesterifikasi trigliserida dengan alkohol menggunakan katalis. Meskipun katalis homogen seperti NaOH dan KOH umum digunakan karena aktivitasnya yang tinggi, namun katalis heterogen menawarkan keunggulan seperti kemudahan pemisahan, kemampuan untuk digunakan kembali, dan pengurangan limbah cair (Kouzu & Hidaka, 2012). CaO telah diakui sebagai salah satu katalis heterogen yang menjanjikan untuk produksi biodiesel karena aktivitas katalitik yang tinggi, ketersediaan luas, dan biaya rendah. Sisca et al. (2021) menunjukkan bahwa CaO dari batu kapur yang dikalsinasi pada 900°C selama 5 jam dapat menghasilkan yield biodiesel hingga 86 %. Namun, katalis CaO murni memiliki beberapa keterbatasan, termasuk leaching kalsium ke dalam produk, deaktivasi oleh air dan CO₂, serta kekuatan mekanik yang relatif rendah (Kouzu & Hidaka, 2012), (Sisca et al., 2021).

Modifikasi CaO dengan material pendukung (*support*) telah menjadi pendekatan efektif untuk meningkatkan stabilitas dan performa katalis. Chakraborty et al. (2010) melaporkan bahwa katalis CaO yang didukung FA batu bara menunjukkan stabilitas lebih baik dibandingkan CaO murni karena komponen SiO₂ dan Al₂O₃ dalam FA meningkatkan kekuatan mekanik dan dispersi situs aktif. FA dari pabrik kelapa sawit juga telah terbukti memiliki potensi sebagai material katalitik karena kandungan silikanya yang tinggi (Ho et al., 2014). Ho et al. (2012) melaporkan bahwa FA pabrik kelapa sawit sebagai *support* katalis dapat meningkatkan yield biodiesel hingga 94,5 %.

Metode aktivasi juga berperan penting dalam kinerja katalis. FA sebagai *support* katalis dilakukan aktivasi untuk meningkatkan kandungan SiO₂ dan Al₂O₃ serta ukuran pori. Beberapa penelitian yang mengaplikasikan FA sebagai katalis reaksi transesterifikasi, melakukan aktivasi termal dengan kalsinasi pada 900°C selama 2-3 jam sebelum dimodifikasi dengan CaO (Chakraborty et al., 2010), (Ho et al., 2012), (Jain et al., 2010), (Volli et al., 2019). Selain itu, rasio metanol dan minyak juga merupakan parameter penting dalam reaksi transesterifikasi. Penelitian terkait sintesis biodiesel melaporkan bahwa rasio metanol dan minyak optimal berada pada rentang 6:1 hingga 12:1, dengan rasio yang lebih tinggi cenderung meningkatkan yield hingga titik tertentu (Brahma et al., 2022), (Zhenyi et al., 2021).

Saat ini, penelitian-penelitian yang telah dilakukan menunjukkan potensi katalis berbasis CaO dan pemanfaatan FA. Namun, penelitian yang mengkaji pengembangan katalis heterogen dari batu kapur dan FA pabrik kelapa sawit, khususnya dalam konteks sumber daya lokal Sumatera Barat masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan katalis CaO dari batu kapur Sumatera Barat yang dimodifikasi dengan FA pabrik kelapa sawit serta mengevaluasi kinerjanya dalam sintesis biodiesel. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk



menganalisis pengaruh variasi rasio CaO-FA dan rasio molar metanol:RBDPO terhadap yield dan komposisi FAME (*fatty acid methyl ester*) biodiesel. Variasi rasio CaO-FA akan memberikan pengaruh signifikan terhadap aktivitas katalitik dalam proses transesterifikasi, dimana dengan meningkatnya proporsi CaO diperkirakan dapat meningkatkan yield biodiesel. Selain itu, interaksi kimia antara CaO dan kandungan silika-alumina dalam FA diyakini dapat meningkatkan stabilitas serta kekuatan katalis, sehingga mampu memberikan performa yang lebih baik dibandingkan CaO murni dalam proses sintesis biodiesel.

BAHAN DAN METODE

Bahan baku utama pada penelitian ini adalah batu kapur (Kamang Magek, Agam Regency), *fly ash* (PT Mutiara Agam, Agam Regency) dan RBDPO (PT Wilmar Nabati Indonesia, Padang). Selanjutnya bahan tambahan yang digunakan adalah *aquadest* dan metanol (CV Novalindo, Padang). Adapun tahapan penelitian yang dilakukan, yaitu: Aktivasi termal FA, sintesis CaO dari batu kapur, sintesis katalis CaO-FA, dan sintesis biodiesel.

Aktivasi Termal *Fly Ash*

Metode ini berdasarkan pada penelitian yang telah dilakukan oleh Nirmala et al. (2024). FA diayak untuk menghilangkan pengotor atau sampah yang terbawa ketika pengambilan sampel. Sampel FA ditambahkan *aquadest* dan di *mixer* selama ± 10 menit. Kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C dan dilanjutkan dengan kalsinasi pada suhu 500°C selama 4 jam.

Preparasi Batu Kapur

Batu kapur ($90\ \mu\text{m}$) terlebih dahulu dicuci dengan air kemudian dikeringkan dalam oven pada 105°C selama 3 jam. Sampel batu kapur kering dikalsinasi pada temperatur 900°C selama 5 jam untuk mendapatkan CaO (Sisca et al., 2021).

Sintesis Katalis CaO-FA

Sintesis katalis CaO yang dimodifikasi dengan FA menggunakan metode impregnasi basah dengan variasi rasio katalis CaO:FA sebesar 1:1, 2:1 dan 3:1 (Ho et al., 2014), (Sisca et al., 2021). CaO sebanyak 150 gram ditambahkan ke dalam 200 ml *aquadest* dengan sistem tertutup pada kecepatan pengadukan 400 rpm. Secara perlahan tambahkan FA yang telah diaktivasi sesuai dengan variasi rasio katalis CaO:FA (1:1, 2:1, dan 3:1) ke dalam campuran. Selanjutnya dipanaskan pada suhu 70°C dan terus dilakukan pengadukan selama 4 jam. Air dipisahkan dari padatan katalis, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C . Katalis CaO-FA dikalsinasi pada 600°C selama 5 jam.

Sintesis Biodiesel

Proses transesterifikasi dilakukan dalam labu leher tiga yang dilengkapi dengan *reflux condenser* dan pengadukan. Sejumlah RBDPO dipanaskan hingga 60°C kemudian ditambahkan katalis CaO-FA 3% (b/b minyak) dan metanol dengan waktu reaksi selama 3 jam. Penambahan jumlah RBDPO dan metanol menyesuaikan dengan variasi rasio mol metanol:RBDPO sebesar 8:1, 10:1 dan 12:1. Campuran reaksi dibiarkan mengendap hingga terbentuk dua lapisan: lapisan bawah (gliserol) dan lapisan atas (biodiesel). Selanjutnya gliserol dipisahkan dari biodiesel.

Biodiesel dicuci dengan air panas ($80-100^{\circ}\text{C}$) dan air pencucian dipisahkan. Proses pencucian diulang hingga pH air pencucian netral ($\text{pH} = 7$). Langkah pencucian ini bertujuan untuk menghilangkan sisa katalis, gliserol, dan metanol yang ada dalam biodiesel. Biodiesel yang telah dicuci kemudian dipanaskan pada suhu 110°C untuk menghilangkan sisa air (Orchidantya et al., 2023). Biodiesel yang diperoleh selanjutnya dilakukan perhitungan yield dan karakterisasi menggunakan instrumen GC-MS (*Gas Chromatography-Mass Spectrometry*) untuk mengetahui komposisi FAME (*fatty acid methyl ester*) dalam biodiesel.



$$\text{Yield (\%)} = \frac{\text{Berat biodiesel (gram)}}{\text{Berat RBDPO (gram)}} \times 100\%$$

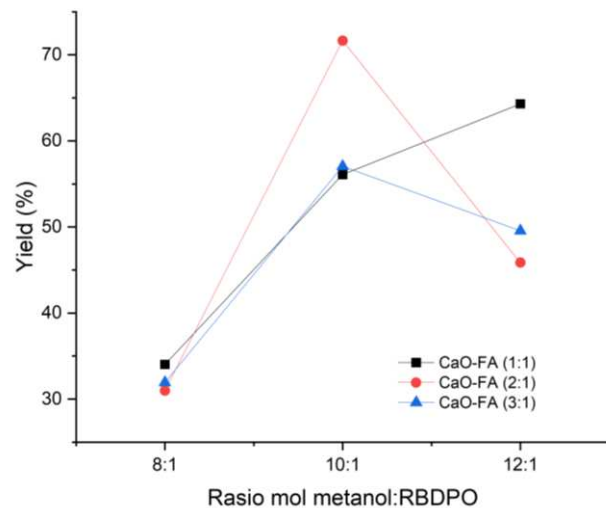
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, variasi rasio katalis CaO-FA sebesar 1:1, 2:1 dan 3:1 digunakan untuk mengevaluasi pengaruh perbedaan komposisi katalis pada produksi biodiesel. Secara teoritis, perubahan rasio CaO terhadap FA akan memengaruhi jumlah situs basa aktif, tingkat dispersi CaO pada permukaan FA, serta potensi interaksi antara CaO dengan komponen silika-alumina dalam FA yang berfungsi sebagai material pendukung. Komponen SiO₂ dan Al₂O₃ pada FA diketahui berperan penting dalam meningkatkan stabilitas struktural dan distribusi aktif CaO pada permukaan katalis (Ho et al., 2014), (Volli et al., 2019). Selain itu, Ghosh et al. (2024) menegaskan bahwa sifat katalis heterogen sangat ditentukan oleh struktur pori, kekuatan ikatan antara situs aktif dan *support*, serta efektivitas proses aktivasi yang dilakukan. Dengan demikian, variasi rasio CaO-FA pada penelitian ini diharapkan menghasilkan karakter permukaan katalis yang berbeda, yang selanjutnya memengaruhi kemampuan katalis dalam mengonversi trigliserida menjadi FAME. Melalui pertimbangan tersebut, kinerja katalis diuji melalui proses transesterifikasi RBDPO dengan variasi rasio molar metanol:RBDPO sebesar 8:1, 10:1, dan 12:1. Yield biodiesel pada setiap variasi tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 1. Secara umum, hasil menunjukkan bahwa komposisi katalis CaO-FA dan rasio mol metanol:RBDPO berpengaruh signifikan terhadap yield biodiesel. Yield tertinggi sebesar 71,65% diperoleh pada katalis CaO-FA (2:1) dengan rasio mol metanol:RBDPO 10:1. Yield yang diperoleh masih lebih rendah dibandingkan dengan yield biodiesel menggunakan katalis CaO murni sebesar 86% seperti yang dilaporkan pada penelitian Sisca et al. (2021). Perbedaan ini mengindikasikan bahwa meskipun FA berfungsi sebagai *support*, proses impregnasi dan aktivasi termal CaO-FA pada penelitian ini kemungkinan belum menghasilkan

jumlah situs basa aktif yang setara dengan CaO murni.

Tabel 1. Yield biodiesel pada setiap katalis

Katalis	Yield (%)		
	Rasio molar metanol:RBDPO		
	8:1	10:1	12:1
CaO-FA (1:1)	34,02	30,99	31,92
CaO-FA (2:1)	56,09	71,65	57,06
CaO-FA (3:1)	64,31	45,85	49,55



Gambar 1. Pengaruh rasio mol metanol dan RBDPO terhadap yield biodiesel

Fenomena katalisis pada sistem CaO-FA berkaitan erat dengan peran CaO sebagai fase aktif basa dan FA sebagai material pendukung yang memengaruhi dispersi serta aksesibilitas situs aktif selama reaksi transesterifikasi. CaO menyediakan situs basa kuat berupa ion O²⁻ pada permukaannya yang berperan dalam mengaktifkan molekul metanol melalui pembentukan metoksida, yang selanjutnya mengubah gugus karbonil trigliserida menjadi *fatty acid methyl ester* (FAME) (Ghosh et al., 2024), (Kouzu & Hidaka, 2012). FA yang mengandung komponen SiO₂ dan Al₂O₃ memungkinkan terjadinya interaksi antara CaO dan permukaan FA, baik secara fisik maupun kimia melalui pembentukan ikatan Ca-O-Si dan Ca-O-Al (Ghosh et al., 2024), (Volli et al., 2019). Namun, interaksi yang kuat atau dispersi CaO yang tidak merata berpotensi menyebabkan sebagian situs basa aktif tertutupi oleh FA, sehingga menurunkan



jumlah situs aktif yang dapat diakses oleh reaktan. Hal ini telah dilaporkan oleh Ghosh et al. (2024) dan Wang et al. (2021) bahwa pada katalis CaO berbasis material silika-alumina, keberadaan material pendukung dapat mengurangi kekuatan basa efektif CaO ketika proses impregnasi dan aktivasi tidak berlangsung optimal. Kondisi ini dapat menjelaskan alasan terjadinya perbedaan aktivitas katalitik antar rasio CaO-FA serta rendahnya yield biodiesel dibandingkan penggunaan CaO murni.

Aktivasi termal bertujuan untuk meningkatkan ketersediaan situs aktif pada permukaan katalis, yang sangat berperan penting dalam reaksi transesterifikasi (Leung et al., 2010), (Kouzu & Hidaka, 2012). Rendahnya aktivitas katalitik dari CaO-FA dibandingkan dengan CaO murni dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti distribusi ukuran partikel, luas permukaan spesifik, serta kemungkinan adanya kontaminan atau fase inert dari FA yang tidak sepenuhnya terdekomposisi selama proses aktivasi. Pada penelitian ini, faktor yang paling dominan dimungkinkan berasal dari belum optimalnya aktivasi katalis dan dispersi CaO pada permukaan FA. Kondisi ini berpotensi menyebabkan sebagian CaO tidak terdispersi secara optimal atau tertutupi oleh komponen FA, sehingga tidak berkontribusi secara efektif sebagai situs basa aktif. Dengan demikian, meskipun FA berperan dalam meningkatkan stabilitas mekanik katalis, keberadaannya pada rasio tertentu justru dapat menurunkan aktivitas katalitik dibandingkan CaO murni. Kondisi ini juga dapat dipengaruhi oleh keberadaan fase inert dari FA yang tidak sepenuhnya teraktivasi pada kondisi kalsinasi yang digunakan, sehingga menurunkan luas permukaan spesifik efektif dan menghambat akses reaktan ke situs aktif CaO (Ghosh et al., 2024). Selanjutnya biodiesel dengan yield tertinggi pada masing-masing rasio katalis CaO-FA dianalisis menggunakan GC-MS untuk mengetahui kandungan FAME dalam biodiesel. Hasil analisis dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 2.

Tabel 2. Komposisi kimia biodiesel

Senyawa	Komposisi (%)		
	CaO-FA (1:1)	CaO-FA (2:1)	CaO-FA (3:1)
Metil Palmitat (C ₁₇ H ₃₄ O ₂)	44,30	-	88,99
Metil Miristat (C ₁₅ H ₃₀ O ₂)	9	-	6,28
Metil Laurat (C ₁₃ H ₂₆ O ₂)	0,63	47,66	1,43
Metil Pentadekanoat (C ₁₆ H ₃₂ O ₂)	0,15	-	0,32
cis-7-Hexadecenoic Acid methyl ester (C ₁₇ H ₃₂ O ₂)	0,43	-	1,67
Metil Dekanoat (C ₁₁ H ₂₂ O ₂)	0,07	6	0,23
Metil Kaprilat (C ₉ H ₁₈ O ₂)	0,06	12,64	0,25
Metil Oleat (C ₁₉ H ₃₆ O ₂)	45,35	-	0,02
Methyl cis-10-heptadecenoate (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	-	-	0,11
Methyl Heptadecanoate (C ₁₈ H ₃₆ O ₂)	-	-	0,39
Methyl 9-oxononanoate (C ₁₀ H ₁₈ O ₃)	-	-	0,05
Glycidyl Methacrylate (C ₇ H ₁₀ O ₃)	-	8,52	-
Propanoic acid, 4-hexen-1-methyl ester (C ₉ H ₁₆ O ₂)	-	6,87	-
Copaene (C ₁₅ H ₂₄)	-	-	0,16
Cyclobutanecarbohydrazide (C ₃ H ₁₀ N ₂ O)	-	10,91	-
Flecainide (C ₁₇ H ₂₀ F ₆ N ₂ O ₃)	-	7,4	-

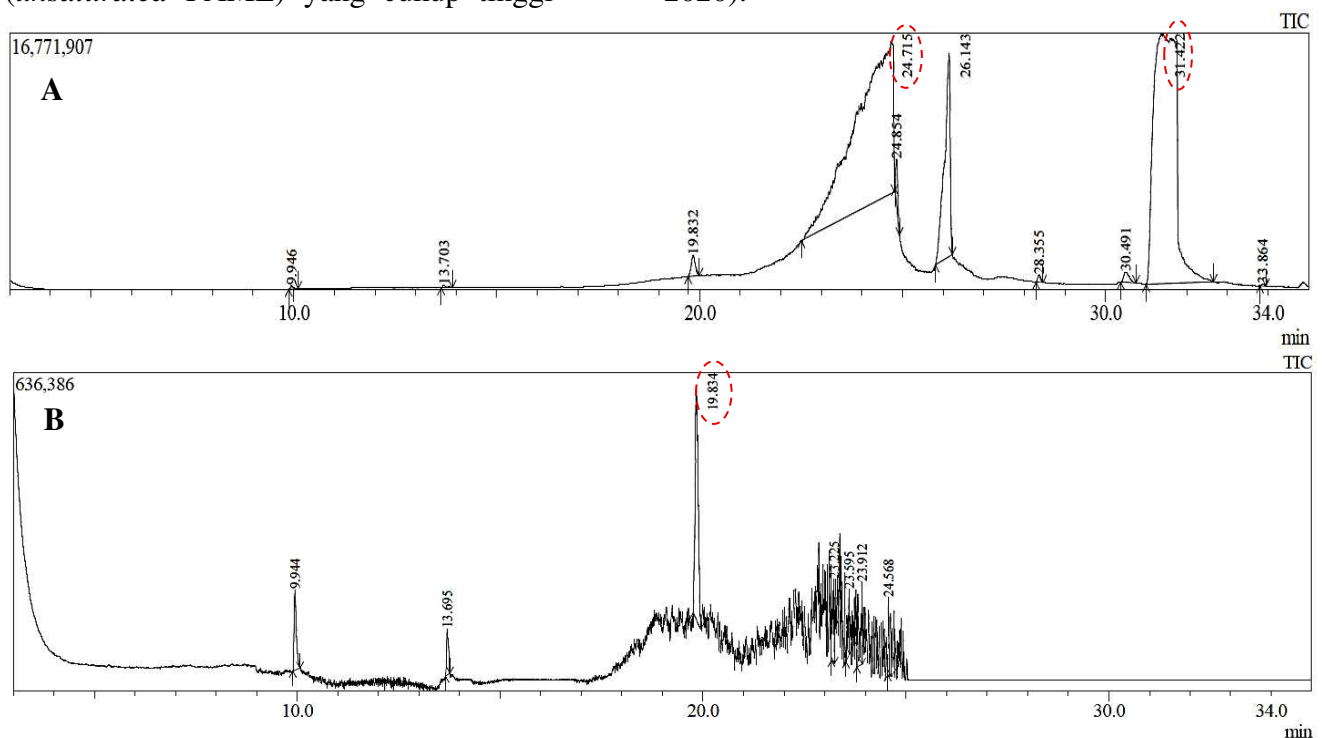
Produk biodiesel pada setiap katalis mengandung FAME dengan panjang rantai karbon (C) yang bervariasi. Berdasarkan pada kromatogram GC-MS, pada katalis CaO-FA (1:1) menunjukkan *peak* dominan pada *retention time* (RT) 24,715 dan 31,422 menit (Gambar 2A) yang menunjukkan komponen utama metil oleat dan metil palmitat dengan total FAME rantai C9-C19 sebesar 99,99%. Selanjutnya pada katalis CaO-FA (2:1), puncak dominan muncul pada waktu retensi 19,834 menit (Gambar 2B) dengan komponen utama metil laurat. Biodiesel yang dihasilkan mengandung FAME dengan rantai C9-C13 sebesar 73,17%. Sedangkan pada katalis CaO-FA (3:1) menunjukkan *peak* dominan pada waktu retensi 31,356 menit (Gambar 2C) dengan komponen utama metil palmitat yang sangat tinggi. Biodiesel yang dihasilkan mengandung FAME dengan rantai C9-C19 sebesar 99,74%. Hasil ini menunjukkan bahwa komposisi FAME yang dihasilkan tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya yield biodiesel, tetapi juga oleh

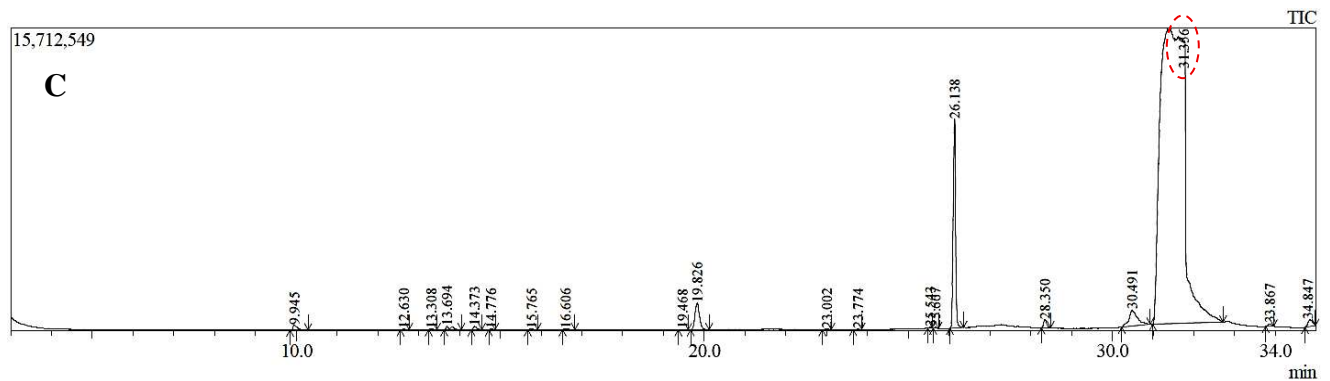


karakter katalis dan selektivitas reaksi transesterifikasi. Variasi rasio CaO-FA menyebabkan perbedaan jumlah dan kekuatan situs basa aktif, yang selanjutnya memengaruhi mekanisme aktivasi metanol serta jalur reaksi pembentukan metil ester dengan panjang rantai karbon tertentu (Leung et al., 2010), (Wang et al., 2021). Meskipun pada data yield (Tabel 1) menunjukkan bahwa yield biodiesel tertinggi diperoleh pada rasio katalis CaO-FA 2:1, hasil analisa pada Tabel 2 memperlihatkan bahwa pada rasio katalis CaO-FA 1:1 dan 3:1 diperoleh komposisi FAME yang lebih baik dengan kandungan FAME didominasi oleh metil ester rantai panjang. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi optimum untuk meningkatkan konversi reaksi tidak selalu berbanding lurus dengan kualitas komposisi biodiesel yang dihasilkan.

Biodiesel yang dihasilkan mengandung FAME dengan rantai C tak jenuh (*unsaturated* FAME) yang cukup tinggi >

50%. Kondisi ini dapat berimplikasi pada stabilitas oksidasi biodiesel. Wang et al. (2021) melaporkan bahwa biodiesel dengan kandungan asam lemak tak jenuh yang tinggi lebih mudah teroksidasi sehingga menurunkan stabilitas oksidasinya. Salah satu kelemahan paling menonjol dari biodiesel adalah stabilitas oksidasi yang rendah. Stabilitas oksidasi mengacu pada kecenderungan biodiesel bereaksi dengan oksigen pada temperatur ruang (rentan terhadap degradasi akibat proses oksidasi). Selama proses oksidasi berbagai macam senyawa terbentuk seperti aldehid, alkohol, asam karboksilat rantai pendek, *gum* tidak larut dan endapan. Ketidakstabilan biodiesel ini mengakibatkan perubahan komposisi yang berpengaruh terhadap kerusakan komposisi dan propertinya sehingga tidak sesuai dengan standar yang sudah ditetapkan (Sia et al., 2020; Tomić et al., 2019; Wang et al., 2021; Wenchao et al., 2020).





Gambar 2. Kromatogram GC-MS biodiesel dengan rasio katalis CaO:FA (A) 1:1; (B) 2:1; dan (C) 3:1

Penelitian ini masih terbatas pada kajian kinerja katalis dalam reaksi transesterifikasi khususnya pengaruh rasio katalis CaO-FA dan rasio molar metanol:RBDPO terhadap perolehan biodiesel. Selain itu, uji kualitas biodiesel masih difokuskan pada komposisi FAME berdasarkan analisis GC-MS. Oleh karena itu, pengujian lanjutan terhadap sifat mutu biodiesel sesuai standar nasional maupun internasional serta karakterisasi katalis juga direkomendasikan untuk memastikan keberhasilan proses aktivasi katalis CaO-FA dan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara karakter katalis dan kinerjanya dalam reaksi transesterifikasi.

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh rasio katalis CaO-FA dan rasio molar metanol:RBDPO terhadap yield biodiesel serta komposisi FAME yang dihasilkan. Berdasarkan hasil penelitian, katalis CaO-FA mampu mengkatalisis reaksi transesterifikasi RBDPO menghasilkan biodiesel dengan yield tertinggi sebesar 71,65% pada rasio CaO-FA 2:1 dan rasio molar metanol:RBDPO 10:1. Sementara itu, berdasarkan analisis komposisi FAME menggunakan GC-MS, pada rasio CaO-FA 3:1 dan rasio molar metanol:RBDPO 8:1 diperoleh biodiesel dengan kandungan metil palmitat tertinggi sebesar 88,99%. Hasil ini menunjukkan bahwa kondisi optimum untuk memperoleh yield biodiesel tertinggi tidak selalu berbanding lurus dengan kualitas komposisi FAME yang diperoleh. Selain itu, kinerja katalis CaO-FA pada penelitian ini

masih belum mampu melampaui aktivitas katalitik CaO murni, yang mengindikasikan bahwa peran FA sebagai *support* belum sepenuhnya meningkatkan jumlah dan efektivitas situs basa aktif CaO dalam reaksi transesterifikasi. Oleh karena itu, penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mengevaluasi lebih lanjut pengaruh kondisi preparasi katalis terhadap karakter dan kinerjanya, termasuk kajian terhadap metode sintesis dan karakterisasi katalis. Pendekatan tersebut diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara karakter katalis CaO-FA dan performanya dalam sintesis biodiesel dari RBDPO, serta mendukung pengembangan katalis heterogen berbasis material lokal untuk produksi biodiesel yang berkelanjutan. Selain itu, pengujian terhadap kualitas biodiesel sesuai dengan standar yang berlaku juga diperlukan guna memastikan kesesuaian mutu biodiesel yang diperoleh serta memperkuat evaluasi kinerja katalis CaO-FA.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dan terlibat pada penelitian. Penelitian ini didanai oleh DIPA Politeknik ATI Padang tahun 2024 No. 1474/BPSDMI/ATI-Padang/V/2024.

DAFTAR PUSTAKA

Brahma, S., Nath, B., Basumatary, B., Das, B., Saikia, P., Patir, K., & Basumatary, S. (2022). Biodiesel production from mixed oils: A sustainable approach towards industrial biofuel production. *Chemical Engineering Journal*



- Advances*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100284>
- Chakraborty, R., Bepari, S., & Banerjee, A. (2010). Transesterification of soybean oil catalyzed by fly ash and egg shell derived solid catalysts. *Chemical Engineering Journal*, 165(3), 798–805. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2010.10.019>
- Farobie, O., & Hartulistiyoso, E. (2021). Palm Oil Biodiesel as a Renewable Energy Resource in Indonesia: Current Status and Challenges. *BioEnergy Research 2021 15:1*, 15(1), 93–111. <https://doi.org/10.1007/S12155-021-10344-7>
- Ghosh, N., Patra, M., & Halder, G. (2024). Current advances and future outlook of heterogeneous catalytic transesterification towards biodiesel production from waste cooking oil. *Sustainable Energy & Fuels*, 8(6), 1105–1152. <https://doi.org/10.1039/D3SE01564E>
- Ho, W. W. S., Ng, H. K., & Gan, S. (2012). Development and characterisation of novel heterogeneous palm oil mill boiler ash-based catalysts for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 125, 158–164. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.08.099>
- Ho, W. W. S., Ng, H. K., Gan, S., & Tan, S. H. (2014). Evaluation of palm oil mill fly ash supported calcium oxide as a heterogeneous base catalyst in biodiesel synthesis from crude palm oil. *Energy Conversion and Management*, 88, 1167–1178. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2014.03.061>
- Jain, D., Khatri, C., & Rani, A. (2010). Fly ash supported calcium oxide as recyclable solid base catalyst for Knoevenagel condensation reaction. *Fuel Processing Technology*, 91(9), 1015–1021. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2010.02.021>
- Kouzu, M., & Hidaka, J. S. (2012). Transesterification of vegetable oil into biodiesel catalyzed by CaO: A review. *Fuel*, 93, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2011.09.015>
- Leung, D. Y. C., Wu, X., & Leung, M. K. H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87(4), 1083–1095. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2009.10.006>
- Mahlia, T. M. I., Ismail, N., Hossain, N., Silitonga, A. S., & Shamsuddin, A. H. (2019). Palm oil and its wastes as bioenergy sources: a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(15), 14849–14866. <https://doi.org/10.1007/S11356-019-04563-X/METRICS>
- Nirmala, D., Pelita, E., Desniorita, D., Youfa, R., Jayanti, R. T., Sahaq, A. B., & Permadani, R. L. (2024). Pemanfaatan Limbah Fly Ash Pabrik Kelapa Sawit Sebagai Adsorben Low-Cost untuk Pemucatan Crude Palm Oil. *Jurnal Integrasi Proses*, 13(2), 153–159. <https://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jip/article/view/28882>
- Orchidantya, N. S., Mas'udah, & Santosa, S. (2023). Pengaruh Rasio Katalis CaO-NaOH dan Waktu Reaksi Transesterifikasi terhadap Kualitas Biodiesel dari Minyak Sawit. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 9(3), 330–337. <https://doi.org/10.33795/distilat.v9i3.3154>
- Sia, C. B., Kandedo, J., Tan, Y. H., & Lee, K. T. (2020). Evaluation on biodiesel cold flow properties, oxidative stability and enhancement strategies: A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 24, 101514. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2020.101514>
- Sisca, V., Deska, A., Syukri, S., Zilfa, Z., & Jamarun, N. (2021). Synthesis and Characterization of CaO Limestone from Lintau Buo Supported by TiO₂ as a Heterogeneous Catalyst in the Production of Biodiesel. *Indonesian Journal of Chemistry*, 21(4), 979–989. <https://doi.org/10.22146/ijc.64675>
- Tomić, M., Đurišić-Mladenović, N., Mičić,



- R., Simikić, M., & Savin, L. (2019). Effects of accelerated oxidation on the selected fuel properties and composition of biodiesel. *Fuel*, 235, 269–276. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2018.07.123>
- Volli, V., Purkait, M. K., & Shu, C. M. (2019). Preparation and characterization of animal bone powder impregnated fly ash catalyst for transesterification. *Science of The Total Environment*, 669, 314–321. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.03.080>
- Wang, W., Liu, H., Li, F., Wang, H., Ma, X., Li, J., Zhou, L., & Xiao, Q. (2021). Effects of unsaturated fatty acid methyl esters on the oxidation stability of biodiesel determined by gas chromatography-mass spectrometry and information entropy methods. *Renewable Energy*, 175, 880–886. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.04.132>
- Wenchao, W., Fashe, L., & Ying, L. (2020). Effect of biodiesel ester structure optimization on low temperature performance and oxidation stability. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 2727–2736. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2020.01.005>
- Wirawan, S. S., Solikhah, M. D., Setiaprada, H., & Sugiyono, A. (2024). Biodiesel implementation in Indonesia: Experiences and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113911. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.113911>
- Zhenyi, C., Xing, J., Shuyuan, L., & Li, L. (2021). Biodiesel Production Methods. *International Journal of Energy and Smart Grid*, 5(1–2), 1–10. <https://doi.org/10.1080/00908310490465902>