

Sintesis Biodiesel dari Minyak Jelantah menggunakan Katalis Heterogen Berbasis Kalsium Oksida dari Limbah Cangkang Kerang Bulu (*Anadara antiquata*)

Anni Rahmat¹, Yuni Kurniati¹, Laila Rahmah Hidayah¹, Salwa Nafisah¹

¹ Universitas Internasional Semen Indonesia

Kompleks PT. Semen Indonesia Jl. Veteran Sidomoro Kebomas Gresik Jawa Timur 61122

*E-mail Korespondensi : yuni.kurniati@uisi.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v18i2.30015>

Submitted May 12th 2025, Accepted July 27th 2025, Published August 10st 2025

Abstrak

Berkurangnya cadangan energi fosil yang bersifat tidak terbarukan menjadi alasan utama dalam penelitian ini untuk mengembangkan energi terbarukan sebagai substitusi solar. Salah satu alternatif yang dikaji adalah produksi biodiesel dari minyak jelantah. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan biodiesel yang ramah lingkungan, mengurangi ketergantungan pada energi fosil, serta memanfaatkan limbah minyak jelantah agar lebih bernilai guna bagi Masyarakat. Penelitian ini menggunakan metode esterifikasi dan transesterifikasi. Variasi katalis yang digunakan adalah 2, 4, dan 6 gram. Sementara itu, perbandingan antara minyak dan metanol diterapkan dengan rasio 1:1,5; 1:3; dan 1:6. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa untuk mengurangi kandungan asam lemak pada minyak jelantah diperlukan proses esterifikasi dengan syarat kandungan asam lemak minyak jelantah minimal 1% untuk dilanjutkan ke proses transesterifikasi. Katalis kalsium oksida (*Anadara antiquata*) yang diperoleh dari limbah cangkang kerang sebagai katalis basa heterogen memiliki kandungan CaO sebesar 96,51%, hasil biodiesel terbaik diperoleh pada rasio molar 1:1,5 dengan katalis 6 gram, rasio molar 1:6 dengan katalis 2 gram, rasio molar 1:6 dengan katalis 4 gram. Ketiga sampel telah memenuhi standar uji biodiesel sesuai Standar Nasional (SNI). Penelitian ini melakukan pengujian nyala api pada biodiesel. Selama pembakaran, warna nyala dihasilkan oleh oksidasi cepat. Warna menunjukkan jumlah energi yang dihasilkan. Warna api biru mengeluarkan lebih banyak panas daripada api merah. Warna api merah di bawah 1000°C. Warna api biru, suhu di bawah 2000°C. Pada pembakaran sampel yang mengandung biodiesel menghasilkan api berwarna biru.

Kata Kunci: biodiesel, katalis, esterifikasi, transesterifikasi

Abstract

*The depletion of non-renewable fossil energy reserves is the main reason for this research to develop renewable energy as a substitute for diesel fuel. One of the alternatives studied is the production of biodiesel from used cooking oil. This study aims to produce environmentally friendly biodiesel, reduce dependence on fossil energy, and utilize used cooking oil waste to increase its value for society. This research employs esterification and transesterification methods. The variations in the catalyst used are 2 grams, 4 grams, and 6 grams. Meanwhile, the oil-to-methanol ratio is applied at 1:1.5, 1:3, and 1:6. The results of this study indicate that the free fatty acid content of used cooking oil must be at least 1% to proceed with the transesterification process. Calcium oxide (CaO) catalyst derived from *Anadara antiquata* shell waste, used as a heterogeneous base catalyst, contains 96.51% CaO. The best biodiesel yield was obtained at a molar ratio of 1:1.5 with 6 grams of catalyst, a molar ratio of 1:6 with 2 grams of catalyst, and a molar ratio of 1:6 with 4 grams of catalyst. All three samples met the biodiesel test standards according to the National Standard (SNI). This study tested the flame on biodiesel. During combustion, the flame color is produced by rapid oxidation. The color indicates the amount of energy produced. Blue flames emit more heat than red flames. Red flames are present below 1000°C. Blue flames are present at temperatures below 2000°C. The combustion of samples containing biodiesel produced a blue flame.*

Key words: biodiesel, catalyst, esterification, transesterification

PENDAHULUAN

Eksplorasi berat terhadap sumber daya fosil prasejarah sebagai sumber energi telah mengakibatkan meningkatnya permintaan untuk mengembangkan sumber energi baru. Pertumbuhan ekonomi yang terus berlanjut mengakibatkan permintaan energi global kian meningkat sepuluh kali lipat pada tahun 2050 dibandingkan dengan permintaan saat ini (Selemani & Kombe, 2022). Penggunaan energi fosil yang meliputi minyak bumi, gas alam, dan batu bara terus menurun seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi dunia. Cadangan minyak Indonesia diperkirakan hanya cukup untuk 9,5 tahun mendatang, sementara cadangan gas alam diperkirakan bertahan selama 19,9 tahun dengan asumsi tidak ada penemuan baru (Sutrisno, 2021). Berdasarkan data yang disajikan, produksi minyak mentah dan kondensat

di Indonesia menunjukkan tren penurunan dari 287.902,20 ribu barrel pada tahun 2014 menjadi 259.246,80 ribu barrel pada tahun 2020, sementara produksi gas alam juga mengalami penurunan dari 2.999.524,40 MMscf pada tahun 2014 menjadi 2.442.830,70 MMscf pada tahun 2020 (BPS, 2021). Penurunan produksi ini mengindikasikan bahwa sumber energi fosil seperti minyak bumi dan gas alam semakin menipis serta tidak dapat diperbarui.

Eksplorasi bahan bakar fosil yang semakin meningkat dan berkurangnya cadangan energi fosil di Indonesia mendorong terbentuknya alternatif sumber energi yang lebih berkelanjutan. Biodiesel menjadi salah satu pilihan alternatif yang menjanjikan, diperoleh melalui proses transesterifikasi trigliserida dengan alkohol, yang menghasilkan ester dan gliserol (Zaki *et al.*, 2019). Biodiesel memiliki berbagai keunggulan seperti bahan bakar yang aman, terbarukan, serta ramah lingkungan. Di Indonesia minyak jelantah dari konsumsi minyak goreng mencapai sekitar 16,2 juta kiloliter per tahun, sehingga memiliki potensi besar sebagai bahan baku biodiesel (Humas EBTKE, 2021). Emisi karbon dan pencemaran lingkungan dapat dikurangi secara signifikan dengan memanfaatkan minyak jelantah yang mencakup sekitar 18,5% dari total konsumsi minyak goreng nasional (ESDM, 2021). Selain itu, biodiesel dari minyak nabati terutama perolehan minyak kelapa sawit juga menawarkan konversi yang tinggi dan proses produksi relatif sederhana sehingga berpotensi besar untuk energi masa depan.

Proses produksi biodiesel dari minyak jelantah melibatkan dua tahap utama meliputi esterifikasi dan transesterifikasi (Gaurav *et al.*, 2019). Untuk mengurangi kandungan asam lemak bebas, dilakukan esterifikasi dilakukan terlebih dahulu agar kandungan asam lemak bebas dengan tujuan meminimalkan pembentukan sabun yang tidak diinginkan dan meningkatkan hasil biodiesel. Pada tahap transesterifikasi alkohol seperti metanol digunakan untuk mengubah bentuk trigliserida menjadi biodiesel dengan katalis, baik dengan katalis homogen ataupun heterogen. Katalis heterogen menawarkan keuntungan dalam hal pemisahan yang mudah, efisiensi penggunaan, serta dampak lingkungan yang lebih rendah.

Penggunaan katalis heterogen berbasis CaO telah banyak dieksplorasi dalam produksi biodiesel karena keunggulannya dalam efisiensi, kemudahan pemisahan dari produk akhir, serta dapat digunakan berulang kali. CaO dari limbah cangkang kerang bulu (*Anadara antiquata*) dapat digunakan sebagai katalis aktif setelah mengalami proses kalsinasi pada suhu 1000°C (Saputra & Iriany, 2015). Proses ini mengubah CaCO₃ menjadi CaO, sehingga dapat mempercepat reaksi transesterifikasi antara minyak dan metanol. Beberapa penelitian sebelumnya telah menguji katalis heterogen dari berbagai limbah organik, menggunakan CaO dari cangkang telur ayam, dan menghasilkan biodiesel dengan densitas 860 kg/m³ dan %FFA 0,34% pada rasio metanol: minyak 1:6 (Widiyastuti *et al.*, 2019). Walaupun efektif, aktivitas katalis hanya optimal dalam beberapa kali penggunaan. Pengembangan lain dilakukan dengan sumber katalis dari abu terbang, yang memang mengandung logam alkali, namun proses sintesisnya lebih kompleks dan memerlukan aktivasi tambahan (Rosyidah & Kusumaningrum, 2021). Penelitian lain menggunakan CaO dari cangkang kerang darah (*Anadara granosa*), yang sejenis namun berbeda dengan *Anadara antiquata*. Hasilnya menunjukkan aktivitas katalitik yang baik, namun belum diuji secara detail pada variasi jumlah katalis dan rasio molar (Fitriani *et al.*, 2020). Penelitian mengeksplorasi penggunaan katalis kalsium oksida (CaO) yang berasal dari limbah cangkang kerang bulu (*Anadara antiquata*) sebagai katalis heterogen. Limbah cangkang kerang ini kaya akan kalsium karbonat (CaCO₃) hasil dari proses kalsinasi pada suhu 1000°C sehingga dapat diubah sebagai katalis yang efektif dan ramah lingkungan (Anugerah & Iriany, 2015).

Penelitian ini menawarkan sumber katalis yang spesifik dan jarang digunakan yaitu limbah cangkang kerang bulu (*Anadara antiquata*) yang belum banyak diteliti sebagai sumber katalis. Sebagian besar riset hanya menggunakan kerang darah atau cangkang telur. *Anadara antiquata* memiliki struktur cangkang lebih berpori dan mengandung kalsium karbonat tinggi, sehingga berpotensi menghasilkan katalis CaO dengan luas permukaan aktif lebih besar setelah kalsinasi. Penggunaan rasio molar dan variasi katalis yang sistematis digunakan untuk memperoleh kondisi optimum pada beberapa rasio katalis yang nantinya akan menghasilkan biodiesel dengan densitas %FFA 0,3% yang sesuai standar SNI 7182:2015

Kesesuaian dengan prinsip ekonomi sirkular dan keberlanjutan yakni dengan memanfaatkan limbah seafood lokal (kerang bulu) yang biasanya terbuang, sehingga mendukung prinsip pengelolaan limbah menjadi produk bernilai. Katalis CaO dari kerang ini lebih ramah lingkungan dibandingkan katalis berbasis

logam transisi atau kimia sintetis. Prinsip yang sederhana, murah, dan aplikatif diaplikasikan dalam proses kalsinasi dan aktivasi yang digunakan dalam penelitian ini relatif sederhana.

Selain dapat mengurangi biaya produksi, penggunaan katalis dari limbah ini juga bisa memberikan nilai tambah pada limbah yang sebelumnya tidak memiliki nilai ekonomi (Julianti *et al.*, 2014). Tujuan dari penelitian yakni mempelajari pengolahan limbah minyak jelantah untuk proses pembuatan biodiesel menggunakan katalis CaO basa padat cangkang kerang bulu (*Anadara antiquata*) dengan metanol. Penelitian ini merupakan alternatif pembuatan biodiesel dari bahan terbarukan dengan mencampur pengolahan limbah.

METODE PENELITIAN

Alat

Alat yang digunakan meliputi furnace, MESH 200, mortar, oven, timbangan analitik, vikometer ostwald, beaker glass 50 ml, beaker glass 25 ml, beaker glass 10 ml, corong, statif dan klem, piknometer, stopwatch, hot plate, magnetic stirrer, buret, pipet gondok, erlemeyer 250 ml, propipet, pipet.

Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah minyak jelantah sebagai sumber minyak untuk produksi biodiesel. Bahan tambahan yang digunakan meliputi metanol, katalis heterogen kalsium oksida (CaO) yang dihasilkan dari limbah cangkang dengan jenis kerang bulu (*Anadara antiquata*), indikator PP, etanol 96%, Na₂SO₄, dan H₂SO₄. Limbah cangkang kerang bulu diperoleh dari sumber lokal, kemudian diolah menjadi katalis melalui proses kalsinasi.

Proses Pembuatan Katalis

Limbah cangkang kerang bulu dicuci bersih, dikeringkan selama 4 jam pada suhu 105°C, dan dihancurkan hingga ukurannya menjadi 100 mesh. Proses kalsinasi dilakukan selama 4 jam pada suhu 698°C untuk menghasilkan kalsium oksida (CaO). Katalis yang dihasilkan kemudian digiling hingga ukuran partikel 200 mesh untuk digunakan dalam proses transesterifikasi.

Proses Esterifikasi

Minyak jelantah dengan kadar asam lemak bebas tinggi terlebih dahulu mengalami proses esterifikasi untuk mengurangi kandungan *Free Fatty Acid* (FFA). Esterifikasi dilakukan dengan mencampurkan minyak jelantah Bersama metanol dengan rasio 1:6 (minyak) dan menggunakan asam sulfat (H₂SO₄) sebagai katalis sebanyak 1% dari massa minyak. Reaksi berlangsung selama 1 jam pada suhu 60°C dengan pengadukan konstan. Setelah reaksi selesai, campuran didiamkan untuk memisahkan lapisan ester dan air, kemudian ester hasil esterifikasi dicuci dengan aquades untuk menghilangkan sisa asam.

Proses Transesterifikasi

Minyak hasil esterifikasi kemudian direaksikan kembali dengan metanol dalam proses transesterifikasi menggunakan katalis CaO. Variabel dalam penelitian ini yaitu rasio molar minyak terhadap metanol (1:1,5; 1:3; 1:6) dan jumlah katalis CaO (2 g; 4 g; 6 g). Reaksi dilakukan dengan pengadukan 800 rpm pada suhu 60°C, selama 1 jam. Hasil reaksi dipisahkan menjadi tiga fasa: katalis, gliserol, dan ester. Ester yang terbentuk dimurnikan melalui pencucian menggunakan aquades atau distilasi langsung pada suhu 70°C.

Pengujian Biodiesel

Biodiesel hasil proses akan dilakukan uji densitas, uji %FFA, dan uji rendemen serta uji nyala api. Uji densitas dilakukan untuk menentukan kualitas biodiesel yang dihasilkan, terutama dalam penentuan kontaminasi bahan bakar. Densitas diukur sesuai dengan standar SNI-04-7182-2015. Perhitungan densitas pada penelitian menggunakan :

$$\rho = \frac{(W_1 - W_2)}{V} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan

W_1 : Berat Pada Piknometer Kosong (gram)

W_2 : Berat Pada Sampel (gram)

V : Volume Sampel Pada Piknometer (mL)

ρ : Densitas (gram/mL)

Uji viskositas pada penelitian bertujuan untuk mengetahui tingkat kekentalan minyak jelantah sebelum dan sesudah esterifikasi. Pada penelitian menggunakan persamaan rumus viskositas sebagai berikut :

$$\eta = K \cdot (t - v) \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

η : Viskositas

K : konstanta viscometer Ostwald yaitu 0,015

t : waktu untuk mencapai bawah viscometer ostwald

v : faktor koreksi viscometer ostwald cannon franske 0,00

Uji FFA dilakukan untuk mengetahui kandungan asam lemak bebas (*Free Fatty Acid*) pada biodiesel (Fedosov et al., 2012). Prosedur titrasi digunakan dengan larutan basa yang distandarisasi. Metode titrasi pada uji %FFA sebagai berikut :

$$N = \frac{\text{gram KOH}}{\text{Mr. KOH}} \times \frac{1000}{\text{Volume KOH}} \dots\dots\dots(3)$$

Perhitungan FFA pada penelitian menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\%FFA = \frac{(mL \times N)_{KOH} \times 256}{\text{gram sampel} \times 1000} \times 100\% \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

mL = Volume larutan basa yang digunakan (mL)

N = Normalitas larutan basa (N)

256 = Faktor konversi (untuk asam lemak palmitat)

Uji rendemen dilakukan untuk menghitung efisiensi proses transesterifikasi dalam menghasilkan biodiesel. Rendemen dihitung dengan membandingkan berat biodiesel yang diperoleh dengan berat minyak yang digunakan:

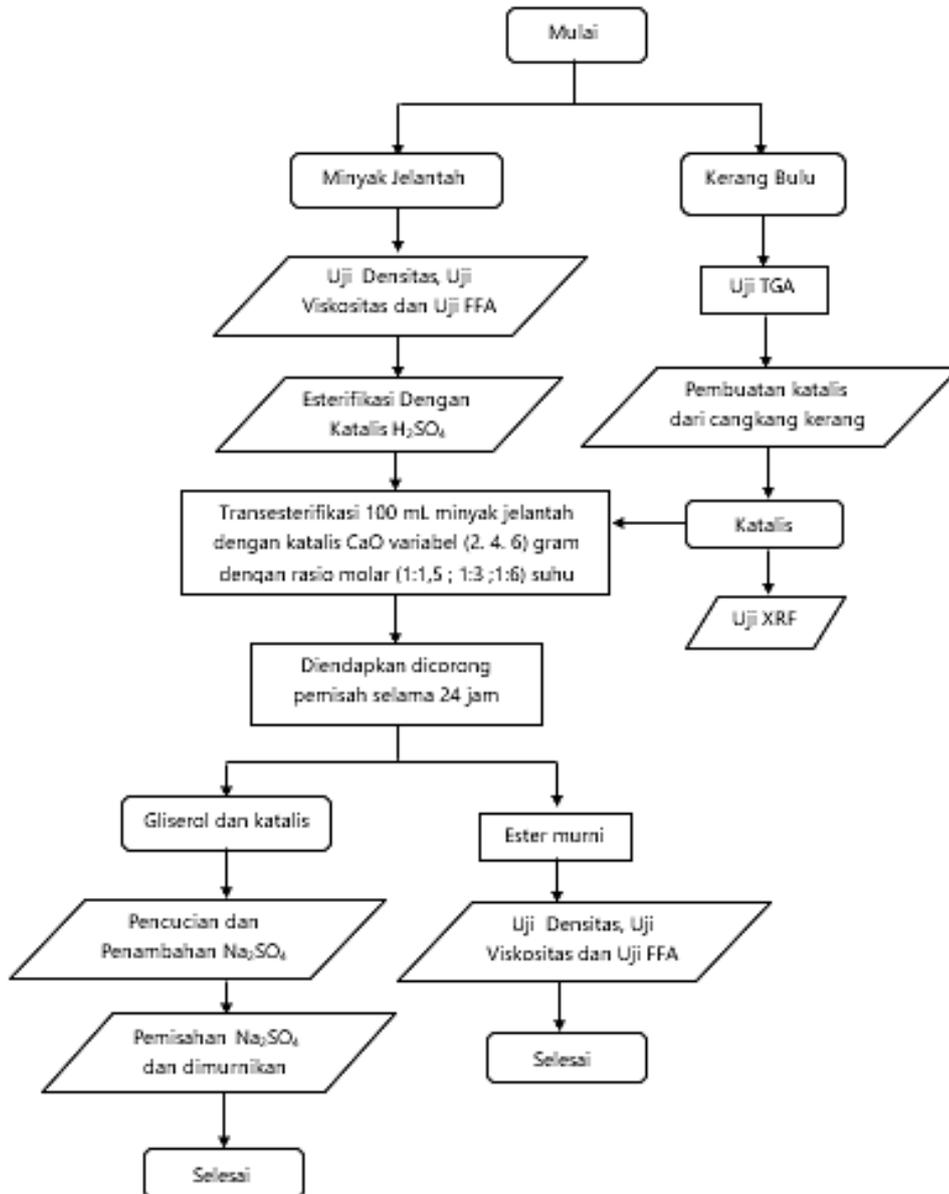
$$\text{Rendemen} = \frac{W_{\text{biodiesel}}}{W_{\text{minyak}}} \times 100\% \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan:

$W_{\text{biodiesel}}$ = Berat biodiesel setelah pencucian dan pemisahan (gram)

W_{minyak} = Berat minyak yang digunakan dalam proses transesterifikasi (gram)

Analisis TGA digunakan untuk menentukan suhu dekomposisi katalis berbasis CaO dari cangkang kerang bulu. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui suhu maksimum yang dibutuhkan dalam proses kalsinasi tanpa menyebabkan dekomposisi bahan katalis (Chih et al., 2023). Hasil uji TGA digunakan agar suhu yang dibutuhkan untuk kalsinasi cangkang kerang bulu dalam pembuatan katalis dapat diketahui. Uji XRF (*X-ray fluorescence*) untuk mengetahui kandungan CaO pada *sea scrub* setelah proses kalsinasi.

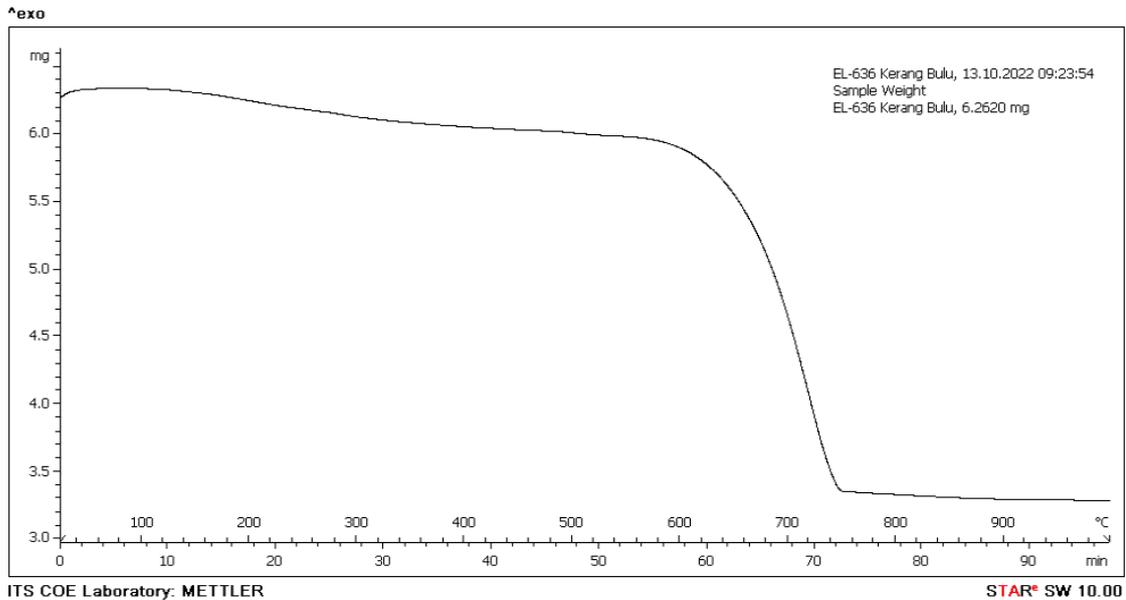


Gambar 1. Diagram Alir Proses

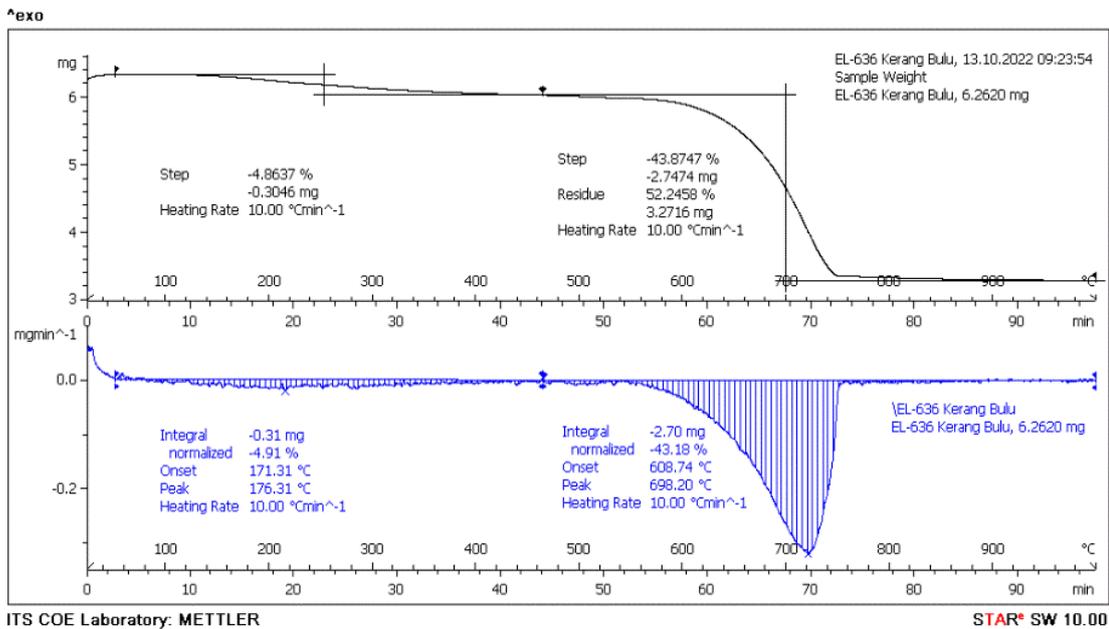
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pretreatment Bahan

Penelitian dimulai dengan tahap awal membuat katalis CaO (kalsium oksida) dari limbah cangkang kerang bulu dimulai dengan proses preparasi, termasuk pencucian dan pengeringan pada suhu 105°C selama 4 jam untuk menghilangkan kotoran dan impuritas. Limbah cangkang kerang bulu yang telah dibersihkan mengandung kalsium karbonat (CaCO₃) sekitar 95,99% (Nasution & Iriany, 2015). Proses kalsinasi dilakukan pada suhu 698°C selama 4 jam, mengubah CaCO₃ menjadi CaO dan membuat massa berkurang dari 55,16 gram menjadi 52,17 gram. Analisis termal menggunakan uji TGA (*Thermal Gravimetric Analysis*) untuk menentukan suhu kalsinasi yang tepat. Tampilan grafik TGA untuk mengontrol fungsi pada penurunan massa terhadap kenaikan temperatur di rentang waktu tertentu (Mayasari & Yuniari, 2016). Hasil uji TGA pada sampel cangkang bulu (*Anadara antiquata*) sebagai berikut :



Gambar 2. Grafik Uji TGA Penurunan Massa Dengan Waktu Laju Alir



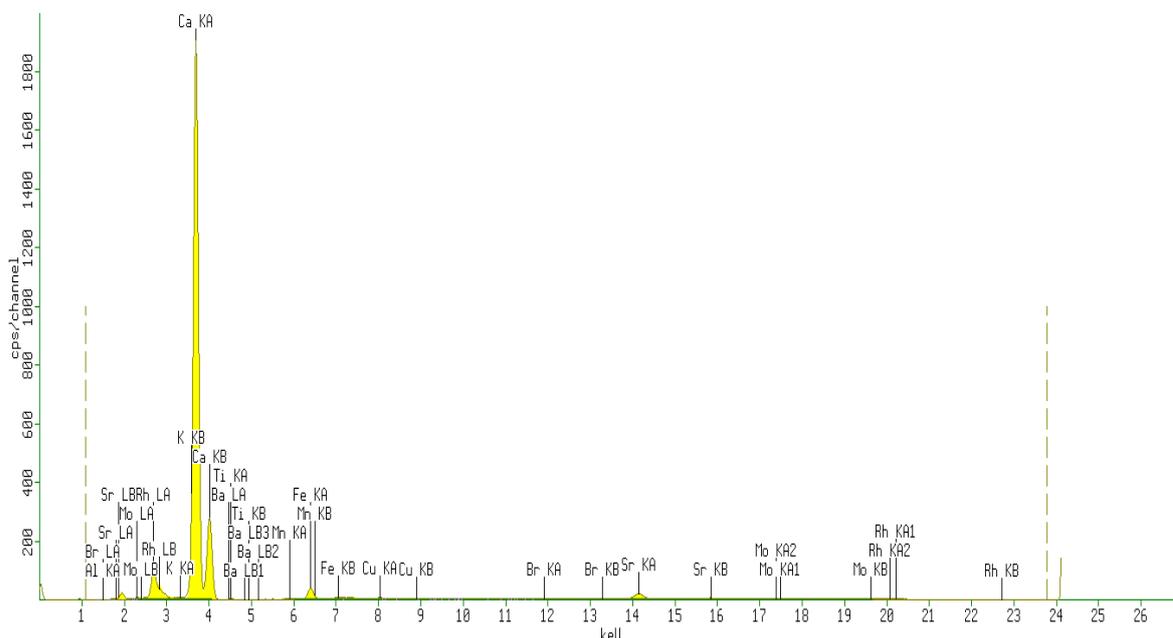
Gambar 3. Grafik Uji TGA Penurunan Massa Dengan Waktu Laju Alir

Gambar 3 menunjukkan proses penurunan massa berdasarkan perubahan temperature yang terjadi. Tahap Pertama (0–200 °C), terjadi penurunan massa: -0.3046 mg (-4.8637%). Hal ini merupakan proses penguapan air (*moisture loss*) dan volatil organik ringan yang terjadi sekitar suhu 171.31–176.31 °C (lihat onset & peak di DTA). Tahap selanjutnya pada suhu 600–750 °C, penurunan massa yang terjadi sebesar -2.7474 mg (-43.8747%) dengan sisa residu: 3.2716 mg (52.2458%). Tahapan ini merupakan dekomposisi utama, kemungkinan besar dari reaksi berikut (Zsakó & Arz, 1974):



Reaksi ini terjadi saat kalsium karbonat (komponen utama cangkang) terurai menjadi kalsium oksida (CaO) dan karbon dioksida (CO₂) pada suhu tinggi (600–750 °C), suhu ini cocok digunakan sebagai katalis heterogen karena menghasilkan CaO murni yang aktif. Setelah proses kalsinasi hasil penelitian pada suhu 698°C selama 4 jam, massa cangkang kerang bulu (*Anadara antiquata*) berkurang sebesar 2,99%, dari 55,16 gram menjadi 52,17 gram. Analisis termal menggunakan uji TGA (*Thermal Gravimetric Analysis*) mengungkapkan bahwa dekomposisi cangkang kerang dimulai pada suhu 560°C dan berlanjut hingga suhu

608°C, dengan berat residu yang tercatat sebesar 3,2 mg dari berat awal 6,2 mg. Pengujian menggunakan XRF (*X-ray Fluorescence*) dilakukan untuk menganalisis kandungan kalsium oksida (CaO) dalam katalis yang dihasilkan. Analisa kuantitatif didapatkan dengan membandingkan intensitas sampel dengan standar. Pada uji XRF cangkang kerang bulu sebagai berikut :



Gambar 4. Grafik Puncak Spektrum Uji XRF Cangkang Kerang Bulu (Anadara antiquata)

Pada hasil XRF (*X-ray Fluorescence*) posisi munculnya puncak bergantung pada energi unsur. Unsur Ca pada kulit K adalah unsur yang mendominasi pada puncak spektrum analisa hasil sampel limbah cangkang kerang bulu. Kandungan terbesar dari cangkang kerang bulu adalah CaO. Berikut merupakan hasil kuantitatif pada uji XRF cangkang kerang bulu :

Tabel 1. Hasil Kualitatif XRF Unsur Pada Cangkang Kerang Bulu (Anadara antiquata)

No.	Komponen Unsur/Senyawa	Konsentrasi	Unit
1	Al/Al ₂ O ₃	1/1	
2	K/K ₂ O	0,17/0,15	
3	Ca/CaO	96,49/96,51	
4	Ti/TiO ₂	0,09/0,09	
5	Mn/MnO	0,049/0,04	
6	Fe/ Fe ₂ O ₃	1,33/1,22	%
7	Cu/CuO	0,093/0,071	
8	Br	0,02/0,009	
9	Sr/SrO	0,615/0,462	
10	Mo/ MoO ₃	0,02/0,02	
11	Ba/ BaO	0,08/0,05	

Hasil pengujian dengan metode XRF diperoleh bahwa kandungan unsur Ca sebesar 96,49%. Pada hasil uji XRF kandungan CaO pada cangkang kerang bulu sebesar 96,51%. Hasil uji XRF menunjukkan bahwa tingginya kandungan CaO pada limbah memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai katalis. Katalis kalsium oksida merupakan sumber logam oksida yang bersifat *ecogreen*, murah dan meningkatkan nilai tambah ekonomi limbah tersebut. Sebelum tahap esterifikasi minyak jelantah dilakukan karakteristik uji terlebih dahulu untuk perbandingan hasil minyak yang melewati tahap esterifikasi dan sebelum melewati tahap esterifikasi. Hasil karakteristik uji minyak sebagai berikut :

Tabel 2. Hasil Karakteristik Uji Minyak Sebelum Tahap Esterifikasi

Bahan Uji	Karakteristik Uji	Hasil Uji	Satuan
Minyak Jelantah	Densitas	944	kg/m ³
	Viskositas	17,65	cSt
	FFA	1,43	%

Proses esterifikasi minyak jelantah dilakukan dengan perbandingan 6:1 antara metanol dan minyak jelantah. Minyak dipanaskan hingga 60°C, kemudian dicampur dengan metanol 98% dan katalis H₂SO₄ 98% sebesar 0,05% dari volume minyak. Campuran dihomogenkan pada 800 rpm selama 1 jam pada suhu konstan 60°C, lalu diendapkan selama 24 jam. Hasil pengendapan menghasilkan lapisan biodiesel dan zat sisa, seperti air, metanol sisa, serta H₂SO₄. Tujuan esterifikasi adalah memaksimalkan konversi pada proses transesterifikasi selanjutnya (Efendi *et al.*, 2018). Berikut merupakan tabel hasil karakteristik uji pada minyak jelantah setelah esterifikasi sebagai berikut :

Tabel 3. Hasil Karakteristik Uji Minyak Setelah Tahap Esterifikasi

Bahan Uji	Karakteristik Uji	Hasil Uji	Satuan
Minyak Jelantah	Densitas	936	kg/m ³
	Viskositas	12,33	CSt
	FFA	0,66	%

Penelitian mengevaluasi perubahan karakteristik minyak jelantah melalui proses esterifikasi dengan fokus pada kadar asam lemak bebas (FFA), densitas, dan viskositas. Uji FFA dilakukan menggunakan metode titrasi KOH, yang menunjukkan penurunan kadar FFA dari 2,8 mL sebelum esterifikasi menjadi 1,3 mL setelah esterifikasi. Proses esterifikasi menggunakan katalis asam H₂SO₄ berhasil menurunkan kadar FFA hingga 0,66% memenuhi standar untuk proses transesterifikasi lebih lanjut. Kemudian, pada pengujian densitas menggunakan piknometer menunjukkan penurunan sebesar 8% setelah esterifikasi, sementara uji viskositas dengan viskometer Ostwald mencatat penurunan viskositas sebesar 5,17%. Temuan ini menunjukkan bahwa proses esterifikasi meningkatkan kualitas minyak jelantah sebagai bahan baku dalam produksi biodiesel.

Uji FFA dilakukan dengan cara titrasi menggunakan KOH. Langkah awal menimbang KOH sebanyak 1,12 gram dan dilarutkan dengan aquades sebanyak 200 mL. Tahap kedua menimbang minyak jelantah sebanyak 5 mL dan etanol 96% sebanyak 50 mL kemudian dipanaskan serta dihomogenkan hingga suhu mencapai 60°C dengan kecepatan 800 rpm. Hasil titrasi pada minyak jelantah sebelum esterifikasi adalah 2,8 mL dan setelah esterifikasi sebesar 1,3 mL. Pada hasil minyak jelantah sebelum esterifikasi didapatkan bahwa kadar FFA lebih tinggi. Penambahan katalis basa CaO dan tingginya FFA menyebabkan terbentuknya sabun pada proses transesterifikasi. Kadar FFA minyak bekas penggorengan dapat dikurangi dengan reaksi esterifikasi menggunakan katalis H₂SO₄ (Azzahro, 2021).

Pada penelitian hasil uji dari asam lemak bebas (FFA) sebesar 0,66%. Hasil angka asam memenuhi syarat proses lanjutan transesterifikasi. Hasil nilai uji FFA maksimal 1% untuk proses produksi biodiesel (Sari *et al.*, 2022). Pengujian densitas menggunakan piknometer menunjukkan penurunan sebesar 8% setelah esterifikasi, sementara uji viskositas dengan viskometer Ostwald mencatat penurunan viskositas sebesar 5,17%. Temuan ini menunjukkan bahwa proses esterifikasi meningkatkan kualitas minyak jelantah sebagai bahan baku dalam produksi biodiesel.

Tahap transesterifikasi bertujuan untuk menghasilkan ester atau FAME (*Fatty Acid Methyl Ester*), gliserol dan katalis. Transesterifikasi dilakukan menggunakan metanol dan katalis CaO dengan variasi jumlah katalis (2, 4, 6 gram) dan metanol (150 mL, 300 mL, 600 mL) pada suhu 60°C dan kecepatan pengadukan 800 rpm selama 1 jam. Produk transesterifikasi dipisahkan menjadi tiga fase yaitu ester (FAME), gliserol, dan katalis. Pemisahan gliserol yang sulit dilakukan disebabkan oleh kelarutan gliserol dalam campuran reaksi, yang dapat menurunkan kadar FAME jika tidak dipisahkan dengan baik. Pada penelitian dilakukan dua perlakuan pemurnian biodiesel untuk mengetahui proses pemurnian biodiesel terbaik. Proses pemurnian menggunakan metode rangkuman beberapa jurnal terdahulu sebagai acuan yaitu dengan metode pencucian dan tidak pencucian. Berdasarkan beberapa penelitian uji coba terdahulu

diambil variabel pencucian menggunakan aquades suhu 60°C dan 80°C. Pencucian dengan tahap pemurnian menggunakan metode distilasi dan *beaker glass*. Waktu operasi dilakukan selama 1 jam dengan suhu 90°C. Hasil perbedaan perlakuan pemurnian biodiesel sebagai berikut :

Tabel 4. Hasil perbedaan perlakuan pemurnian biodiesel Rasio 1:3

Perlakuan	Warna	Uji Nyala Api	Bentuk Biodiesel
Pencucian aquades 60°C, penambahan Na ₂ SO ₄ , pemanasan <i>beaker glass</i> 90°C selama 1 jam	Setelah pencucian warna kuning susu, setelah diendapkan 24 jam menjadi bening tidak ada pemisahan fasa, setelah penambahan Na ₂ SO ₄ tetap kuning bening tidak ada pemisahan fasa	Tidak Menyala	Sangat encer
Pencucian aquades 60°C, penambahan Na ₂ SO ₄ , pemurnian distilasi 80°C selama 1 jam	Setelah pencucian warna kuning susu, setelah diendapkan 24 jam menjadi bening tidak ada pemisahan fasa, setelah penambahan Na ₂ SO ₄ tetap kuning bening tidak ada pemisahan fasa	Tidak menyala	Sangat encer
Pencucian Aquades 80°C, Penambahan Na ₂ SO ₄ , Pemanasan <i>beaker glass</i> 90°C selama 1 jam	Setelah pencucian warna kuning susu, setelah diendapkan 24 jam menjadi bening tidak ada pemisahan fasa, setelah penambahan Na ₂ SO ₄ tetap kuning bening tidak ada pemisahan fasa	Tidak menyala	Sangat encer
Pencucian aquades 80°C, penambahan Na ₂ SO ₄ , pemurnian distilasi 80°C selama 1 jam	Setelah pencucian warna kuning susu, setelah diendapkan 24 jam menjadi bening tidak ada pemisahan fasa, setelah penambahan Na ₂ SO ₄ tetap kuning bening tidak ada pemisahan fasa	Tidak menyala	Sangat encer
Ester tanpa pemurnian	Warna kuning bening	Menyala merah	Sangat encer
Tanpa pencucian, pemurnian distilasi suhu 68°C dengan waktu operasi 30 menit dan 60 menit	Kuning bening dan kuning gelap	Menyala biru	Tidak terlalu encer

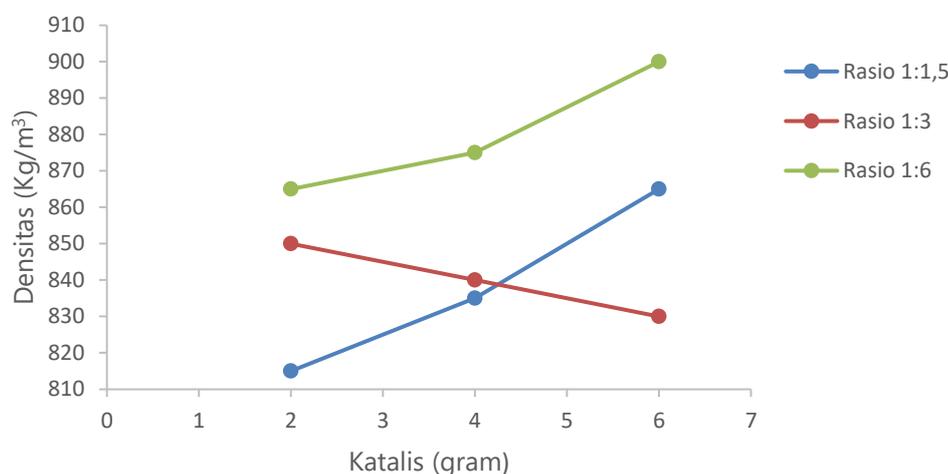
Pengujian Biodiesel

Pengujian spesifikasi biodiesel dari minyak jelantah menggunakan katalis heterogen yaitu kalsium oksida dan metanol dilakukan untuk mengetahui kesesuaiannya dengan Standar Nasional Indonesia (SNI-Biodiesel, 2006) yang telah ditetapkan. Parameter pertama yang diuji adalah densitas biodiesel, yang merupakan rasio berat terhadap satuan volume dan berkaitan erat dengan viskositas. Densitas yang melebihi persyaratan menunjukkan adanya reaksi konversi minyak nabati yang tidak sempurna, serta potensi kontaminasi seperti sabun, gliserin, asam lemak non-esterifikasi, air, residu katalis, dan metanol residu. Sesuai dengan SNI, nilai densitas biodiesel yang dihasilkan harus berada dalam rentang 850-890 kg/m³.

Tabel 5. Tabel Hasil Uji Densitas Biodiesel

Run	Variabel Bebas		Variabel Kontrol	Analisa Uji		
	Minyak:Metanol (mL)	Katalis (gram)		Densitas 40°C	Satuan	SNI
1	1:1,5	2	Waktu Operasi Transesterifikasi 1 jam, Suhu 60°C, Pemurnian Distilasi suhu 70°C selama 30 menit	816	Kg/m ³	850-890 Kg/m ³
2	1:1,5	4		834		
3	1:1,5	6		868		
4	1:3	2		850		
5	1:3	4		840		
6	1:3	6		830		
7	1:6	2		864		
8	1:6	4		875		
9	1:6	6		904		

Tabel hasil uji densitas biodiesel menunjukkan bahwa densitas biodiesel sesuai syarat SNI-04-7182-2015 kecuali pada variabel perbandingan minyak dan metanol berturut-turut adalah 1:6 dengan katalis 6 gram. Pada variabel tersebut hasil densitas sangat tinggi tidak sesuai SNI-04-7182-2015. Hasil uji densitas pada tabel ditunjukkan pada gambar grafik sebagai berikut :



Gambar 5. Grafik Perbandingan Katalis Dengan Densitas

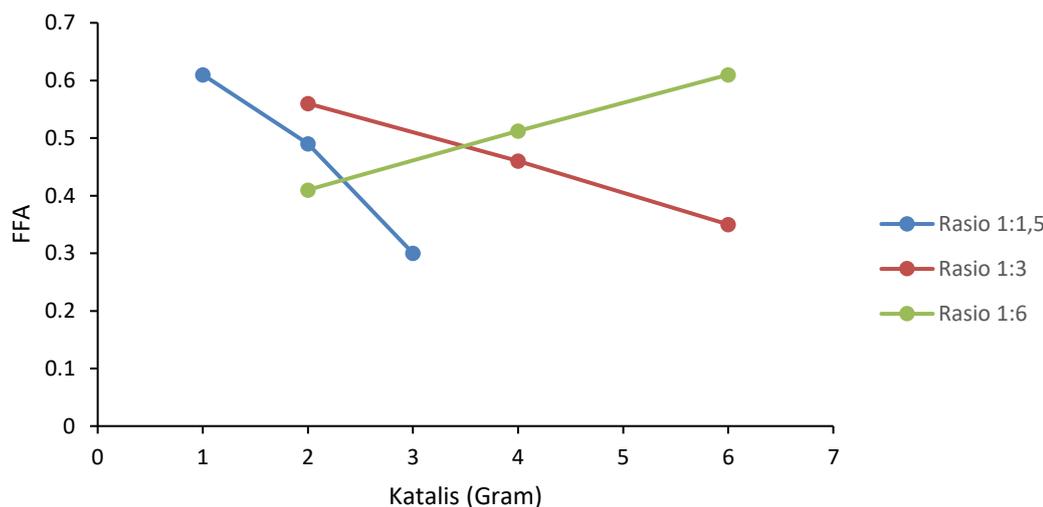
Tabel 6. Tabel Hasil Uji %FFA Biodiesel

Run	Variabel Bebas		Variabel Kontrol	Analisa Uji		
	Minyak:Metanol (mL)	Katalis (gram)		%FFA	Satuan	SNI
1	1:1,5	1	Waktu Operasi Transesterifikasi 1 jam, Suhu 60°C, Pemurnian Distilasi suhu 70°C selama 30 menit	0,61%	Mg. KOH/g, maks	0,5
2	1:1,5	2		0,49%		
3	1:1,5	3		0,3%		
4	1:3	2		0,56%		
5	1:3	4		0,46%		
6	1:3	6		0,35%		
7	1:6	2		0,41%		
8	1:6	4		0,512%		
9	1:6	6		0,61%		

Pada grafik 4 densitas cenderung naik pada variabel rasio 1:6 dan 1:1,5 serta menurun untuk variabel 1:3. Adanya ketidakaturan tersebut kemungkinan disebabkan masih adanya pengotor pada biodiesel,

sehingga nilai densitas yang diperoleh tinggi (Susanti *et al.*, 2023). Densitas pada biodiesel sebagai bahan bakar tidak boleh terlalu rendah ataupun tinggi (Miskah *et al.*, 2016). Jumlah miligram yang dibutuhkan untuk menetralkan asam lemak bebas dalam 1 gram minyak atau lemak adalah bilangan asam. Nilai uji asam lemak mencapai SNI maksimal 0,5 mg KOH/gram.

Pada uji angka asam biodiesel dari minyak jelantah bernilai rendah kecuali pada variabel 4, 8 dan 9. Pada ketiga variabel dihasilkan biodiesel dengan angka asam melebihi kadar maksimal standar SNI (Badan Standarisasi Nasional, 2015). Kandungan asam lemak bebas pada minyak jelantah telah berkurang karena rendahnya produksi asam lemak. Biodiesel bersifat korosif dan dapat membentuk jelaga atau endapan pada injektor diesel apabila bilangannya tinggi (Berghuis *et al.*, 2019). Hasil tabel uji %FFA ditampilkan pada grafik sebagai berikut :

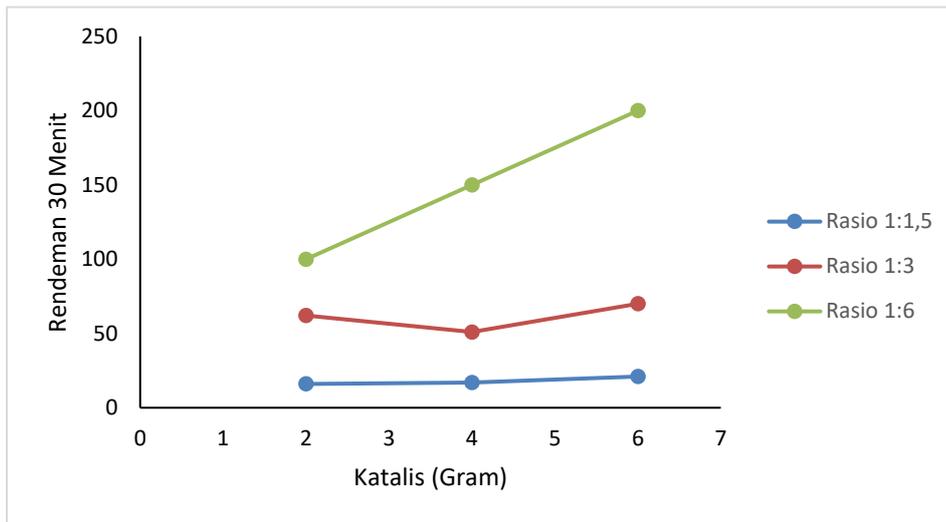


Gambar 6. Grafik Perbandingan Katalis Dengan %FFA

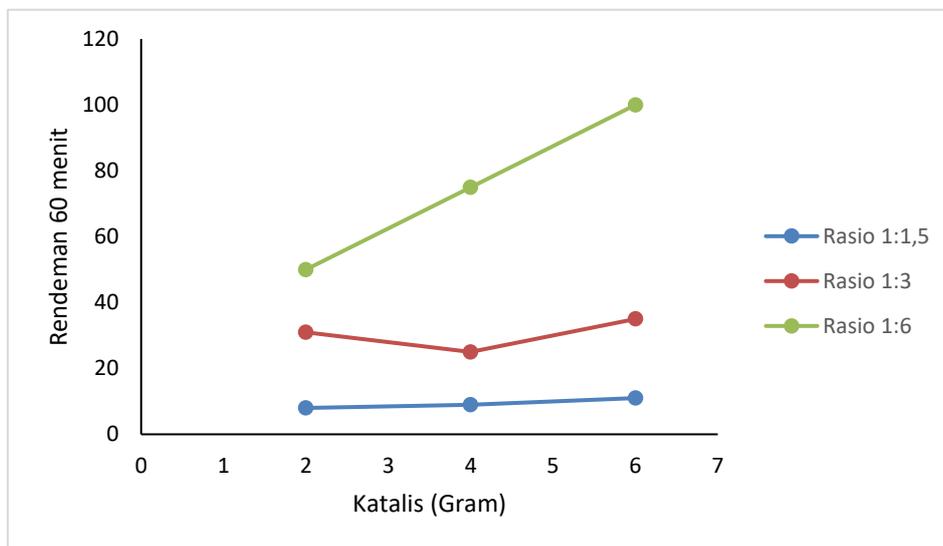
Pada gambar grafik 7 dan 8 diketahui bahwa pada rasio 1:1,5 dan rasio 1:3 mengalami penurunan %FFA ketika terjadi penambahan katalis. Hal tersebut sesuai dengan penelitian terdahulu (Arita *et al.*, 2014) bahwa penambahan katalis mempengaruhi angka asam biodiesel menjadi semakin rendah (Arita *et al.*, 2014). Angka asam yang tinggi mempengaruhi rusaknya minyak sehingga mengurangi viskositas minyak nabati untuk memenuhi standar solar . Pengujian rendemen atau yield biodiesel adalah banyaknya alkil ester hasil minyak yang direaksikan. Pengujian rendemen pada biodiesel dari minyak jelantah sesuai SNI-04-7182-2015 sebagai berikut :

Tabel 7. Tabel Hasil Uji Rendemen Biodiesel

Run	Variabel Bebas		Variabel Kontrol	Analisa Uji	
	Minyak : Metanol (mL)	Katalis (gram)		Hasil Rendemen 30 menit	Hasil Rendemen 60 menit
1	1:1,5	2	Waktu Operasi Transesterifikasi 1 jam, Suhu 60°C	16	8
2	1:1,5	4		17	9
3	1:1,5	6		21	11
4	1:3	2		62	31
5	1:3	4		51	25
6	1:3	6		70	35
7	1:6	2		100	50
8	1:6	4		150	75
9	1:6	6		200	100

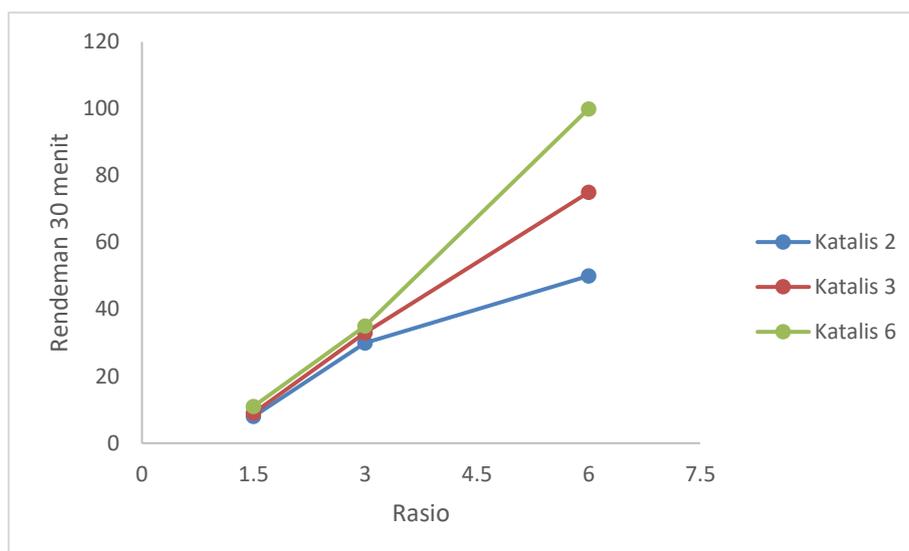


Gambar 7. Grafik Perbandingan Katalis Dengan %Rendemen Waktu Operasi 30 Menit

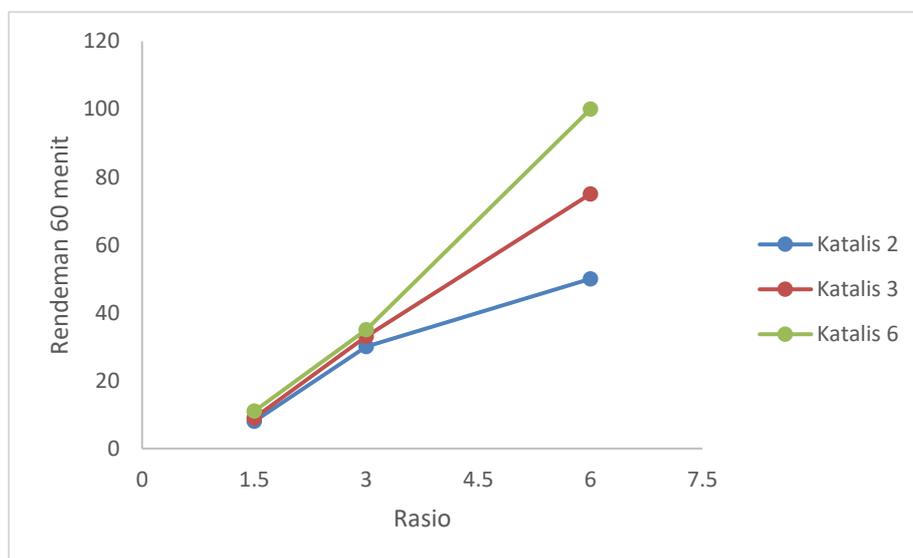


Gambar 8. Grafik Perbandingan Katalis Dengan %Rendemen Waktu Operasi 60 Menit

Pada gambar grafik 6 dan 7 meningkatnya %rendemen sebanding dengan meningkatnya penambahan katalis pada saat reaksi transesterifikasi. %yield atau %rendemen cenderung meningkat pada saat CaO ditambahkan yang mempengaruhi sisi aktif katalis menjadi bertambah. Meningkatnya rasio CaO menyebabkan akumulasi CaO membentuk gumpalan sehingga mencegah kontak antara sisi aktif dan reaktan. Luas permukaan katalis menjadi kecil dan mengurangi sisi aktif karena gumpalan menutupi pori. Jika jumlah katalis berlebih maka dapat menyebabkan reaksi penyabunan yang menghasilkan gliserol dan air sehingga mengurangi produksi biodiesel. Persentase konversi biodiesel semakin besar karena penggunaan alkohol berlebih membuat reaksi berjalan kekanan dan memperbesar jumlah produk biodiesel yang dihasilkan (Miskah *et al.*, 2016). Pengaruh meningkatnya jumlah *active site* terjadi karena meningkatnya jumlah katalis. Meningkatnya jumlah *active site* dapat memberikan peluang terjadinya reaksi pembentukan ester (Sidabutar *et al.*, 2013). Katalis yang tidak bereaksi dapat meningkatkan laju reaksi melalui penurunan energi aktivasi.



Gambar 9. Grafik Perbandingan Rasio Molar Dengan %Rendemen Waktu Operasi 30 Menit



Gambar 10. Grafik Perbandingan Rasio Molar Dengan %Rendemen Waktu Operasi 60 Menit

Pada gambar grafik 9 dan 10 diketahui bahwa semakin meningkatnya rasio molar sebanding dengan meningkatnya %rendemen yang dihasilkan pada biodiesel. Fasa kontinu (metanol) bergeser ke arah kanan (produk) mempengaruhi perolehan *yield*. *Yield* biodiesel meningkat ketika rasio molar meningkat (Putri & Sudiyo, 2012). Penelitian lain juga menjelaskan *yield* biodiesel bertambah dengan meningkatnya rasio molar metanol terhadap minyak. Reaksi transesterifikasi bersifat reversibel dan membutuhkan metanol berlebih untuk mendorong reaksi ke sisi produk. Peningkatan rasio mol metanol terhadap minyak membuat nilai perolehan biodiesel tinggi sehingga menggeser reaksi ke kanan atau ke produk untuk meningkatkan hasil biodiesel. (Liu *et al.*, 2008)

Penelitian menunjukkan bahwa pembakaran biodiesel menghasilkan nyala api berwarna biru, yang menunjukkan suhu lebih tinggi di bawah 2000°C, dibandingkan dengan solar yang menghasilkan nyala api merah di bawah 1000°C. Perbandingan ini menegaskan bahwa biodiesel cenderung menghasilkan suhu pembakaran yang lebih tinggi daripada solar (Berghuis *et al.*, 2019). Uji nyala api pada biodiesel dengan berbagai variabel ditunjukkan pada tabel 8 sebagai berikut :

Tabel 8. Hasil Uji Nyala Api Biodiesel

Run	Variabel Bebas		Variabel Kontrol	Analisa Uji Warna Titik Nyala Api	Standar Kandungan Biodiesel
	Minyak:Metanol (mL)	Katalis (gram)			
1	1:1,5	2		Nyala Biru	
2	1:1,5	4	Waktu Operasi	Nyala Biru	
3	1:1,5	6	Transesterifikasi 1	Nyala Biru	
4	1:3	2	jam, Suhu 60°C,	Nyala Biru	Nyala Api Biru
5	1:3	4	Pemurnian Distilasi	Nyala Biru	
6	1:3	6	suhu 70°C selama	Nyala Biru	
7	1:6	2	30 menit	Nyala Biru	
8	1:6	4		Nyala Biru	

Terdapat perbedaan warna nyala api pada biodiesel dan solar. Warna api biodiesel berwarna biru. Warna api solar berwarna merah. Biodiesel terbakar lebih baik apabila dibandingkan dengan solar karena tidak menghasilkan emisi yang dapat mencemari lingkungan (Berghuis *et al.*, 2019).

Hasil Biodiesel Terbaik

Pada penelitian didapatkan hasil biodiesel terbaik sebagai berikut :

Tabel 9. Hasil Biodiesel Terbaik

No	Bahan	Rasio Massa	Jumlah Katalis (gram)	Densitas (Kg/m ³)	%FFA (Mg.KOH/g)
1		1:1,5	6	868	0,3%
2	Biodiesel		2	864	0,35%
3		1:6	4	875	0,41%
		SNI 7182:2015		850-890 (Kg/m ³)	Maks. 0,5 Mg.KOH/g

Berdasarkan Tabel 9, hasil biodiesel terbaik dalam penelitian ini diperoleh pada rasio massa metanol terhadap minyak jelantah sebesar 1:1,5 dan jumlah katalis CaO sebesar 6 gram, yang menghasilkan biodiesel dengan densitas 868 kg/m³ dan kadar asam lemak bebas (%FFA) sebesar 0,3%. Nilai tersebut masih berada dalam batas standar mutu biodiesel menurut SNI 7182:2015, yang mensyaratkan densitas dalam rentang 850–890 kg/m³ dan kadar FFA maksimum 0,5%. Formulasi lainnya (rasio 1:6 dan katalis 2–4 gram) juga menghasilkan biodiesel yang memenuhi standar, namun dengan nilai FFA sedikit lebih tinggi, yaitu 0,35% dan 0,41%.

Jika dibandingkan dengan penelitian lain, misalnya studi oleh Widiyastuti *et al.* (2019) yang memproduksi biodiesel dari minyak jelantah menggunakan katalis CaO dari cangkang telur, diperoleh %FFA terbaik sebesar 0,34% dan densitas 860 kg/m³ pada rasio molar 1:6. Sementara itu, penelitian oleh Rosyidah dan Kusumaningrum (2021) dengan katalis dari abu terbang menghasilkan FFA sebesar 0,42%. Maka, kualitas biodiesel dalam penelitian ini tergolong kompetitif, bahkan cenderung lebih baik dari beberapa penelitian serupa, terutama dalam hal kestabilan densitas dan kadar FFA yang lebih rendah pada jumlah katalis yang optimal. Hal ini menunjukkan bahwa katalis CaO dari cangkang kerang bulu cukup efektif dalam mengurangi kadar asam lemak bebas dan menghasilkan biodiesel berkualitas sesuai standar nasional.

KESIMPULAN

Pada penelitian didapatkan kesimpulan yakni proses esterifikasi diperlukan untuk mereduksi asam lemak pada minyak jelantah. Kandungan asam lemak minyak jelantah minimal 1% untuk melanjutkan proses transesterifikasi. Katalis kalsium oksida (*Anadara antiquata*) yang diperoleh dari limbah cangkang kerang sebagai katalis basa heterogen memiliki kandungan CaO sebesar 96,51%. Katalis CaO yang berasal dari cangkang kerang menunjukkan bahwa limbah dapat dikembangkan menjadi sumber oksida logam yang bersifat ekologis, murah dan dapat memberikan nilai ekonomi. Hasil biodiesel terbaik diperoleh pada

rasio molar 1:1,5 dengan katalis 6 gram. Rasio molar 1:6 dengan katalis 2 gram. Rasio molar 1:6 dengan katalis 4 gram. Ketiga sampel telah memenuhi standar uji biodiesel sesuai SNI.

Dari penelitian terdapat beberapa saran sebagai bahan evaluasi pada penelitian yang akan dilakukan kedepannya yakni perlunya penelitian lanjutan mengenai pencucian dan pemurnian biodiesel dengan metode yang lain, sehingga dapat memenuhi syarat viskositas sesuai SNI. Setelah itu, perlu adanya pengujian GC-MS untuk mengetahui sampel, baik dari sampel minyak jelantah maupun biodiesel bervariasi. Selanjutnya, pengujian FTIR bertujuan untuk mengetahui perubahan gugus fungsi dalam ester (biodiesel) yang dibandingkan dengan sampel awal. Kemudian, perlu adanya pengujian nyala api sebagai acuan standart titik nyala biodiesel dan pengujian karakteristik lebih lanjut untuk mengetahui standart biodiesel secara kimia, fisika, serta lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhmad Anugerah S, & Iriany. (2015). Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Bulu Sebagai Adsorben Untuk Menjerap Logam Kadmium (Ii) Dan Timbal (Ii). *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(3), 40–45. <https://doi.org/10.32734/jtk.v4i3.1480>
- Arita, S., Adipati, A. S., & Sari, D. P. (2014). Pembuatan Katalis Heterogen Dari Cangkang Kerang Darah (Anadara Granosa) Dan Diaplikasikan Pada Reaksi Transesterifikasi Dari Crude Palm Oil. *Jurnal Teknik Kimia*, 20(3), 31–37. <http://jtk.unsri.ac.id/index.php/jtk/article/view/183/0>
- Azzahro, U. L. (2021). Umei Latifah Azzahro 1 dan Wisnu Broto 2. *Jurnal Sosial Dan Teknologi*, 1(6), 499–507.
- Badan Standarisasi Nasional. (2015). SNI 7182:2015 Biodiesel. *Badan Standarisasi Nasional*, 1, 1–88.
- Berghuis, N. T., Tamako, P. D., & Supriadin, A. (2019). Pemanfaatan Limbah Biji Alpukat (*Persea americana*) sebagai Bahan Baku Biodiesel. *Al-Kimiya*, 6(1), 36–45. <https://doi.org/10.15575/ak.v6i1.4597>
- BPS. (2021). *Produksi Minyak Bumi dan Gas Alam, 1996-2022*. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/1/MTA5MiMx/petroleum-and-natural-gas-production--1996-2022.html>
- Chih, T. B., Nurul Huda Zulkifli, M. F. M. S., & Mohd Shukri Zainal Abidin. (2023). Preparation and Characterization of Shell-Based CaO Catalysts for Biodiesel Synthesis. *Energies, MDPI*, 16(14).
- Efendi, R., Faiz, H. A. N., & Firdaus, E. R. (2018). Pembuatan Biodiesel Minyak Jelantah Menggunakan Metode Esterifikasi- Transesterifikasi Berdasarkan Jumlah Pemakaian Minyak Jelantah. *Industrial Research Workshop and National Seminar*, 7182, 402–409.
- ESDM, K. (2021). *Minyak Jelantah, Sebuah Potensi Bisnis Energi yang Menjanjikan*. Direktorat Jenderal EBTKE, Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. <https://www.esdm.go.id/id/berita-unit/direktorat-jenderal-ebtke/minyak-jelantah-sebuah-potensi-bisnis-energi-yang-menjanjikan-1>
- Fedosov, S. N., Brask, J., & Xu, X. (2012). Microtitration of free fatty acids in oil and biodiesel samples using absorbance and/or fluorescence of pyranine. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89(12), 2155–2163. <https://doi.org/10.1007/s11746-012-2117-8>
- Fitriani, E., Nasution, A. H., & Ramadhan, R. (2020). *Pembuatan Biodiesel dari Minyak Jelantah Menggunakan Katalis CaO dari Cangkang Kerang Darah (Anadara granosa)*.
- Gaurav, A., Dumas, S., Mai, C. T. Q., & Ng, F. T. T. (2019). A kinetic model for a single step biodiesel production from a high free fatty acid (FFA) biodiesel feedstock over a solid heteropolyacid catalyst. *Green Energy and Environment*, 4(3), 328–341. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2019.03.004>
- Humas EBTKE. (2021). *Laporan Kinerja Ditjen EBTKE Tahun 2020*. <https://ebtke.esdm.go.id/post/2021/04/19/2843/laporan.kinerja.ditjen.ebtke.tahun.2020>
- Julianti, N. K., Wardani, T. K., Gunardi, I., & Roesyadi, A. (2014). Pembuatan Biodiesel dari Minyak Kelapa Sawit RBD dengan Menggunakan Katalis Berpromotor Ganda Berpenyangga γ -Alumina(CaO/MgO/ γ -Al₂O₃) dalam Reaktor Fluidized Bed. *Jurnal Teknik Pomits*, 3(2), 143–148.

- Liu, X., Piao, X., Wang, Y., & Zhu, S. (2008). Transesterification of soybean oil with methanol to biodiesel using calcium oxide as a solid base catalyst. *Fuel*, 87(7), 1076–1082.
- Mayasari, H. E., & Yuniari, A. (2016). Karakteristik termogravimetri dan kinetika dekomposisi EPDM dengan bahan pengisi carbon black. *Majalah Kulit, Karet, Dan Plastik*, 32(2), 125. <https://doi.org/10.20543/mkcp.v32i2.1591>
- Miskah, S., Zulkarnain, I., & Pramana, W. (2016). *Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Jarak Kepyar Dengan Reaksi Metanolisis Menggunakan Katalis Cao Dari Cangkang Kerang*.
- Nasution, J. H., & Iriany. (2015). Pembuatan adsorben dari cangkang kerang bulu yang diaktivasi secara termal sebagai pengadsorpsi fenol. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(4), 51–57.
- Rosyidah, L., & Kusumaningrum, A. (2021). Pemanfaatan Abu Terbang sebagai Katalis Heterogen dalam Produksi Biodiesel dari Minyak Jelantah. *Jurnal Energi Dan Lingkungan*, 8(1).
- Saputra, A. A., & Iriany. (2015). Adsorben Untuk Menjerap Logam. *Universitas Sumatera Utara*, 4(3), 40–45.
- Sari, Y. C., Junaidi, R., & Hasan, A. (2022). Application Of Limestone As Heterogene Catalyst For Biodiesel Production From Waste Cooking Oil. *Jurnal Pendidikan Dan Teknologi Indonesia*, 2(8). <https://doi.org/10.52436/1.jpti.204>
- Selemani, A., & Kombe, G. G. (2022). Glycerolysis of high free fatty acid oil by heterogeneous catalyst for biodiesel production. *Results in Engineering*, 16(August), 100602. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100602>
- Sidabutar, E. D. C., Faniudin, M. N., & Said, M. (2013). Sidabutar 2013.pdf. *Jurnal Teknik Kimia*, 19(1), 40–49.
- SNI-Biodiesel. (2006). *Sni 04-7182-2006*.
- Sri Kembaryanti Putri, S., & Sudiyo, R. (2012). Studi Proses Pembuatan Biodiesel dari Minyak Kelapa (Coconut Oil) dengan Bantuan Gelombang Ultrasonik. *Jurnal Rekayasa Proses*, 6(1).
- Susanti, T., Mas'udah, M., & Santosa, S. (2023). Studi Penggunaan Katalis Cao-Naoh Pada Produksi Biodiesel Dari Minyak Jelantah. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, 8(2), 294–300. <https://doi.org/10.33795/distilat.v8i2.361>
- Sutrisno, E. (2021). *Menggeser Minyak ke Gas Bumi*. Portal Informasi Indonesia (Indonesia.Go.Id). <https://indonesia.go.id/kategori/editorial/2993/menggeser-minyak-ke-gas-bumi>
- Widiyastuti, E., Setiawan, I., & Nugroho, A. (2019). Produksi Biodiesel dari Minyak Jelantah Menggunakan Katalis CaO Berbasis Limbah Cangkang Telur Ayam Ras. *Jurnal Teknik Kimia*, 13(2).
- Zaki, M., Husin, M.T., H., Alam, P. N., Darmadi, D., Rosnelly, C. M., & Nurhazanah, N. (2019). Transesterifikasi Minyak Biji Buta-Buta menjadi Biodiesel pada Katalis Heterogen Kalsium Oksida (CaO). *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 14(1), 36–43. <https://doi.org/10.23955/rkl.v14i1.13495>
- Zsakó, J., & Arz, H. E. (1974). Kinetic analysis of thermogravimetric data - VII. Thermal decomposition of calcium carbonate. *Journal of Thermal Analysis*, 6(6), 651–656. <https://doi.org/10.1007/BF01911785>