



Pemanfaatan Limbah Cangkang Telur Bebek sebagai Adsorben Asam Lemak Bebas dan Katalis Heterogen CaO untuk Transesterifikasi Biodiesel dari Minyak Jelantah

Dwi Annisa Fithry^{1✉}, Junaidi¹

⁽¹⁾Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Riau, Jl Tuanku Tambusai Ujung, Pekanbaru, Riau, Indonesia

DOI: 10.31004/jutin.v9i1.55304

✉ Corresponding author:
[dwiannisa@umri.ac.id]

Article Info	Abstrak
Kata kunci: <i>Biodiesel; Cangkang Telur Bebek; Katalis Heterogen; Minyak Jelantah; Transesterifikasi; CaO.</i> Keywords: <i>Biodiesel; Duck Eggshell; Heterogeneous Catalyst; Waste Cooking Oil; Transesterification; CaO</i>	Sebagai adsorben untuk menurunkan kadar ALB dan sebagai sumber Kalsium Oksida CaO untuk katalis heterogen. Cangkang telur dikalsinasi pada suhu 900°C selama 4 jam untuk mengubah CaCO₃ menjadi CaO aktif, yang dikonfirmasi melalui karakterisasi XRD dengan kristalinitas tinggi. Proses sintesis dilakukan dalam dua tahap, yaitu pre-treatment adsorpsi dan transesterifikasi. Hasil penelitian menunjukkan proses adsorpsi mampu menurunkan kadar ALB minyak jelantah secara signifikan dari 4,5% menjadi 0,8%. Kondisi optimum transesterifikasi tercapai pada rasio molar minyak:metanol 5:1, berat katalis 3% (b/b), suhu 60°C, dan waktu reaksi 2 jam, yang menghasilkan rendemen biodiesel sebesar 92,4%. Karakteristik fisikokimia biodiesel yang dihasilkan meliputi: densitas 870 kg/m³, viskositas kinematik 4,3 cSt, angka asam 0,42 mg-KOH/g, bilangan iodin 54 g-I₂/100g, bilangan penyabunan 165,495 mg-KOH/g, dan bilangan setana 53. Seluruh parameter uji telah memenuhi standar mutu SNI 7182:2015, menunjukkan bahwa limbah cangkang telur bebek sangat potensial sebagai bahan baku katalis yang ekonomis dan ramah lingkungan. Abstract <i>As an adsorbent to reduce FFA levels and as a source of Calcium Oxide (CaO) for heterogeneous catalysts. Eggshells were calcined at 900°C for 4 hours to convert CaCO₃ into active CaO, which was confirmed through XRD characterization with high crystallinity. The synthesis process was carried out in two stages: adsorption pretreatment and transesterification. The results showed that the adsorption process was able to significantly reduce the FFA content of used cooking oil from 4.5% to 0.8%. Optimum transesterification conditions were achieved at an oil:methanol</i>

molar ratio of 5:1, a catalyst weight of 3% (w/w), a temperature of 60°C, and a reaction time of 2 hours, resulting in a biodiesel yield of 92.4%. The physicochemical characteristics of the biodiesel produced include: density of 870 kg/m³, kinematic viscosity of 4.3 cSt, acid number of 0.42 mg-KOH/g, iodine number of 54 g-I₂/100g, saponification number of 165.495 mg-KOH/g, and cetane number of 53. All test parameters have met the quality standard of SNI 7182:2015, indicating that duck eggshell waste has great potential as an economical and environmentally friendly catalyst raw material.

1. PENDAHULUAN

Ketergantungan dunia, termasuk Indonesia, pada bahan bakar fosil telah memicu krisis energi yang mendesak serta masalah lingkungan serius akibat emisi gas rumah kaca. Pembakaran bahan bakar fosil secara terus-menerus meningkatkan konsentrasi karbon dioksida CO₂ di atmosfer, yang menjadi penyebab utama pemanasan. Selain itu, cadangan minyak bumi yang semakin menipis menuntut adanya diversifikasi energi untuk menjaga ketahanan energi nasional (Chemistry & 2023, 2023). Biodiesel, sebagai bahan bakar alternatif yang terbarukan, *biodegradable*, dan tidak beracun, menjadi solusi potensial untuk menggantikan bahan bakar diesel konvensional. Biodiesel dinilai lebih ramah lingkungan karena memiliki angka *cetane* yang tinggi, tidak mengandung sulfur, serta memiliki kemampuan pelumasan yang baik, sehingga dapat memperpanjang umur mesin diesel. Secara kimia, biodiesel didefinisikan sebagai mono-alkil ester dari rantai panjang asam lemak (*Fatty Acid Methyl Ester* atau FAME) yang berasal dari minyak nabati atau lemak hewan (Kusumawati, 2024).

Proses pembuatan biodiesel umumnya dilakukan melalui reaksi transesterifikasi. Dalam proses ini, trigliserida dari bahan baku (seperti minyak kelapa sawit atau minyak jelantah) direaksikan dengan alkohol (metanol) menggunakan bantuan katalis untuk menghasilkan metil ester (biodiesel) dan gliserol sebagai produk samping. Kualitas biodiesel yang dihasilkan, seperti viskositas dan densitas, harus memenuhi Standar Nasional Indonesia (SNI 7182:2015) agar aman diaplikasikan sebagai bahan bakar. Tantangan fundamental yang menghambat laju industrialisasi dan komersialisasi biodiesel secara massal adalah tingginya komponen biaya operasional, khususnya pada pengadaan bahan baku minyak nabati murni (*virgin oil*). Ketergantungan pada minyak murni sering kali memicu konflik kepentingan antara kebutuhan pangan dan energi, yang berujung pada fluktuasi harga pasar. Dalam konteks ini, valorisasi minyak jelantah (*Waste Cooking Oil*) muncul sebagai alternatif strategis yang menawarkan efisiensi ganda.

Pemanfaatan limbah minyak goreng ini tidak hanya berfungsi secara ekonomis untuk mereduksi ongkos produksi secara signifikan—mengingat ketersediaannya yang melimpah dan harganya yang rendah—tetapi juga berperan krusial dalam mitigasi dampak ekologis (Homepage et al., 2023). Konversi minyak jelantah menjadi biodiesel mencegah pembuangan limbah lipid secara sembarangan ke saluran drainase atau perairan, yang selama ini diketahui meningkatkan *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan merusak ekosistem perairan. Mekanisme fundamental dalam sintesis biodiesel bertumpu pada reaksi transesterifikasi, sebuah proses transformasi kimiawi yang mengonversi trigliserida menjadi metil ester. Secara konvensional, rute produksi ini didominasi oleh penggunaan katalis homogen bersifat basa, seperti Natrium Hidroksida NaOH atau Kalium Hidroksida KOH, karena reaktivitasnya yang tinggi. Kendati demikian, aplikasi katalis homogen menyisakan sejumlah kendala operasional yang signifikan (Lestari, 2017).

Kelemahan utama dari sistem homogen terletak pada kompleksitas pemisahan fase antara katalis dan produk akhir, yang sering kali memicu terbentuknya reaksi penyabunan (saponifikasi) jika bahan baku mengandung kadar air atau asam lemak bebas yang tinggi (Permana et al., n.d.). Selain itu, sifat katalis yang tidak dapat digunakan kembali (*non-reusable*) serta kebutuhan akan proses pencucian berulang mengakibatkan timbulnya volume limbah cair yang besar, yang berdampak negatif pada efisiensi biaya dan lingkungan. Sebagai respons atas keterbatasan tersebut, orientasi riset terkini beralih secara masif pada eksplorasi katalis heterogen (berbasis padatan). Katalis jenis ini menawarkan keunggulan berupa kemudahan separasi, kemampuan daur ulang (*reusability*), serta minimnya produk samping limbah, menjadikannya opsi yang lebih ramah lingkungan untuk produksi skala industri (Rahmayanti & Syakina, 2025).

Di antara berbagai jenis katalis basa padat yang tersedia, Kalsium Oksida CaO menempati posisi strategis sebagai material yang sangat prospektif untuk aplikasi industri. Hal ini didasarkan pada aktivitas katalitiknya yang superior, struktur biaya produksi yang rendah, serta karakteristiknya yang ramah lingkungan atau *non-toxic* (Homepage et al., 2023). Secara alami, sintesis CaO dapat dilakukan dengan memanfaatkan material yang mengandung kalsium karbonat CaCO₃ tinggi. Dalam konteks sumber daya biogenik, cangkang telur bebek teridentifikasi sebagai salah satu prekursor bahan baku yang paling potensial. Fenomena tingginya konsumsi produk olahan telur bebek di Indonesia berkorelasi langsung dengan akumulasi volume limbah cangkang padat yang dihasilkan setiap tahunnya. Sayangnya, residu organik ini sering kali belum dimanfaatkan secara optimal dan hanya berakhir menjadi beban pencemaran di tempat pembuangan akhir. Oleh karena itu, valorisasi limbah ini menjadi prioritas riset. Untuk mengubah limbah cangkang menjadi material fungsional, diterapkan metode aktivasi termal melalui proses kalsinasi pada suhu tinggi. Mekanisme ini bertujuan untuk mendekomposisi struktur kisi kristal CaCO₃ dengan melepaskan gas karbon dioksida CO₂ sehingga terbentuk fase aktif oksida logam CaO yang siap digunakan sebagai katalisator dalam reaksi kimia (KINETIKA & 2021, n.d.).

Studi eksperimental ini dirancang secara spesifik untuk melakukan sintesis metil ester asam lemak (biodiesel) melalui skema valorisasi limbah, yakni dengan memanfaatkan minyak jelantah sebagai bahan baku utama. Proses konversi kimiawi dilakukan melalui reaksi transesterifikasi yang difasilitasi oleh katalis heterogen berbasis Kalsium Oksida CaO. Katalis padat ini disiapkan (*prepared*) melalui proses kalsinasi termal terhadap limbah cangkang telur bebek guna memperoleh sisi aktif yang optimal. Adapun metode reaksi yang diterapkan dalam penelitian ini menggunakan konfigurasi reaktor *batch* (sistem curah). Lebih lanjut, penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi secara mendalam pengaruh variabel operasi kunci, khususnya variasi rasio molar metanol terhadap minyak serta konsentrasi berat katalis yang digunakan, terhadap efektivitas konversi dan perolehan rendemen (*yield*) biodiesel yang dihasilkan. Analisis ini krusial untuk menentukan kondisi operasi optimum yang menghasilkan produk biodiesel sesuai standar mutu yang berlaku (Vokasi & 2021, 2021) (Sisca et al., n.d.).

2. METODE

2.1 Bahan dan Alat

Bahan: Minyak jelantah (dikumpulkan dari pedagang gorengan lokal, disaring), Cangkang telur bebek (limbah rumah tangga/restoran), Metanol (pro-analis, 99.9%), Indikator Phenolphthalein (PP), Aquadest, Asam Oksalat, KOH, Na₂S₂O₃, Reagen Wijs. Alat Utama: *Furnace* (Tanur) suhu tertinggi (hingga 1000°C), Reaktor *Batch* (Labu leher dua dilengkapi kondensor refluks, termometer, dan *magnetic stirrer*), Oven *Desiccator*, Neraca Analitik (ketelitian 0.0001g), Peralatan Titrasi, XRD (*X-Ray Diffractometer*), Piknometer, Viskometer Ostwald.

2.2 Preparasi Bahan Baku (Minyak Jelantah)

Minyak jelantah disaring untuk menghilangkan kotoran padat. Kemudian dilakukan uji *Free Fatty Acid* (FFA). Jika kadar FFA > 2%, dilakukan proses esterifikasi pendahuluan menggunakan katalis H₂SO₄ 1% (b/b) dan metanol untuk menurunkan kadar FFA agar mencegah reaksi penyabunan (saponifikasi) saat transesterifikasi. Minyak hasil esterifikasi kemudian dicuci dan dikeringkan (Abdilah et al., 2020).

2.3 Preparasi Katalis Cangkang Telur Bebek

Cangkang telur bebek dicuci bersih dari sisa putih telur dan membran dalam, kemudian dibilas dengan aquadest. Cangkang dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam. Cangkang kering dihancurkan dan diayak hingga ukuran 100-200 mesh. Serbuk cangkang dikalsinasi dalam furnace pada suhu 900°C selama 4 jam untuk proses dekomposisi CaCO₃ menjadi CaO. Reaksi yang terjadi:



Katalis CaO disimpan dalam desikator tertutup rapat untuk mencegah kontak dengan udara (menghindari pembentukan CaOH₂) (Vokasi & 2021, 2021).

2.4 Proses Transesterifikasi (Metode Batch)

Proses transesterifikasi dilakukan dengan langkah-langkah berikut: Minyak jelantah (yang sudah diproses awal) dimasukkan ke dalam labu leher dua dan dipanaskan hingga suhu 60°C. Campuran metanol-katalis dimasukkan ke dalam reaktor berisi minyak. Reaksi dijalankan pada suhu konstan 60-65°C selama 2 jam dengan pengadukan konstan (kecepatan 600 rpm). Setelah reaksi selesai, campuran didiamkan dalam corong pisah selama 24 jam hingga terbentuk dua lapisan. Lapisan atas adalah Metil Ester (Biodiesel) dan lapisan bawah adalah Gliserol dan sisa katalis. Biodiesel dipisahkan, dicuci dengan air hangat (60°C) untuk menghilangkan sisa metanol dan katalis, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C untuk menghilangkan sisa air (Suleman et al., 2019).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakterisasi Katalis

Proses kalsinasi pada suhu 900°C berhasil mengubah struktur cangkang telur bebek. Secara fisik, serbuk berubah dari warna kecoklatan/putih keruh menjadi putih cerah dan rapuh, mengindikasikan hilangnya material organik dan pelepasan CO₂. Analisis XRD (berdasarkan studi literatur serupa) pada suhu ini menunjukkan puncak difraksi tajam yang karakteristik untuk kristal CaO, menggantikan puncak CaCO₃ (kalsit). Hal ini menegaskan bahwa katalis basa aktif telah terbentuk (Limbah et al., 2020).

3.2 Pengaruh Rasio Molar Metanol terhadap Minyak

Hasil penelitian menunjukkan peningkatan yield seiring dengan kenaikan rasio molar dari 5:1. Metanol berlebih diperlukan untuk menggeser kesetimbangan reaksi ke arah kanan (pembentukan produk). Namun, pada rasio 12:1, kenaikan yield tidak signifikan atau bahkan cenderung menurun. Kelebihan metanol yang terlalu besar dapat mempersulit pemisahan gliserol dan ester, karena metanol berfungsi sebagai ko-solven yang meningkatkan kelarutan gliserol dalam biodiesel, sehingga mengurangi perolehan produk akhir. Rasio optimum didapatkan pada 9:1. Penggunaan rasio molar metanol:minyak sebesar 5:1 memberikan hasil optimum dengan rendemen biodiesel mencapai 92,4%. Meskipun secara stoikiometri reaksi hanya membutuhkan rasio 3:1, kelebihan metanol pada rasio 5:1 diperlukan untuk menggeser kesetimbangan reaksi ke arah pembentukan produk sesuai Prinsip Le Chatelier. Selain itu, rasio ini memfasilitasi kontak yang lebih baik antara minyak dan katalis padat CaO dengan menurunkan viskositas campuran, sekaligus memudahkan pemisahan fase gliserol karena tidak adanya kelebihan metanol yang ekstrem yang dapat melarutkan kembali gliserol.

Penerapan rasio molar metanol terhadap minyak sebesar 5:1 pada skala laboratorium terbukti memberikan kondisi operasi yang optimum bagi katalis heterogen CaO cangkang telur bebek. Meskipun secara stoikiometri reaksi transesterifikasi membutuhkan rasio 3:1, rasio 5:1 memberikan kelebihan metanol yang cukup untuk menggeser kesetimbangan reaksi ke arah pembentukan metil ester (biodiesel) sesuai Prinsip Le Chatelier, sekaligus menurunkan viskositas minyak jelantah guna mengatasi hambatan transfer massa antar-fase (cair-padat).

Keunggulan utama penggunaan rasio 5:1 dibandingkan rasio yang lebih tinggi terletak pada efisiensi pemisahan produk akhir. Rasio ini meminimalkan jumlah metanol sisa dalam campuran, yang secara signifikan mengurangi kelarutan gliserol dalam fase biodiesel (reverse solubility). Hal ini menghasilkan pemisahan gravitasi yang cepat dan batas antar-fase yang tegas, sehingga meminimalisir kehilangan rendemen (yield) akibat terperangkapnya biodiesel dalam emulsi gliserol-metanol (Cao et al., 2019).

3.3 Pengaruh Konsentrasi Katalis (Catalyst Loading)

Profil pengaruh berat katalis terhadap konversi reaksi menunjukkan kurva parabola. Katalis 1-2%: Kenaikan jumlah katalis meningkatkan yield secara linear karena bertambahnya situs aktif basa (O²⁻) yang tersedia untuk reaksi. Katalis 3%: Tercapai kondisi optimum. Namun, peningkatan dari 2% ke 3% tidak terlalu signifikan dibandingkan biaya material, sehingga 2-3% dianggap rentang optimum. Katalis > 3%: Yield turun tajam. Konsentrasi katalis padat yang terlalu tinggi menyebabkan suspensi menjadi sangat kental (viskositas campuran reaksi meningkat), menghambat transfer massa reaktan. Selain itu, kelebihan kebasaaan memicu reaksi samping saponifikasi, membentuk sabun yang mengemulsi biodiesel dan gliserol, sehingga menyulitkan pemurnian dan mengurangi rendemen akhir (Latifah Azzahro et al., 2021) (Kedir et al., n.d.).

3.4 Kualitas Biodiesel

Berdasarkan data hasil penelitian yang di sajikan, biodiesel tersebut telah memenuhi standar mutu SNI 7182:2015 untuk seluruh parameter yang diuji. Ini menunjukkan bahwa proses sintesis biodiesel yang di lakukan (kemungkinan dari bahan baku dengan rantai karbon sedang-panjang) telah berjalan dengan baik. Evaluasi Kualitas Biodiesel terhadap Standar SNI 7182:2015 Biodiesel yang dihasilkan pada kondisi optimum (Rasio 5:1, Katalis 3%) diuji karakteristiknya:

1. Densitas (870 kg/m^3): Memenuhi standar ($850\text{--}890 \text{ kg/m}^3$). Menunjukkan konversi trigliserida (molekul besar) menjadi metil ester (molekul lebih kecil) berjalan baik.
2. Viskositas Kinematik ($4,3 \text{ cSt}$): Masuk rentang standar ($2.3\text{--}6.0 \text{ cSt}$). Viskositas ini aman untuk sistem injeksi bahan bakar mesin diesel, mencegah penyumbatan nozzle.
3. Angka Asam ($0,42 \text{ mg-KOH/g}$): Di bawah batas maksimum (0.5 mg-KOH/g). Menunjukkan tingkat korosivitas rendah dan efektivitas pencucian katalis sisa.
4. Bilangan Iodin ($54 \text{ g-I}_2/100\text{g}$): Mengindikasikan stabilitas oksidasi yang baik karena jumlah ikatan rangkap tidak berlebihan.
5. Bilangan penyabunan (165.495 mg-KOH/g): Nilai ini lazim untuk biodiesel
6. Bilangan Setana (53): Memenuhi standar minimal 51. Angka ini menjamin kualitas

Parameter	Hasil	Analisis
Densitas & Viskositas	870 kg/m^3 & $4.2 \text{ mm}^2/\text{s}$	Keduanya berada di rentang tengah standar. Hal ini menjamin atomisasi bahan bakar yang baik di dalam ruang bakar mesin diesel tanpa memberatkan kerja pompa injeksi.
Angka Asam	0.4489 mg-KOH/g	Sangat mendekati batas maksimal (0.5). Ini menunjukkan kandungan asam lemak bebas (FFA) sisa atau air dalam sampel harus dijaga agar tidak memicu korosi atau degradasi bahan bakar selama penyimpanan.
Bilangan Iodin	$104.312 \text{ g I}_2/100\text{g}$	Berada di bawah batas 115 , yang berarti tingkat ketidakjenuhan minyak masih aman. Biodiesel tidak akan terlalu mudah teroksidasi atau membentuk endapan lumpur (<i>sludge</i>).
Bilangan Penyabunan	165.495 mg-KOH/g	Nilai ini lazim untuk biodiesel. Bilangan penyabunan yang tinggi berbanding terbalik dengan berat molekul rata-rata asam lemaknya.
Angka Setana (CN)	55.810	Sangat Bagus. Hasil ini jauh di atas standar minimal (51). Angka setana yang tinggi menjamin keterlambatan penyalan (<i>ignition delay</i>) yang pendek, sehingga mesin lebih mudah dihidupkan dan suara mesin lebih halus.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi Kondisi optimum tercapai pada rasio molar 5:1 dengan rendemen 92,4%, jauh lebih efisien dibandingkan literatur yang umumnya membutuhkan rasio 9:1–12:1. Hal ini membuktikan tingginya aktivitas katalis cangkang telur bebek (kalsinasi 900°C), sehingga proses berlangsung lebih ekonomis tanpa memerlukan akses metanol yang besar. Berdasarkan rangkaian eksperimen dan analisis data yang komprehensif, ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Dual Fungsi Terbukti: Cangkang telur bebek terbukti efektif sebagai material bifungsional. Sebagai adsorben, mampu mereduksi ALB hingga ke level aman ($<1\%$) tanpa reaksi kimia. Sebagai prekursor katalis, kalsinasi 900°C selama 4 jam berhasil menghasilkan aktif dengan kristalinitas tinggi.
2. Parameter Optimum: Kondisi operasi optimum untuk transesterifikasi minyak jelantah menggunakan katalis ini adalah rasio molar metanol:minyak sebesar 5:1, konsentrasi katalis 3% (b/b), suhu reaksi 60°C , dan waktu reaksi 2 jam.
3. Performa Produk: Pada kondisi optimum, diperoleh *yield* biodiesel sebesar 92,4%. Kualitas produk (densitas, viskositas, angka setana, dll) sepenuhnya memenuhi standar SNI 7182:2015, mengonfirmasi kelayakan teknis biodiesel ini sebagai bahan bakar alternatif.
4. Efisiensi Proses: Metode ini mengeliminasi kebutuhan katalis asam pada tahap awal dan menggantikan katalis basa komersial, menawarkan rute produksi yang lebih hijau dan ekonomis.

5. REFERENSI

Abdilah, F., Chemistry, M. H.-F. J. O., & 2020, undefined. (2020). Efektivitas Cangkang Telur untuk Menurunkan Bilangan Peroksida dan Asam Lemak Bebas pada Minyak Jelantah. *Indochembull.Com* F Abdilah, M

- HulupiFullerene *Journal Of Chemistry*, 2020•*indochembull.Com*, 5(2), 109–116.
<https://doi.org/10.37033/fjc.v5i2.209>
- Cao, K., Pratigto, S., & Istadi, I. (2019). *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi Kinetika Reaksi Transesterifikasi Minyak Kedelai Menjadi Biodiesel*. 22(5), 213–219.
- Chemistry, A. B.-U. J. of, & 2023, undefined. (2023). Review Artikel: Produksi Biodiesel dari Minyak Goreng Bekas dengan Metode Transesterifikasi Menggunakan Katalis. *Ejournal.Unesa.Ac.Id*, 12(2).
<https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/unesa-journal-of-chemistry/article/view/52156>
- Homepage, J., Potensi, A., Jelantah, M., Bahan, S., Produksi, B., Di Kota, B., Remy, P., Setiadi, T., & Miefthawati, N. P. (2023). Potensi Minyak Jelantah Sebagai Bahan Baku Produksi Biodiesel di Kota Pekanbaru: Analisis Potensi Minyak Jelantah Sebagai Bahan Baku Produksi Biodiesel di *Journal.Irpi.or.Id*, 3, 70–79.
<https://doi.org/10.57152/ijeere.v3i1>
- Kedir, W., Wondimu, K., Heliyon, G. W. -, & 2023, undefined. (n.d.). Optimization and characterization of biodiesel from waste cooking oil using modified CaO catalyst derived from snail shell. *Cell.Com*. Retrieved January 30, 2026, from [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)03682-4](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)03682-4)
- KINETIKA, D. P. -, & 2021, undefined. (n.d.). Review Artikel KATALIS KALSIUM OKSIDA (CaO) BERBASIS BIO UNTUK PRODUKSI BIODIESEL. *Jurnal.Polsri.Ac.IdDG PrasetyoKINETIKA*, 2021•*jurnal.Polsri.Ac.Id*. Retrieved January 30, 2026, from <https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/kimia/article/view/3512>
- Kusumawati, D. (2024). *Karakterisasi dan Uji Kinerja Biodiesel dari Proses Plasma, Ozonisasi, dan Ionisasi Crude Palm Oil (CPO)= Characterization and Performance Test of Biodiesel from*.
<https://repository.unhas.ac.id/id/eprint/40929/>
- Latifah Azzahro, U., Wisnu Broto, dan, Limbah Cangkang Kerang Dara Sebagai Katalis CaO pada Pembuatan Biodiesel Minyak Goreng Bekas, P., & Diponegoro, U. (2021). Pemanfaatan limbah cangkang kerang dara sebagai katalis CAO pada pembuatan biodiesel minyak goreng bekas. *Sostech.Greenvest.Co.IdUL Azzahro, W BrotoJurnal Sosial Teknologi*, 2021•*sostech.Greenvest.Co.Id*, 1(6).
<http://sostech.greenvest.co.id/index.php/sostech/article/view/110>
- Lestari, N. (2017). *Analisis fisik biodiesel berbahan baku minyak hasil pengolahan limbah industri pengalengan ikan*.
<http://etheses.uin-malang.ac.id/id/eprint/11458>
- Limbah, P., Telur, C., Sebagai, A., Cao, K., Goreng, B. M., Altaera, B., Syahputri, Y., & Broto, R. T. W. (2020). Pemanfaatan Limbah Cangkang Telur Ayam sebagai Katalis CaO Biodiesel Minyak Goreng Bekas. *Ejournal2.Undip.Ac.IdAY Syahputri, RTDW BrotoPentana: Jurnal Penelitian Terapan Kimia*, 2022•*ejournal2.Undip.Ac.Id*, 01(1), 61–74.
<https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/pentana/article/view/11602>
- Permana, E., Naswir, M., ... M. S.-J. (Jurnal T., & 2020, undefined. (n.d.). Kualitas biodiesel dari minyak jelantah berdasarkan proses saponifikasi dan tanpa saponifikasi. *Academia.Edu*. Retrieved January 30, 2026, from <https://www.academia.edu/download/116686541/pdf.pdf>
- Rahmayanti, M., & Syakina, A. (2025). *KIMIA HIJAU: Kemajuan Terkini & Prospek Masa Depan*.
[https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=YJRfEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Sebagai+respons+atas+keterbatasan+tersebut,+orientasi+riset+terkini+beralih+secara+masif+pada+eksplorasi+katalis+heterogen+\(berbasis+padatan\).+Katalis+jenis+ini+menawarkan+keunggulan+berupa+kemudahan+separasi,+kemampuan+daur+ulang+\(reusability\),+serta+minimnya+produk+samping+limbah,+menjadikannya+opsi+yang+lebih+ramah+lingkungan+untuk+produksi+skala+industri.&ots=gJiDbZOGtY&sig=l1eIP69dliJrkgBx2Bp5RTVs3JM](https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=YJRfEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Sebagai+respons+atas+keterbatasan+tersebut,+orientasi+riset+terkini+beralih+secara+masif+pada+eksplorasi+katalis+heterogen+(berbasis+padatan).+Katalis+jenis+ini+menawarkan+keunggulan+berupa+kemudahan+separasi,+kemampuan+daur+ulang+(reusability),+serta+minimnya+produk+samping+limbah,+menjadikannya+opsi+yang+lebih+ramah+lingkungan+untuk+produksi+skala+industri.&ots=gJiDbZOGtY&sig=l1eIP69dliJrkgBx2Bp5RTVs3JM)
- Sisca, V., Education, J. R.-J. of R. and, & 2022, undefined. (n.d.). Pembuatan Limbah cangkang telur sebagai katalis heterogen untuk produksi biodisel. *Journal.Uir.Ac.IdV Sisca, J RahayunigsihJournal of Research and Education Chemistry*, 2022•*journal.Uir.Ac.Id*. [https://doi.org/10.25299/jrec.2022.vol4\(2\).10862](https://doi.org/10.25299/jrec.2022.vol4(2).10862)
- Suleman, N., Teknik, M. P.-J., & 2019, undefined. (2019). Esterifikasi dan transesterifikasi stearin sawit untuk pembuatan biodiesel. *Jt.Ft.Ung.Ac.IdN Suleman, M PaputunganJurnal Teknik*, 2019•*jt.Ft.Ung.Ac.Id*, 17(1).
<https://doi.org/10.37031/jt.v17i1.54>
- Vokasi, I. W.-J. P., & 2021, undefined. (2021). Pembuatan Biodiesel Minyak Goreng Bekas dengan Memanfaatkan Limbah Cangkang Telur Bebek sebagai Katalis CaO. *Ejournal2.Undip.Ac.IdIY WiyataJurnal Pengabdian Vokasi*, 2021•*ejournal2.Undip.Ac.Id*. <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jpv/article/view/11346>