

**ANALISIS STRUKTUR KRISTAL DAN KOMPOSISI UNSUR
KATALIS HETEROGEN DARI KULIT PISANG KLUTUK
(*MUSA BALBISIANA* COLLA) DAN APLIKASINYA PADA
TRANSESTERIFIKASI MINYAK KELAPA SAWIT**

Skripsi

**Untuk memenuhi sebagian persyaratan
mencapai derajat Sarjana S-1**



Arnodita Zenola

22106030009

**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA**

2026

LEMBAR PENGESAHAN



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1913/Un.02/DST/PP.00.9/08/2026

Tugas Akhir dengan judul : ANALISIS STRUKTUR KRISTAL DAN KOMPOSISI UNSUR KATALIS
HETEROGEN DARI KULIT PISANG KLUTUK (MUSA BALBISIANA
COLLA) DAN APLIKASINYA PADA TRANSESTERIFIKASI MINYAK KELAPA
SAWIT

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : ARNODITA ZENOLA
Nomor Induk Mahasiswa : 22106030009
Telah diujikan pada : Selasa, 11 Agustus 2026
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Sudartin, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a8396c26d18c



Penguji I

Didik Krisdiyanto, S.Si., M.Sc
SIGNED

Valid ID: 6a83ed1f0c58c



Penguji II

Khamidinal, S.Si., M.Si
SIGNED

Valid ID: 6a86825040996



Yogyakarta, 11 Agustus 2026
UIN Sunan Kalijaga

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a87846c9b328



SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan Skripsi/Tugas Akhir
Lamp : -

Kepada
Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta
di Yogyakarta

Assalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk, dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Arnodita Zenola
NIM : 22106030009
Judul Skripsi : Analisis Struktur Kristal dan Komposisi Unsur Katalis Heterogen Dari Kulit Pisang Klutuk (*Musa balbisiana* Colla) dan Aplikasinya Pada Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit

sudah dapat diajukan kembali kepada Jurusan Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Kimia.

Dengan ini, kami mengharapkan agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqasyahkan. Atas perhatiannya, kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Yogyakarta, 29 Juli 2026

Pembimbing,

Sudarlin, M. Si.

NIP. 19850611 201503 1 002

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Amodita Zenola
NIM : 22106030009
Jurusan : Kimia
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Analisis Struktur Kristal dan Komposisi Unsur Katalis Heterogen Dari Kulit Pisang Klutuk (*Musa balbisiana* Colla) dan Aplikasinya Pada Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit” merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 29 Juli 2026



Amodita Zenola
NIM. 22106030009

HALAMAN MOTTO

“Jika Bukan Karena Allah Yang Memampukan, Mungkin Aku Sudah Lama Menyerah. Sesungguhnya Beserta Kesulitan Ada Kemudahan”

(QS. Al-Insyirah: 5-6)

“Keberhasilan Bukanlah Milik Orang Pintar, Keberhasilan Adalah Milik Mereka Yang Senantiasa Berusaha”

(BJ Habibie)

“Mungkin Kita Sampai, Mungkin Saja Tidak Tugas Kita Hanya Berjalan”

(The Jeblogs - Sambutlah)

“Ketakutan Yang Menenggelamkan. Keberanian Yang Menyelamatkan”

(FSTVLST – Hujan Mata Pisau)

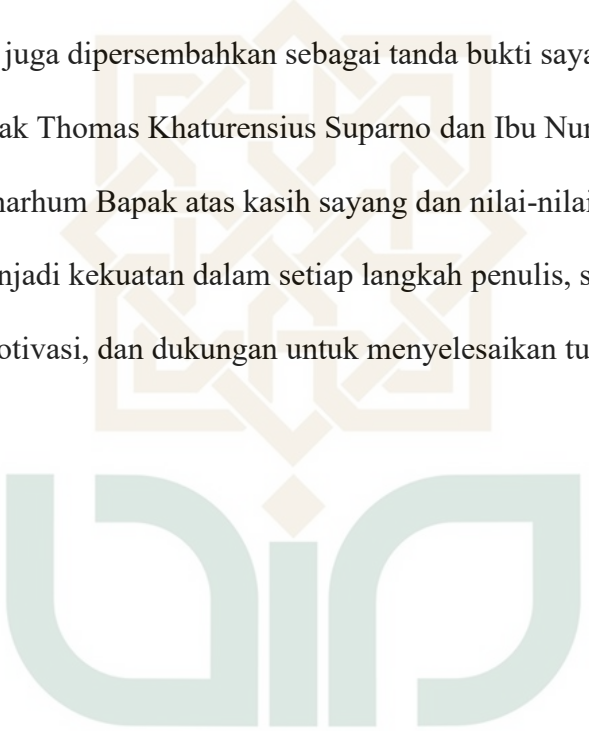
*“Suro Diro Djoyodinigrat Lebur Dening Pangastuti”
Segala bentuk rintangan prosesnya akan lancar apabila
dilawan dengan sabar dan welas asih.*

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PERSEMBAHAN

Karya tulis ini penulis persembahkan dan didedikasikan untuk almamater
Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga
Yogyakarta

Karya tulis ini juga dipersembahkan sebagai tanda bukti sayang dan cinta kepada
almarhum Bapak Thomas Khaturensius Suparno dan Ibu Nurhayati. Terima kasih
kepada almarhum Bapak atas kasih sayang dan nilai-nilai kehidupan yang
senantiasa menjadi kekuatan dalam setiap langkah penulis, serta kepada Ibu atas
doa, motivasi, dan dukungan untuk menyelesaikan tugas akhir ini.



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Allah SWT. puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Swt. atas segala rahmat, karunia, nikmat, kesehatan, kekuatan, serta kemudahan yang senantiasa diberikan, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Struktur Kristal dan Komposisi Unsur Katalis Heterogen dari Kulit Pisang Klutuk (*Musa balbisiana* Colla) dan Aplikasinya pada Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si.) pada Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta. Selama proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa penyelesaian penelitian dan penulisan skripsi tidak terlepas dari doa, dukungan, bimbingan, motivasi, serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Prof. Noorhaidi Hasan, M.A., M.Phil., Ph.D. selaku Rektor Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.
2. Dr. Hj. Khurul Wardati, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
3. Prof. Dr. Maya Rahmayanti, S.Si., M.Si. selaku Ketua Program Studi Kimia yang telah memberikan berbagai arahan.
4. Prof. Dr. Susy Yunita Prabawati, M. Si. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan motivasi dan arahan selama studi.
5. Sudarlin, M. Si. selaku Dosen Pembimbing Skripsi yang ikhlas dan sabar meluangkan waktunya untuk membimbing, mengarahkan dan memotivasi dalam penyusunan skripsi ini.
6. Seluruh dosen dan staf karyawan di Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta yang telah membantu sehingga penyusunan skripsi ini dapat berjalan dengan lancar.
7. Alm. Bapak Thomas Katurensius Suparno yang merupakan cinta pertama penulis, sosok Bapak yang selalu dirindukan dan menjadi alasan penulis bertahan sejauh ini. Beliau memang tidak sempat merasakan pendidikan hingga bangku perkuliahan bahkan beliau tidak sempat melihat putri

kecilnya tumbuh untuk menggapai mimpinya, namun segala cinta, ketulusan, dan berbagai pengorbanan yang telah dilakukan semasa hidupnya tetap menjadi kekuatan terbesar dalam hidup penulis. Terima kasih telah menjadi pelita dalam setiap gelap perjalanan penulis. Nama dan cinta beliau akan tetap abadi di hati dan setiap pencapaian penulis.

8. Ibu Nurhayati perempuan hebat dan luar biasa yang dengan penuh cinta serta keteguhan hati berjuang tanpa lelah demi masa depan anak-anaknya hingga meraih gelar. Terima kasih atas doa-doa yang tak pernah terputus, atas kasih yang tak pernah berkurang dan atas pengorbanan yang tak pernah terhitung nilainya. Ibu adalah rumah, kekuatan dan alasan penulis terus melangkah. Selalu baik ya Bu, karena Ibu harus ada disetiap perjalanan hidup penulis.
9. Saudari penulis, Redenta Aurora serta keponakan penulis Bilqis dan Nara, yang senantiasa memberikan kasih sayang, doa, dukungan, semangat, serta keceriaan sehingga menjadi penyemangat bagi penulis dalam menyelesaikan penyusunan skripsi ini.
10. Sahabat terbaik penulis sejak bangku SMP hingga saat ini Ivanda Charlieta Tarasari (Jepuy) yang senantiasa setia menemani, mendengarkan setiap cerita dan keluh kesah, serta memberikan doa, dukungan, motivasi, dan semangat kepada penulis dalam setiap proses yang dilalui.
11. Meylina Adilla yang dengan tulus menemani setiap proses, menguatkan di setiap keraguan, dan menjadi bagian dari perjalanan hingga skripsi ini akhirnya terselesaikan.
12. Rifani Zerlinda Putri, yang senantiasa hadir memberikan doa, semangat, dukungan, dan menjadi tempat berbagi cerita selama proses penyusunan skripsi ini.
13. Desy Ika Rachmawati dan Niken Dwi Lestari, sahabat sejak bangku SMA yang telah menemani perjalanan ini dengan doa, semangat, bantuan, dan kebersamaan yang penuh makna hingga skripsi ini dapat terselesaikan.

14. Circle Bogor, yang selalu memberikan doa, dukungan, motivasi, serta menjadi tempat berbagi cerita dan kebahagiaan sehingga penulis mampu melalui setiap proses dengan lebih baik.
15. H & M *Family*, yaitu Kak Haris, Aqza, Khilya, Alfian, dan Faik yang senantiasa sabar mendengarkan setiap keluhan kesah, memberikan doa, dukungan, motivasi, serta menemani penulis selama proses penelitian dan penyusunan skripsi ini.
16. Teman-teman satu bimbingan, Shabrina, Hela, dan Azka, yang telah berjuang bersama serta saling memberikan dukungan selama proses penelitian dan penyusunan skripsi ini.
17. Teman-teman dekat penulis selama menempuh pendidikan di Program Studi Kimia, yaitu Puspa, Dela, Hanifah, Alifia, Nabila, Fadlila, Iim, Tari, Anisa, Nanda, dan Dea, yang telah memberikan banyak kenangan, kebersamaan, dukungan, serta motivasi selama masa perkuliahan.
18. Keluarga Xenon (Kimia Angkatan 2022) yang telah memberikan kebersamaan, dukungan, motivasi, serta kenangan berharga selama perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini.
19. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu atas segala bantuan, dukungan, motivasi, dan doa yang telah diberikan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
20. Terakhir, penulis mengucapkan terima kasih kepada diri sendiri Arnodita Zenola, atas segala perjuangan, kesabaran, dan keteguhan hati dalam menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih telah bertahan melewati setiap proses, menghadapi berbagai tantangan, dan terus berusaha hingga mencapai tahap ini. Semoga pencapaian ini menjadi awal untuk terus bertumbuh, berkarya, dan menggapai impian.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan karya ilmiah ini. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat serta menjadi referensi bagi pengembangan penelitian katalis heterogen dan biodiesel.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR.....	iii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iv
HALAMAN MOTTO	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
ABSTRAK	xv
<i>ABSTRACT</i>	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Batasan Masalah	7
C. Rumusan Masalah	8
D. Tujuan Penelitian	8
E. Manfaat Penelitian	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	10
A. Tinjauan Pustaka	10
B. Landasan Teori.....	16
1. Biodiesel	16
2. Minyak Kelapa Sawit.....	19
3. Reaksi Transesterifikasi	21
4. Pisang.....	23
5. Katalis Heterogen.....	24
6. Proses Kalsinasi	25
C. Kerangka Berpikir dan Hipotesis Penelitian.....	26
BAB III METODE PENELITIAN	33
A. Waktu dan Tempat Penelitian	33

B. Alat-alat Penelitian.....	33
C. Bahan-bahan Penelitian	33
D. Prosedur Kerja Penelitian	34
1. Preparasi Bahan Baku Katalis dari Kulit Pisang Klutuk	34
2. Sintesis Katalis Heterogen melalui Proses Kalsinasi.....	34
3. Uji Kebasaan Katalis dengan Metode <i>Hammett Indicator</i> -Asam Benzoat.....	34
4. Karakterisasi dan Analisa Fase Kristal menggunakan Instrumen XRD	35
5. Karakterisasi dan Analisa Gugus Fungsi Menggunakan Instrumen FTIR	36
6. Karakterisasi dan Analisa Komposisi Unsur Menggunakan Instrumen XRF ..	36
7. Sintesis Biodiesel melalui Reaksi Transesterifikasi.....	37
8. Pemurnian Biodiesel	37
9. Analisis Rendemen Biodiesel	37
10. Penentuan dan Analisa Komponen Biodiesel dengan GC-MS.....	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
A. Preparasi Kulit Pisang Klutuk.....	39
B. Sintesis Katalis Heterogen Kulit Pisang Klutuk	40
C. Karakterisasi Fase Kristal Katalis Heterogen Kulit Pisang Klutuk berdasarkan Difraktogram <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	44
D. Karakterisasi Gugus Fungsi Katalis Heterogen Kulit Pisang Klutuk Menggunakan Instrumen <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR).....	46
E. Karakterisasi Komposisi Katalis Heterogen Kulit Pisang Klutuk Menggunakan Instrumen <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF).....	49
F. Sintesis Biodiesel dari Minyak Kelapa Sawit dengan Katalis Heterogen Kulit Pisang Klutuk.....	52
G. Analisa Rendemen Biodiesel	57
H. Analisa Biodiesel dengan GC-MS	58
BAB V KESIMPULAN	63
A. Kesimpulan	63
B. Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	65
LAMPIRAN.....	70
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Diagram Proses Pembuatan Biodiesel	17
Gambar 2. 2 Reaksi Transesterifikasi	21
Gambar 2. 3 Mekanisme Reaksi Transesterifikasi Menggunakan Katalis K_2O ...	22
Gambar 2. 4 Hasil Kalsinasi dari K_2CO_3	26
Gambar 4. 1 Serbuk Kulit Pisang Klutuk Ukuran 100 mesh	40
Gambar 4. 2 Katalis Heterogen dari Kulit Pisang Klutuk.....	41
Gambar 4. 3 Perubahan Warna Campuran Setelah Ditambahkan Indikator PP ..	43
Gambar 4. 4 Difraktogram XRD Katalis Heterogen Kulit Pisang Klutuk.....	44
Gambar 4. 5 Spektrum FTIR Katalis Heterogen Kulit Pisang Klutuk.....	47
Gambar 4. 6 Tiga Lapisan Pada Biodiesel	56
Gambar 4. 7 Kromatogram Biodiesel	58
Gambar 4. 8 Spektrum Massa Puncak Kesebelas Biodiesel	59
Gambar 4. 9 Spektrum Massa Puncak Kesembilan Biodiesel	60

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Standar Mutu Biodiesel SNI 7182:2015	18
Tabel 2. 2 Analisis Komposisi Asam Lemak Dalam Biodiesel	20
Tabel 2. 3 Sifat Fisik Minyak Kelapa Sawit	20
Tabel 4. 1 Hasil Uji XRF Komposisi Katalis Heterogen Kulit Pisang Klutuk	50
Tabel 4. 2 Komposisi senyawa metil ester pada biodiesel	59



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan.....	70
Lampiran 2. Dokumentasi.....	72
Lampiran 3. Data Penelitian Menggunakan Instrument	73



ABSTRAK

Kulit pisang klutuk (*Musa balbisiana* Colla) merupakan limbah biomassa yang mengandung mineral berpotensi membentuk oksida logam sebagai katalis melalui proses kalsinasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis struktur kristal, gugus fungsi, dan komposisi unsur katalis oksida logam hasil kalsinasi kulit pisang klutuk serta mengkaji aplikasinya pada reaksi transesterifikasi minyak kelapa sawit. Katalis disintesis melalui proses kalsinasi pada suhu 750°C selama 3 jam, kemudian dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), *X-Ray Fluorescence* (XRF), dan diuji sifat kebasaannya menggunakan metode *Hammett Indicator*-Asam Benzoat. Biodiesel yang dihasilkan dianalisis berdasarkan rendemen dan komposisi senyawa menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS). Hasil karakterisasi XRD menunjukkan puncak difraksi dominan K₂O pada sudut 2 θ sebesar 25,44°; 29,72°; 31,62°; 33,29°; dan 40,58°, serta teridentifikasi fase CaO, MgO, dan SiO₂. Analisis XRF menunjukkan K₂O sebagai komponen dominan sebesar 50,88%, sedangkan hasil FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus karbonat dan ikatan logam-oksigen seperti K-O, Na-O, dan Ca-O. Katalis memiliki total *basicity* sebesar 1,09 mmol/g. Rendemen biodiesel sebesar 86,68% dan total kandungan *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) sebesar 99,16% yang didominasi oleh metil oleat (60,83%) dan metil stearat (31,00%). Hasil penelitian menunjukkan bahwa katalis heterogen berbasis kulit pisang klutuk berhasil digunakan sebagai katalis basa pada reaksi transesterifikasi minyak kelapa sawit.

Kata Kunci: biodiesel; kulit pisang klutuk; katalis heterogen; transesterifikasi

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

ABSTRACT

Klutuk banana peel (Musa balbisiana Colla) is a biomass waste that contains minerals with the potential to form metal oxides as catalysts through the calcination process. This study aims to analyze the crystal structure, functional groups, and elemental composition of the metal oxide catalyst produced by calcining klutuk banana peels, as well as to examine its application in the transesterification reaction of palm oil. The catalyst was synthesized through a calcination process at 750°C for 3 hours, then characterized using X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-ray Fluorescence (XRF), and tested for basicity using the Hammett Indicator-Benzoic Acid Benzoate method. The resulting biodiesel was analyzed for yield and compound composition using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). The XRD characterization results showed dominant K₂O diffraction peaks at 2θ angles of 25.44°, 29.72°, 31.62°, 33.29°, and 40.58°, as well as the identification of CaO, MgO, and SiO₂ phases. XRF analysis showed K₂O as the dominant component at 50.88%, while FTIR results confirmed the presence of carbonate groups and metal-oxygen bonds such as K-O, Na-O, and Ca-O. The catalyst has a total basicity of 1.09 mmol/g. The biodiesel yield was 86.68%, and the total Fatty Acid Methyl Ester (FAME) content was 99.16%, dominated by methyl oleate (60.83%) and methyl stearate (31.00%). The results of this study indicate that the heterogeneous catalyst derived from klutuk banana peels can be successfully used as a basic catalyst in the transesterification of palm oil.

Keywords: *biodiesel; klutuk banana peels; heterogeneous catalyst; transesterification*

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Di tengah meningkatnya kebutuhan energi terbarukan, pengembangan biodiesel sebagai alternatif bahan bakar berbasis nabati semakin mendapat perhatian (Jazuli & Wibowo, 2020). Salah satu metode untuk menghasilkan biodiesel adalah melalui proses transesterifikasi minyak nabati, yang mengubah trigliserida menjadi biodiesel dengan bantuan katalis. Katalis memegang peranan penting dalam menentukan efisiensi reaksi dan kemudahan konversi produk akhir. Oleh karena itu, pemilihan katalis yang tepat menjadi sangat penting dalam proses transesterifikasi. Katalis yang efektif dapat meningkatkan laju reaksi, mengurangi energi aktivasi, serta meminimalkan pembentukan produk samping yang tidak diinginkan (Syafitri, 2024).

Katalis yang sering digunakan dalam produksi biodiesel konvensional umumnya berupa katalis homogen, baik dalam bentuk asam seperti asam sulfat (H_2SO_4) maupun basa seperti natrium hidroksida (NaOH). Katalis homogen ini berada dalam fase yang sama dengan reaktan, sehingga memungkinkan reaksi transesterifikasi berlangsung dengan efisiensi yang tinggi. Meskipun efektif, pendekatan ini memiliki beberapa kelemahan termasuk sensitivitas terhadap kandungan *free fatty acid* (FFA) yang tinggi, pembentukan sabun dan kesulitan dalam analisis produk serta dapat menimbulkan limbah alkali (Mandari & Devarai, 2022). Untuk mengatasi masalah ini, penelitian telah beralih ke pengembangan katalis padat heterogen. Katalis ini berada dalam fase yang berbeda dari reaktan, sehingga memungkinkan pemisahan yang lebih mudah setelah reaksi selesai. Katalis heterogen menawarkan beberapa keunggulan

dibandingkan katalis homogen, termasuk kemudahan fleksibilitas, kemampuan untuk digunakan kembali dan pengurangan korosi. Katalis heterogen dapat diproduksi dari berbagai bahan, termasuk oksida logam, zeolit dan bahan berbasis biomassa (Yaghi *et al.*, 2025). Penggunaan bahan berbasis biomassa sebagai katalis heterogen semakin menarik karena sifatnya yang ramah lingkungan dan biaya yang rendah. Katalis heterogen berbasis biomassa dapat mengurangi biaya produksi biodiesel karena materialnya mudah didapat dan murah (Mandari & Devarai, 2022).

Salah satu contoh biomassa yang menjanjikan sebagai katalis heterogen adalah kulit pisang. Meskipun sering dianggap limbah, kulit pisang mengandung senyawa kaya kalsium, kalium, dan magnesium yang dapat diubah menjadi oksida logam seperti kalsium oksida (CaO) dan kalium oksida (K_2O). Penggunaan kulit pisang sebagai katalis heterogen dalam proses transesterifikasi biodiesel menarik perhatian karena ketersediaannya yang melimpah dan potensi ekonomis yang tinggi. Penelitian oleh Fan *et al.* (2019) menunjukkan bahwa sintesis katalis K_2O - KCl melalui kalsinasi kulit pisang menghasilkan aktivitas katalitik signifikan dan kestabilan yang baik. Dalam penelitian tersebut, transesterifikasi dilakukan menggunakan minyak kedelai dengan rasio molar metanol terhadap minyak 15:1 pada suhu 65°C selama 1 jam yang menghasilkan rendemen biodiesel mencapai 95,1% dalam kondisi optimal. Temuan ini menegaskan potensi kulit pisang sebagai sumber katalis yang efisien dan ramah lingkungan.

Studi lain oleh Ashok *et al.* (2024) melaporkan hasil transesterifikasi minyak goreng bekas menggunakan kulit pisang Nendran yang telah dikalsinasi sebagai katalis menunjukkan konversi biodiesel yang mencapai 72,25%. Reaksi dilakukan dengan

menggunakan perbandingan molar minyak goreng bekas terhadap metanol sebesar 2:1 dan penambahan katalis sebanyak 0,7 gram. Reaksi berlangsung dalam dalam *ultrasonic bath* pada suhu 65°C selama 25 menit. Selain itu, karakterisasi katalis dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), dan *X-ray Diffraction* (XRD). Hasil SEM menunjukkan bahwa permukaan katalis memiliki morfologi yang tidak beraturan dan berpori akibat proses kalsinasi. Analisis FTIR mengidentifikasi pita serapan yang berkaitan dengan gugus logam-oksigen dan karbonat, sedangkan pola difraksi XRD menunjukkan keberadaan fase kristalin yang didominasi oleh senyawa kalium terutama K_2O dan K_2CO_3 yang berperan sebagai situs basa aktif dalam reaksi transesterifikasi (Ashok *et al.*, 2024). Hasil ini menunjukkan bahwa kulit pisang nendran dapat berfungsi sebagai alternatif yang efisien dan ramah lingkungan dalam produksi biodiesel, memberikan wawasan penting untuk penelitian lebih lanjut tentang pemanfaatan limbah pertanian dalam konversi energi terbarukan.

Meskipun demikian, penelitian lebih lanjut masih diperlukan karena setiap varietas pisang memiliki komposisi kimia dan kandungan mineral berbeda yang berpengaruh pada pembentukan situs aktif katalis. Berdasarkan hasil penelitian Deka & Talukdar (2007) kulit pisang klutuk (*Musa balbisiana* Colla) mengandung mineral alkali yang cukup tinggi, meliputi karbonat (CO_3^{2-}) sebesar 161,40 g/kg, klorida (Cl^-) sebesar 6,62 g/kg, kalium (K^+) sebesar 233,60 g/kg dan natrium (Na^+) sebesar 2,00 g/kg. Kandungan mineral tersebut berpotensi menghasilkan oksida logam basa yang berbeda dalam struktur kristal maupun distribusi situs aktif setelah proses kalsinasi, sehingga dapat memengaruhi aktivitas dan kestabilan katalis secara signifikan.

Untuk menentukan sifat fisik katalis dari kulit pisang klutuk yang berperan dalam proses transesterifikasi, maka diperlukan metode karakterisasi yang mampu memberikan informasi terkait struktur kristal dan komposisi unsur. Analisis XRD diterapkan untuk mengidentifikasi struktur kristal yang terbentuk setelah kalsinasi katalis berbasis kulit pisang klutuk. Berdasarkan penelitian Tarigan *et al.* (2023) abu kulit pisang yang dikalsinasi menghasilkan spektrum XRD untuk mengidentifikasi keberadaan oksida seperti K_2O serta senyawa basa lainnya sebagai fase dominan. Dengan mengetahui struktur atau fase kristal yang terbentuk, peneliti dapat menilai kestabilan struktur, dan memungkinkan prediksi tentang sebaran situs aktif katalis misalnya ion K^+ atau Ca^{2+} yang sangat penting dalam reaksi transesterifikasi. Struktur kristal yang jelas atau difraksi puncak tajam menunjukkan material yang tersintesis dengan baik, sementara puncak lebar atau rendah intensitas mungkin mengindikasikan adanya fase amorf atau partikel sangat kecil dimana kondisi ini dapat mempengaruhi aktivitas katalis. Oleh karena itu, XRD menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa katalis heterogen dari kulit pisang klutuk telah menghasilkan oksida yang diharapkan dan bebas dari fasa tidak diinginkan yang dapat menghambat aktivitas katalitik.

Selain itu, karakterisasi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) juga diperlukan untuk mengkaji gugus fungsi dan jenis ikatan kimia yang terdapat pada katalis hasil kalsinasi. Teknik ini mampu memberikan informasi mengenai keberadaan gugus hidroksil ($-OH$), gugus karbonat (CO_3^{2-}), ikatan logam-oksigen dan sisa senyawa organik yang masih terdapat pada permukaan material. Menurut Daimary *et al.*, (2022) FTIR dapat digunakan untuk mengidentifikasi

gugus fungsi dan perubahan struktur kimia pada katalis berbasis kulit pisang setelah proses kalsinasi. Informasi tersebut penting untuk mengevaluasi perubahan kimia yang terjadi selama proses kalsinasi sekaligus mengonfirmasi terbentuknya senyawa aktif pada permukaan katalis. Analisis FTIR juga dapat memberikan gambaran mengenai keberadaan situs basa aktif melalui karakteristik vibrasi gugus fungsi yang terdeteksi pada spektrum inframerah (Aziz *et al.*, 2020). Identifikasi situs basa aktif tersebut penting untuk memperkirakan keberhasilan pembentukan permukaan katalis, memahami interaksi antara katalis dan reaktan selama proses transesterifikasi serta mendeteksi kemungkinan adanya produk samping yang dapat memengaruhi kinerja katalis. Oleh karena itu, karakterisasi FTIR berperan sebagai pelengkap analisis XRD dalam memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai karakteristik struktur dan sifat kimia katalis yang dihasilkan.

Untuk melengkapi informasi mengenai karakteristik katalis yang diperoleh dari analisis XRD dan FTIR, karakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dilakukan guna menentukan komposisi unsur penyusun material secara kualitatif maupun kuantitatif. Metode ini berfungsi untuk mengidentifikasi dan mengukur kandungan unsur logam utama seperti kalium (K), kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) yang berperan sebagai situs basa aktif dalam reaksi transesterifikasi. Melalui XRF, dapat diketahui sejauh mana proses kalsinasi dan aktivasi mampu meningkatkan kadar oksida logam seperti K_2O , CaO dan MgO yang menentukan aktivitas katalitik material. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Yuliyati *et al.* (2020) yang menunjukkan bahwa hasil uji XRF pada katalis CaO/SiO_2 memberikan kadar CaO sebesar 97,8% dan SiO_2 sebesar 86,3%, yang menandakan bahwa proses pemurnian dan pembentukan katalis

dapat berjalan efektif serta menghasilkan material dengan kandungan oksida logam dominan.

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah minyak kelapa sawit yang dikenal sebagai salah satu sumber utama biodiesel di Indonesia karena produktivitasnya yang tinggi (Farobie & Hartulistiyoso, 2022). Kandungan trigliserida yang tinggi dalam minyak kelapa sawit juga sangat mendukung terhadap konversi menjadi biodiesel melalui proses transesterifikasi (Siaw *et al.*, 2023). Oleh karena itu, pemilihan minyak kelapa sawit memungkinkan pengujian kinerja katalis secara lebih realistis serta memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai hubungan antara struktur kristal, komposisi unsur, dan efektivitas katalis dalam mengonversi trigliserida menjadi metil ester.

Melihat pentingnya pengembangan energi terbarukan dan besarnya potensi limbah kulit pisang sebagai sumber bahan katalis, penelitian ini difokuskan pada pembuatan katalis heterogen berbasis kulit pisang klutuk dengan menekankan analisis struktur kristal, gugus fungsi, dan komposisi unsur melalui karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), dan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Pendekatan ini dilakukan untuk memperoleh pemahaman mendalam mengenai keterkaitan antara fase kristalin, komposisi logam oksida, dan aktivitas katalitik yang dihasilkan. Melalui karakterisasi tersebut, diharapkan dapat diperoleh data eksperimental yang komprehensif guna mendukung pengembangan katalis berbasis biomassa yang efisien dan berkelanjutan dalam proses transesterifikasi minyak kelapa sawit. Urgensi penelitian ini terletak pada perlunya pengembangan katalis heterogen yang efisien, ramah lingkungan dan berasal dari sumber daya

terbarukan untuk mendukung produksi biodiesel yang berkelanjutan. Pemanfaatan limbah biomassa, seperti kulit pisang klutuk, sebagai bahan baku katalis tidak hanya berpotensi meningkatkan nilai guna limbah pertanian, tetapi juga menjadi alternatif dalam mengatasi berbagai keterbatasan penggunaan katalis homogen pada proses transesterifikasi.

B. Batasan Masalah

Untuk membatasi ruang lingkup permasalahan yang akan dibahas, maka dalam penelitian ini penulis menekankan:

1. Penelitian ini menggunakan kulit pisang yang spesifik yaitu kulit pisang klutuk sebagai bahan baku pembuatan katalis heterogen dan minyak kelapa sawit sebagai bahan baku biodiesel.
2. Karakterisasi katalis difokuskan pada analisis struktur atau fase kristal menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), analisis gugus fungsi dan ikatan kimia menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dan analisis komposisi unsur menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF).
3. Penelitian ini difokuskan pada produksi biodiesel melalui reaksi transesterifikasi menggunakan alkohol metanol sebagai agen metilasi, mengingat metanol memiliki reaktivitas tinggi, harga relatif murah, dan kompatibilitas yang baik dengan katalis heterogen.
4. Evaluasi biodiesel dilakukan dengan pengukuran rendemen dan identifikasi senyawa hasil reaksi menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) untuk memastikan terbentuknya metil ester sebagai komponen utama biodiesel.

5. Penelitian ini tidak mencakup karakterisasi morfologi permukaan (SEM), luas permukaan (BET), dan pengujian sifat fisika-kimia biodiesel lainnya secara menyeluruh karena dilakukan oleh rekan peneliti dalam tim kolaboratif.

C. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian, maka dapat dirumuskan rumusan masalah pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana sintesis dan sifat kebasaaan katalis heterogen berbasis kulit pisang klutuk yang dihasilkan melalui proses kalsinasi pada suhu 750°C ?
2. Bagaimana karakteristik fisik katalis heterogen berbasis kulit pisang klutuk yang meliputi struktur kristal, gugus fungsi, dan komposisi unsur berdasarkan hasil karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), dan *X-Ray Fluorescence* (XRF)?
3. Bagaimana rendemen dan jenis senyawa metil ester yang terbentuk dari hasil reaksi transesterifikasi minyak kelapa sawit menggunakan katalis berbasis kulit pisang klutuk?

D. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan penelitian ini sebagai berikut:

1. Menyintesis katalis heterogen berbasis kulit pisang klutuk melalui proses kalsinasi pada suhu 750°C dan menentukan sifat kebasaaannya menggunakan metode *Hammett indicator*-asam benzoat.
2. Mengkarakterisasi struktur kristal, gugus fungsi dan komposisi unsur spesifik katalis heterogen berbasis kulit pisang klutuk menggunakan *X-Ray Diffraction*

(XRD), *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), dan *X-Ray Fluorescence* (XRF).

3. Menentukan rendemen dan mengidentifikasi senyawa metil ester yang terbentuk dari hasil reaksi transesterifikasi minyak kelapa sawit menggunakan katalis berbasis kulit pisang klutuk berdasarkan data GCMS.

E. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan data eksperimental terkait potensi kulit pisang klutuk sebagai bahan baku katalis heterogen melalui proses kalsinasi.
2. Menyediakan informasi ilmiah mengenai karakteristik fisik katalis berbasis kulit pisang klutuk, khususnya struktur kristal, gugus fungsi dan komposisi unsur spesifik yang dianalisis menggunakan XRD, FTIR, dan XRF.
3. Menegaskan pentingnya metode karakterisasi XRD, FTIR, dan XRF dalam memahami hubungan sifat fisik katalis dengan efisiensinya pada reaksi transesterifikasi biodiesel.
4. Membuktikan kemampuan katalis berbasis limbah kulit pisang klutuk dalam mengonversi minyak kelapa sawit menjadi biodiesel, yang diverifikasi melalui pengukuran rendemen dan analisis GC-MS.
5. Mendorong pemanfaatan limbah pertanian lokal sebagai sumber daya alternatif untuk pengembangan energi terbarukan yang lebih berkelanjutan.
6. Mendukung kerja kolaboratif lintas bidang dalam pengembangan biodiesel berkelanjutan melalui pendekatan eksperimental yang efisien dan aplikatif.

BAB V

KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai analisis struktur kristal dan komposisi unsur katalis heterogen dari kulit pisang klutuk (*Musa balbisiana* Colla) serta aplikasinya pada transesterifikasi minyak kelapa sawit, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Katalis heterogen berbasis kulit pisang klutuk (*Musa balbisiana* Colla) berhasil disintesis melalui kalsinasi pada suhu 750 °C selama 3 jam dan memiliki sifat basa dengan kekuatan basa $H > 9,3$ serta total kebasaan sebesar 1,09 mmol/g, sehingga berpotensi digunakan sebagai katalis basa heterogen pada reaksi transesterifikasi.
2. Karakterisasi katalis menunjukkan adanya fase K_2O , CaO , MgO , dan SiO_2 berdasarkan XRD, gugus karbonat dan ikatan logam–oksigen berdasarkan FTIR, serta K_2O sebagai komponen dominan sebesar 50,88% berdasarkan XRF, diikuti CaO 10,12%, SiO_2 3,67%, dan MgO 1,50%.
3. Penggunaan katalis pada transesterifikasi minyak kelapa sawit menghasilkan biodiesel dengan rendemen 86,68% dan total metil ester sebesar 99,16%, yang didominasi oleh metil oleat sebesar 60,83% dan metil stearat sebesar 31,00% berdasarkan analisis GC-MS. Hasil tersebut menunjukkan bahwa katalis heterogen berbasis kulit pisang klutuk efektif digunakan.

B. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk penelitian selanjutnya, yaitu perlu dilakukan optimasi kondisi reaksi transesterifikasi, seperti variasi rasio molar metanol terhadap minyak kelapa sawit, konsentrasi katalis, suhu, dan waktu reaksi untuk memperoleh kondisi optimum dalam menghasilkan biodiesel dengan rendemen dan kandungan *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) yang lebih tinggi. Selain itu, perlu dilakukan pengujian stabilitas dan penggunaan ulang (*reusability*) katalis heterogen berbasis kulit pisang klutuk untuk mengetahui ketahanan aktivitas katalis setelah digunakan pada beberapa siklus reaksi. Penelitian selanjutnya juga disarankan melakukan karakterisasi yang lebih komprehensif seperti *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) sehingga hubungan antara morfologi, luas permukaan, dan aktivitas katalitik dapat dijelaskan secara lebih mendalam. Selain itu, perlu dilakukan pengujian sifat fisika dan kimia biodiesel berdasarkan SNI 7182:2015, seperti densitas, viskositas, angka asam, kadar air, titik nyala, dan kadar gliserol, sehingga kualitas biodiesel yang dihasilkan dapat dievaluasi secara lebih menyeluruh.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Esawi, N., Al Qubeissi, M., & Kolodnytska, R. (2019). The Impact of Biodiesel Fuel on Ethanol/Diesel Blends. *Energies*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/en12091804>
- Ashok, C., Sankarajan, E., Kumar, P. S., Janani, G., Suresh, A. R., Muthuvelu, K. S., & Rangasamy, G. (2024). Ultrasound-assisted transesterification of waste cooking oil to biodiesel utilizing banana peel derived heterogeneous catalyst. *Biotechnology for Sustainable Materials*, 1(1). <https://doi.org/10.1186/s44316-024-00004-z>
- Aziz, M. A. A., Jalil, A. A., Wongsakulphasatch, S., & Vo, D. V. N. (2020). Understanding the role of surface basic sites of catalysts in CO₂ activation in dry reforming of methane: A short review. *Catalysis Science and Technology*, 10(1), 35–45. <https://doi.org/10.1039/c9cy01519a>
- Badilli, B. N., Bulut Kocabas, B., Attar, A., Aktas, E., & Altikatoglu Yapaoz, M. (2026). Sustainable synthesis of MgO nanoparticles from *Persea americana* for cultivar dependent nanostructure, environmental remediation and bioactivity supported by molecular docking. *Scientific Reports*, 16(1), 1–20. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-44077-4>
- Betiku, E., & Ajala, S. O. (2014). Modeling and optimization of *Thevetia peruviana* (yellow oleander) oil biodiesel synthesis via *Musa paradisiacal* (plantain) peels as heterogeneous base catalyst: A case of artificial neural network vs. response surface methodology. *Industrial Crops and Products*, 53, 314–322. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.12.046>
- Bustaman, S. (2009). Strategi pengembangan industri biodiesel berbasis kelapa di Maluku. *Jurnal Litbang Pertanian*, 28(2), 46–53.
- Daimary, N., Boruah, P., Eldiehy, K. S. H., Pegu, T., Bardhan, P., Bora, U., Mandal, M., & Deka, D. (2022). *Musa acuminata* peel: A bioresource for bio-oil and by-product utilization as a sustainable source of renewable green catalyst for biodiesel production. *Renewable Energy*, 187, 450–462. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.054>
- Daryono, E. D., Prasetyo, A. P., Bahri, S., & Sista, E. M. (2020). Produksi biodiesel tanpa gliserol dari minyak kelapa sawit dengan variasi massa co-solvent dan waktu reaksi. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 9(2), 51–56.
- Deka, D. C., & Talukdar, N. N. (2007). Chemical and spectroscopic investigation of Kolakhar and its commercial importance. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 6(1), 72–78.
- Devita, L. (2015). *BIODIESEL SEBAGAI BIOENERGI ALTERNATIF DAN PROSPEKTIF*.
- Ding, J., He, B., & Li, J. (2011). Biodiesel production from acidified oils via supercritical methanol. *Energies*, 4(12), 2212–2223. <https://doi.org/10.3390/en4122212>
- Enggawati, E. R., & Ediati, R. (2013). Pemanfaatan kulit telur ayam dan abu layang batubara sebagai katalis heterogen untuk reaksi transesterifikasi minyak Nyamplung (*Calophyllum Inophyllum* Linn). *Jurnal Sains Dan Seni Pomits*, 2(1), 1–6.

- Fan, M., Wu, H., Shi, M., Zhang, P., & Jiang, P. (2019). Well-dispersive K₂O–KCl alkaline catalyst derived from waste banana peel for biodiesel synthesis. *Green Energy and Environment*, 4(3), 322–327. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2018.09.004>
- Farobie, O., & Hartulistiyoso, E. (2022). Palm Oil Biodiesel as a Renewable Energy Resource in Indonesia: Current Status and Challenges. *BioEnergy Research*, 15(1), 93–111. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10344-7>
- Faruque, M. O., Razzak, S. A., & Hossain, M. M. (2020). Application of heterogeneous catalysts for biodiesel production from microalgal oil—a review. In *Catalysts* (Vol. 10, Issue 9, pp. 1–25). MDPI. <https://doi.org/10.3390/catal10091025>
- Foroutan, R., Peighambardoust, S. J., Mohammadi, R., Peighambardoust, S. H., & Ramavandi, B. (2022). Generation of biodiesel from edible waste oil using ZIF-67-KOH modified *Luffa cylindrica* biomass catalyst. *Fuel*, 322, 124181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124181>
- Gede Putu Pratama Mahendra Putra, I., & Iskandar, N. (2023). PENGARUH PERSENTASE BINDER BENTONIT TERHADAP DENSITAS PELET KATALIS ZEOLIT ALAM. In *Jurnal Teknik Mesin S-1* (Vol. 11, Issue 1).
- Hidayati, N., Ariyanto, T. S., & Septiawan, H. (2017). TRANSESTERIFIKASI MINYAK GORENG BEKAS MENJADI BIODIESEL DENGAN KATALIS KALSIUM OKSIDA. *Jurnal Teknologi Bahan Alam*, 1(1).
- Istadi, I., Prasetyo, S. A., & Nugroho, T. S. (2015). Characterization of K₂O/CaO–ZnO Catalyst for Transesterification of Soybean Oil to Biodiesel. *Procedia Environmental Sciences*, 23, 394–399. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.01.056>
- Janajreh, I., Elsamad, T., Aljaberi, A., & Diouri, M. (2015). Transesterification of Waste Cooking Oil: Kinetic Study and Reactive Flow Analysis. *Energy Procedia*, 75, 547–553. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.451>
- Jannah, R. (2008). Reaksi Transesterifikasi Trigliserida Minyak Jarak Pagar dengan Metanol menggunakan Katalis Padatan Basa K₂CO₃/y-Al₂O₃. *Depok: Universitas Indonesia*.
- Jaya, D., Widayati, T. W., Salsabiela, H., & Majid, M. F. A. (2021). Pembuatan Biodiesel dari Minyak Jelantah Menggunakan Katalis Heterogen. *Jurnal Eksegi*, 19(1), 29–34.
- Jazuli, M., & Wibowo, A. A. (2020). BIODIESEL SEBAGAI SUMBER ENERGI TERBARUKAN: PROSES DAN TEKNOLOGI TERKINI. 2020(2), 445–450. <http://distilat.polinema.ac.id>
- Kadapure, S. A., Kirti, P., Singh, S., Kokatnur, S., Hiremath, N., Variar, A., Shaikh, S., & Chittaragi, R. (2018). Studies on process optimization of biodiesel production from waste cooking and palm oil. *International Journal of Sustainable Engineering*, 11(3), 167–172. <https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1420107>
- Kansedo, J., Lee, K. T., & Bhatia, S. (2009). Biodiesel production from palm oil via heterogeneous transesterification. *Biomass and Bioenergy*, 33(2), 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.05.011>
- Kim, Y.-K., Lifang, H., Park, J.-I., Miyawaki, J., Mochida, I., & Yoon, S.-H.

- (2011). Catalytic activity and activation mechanism of potassium carbonate supported on perovskite oxide for coal char combustion. *Fuel*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.017>
- Kusumawardani, C. (2022). THE CALCINATION EFFECT ON THE CRYSTALLINITY, NITROGEN CONTENT, AND PORE STRUCTURE OF NITROGEN-DOPED TITANIUM DIOXIDE. In *J. Sains Dasar* (Vol. 2022, Issue 2).
- Lee, A. F., Bennett, J. A., Manayil, J. C., & Wilson, K. (2014). Heterogeneous catalysis for sustainable biodiesel production via esterification and transesterification. *Chemical Society Reviews*, 43(22), 7887–7916. <https://doi.org/10.1039/c4cs00189c>
- 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://econpapers.repec.org/RePEc:eee:appene:v:87:y:2010:i:4:p:1083-1095>
- Man, L. F., Kwong, T. L., Wong, W. T., & Yung, K. F. (2021). Mesoporous Zn/MgO hexagonal nano-plates as a catalyst for camelina oil biodiesel synthesis. *Nanomaterials*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/nano11102690>
- Mancini, A., Imperlini, E., Nigro, E., Montagnese, C., Daniele, A., Orrù, S., & Buono, P. (2015). Biological and nutritional properties of palm oil and palmitic acid: Effects on health. In *Molecules* (Vol. 20, Issue 9, pp. 17339–17361). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules200917339>
- Mandari, V., & Devarai, S. K. (2022). Biodiesel Production Using Homogeneous, Heterogeneous, and Enzyme Catalysts via Transesterification and Esterification Reactions: a Critical Review. In *Bioenergy Research* (Vol. 15, Issue 2, pp. 935–961). Springer. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10333-w>
- Maulidiyah, Nurdin, M., Fatma, F., Natsir, M., & Wibowo, D. (2017). Characterization of methyl ester compound of biodiesel from industrial liquid waste of crude palm oil processing. *Analytical Chemistry Research*, 12, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ancr.2017.01.002>
- Meriatna, Husin, H., Riza, M., Faisal, M., Ahmadi, & Sulastrri. (2023). Biodiesel production using waste banana peel as renewable base catalyst. *Materials Today: Proceedings*, 87, 214–217. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.400>
- Mutia Anggraini, T., Fitriani, N., Kunci, K., & Tahu, A. (2018). LIMBAH AMPAS TAHU SEBAGAI BAHAN BAKU UNTUK PRODUKSI BIODIESEL. In *Jurnal Integrasi Proses* (Vol. 7, Issue 1). <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jip>
- Nwakodo, C. S., Udensi, E. A., & Chukwu, M. (2020). Effect of Processing Methods and Storage Time on Physical Characteristics of Palm Oil. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3517478>
- Panpraneecharoen, S., Punsuvon, V., & Puemchalad, C. (2015). Comparison of homogeneous and heterogeneous catalysts in biodiesel production from Pongamia pinnata oil. *Asian Journal of Chemistry*, 27(3), 1023–1027. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2015.18023>
- Pathak, G., Das, D., Rajkumari, K., & Rokhum, L. (2018). Exploiting waste:

- Towards a sustainable production of biodiesel using: *Musa acuminata* peel ash as a heterogeneous catalyst. *Green Chemistry*, 20(10), 2365–2373. <https://doi.org/10.1039/c8gc00071a>
- Peranginangin, S., Sembiring, H. B., Nainggolan, Y. V. M., Sihotang, N. S., & Wijoyo, H. (2024). Fatty acid methyl ester (FAME) production from sludge solid waste as K₂O/SiO₂ catalyst. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10(July), 100933. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2024.100933>
- Piker, A., Tabah, B., Perkasa, N., & Gedanken, A. (2016). A green and low-cost room temperature biodiesel production method from waste oil using egg shells as catalyst. *Fuel*, 182, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.05.078>
- Prasetyo, J. (2018). STUDI PEMANFAATAN MINYAK JELANTAH SEBAGAI BAHAN BAKU PEMBUATAN BIODIESEL Studi On The Utilization of Used Oil As Raw Material For Biodiesel. In *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia UNPAM* (Vol. 2, Issue 2).
- Santoso, A., Kusumah, T. N., Sumari, S., Wijaya, A. R., Retnosari, R., Rachman, I. B., Marfuah, S., & Asrori, M. R. (2022). Synthesis of biodiesel from waste cooking oil using heterogeneous catalyst of Na₂O/γ-Al₂O₃ assisted by ultrasonic wave. *AIMS Energy*, 10(5), 1059–1073. <https://doi.org/10.3934/energy.2022049>
- Sari, S. P., Tambunan, A. H., & EkoNugroho, L. P. (2016). Penggunaan pengaduk statik untuk pengurangan kebutuhan katalis dalam produksi biodiesel. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 26(3).
- Satapathy, A., Saikia, K., & Rokhum, S. L. (2023). Biodiesel Production Using a Banana Peel Extract-Mediated Highly Basic Heterogeneous Nanocatalyst. *Sustainability (Switzerland)*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/su151411332>
- Siaw, W. C., Tan, L. S., Kiew, P. L., Tsuji, T., & Murshid, G. (2023). Synthesis of Biodiesel from Palm Oil Using a Hybrid Mechanical Stirring and High Frequency Ultrasonic-Assisted Enzyme-Catalysed Process. *Chemical Engineering Transactions*, 106, 1057–1062. <https://doi.org/10.3303/CET23106177>
- Soares Dias, A. P., Pedra, I., Salvador, É., Rijo, B., Costa Pereira, M. F., Serralha, F., & Nogueira, I. (2024). Biodiesel Production over Banana Peel Biochar as a Sustainable Catalyst. *Catalysts*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/catal14040266>
- Suharto, T. E. (2022). *KATALISIS DALAM INDUSTRI KIMIA*.
- Sujadi, S., Hasibuan, H., Rahmadi, H., & Purba, A. (2016). KOMPOSISI ASAM LEMAK DAN BILANGAN IOD MINYAK DARI SEMBILAN VARIETAS KELAPA SAWIT DxP KOMERSIAL DI PPKS. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*, 24, 1–11. <https://doi.org/10.22302/iopri.jur.jpks.v24i1.1>
- Syafitri, N. (2024). Transesterifikasi In situ Produksi Biodiesel Dengan Variasi Massa Bahan Baku Terhadap Karakteristik Biodiesel. *Jurnal Integritas Proses Dan Lingkungan*, 1(2), 66–72.
- Tan, Y. H., Abdullah, M. O., & Nolasco Hipolito, C. (2016). Comparison of Biodiesel Production between Homogeneous and Heterogeneous Base

- Catalysts. *Applied Mechanics and Materials*, 833, 71–77. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.833.71>
- Tarigan, J. B., Perangin-Angin, S., Simanungkalit, S. R., Zega, N. P., & Sitepu, E. K. (2023). Utilization of waste banana peels as heterogeneous catalysts in room-temperature biodiesel production using a homogenizer. *RSC Advances*, 13(9), 6217–6224. <https://doi.org/10.1039/d3ra00016h>
- Verma, S., Sahu, D., & Almutairi, B. O. (2024). Production and characterization of biodiesel fuel produced from third-generation feedstock. *Frontiers in Materials*, 11, 1454120.
- Wang, K., & Xu, S. (2024). Preparation of High Specific Surface Area Activated Carbon from Petroleum Coke by KOH Activation in a Rotary Kiln. *Processes*, 12(2), 1–12. <https://doi.org/10.3390/pr12020241>
- Yaghi, M., Chidiac, S., Awad, S., El Rayess, Y., & Zgheib, N. (2025). An Overview of Biodiesel Production via Heterogeneous Catalysts: Synthesis, Current Advances, and Challenges. *Clean Technologies*, 7(3), 62. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7030062>
- Yulistiono, H. S., & Brotowati, S. (2018). Pengaruh Suhu Kalsinasi pada Sintesis Katalis Padat Titanium Dioksida Tersulfonasi Terhadap Konversi Pembentukan Ester Pada Reaksi Esterifikasi Destilat Asam Lemak Minyak Sawit Menggunakan Metanol. *Seminar Nasional Hasil Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat (SNP2M)*, 3.
- Yuliyati, Y. B., Noviyanti, A. R., Rizal, M., & Nurjanah, S. (2020). Karakterisasi Biodiesel Dari Minyak Kemiri Sunan Dengan Katalis Heterogen Silika Terimpregnasi Kalsium Oksida (CaO/SiO₂). *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 38(1), 1–68.
- Zein, Y. M., Kumar Anal, A., Prasetyoko, D., & Qoniah, I. (2016). 98 Biodiesel Production from Waste Palm Oil Catalyzed by Hierarchical ZSM-5 Supported Calcium Oxide. In *Indones. J. Chem* (Vol. 16, Issue 1).

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA