

**SINTESIS DAN ANALISIS MORFOLOGI DAN LUAS  
PERMUKAAN KATALIS DARI KULIT PISANG KEPOK  
SERTA APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS PADA  
TRANSESTERIFIKASI MINYAK KELAPA SAWIT**

**Skripsi  
Untuk memenuhi sebagian persyaratan  
mencapai derajat Sarjana Kimia**



**Oleh:  
Azzarkasyi Azka  
22106030019**

**PROGRAM STUDI KIMIA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA  
2026**

## HALAMAN 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-2369/Un.02/DST/PP.00.9/09/2026

Tugas Akhir dengan judul : Sintesis dan Analisis Morfologi dan Luas Permukaan Katalis dari Kulit Pisang Kepok Serta Aplikasinya Sebagai Katalis pada Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : AZZARKASYI AZKA  
Nomor Induk Mahasiswa : 22106030019  
Telah diujikan pada : Jumat, 28 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

Sudarlin, M.Si.  
SIGNED

Valid ID: 6aa39d8c63b8c



Penguji I

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

Valid ID: 6aa0b055b3f6a



Penguji II

Khamidinal, S.Si., M.Si  
SIGNED

Valid ID: 6aa2c24c172c3



Yogyakarta, 28 Agustus 2026  
UIN Sunan Kalijaga  
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

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

Valid ID: 6aaba948c7df5

## SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

### 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 wr. wb.

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

Nama : Azzarkasyi Azka

NIM : 22106030019

Judul Skripsi : Sintesis dan Analisis Morfologi dan Luas Permukaan Katalis dari Kulit Pisang Kepok (*Musa acuminata* x *balbisiana* Colla.) serta Aplikasinya sebagai Katalis pada Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit

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

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

Wassalamu'alaikum wr. wb.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

Yogyakarta, 28 Agustus 2026

Pembimbing

Sutartin, M. S.

NIP: 19850611 201503 1 002

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

### SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Azzarkasyi Azka  
NIM : 22106030019  
Jurusan : Kimia  
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul **"Sintesis dan Analisis Morfologi dan Luas Permukaan Katalis dari Kulit Pisang Kepok (*Musa acuminata x balbisiana* Colla.) serta Aplikasinya sebagai Katalis 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, 28 Agustus 2026



Azzarkasyi Azka  
NIM. 22106030019

## HALAMAN MOTTO

وَلَا تَيْئِسُوا مِنْ رَوْحِ اللَّهِ إِنَّهُ لَا يَيْئَسُ مِنْ رَوْحِ اللَّهِ إِلَّا الْقَوْمُ الْكَافِرُونَ

*“Janganlah kamu berputus asa dari rahmat Allah. Sesungguhnya tidak ada yang berputus asa dari rahmat Allah, kecuali kaum yang kafir”*

**(QS. Yusuf: 87)**

*“Lakukan karena Allah apa yang Dia suka lalu mintalah kepadaNya apa yang kamu suka”*

**(Abina K.H.Akhmad Kharis Masduki)**

*“The world is so competitive, aggressive, consumive, selfish and during the time we spend here we must be all but that”*

**(Jose Mourinho)**

*“Mimpi bukanlah apa yang kamu lihat saat tidur. Mimpi adalah hal-hal yang membuatmu tidak bisa tidur”*

**(Cristiano Ronaldo)**

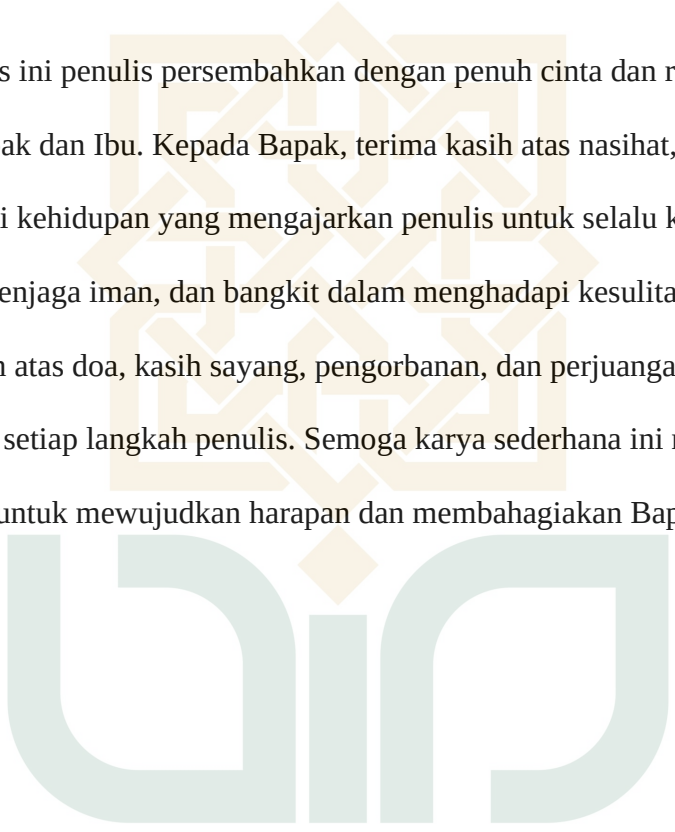
*Di kimia aku belajar banyak sekali reaksi, tapi menurutku reaksi yang paling indah ialah reaksi orang tuaku ketika melihat anaknya sukses kelak.*

*Aamiin*

## **HALAMAN PERSEMBAHAN**

Karya tulis ini penulis persembahkan dan dedikasikan untuk Almamater Program  
Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan  
Kalijaga Yogyakarta

Karya tulis ini penulis persembahkan dengan penuh cinta dan rasa terima kasih kepada Bapak dan Ibu. Kepada Bapak, terima kasih atas nasihat, keteladanan, dan nilai-nilai kehidupan yang mengajarkan penulis untuk selalu kembali kepada Allah, menjaga iman, dan bangkit dalam menghadapi kesulitan. Kepada Ibu, terima kasih atas doa, kasih sayang, pengorbanan, dan perjuangan yang senantiasa menyertai setiap langkah penulis. Semoga karya sederhana ini menjadi langkah awal untuk mewujudkan harapan dan membahagiakan Bapak dan Ibu.



STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

## KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ مَا شَاءَ اللَّهُ لَا يَسْئُوقُ الْخَيْرَ إِلَّا اللَّهُ بِسْمِ اللَّهِ مَا شَاءَ اللَّهُ لَا يَصْرِفُ السُّوءَ إِلَّا اللَّهُ  
بِسْمِ اللَّهِ مَا شَاءَ اللَّهُ مَا كَانَ مِنْ نِعْمَةٍ فَمِنْ اللَّهِ بِسْمِ اللَّهِ مَا شَاءَ اللَّهُ لَا حَوْلَ وَلَا قُوَّةَ إِلَّا بِاللَّهِ  
وَالصَّلَاةُ وَالسَّلَامُ عَلَى سَيِّدِنَا مُحَمَّدٍ، وَعَلَى آلِهِ وَصَحْبِهِ أَجْمَعِينَ، أَمَّا بَعْدُ

Segala puji bagi Allah Swt., Tuhan semesta alam, sumber kasih yang tak bertepi dan pemberi rahmat yang tak terhitung. Atas limpahan nikmat, kesehatan, kekuatan, serta kesempatan yang dianugerahkan-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Sintesis dan Analisis Morfologi dan Luas Permukaan Katalis dari Kulit Pisang Kepok (*Musa acuminata* x *balbisiana* Colla.) serta Aplikasinya sebagai Katalis 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. Perjalanan penelitian dan penyusunan skripsi ini menjadi bagian dari proses panjang yang tidak penulis lalui seorang diri. Di balik setiap halaman yang tersusun, terdapat doa, perhatian, arahan, waktu, tenaga, dan kebaikan dari banyak pihak. Oleh karena itu, dengan penuh hormat dan rasa syukur, penulis menyampaikan 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 dan dukungan selama penulis menempuh pendidikan
4. Prof. Dr. Susy Yunita Prabawati, M. Si. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang dengan penuh perhatian telah memberikan arahan, motivasi, dan pendampingan selama penulis menjalani proses pendidikan.
5. Sudarlin, M. Si. selaku Dosen Pembimbing Skripsi yang dengan kesabaran, ketulusan, dan keluasan ilmu telah meluangkan waktu untuk membimbing,

mengarahkan, mengoreksi, serta memberikan motivasi kepada penulis hingga skripsi ini dapat diselesaikan.

6. Seluruh dosen dan staf karyawan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta yang telah memberikan ilmu, pelayanan, dan bantuan selama penulis menempuh pendidikan hingga proses penyelesaian skripsi.
7. Bapak Ruri Anajib, S.Pd., sosok panutan dan pemimpin keluarga yang selalu menjadi teladan bagi penulis dalam menjalani kehidupan. Terima kasih atas setiap nasihat, diskusi, keputusan, dan pelajaran hidup yang senantiasa diberikan dengan penuh ketulusan. Bapak telah mengajarkan penulis untuk menjalani hidup dengan pedoman Islam, menjaga ketaatan dan istiqamah, serta mempertimbangkan setiap langkah dengan bijaksana. Banyak hal baik yang tumbuh dalam diri penulis berasal dari nilai dan teladan yang Bapak tanamkan. Semoga segala kebaikan, ilmu, dan cinta yang Bapak berikan menjadi amal jariyah dengan pahala yang tidak pernah terputus, serta semoga Allah senantiasa membimbing Bapak untuk memimpin keluarga kecil kita menuju ridha dan surga-Nya.
8. Ibu Dyan Sukmawati, S.TP., pintu surga penulis, perempuan tercinta yang gigih, pekerja keras, dan senantiasa menempatkan keluarga dalam setiap doa dan langkahnya. Terima kasih atas kesabaran, keikhlasan, kasih sayang, serta keteguhan hati dalam membimbing dan membesarkan penulis. Ibu adalah salah satu alasan penulis terus berusaha menjadi lebih baik, sekaligus tempat pulang yang mampu mengembalikan keceriaan ketika hati sedang lelah. Tidak akan pernah cukup kata-kata untuk membalas segala yang telah Ibu berikan; bahkan langit pun terasa terlalu sempit untuk menampung doa-doa penulis bagi Ibu. Semoga Allah senantiasa menjaga, memuliakan, dan menjadikan Ibu hamba-Nya yang terbaik.
9. Shanna'a Syai'a Shafa, adik terbaik penulis, yang meskipun jarang bertemu sejak penulis menyelesaikan pendidikan dasar karena sama-sama menempuh pendidikan di pondok pesantren, tetap hadir melalui doa, dukungan, keceriaan, dan kasih sayangnya. Terima kasih telah menjadi

bagian dari kebahagiaan penulis hingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan lebih ringan dan penuh syukur

10. Teman-teman Pondok Pesantren Wahid Hasyim yang telah menghadirkan kebersamaan, keseruan, hiburan, doa, dan dukungan sejak masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini. Terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan yang membuat proses panjang ini terasa lebih hidup.
11. Teman-teman alumni Pondok Pesantren Darul Qur'an yang tetap menjaga silaturahmi dan menjalin hubungan baik sejak masa kelulusan hingga akhir perjalanan perkuliahan. Terima kasih atas kebersamaan, perhatian, dan doa yang terus terjaga meskipun perjalanan masing-masing telah berbeda.
12. Handika, Dhani, dan almarhum Aria, teman dekat dan seperjuangan yang telah menjadi bagian dari perjalanan penulis sejak masa-masa awal perkuliahan. Terima kasih atas kebersamaan, tawa, cerita, dan berbagai kenangan yang telah membuat perjalanan perkuliahan menjadi lebih seru dan bermakna. Khusus untuk almarhum Aria, meskipun Allah telah memanggilnya terlebih dahulu sehingga tidak dapat bersama-sama menyaksikan perjalanan hingga kelulusan, segala kebaikan, persahabatan, dan kenangan yang pernah terukir akan selalu menjadi bagian yang tidak terlupakan dalam perjalanan penulis. Semoga Allah Swt. mengampuni segala dosa dan kekhilafannya, menerima seluruh amal baiknya, melapangkan dan menerangi tempat peristirahatannya, serta menempatkannya di tempat terbaik di sisi-Nya. Semoga doa-doa baik yang dipanjatkan untuknya menjadi bentuk kecil dari rasa terima kasih atas persahabatan yang pernah diberikan. Al-Fatihah.
13. Circle Barudak, Arif, Aryas, Rama, Sheila, Rini, Nurul, Naiya, dan Della, yang telah menjadi pengisi ruang-ruang kosong dalam perjalanan penulis, menemani dalam berbagai keadaan, serta memberikan semangat, dukungan, dan kebersamaan sejak awal perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini
14. Nonod, Hella, Meylina, dan Shabrina, teman-teman satu bimbingan yang telah menjadi partner penelitian dan perjuangan sejak awal proses bimbingan. Terima kasih atas kebersamaan, dukungan, bantuan, dan

suasana menyenangkan yang membuat perjalanan penelitian ini terasa lebih ringan.

15. Keluarga Xenon (Kimia Angkatan 2022), yang telah menjadi bagian dari perjalanan akademik penulis. Terima kasih atas kebersamaan, semangat, bantuan, dan berbagai kenangan yang tumbuh selama masa perkuliahan hingga tahap penyelesaian skripsi. Semoga persaudaraan yang terbentuk di bangku perkuliahan tetap memiliki tempat dalam perjalanan masing-masing setelah ini.
16. Teman-teman KKN Bendosari, yang telah menjadi bagian berharga dalam perjalanan penulis. Terima kasih atas kebersamaan, cerita, tawa, dan dukungan selama masa KKN hingga proses penyusunan skripsi. Terima kasih telah menjadikan salah satu fase perkuliahan penulis lebih berwarna dan penuh kenangan.
17. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang dengan cara dan perannya masing-masing telah memberikan doa, bantuan, perhatian, semangat, maupun kebaikan selama perjalanan pendidikan dan penyusunan skripsi ini. Penulis menyadari bahwa tidak semua kebaikan dapat disebutkan namanya, tetapi tidak satu pun akan dilupakan.
18. Diri penulis sendiri, yang telah memilih untuk tetap berjalan, bertahan di tengah lelah dan keraguan, serta menyelesaikan apa yang telah dimulai. Skripsi ini bukan sekadar tentang gelar, melainkan bukti bahwa penulis mampu menepati janji kepada diri sendiri untuk menyelesaikan perjalanan ini. Semoga pencapaian ini menjadi awal untuk terus bertumbuh, tetap rendah hati dalam keberhasilan, kuat dalam kegagalan, dan senantiasa mengingat bahwa setiap pencapaian merupakan titipan Allah.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan, baik dalam proses maupun penyajiannya. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan sebagai bahan perbaikan dan penyempurnaan di masa mendatang. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, menambah wawasan dalam bidang kimia, serta menjadi salah satu referensi bagi pengembangan penelitian selanjutnya.

## DAFTAR ISI

|                                                  |       |
|--------------------------------------------------|-------|
| HALAMAN PENGESAHAN.....                          | i     |
| SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR .....      | ii    |
| SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....           | iii   |
| HALAMAN MOTTO .....                              | iv    |
| HALAMAN PERSEMBAHAN .....                        | v     |
| KATA PENGANTAR .....                             | vi    |
| DAFTAR ISI.....                                  | x     |
| DAFTAR GAMBAR .....                              | xiii  |
| DAFTAR TABEL.....                                | xv    |
| DAFTAR LAMPIRAN.....                             | xvii  |
| ABSTRAK .....                                    | xviii |
| BAB I PENDAHULUAN .....                          | 1     |
| A. Latar Belakang.....                           | 1     |
| B. Batasan Masalah.....                          | 9     |
| C. Rumusan Masalah .....                         | 10    |
| D. Tujuan Penelitian.....                        | 11    |
| E. Manfaat Penelitian.....                       | 11    |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI ..... | 13    |
| A. Tinjauan Pustaka .....                        | 13    |
| B. Landasan teori .....                          | 17    |
| 1. Pisang .....                                  | 17    |
| 2. Biodiesel.....                                | 19    |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| 3. Katalis Heterogen.....                                           | 22 |
| 4. Reaksi Transesterifikasi .....                                   | 23 |
| 5. Metode Kalsinasi.....                                            | 25 |
| 6. <i>Brunauer–Emmett–Teller</i> (BET) .....                        | 28 |
| 7. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) .....                  | 35 |
| 8. <i>X-ray Diffraction</i> (XRD).....                              | 39 |
| 9. <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS) .....        | 43 |
| C. Kerangka Berpikir dan Hipotesis Penelitian .....                 | 46 |
| BAB III METODE PENELITIAN .....                                     | 51 |
| A. Waktu dan Tempat Penelitian .....                                | 51 |
| B. Alat-alat Penelitian .....                                       | 51 |
| C. Bahan Penelitian.....                                            | 52 |
| D. Cara Kerja Penelitian.....                                       | 52 |
| E. Teknik Analisis Data .....                                       | 59 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....                                   | 62 |
| A. Preparasi Bahan Baku Katalis dari Kulit Pisang Kepok .....       | 62 |
| B. Sintesis Katalis melalui Proses Kalsinasi .....                  | 63 |
| C. Uji Kebasaan Katalis .....                                       | 65 |
| D. Morfologi dan Komposisi Permukaan.....                           | 67 |
| E. Luas Permukaan dan Ukuran Pori .....                             | 74 |
| F. Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) .....               | 81 |
| G. Perhitungan Rendemen Produk Hasil Reaksi Transesterifikasi ..... | 89 |
| H. Analisis Produk Biodiesel dengan GC-MS .....                     | 92 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| BAB V KESIMPULAN ..... | 101 |
| A. Kesimpulan.....     | 101 |
| B. Saran.....          | 102 |
| DAFTAR PUSTAKA .....   | 105 |
| LAMPIRAN.....          | 111 |



## DAFTAR GAMBAR

|             |                                                                                                                                                            |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2. 1 | Struktur metil palmitat, salah satu contoh molekul biodiesel                                                                                               | 20 |
| Gambar 2. 2 | Diagram proses pembuatan biodiesel                                                                                                                         | 21 |
| Gambar 2. 3 | Mekanisme Reaksi Transesterifikasi                                                                                                                         | 24 |
| Gambar 2. 4 | Skema alat analisis BET untuk pengukuran luas permukaan berdasarkan adsorpsi nitrogen                                                                      | 31 |
| Gambar 2. 5 | Kurva linear BET yang digunakan untuk menghitung kapasitas adsorpsi dan luas permukaan                                                                     | 33 |
| Gambar 2. 6 | Diagram Skematik dari Komponen Inti Mikroskop SEM                                                                                                          | 36 |
| Gambar 2. 7 | Contoh sampel standar kromatogram GC-MS untuk biodiesel                                                                                                    | 44 |
| Gambar 4. 1 | Serbuk kulit pisang kepok hasil akhir preparasi berukuran 100 mesh                                                                                         | 63 |
| Gambar 4. 2 | Serbuk kulit pisang kepok setelah kalsinasi                                                                                                                | 64 |
| Gambar 4. 3 | Erlenmeyer berisi larutan katalis yang dilarutkan dalam metanol dan diberi indikator fenolftalein                                                          | 66 |
| Gambar 4. 4 | Erlenmeyer berisi larutan katalis dan indikator yang telah dititrasi hingga warna berubah dari merah muda menjadi bening                                   | 66 |
| Gambar 4. 5 | Susunan 4 panel citra SEM katalis kulit pisang kepok pada perbesaran 500× (kiri atas), 1.000× (kanan atas), 5.000× (kiri bawah), dan 10.000× (kanan bawah) | 69 |

|              |                                                                                                                                  |    |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 4. 6  | Spektrum EDX (grafik counts vs keV) .....                                                                                        | 70 |
| Gambar 4. 7  | (a) diagram ternary/segitiga scatter diagram; (b) citra<br>elemental mapping pada area SEM skala 100 $\mu\text{m}$ .....         | 73 |
| Gambar 4. 8  | Hasil Deteksi Objek Permukaan Menggunakan ImageJ<br>pada citra SEM 10.000 $\times$ .....                                         | 73 |
| Gambar 4. 9  | Grafik BJH method Adsorption dV(d) .....                                                                                         | 79 |
| Gambar 4. 10 | Grafik BJH method Desorption dV(d) .....                                                                                         | 79 |
| Gambar 4. 11 | Grafik Origin plot data $P/P_0$ (sumbu x) terhadap<br>$1/[V((P_0/P)-1)]$ (sumbu y) .....                                         | 81 |
| Gambar 4. 12 | Hasil pencocokan garis referensi fase kristalin pada<br>difraktogram XRD katalis kulit pisang kepok .....                        | 82 |
| Gambar 4. 13 | Biodiesel murni berwarna kuning jernih hasil<br>transesterifikasi minyak kelapa sawit dengan katalis kulit<br>pisang kepok ..... | 90 |
| Gambar 4. 14 | Kromatogram Total Ion Current (TIC) hasil analisis GC-<br>MS sampel biodiesel .....                                              | 92 |
| Gambar 4. 15 | Spektrum Massa Puncak Kesembilan Biodiesel .....                                                                                 | 96 |
| Gambar 4. 16 | Spektrum Massa Puncak Keenam Biodiesel .....                                                                                     | 97 |
| Gambar 4. 17 | Spektrum Massa Puncak Kesepuluh Biodiesel .....                                                                                  | 98 |

## DAFTAR TABEL

|             |                                                                                                                                    |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2. 1  | Kandungan Mineral Kulit Pisang Kepok Berdasarkan Hasil Penelitian Yani et al. (2025) .....                                         | 18 |
| Tabel 2. 2  | Karakteristik fisik gas-gas yang digunakan dalam analisis BET seperti N <sub>2</sub> , Ar, dan CO <sub>2</sub> (Naderi, 2015)..... | 32 |
| Tabel 4. 1  | Rekapitulasi massa kulit pisang kepok .....                                                                                        | 62 |
| Tabel 4. 2  | Hasil titrasi asam benzoat dan perhitungan kebasaan (basicity) katalis kulit pisang kepok .....                                    | 67 |
| Tabel 4. 3  | Hasil kuantifikasi EDX mode OXIDE (stoikiometri oksida) .....                                                                      | 71 |
| Tabel 4. 4  | Hasil kuantifikasi EDX mode PURE (elemental).....                                                                                  | 71 |
| Tabel 4. 5  | Ringkasan Hasil Observasi Visual Permukaan Katalis Menggunakan ImageJ pada citra SEM 10.000× .....                                 | 74 |
| Tabel 4. 6  | Ringkasan luas permukaan katalis kulit pisang kepok berdasarkan berbagai metode perhitungan data BET .....                         | 75 |
| Tabel 4. 7  | Data volume pori dan ukuran pori katalis kulit pisang kepok hasil analisis BET .....                                               | 77 |
| Tabel 4. 8  | Identifikasi Puncak XRD, d-spacing, dan Fase Kristalin Katalis Abu Kalsinasi Kulit Pisang Kepok.....                               | 83 |
| Tabel 4. 9  | Ringkasan Parameter Kristal Katalis Kulit Pisang Kepok.....                                                                        | 86 |
| Tabel 4. 10 | Hasil Perhitungan Ukuran Kristalit Scherrer pada Tujuh Puncak Difraksi Dominan.....                                                | 88 |
| Tabel 4. 11 | Hasil pengukuran volume biodiesel murni dan perhitungan rendemen.....                                                              | 90 |

|             |                                                                                                                                            |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 4. 12 | Hasil Perhitungan Rendemen FAME .....                                                                                                      | 90 |
| Tabel 4. 13 | Identifikasi senyawa hasil analisis GC-MS biodiesel dari<br>minyak kelapa sawit dengan katalis kulit pisang kepok<br>(pustaka NIST23)..... | 94 |



**DAFTAR LAMPIRAN**

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| Lampiran 1 Perhitungan..... | 111 |
| Lampiran 2 Dokumentasi..... | 114 |



## ABSTRAK

### SINTESIS DAN ANALISIS MORFOLOGI DAN LUAS PERMUKAAN KATALIS DARI KULIT PISANG KEPOK SERTA APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS PADA TRANSESTERIFIKASI MINYAK KELAPA SAWIT

Oleh:

Azzarkasyi Azka

22106030019

Pembimbing:

Sudarlin, M. Si.

Kulit pisang kepok (*Musa acuminata* × *balbisiana* Colla) merupakan limbah biomassa yang mengandung mineral seperti kalium, kalsium, fosfor, dan silikon sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku katalis heterogen. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik katalis hasil kalsinasi kulit pisang kepok berdasarkan sifat kebasaaan, morfologi, komposisi unsur, luas permukaan, karakteristik pori, dan struktur kristalnya serta mengkaji penggunaannya pada reaksi transesterifikasi minyak kelapa sawit. Katalis dibuat melalui proses kalsinasi pada suhu 750 °C selama 3 jam, kemudian dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX), *Brunauer-Emmett-Teller* (BET), dan *X-ray Diffraction* (XRD), serta diuji sifat kebasaaannya menggunakan metode indikator Hammett dan titrasi asam benzoat. Produk FAME dianalisis berdasarkan rendemen dan komposisi senyawa menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS). Hasil uji kebasaaan menunjukkan nilai  $H^- > 9,3$  dengan total *basicity* sebesar  $0,76 \pm 0,043$  mmol/g. Analisis EDX menunjukkan kalium sebagai unsur logam dengan persentase tertinggi, yaitu 15,90%. Hasil XRD yang dianalisis menggunakan aplikasi Match! dan database Crystallography Open Database (COD) menunjukkan fase  $Ca_3(PO_4)_2$ ,  $CaCO_3$ ,  $K_4P_2O_7$ ,  $K_2SiO_3$ ,  $K_2CO_3$ , dan KCl. Analisis struktur kristal menunjukkan variasi sistem kristal, parameter kisi, dan jarak antarbidang pada fase penyusun katalis, sedangkan perhitungan menggunakan persamaan Scherrer menunjukkan ukuran kristalit sebesar 3,65–43,64 nm. Analisis BET-BJH menunjukkan luas permukaan spesifik sebesar 20,90 m<sup>2</sup>/g, volume pori total sebesar 0,0864 cm<sup>3</sup>/g, dan diameter pori rata-rata sebesar 16,54 nm. Hasil transesterifikasi menggunakan 7% katalis, rasio molar minyak terhadap metanol 1:15, suhu 60–65 °C, dan waktu reaksi 2 jam menghasilkan FAME dengan rendemen sebesar 75,00% secara volumetrik atau sekitar 73,92% berdasarkan estimasi massa. Analisis GC-MS menunjukkan 13 dari 16 puncak yang teridentifikasi merupakan FAME dengan total area sebesar 99,48%, dengan komponen terbesar berupa FAME C18:1 sebesar 51,84%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa katalis berbasis kulit pisang kepok memiliki sifat basa dan karakteristik fisik serta struktur kristal yang mendukung penggunaannya sebagai katalis heterogen, meskipun rendemen FAME yang diperoleh masih belum mencapai target yang ditetapkan.

**Kata Kunci:** FAME; kulit pisang kepok; katalis heterogen; transesterifikasi

## ABSTRACT

### SYNTHESIS AND ANALYSIS OF MORPHOLOGY AND SURFACE AREA OF CATALYST DERIVED FROM KEPOK BANANA PEEL AND ITS APPLICATION AS CATALYST IN PALM OIL TRANSESTERIFICATION

By:

Azzarkasyi Azka

22106030019

Supervisor:

Sudarlin, M. Si.

Kepok banana peel (*Musa acuminata* × *balbisiana* Colla) is a biomass waste containing minerals such as potassium, calcium, phosphorus, and silicon, making it a potential raw material for heterogeneous catalysts. This study aimed to analyze the characteristics of a catalyst derived from calcined kepok banana peel in terms of basicity, morphology, elemental composition, surface area, pore characteristics, and crystal structure, as well as to evaluate its performance in the transesterification of palm oil. The catalyst was prepared by calcination at 750°C for 3 hours and subsequently characterized using Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX), Brunauer-Emmett-Teller (BET), and X-ray Diffraction (XRD) analyses. Basicity was assessed using the Hammett indicator method combined with benzoic acid titration. The fatty acid methyl ester (FAME) product was analyzed in terms of yield and compound composition using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). The basicity test revealed an H-value of greater than 9.3, with a total basicity of  $0.76 \pm 0.043$  mmol/g. EDX analysis identified potassium as the predominant metallic element at 15.90%. XRD analysis performed using the Match! application and the Crystallography Open Database (COD) identified the crystalline phases  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ,  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , and KCl. Crystal structure analysis revealed variations in crystal systems, lattice parameters, and interplanar spacings among the constituent phases, while Scherrer equation calculations yielded crystallite sizes ranging from 3.65 to 43.64 nm. BET-BJH analysis showed a specific surface area of 20.90 m<sup>2</sup>/g, a total pore volume of 0.0864 cm<sup>3</sup>/g, and an average pore diameter of 16.54 nm. Transesterification carried out using 7% catalyst loading, an oil-to-methanol molar ratio of 1:15, a reaction temperature of 60–65°C, and a reaction time of 2 hours produced FAME with a volumetric yield of 75.00%, or approximately 73.92% based on mass estimation. GC-MS analysis showed that 13 out of 16 identified peaks corresponded to FAME compounds, with a total area of 99.48%, in which C18:1 FAME was the most abundant component at 51.84%. These results indicate that the kepok banana peel-based catalyst possesses basic properties along with physical characteristics and a crystal structure that support its use as a heterogeneous catalyst, although the FAME yield obtained has not yet reached the defined target.

Keywords: FAME; kepok banana peel; heterogeneous catalyst; transesterification.

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Di Indonesia, potensi pengembangan bioenergi sangat besar, namun hingga saat ini masih belum dimanfaatkan secara optimal. Salah satu bentuk pemanfaatan bioenergi yang semakin mendapat perhatian adalah konversi minyak menjadi biodiesel. Produksi biodiesel secara industri umumnya mengandalkan reaksi transesterifikasi yang memerlukan katalis untuk mempercepat reaksi antara trigliserida dan alkohol. Pemilihan katalis menjadi tahap krusial karena mempengaruhi kecepatan reaksi, rendemen produk, dan kemudahan pemurnian. Selama ini, katalis homogen banyak digunakan karena mampu memberikan konversi tinggi dalam waktu singkat. Namun, keterbatasannya dalam proses pemisahan, regenerasi, serta kecenderungan menghasilkan limbah samping mendorong pencarian alternatif katalis yang lebih efisien dan berkelanjutan (Ruhaiya et al., 2020).

Katalis homogen, seperti natrium hidroksida (NaOH) atau kalium hidroksida (KOH), merupakan jenis yang paling umum digunakan dalam industri karena larut dengan baik dalam metanol dan mampu menghasilkan biodiesel dengan rendemen tinggi dalam waktu reaksi yang singkat serta pada kondisi operasi yang ringan. Namun, katalis ini hanya cocok untuk bahan baku berkualitas tinggi karena kandungan asam lemak bebas yang tinggi dapat menyebabkan reaksi pembentukan sabun yang menurunkan hasil biodiesel. Selain itu, katalis homogen sulit dipisahkan dari campuran reaksi, tidak dapat digunakan kembali, bersifat

korosif terhadap peralatan, serta membutuhkan proses pencucian intensif yang menghasilkan limbah cair alkali dalam jumlah besar (Ramos et al., 2019).

Keterbatasan ini mendorong peneliti untuk mencari alternatif yang lebih efisien, mudah dipisahkan, dan ramah lingkungan, sehingga muncullah katalis heterogen sebagai salah satu solusi yang semakin banyak dikembangkan. Penggunaan katalis heterogen semakin banyak dikembangkan karena menawarkan sejumlah keunggulan dalam proses produksi biodiesel. Katalis heterogen seperti CaO, MgO, dan logam transisi lainnya bersifat padat, sehingga mudah dipisahkan dari campuran reaksi tanpa membutuhkan proses pemurnian yang rumit. Hal ini memungkinkan proses produksi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Selain itu, katalis heterogen dapat digunakan kembali dalam beberapa siklus reaksi tanpa kehilangan aktivitas yang signifikan, sehingga berkontribusi pada pengurangan limbah dan penurunan biaya produksi secara keseluruhan (Faruque et al., 2020).

Salah satu contoh penerapan katalis heterogen berbasis limbah yang menunjukkan hasil menjanjikan ditunjukkan dalam penelitian oleh Tarigan et al. (2023) yang menggunakan kulit pisang sebagai sumber mineral alkali untuk pembuatan katalis basa padat dalam reaksi transesterifikasi minyak sawit. Pada kondisi optimum, yaitu rasio molar metanol terhadap minyak 9:1, konsentrasi katalis 3%, suhu reaksi 65 °C, dan waktu reaksi 120 menit, diperoleh rendemen biodiesel sebesar 94,48%. Untuk memastikan sifat dan potensi katalitiknya, katalis hasil kalsinasi dikarakterisasi menggunakan TGA, XRD, SEM, dan XRF, yang secara konsisten menunjukkan dominasi senyawa K<sub>2</sub>O, morfologi berpori, serta struktur kristalin yang aktif sebagai situs basa. Hasil karakterisasi ini menegaskan

bahwa kulit pisang setelah kalsinasi memiliki komposisi dan struktur yang sesuai untuk digunakan sebagai katalis heterogen dalam produksi biodiesel. Kelemahan penelitian Tarigan et al. adalah penggunaan kulit pisang yang tidak spesifik. Hal ini penting untuk memberikan gambaran perbedaan potensi setiap jenis pisang sebagai sumber katalis heterogen

Melihat potensi tersebut, penulis mempertimbangkan penggunaan katalis heterogen berbasis limbah kulit pisang yang spesifik, yakni kulit pisang kepok (*Musa acuminata x balbisiana Colla*). Kulit pisang kepok merupakan limbah pertanian yang melimpah di Indonesia dan selama ini belum dimanfaatkan secara optimal. Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode MPAES, kulit pisang kepok terbukti mengandung mineral dalam jumlah tinggi, terutama kalium dengan kadar mencapai 5.237,6 mg/kg, disertai kalsium sebesar 2.568,7 mg/kg dan fosfor sebesar 429,13 mg/kg (Yani, Handa, et al., 2025).

Selain itu, penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kulit pisang yang dimodifikasi dengan larutan KOH dan dikalsinasi pada suhu tinggi dapat digunakan sebagai katalis heterogen dalam reaksi transesterifikasi minyak jelantah. Proses modifikasi ini menghasilkan katalis yang mengandung senyawa aktif seperti  $K_2O$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ , dan  $SiO_2$ , yang berperan sebagai pusat basa aktif dalam reaksi. Hasil karakterisasi menggunakan FTIR dan SEM menunjukkan bahwa katalis memiliki struktur berpori dengan penyebaran situs aktif yang baik, sehingga meningkatkan efisiensi proses transesterifikasi. Pada kondisi optimum, yaitu rasio molar metanol terhadap minyak 12:1, konsentrasi katalis 1%, suhu 65 °C, dan waktu reaksi 2 jam, diperoleh rendemen biodiesel sebesar 88,7%. Keunggulan utama dari penelitian ini

adalah keberhasilan memanfaatkan limbah kulit pisang yang kaya mineral menjadi katalis yang dapat digunakan kembali dan lebih ramah lingkungan dibandingkan katalis homogen. Temuan ini sekaligus menegaskan bahwa kulit pisang memiliki potensi besar sebagai bahan baku katalis heterogen. Jenis pisang yang digunakan pada penelitian sebelumnya belum spesifik pada kulit pisang tertentu. Penelitian ini akan mempelajari secara spesifik potensi limbah kulit pisang kepok (*Musa acuminata x balbisiana Colla*) sebagai sumber katalis. (Rosli et al., 2023).

Pemahaman lebih lanjut mengenai karakteristik katalis dari kulit pisang kepok memerlukan metode karakterisasi yang mampu memberikan informasi detail terkait luas permukaan dan struktur pori. Salah satunya adalah *Brunauer-Emmett-Teller* (BET). Dalam penelitian ini, karakterisasi luas permukaan spesifik bahan anorganik menggunakan metode *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) menjadi pendekatan utama untuk memastikan efisiensi katalis heterogen berbasis kulit pisang kepok. BET tidak hanya menyediakan data kuantitatif terkait luas permukaan dan volume pori, tetapi juga memungkinkan penilaian kualitas dispersi dan struktur pori dari katalis yang dihasilkan, yang sangat krusial dalam proses transesterifikasi untuk produksi biodiesel. Pemanfaatan metode ini sejalan dengan panduan eksperimental yang menekankan pentingnya tahap pra-pengujian seperti pengeringan dan *degassing*, serta akurasi dalam pengukuran isotherm adsorpsi, sehingga hasil yang diperoleh benar-benar mencerminkan karakter intrinsik material (Irwansyah et al., 2024). Oleh karena itu, karakterisasi BET menjadi landasan penting dalam merancang suhu aktivasi, memilih perlakuan termal yang tepat, serta mengevaluasi sejauh mana porositas dan luas permukaan dapat

meningkatkan interaksi antara minyak dan katalis yang berbasis dari kulit pisang kepok.

Selain karakterisasi luas permukaan, analisis morfologi dan komposisi permukaan katalis juga dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). SEM juga diperlukan untuk melengkapi BET karena dapat digunakan untuk mengamati struktur permukaan katalis, termasuk bentuk, ukuran, dan distribusi pori yang terbentuk setelah proses kalsinasi. Pengamatan ini penting karena struktur permukaan yang berpori dan merata dapat meningkatkan luas permukaan aktif dan mempercepat kontak antara reaktan dan situs aktif selama reaksi transesterifikasi. Dalam penelitian sebelumnya, hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa permukaan katalis  $K_2O/Al_2O_3$  yang biasa terdapat pada kulit pisang, memiliki morfologi menyerupai struktur pori acak seperti karang, ini mendukung keberhasilan proses impregnasi dan aktivasi katalis (Karo-Karo et al., 2020). Berdasarkan acuan tersebut, pendekatan pada penelitian ini tidak hanya memanfaatkan karakterisasi SEM untuk melihat morfologi pori, tetapi juga menjadikannya sebagai dasar untuk memahami peran sifat fisik katalis khususnya yang berasal kulit pisang kepok dalam meningkatkan efisiensi konversi trigliserida pada reaksi transesterifikasi.

Sejalan dengan pendekatan karakterisasi yang digunakan pada penelitian terdahulu, evaluasi katalis tidak hanya dilakukan melalui analisis morfologi dan sifat permukaan lainnya menggunakan SEM serta BET, tetapi juga dilengkapi dengan pengujian sifat kebasaaan. Pendekatan ini dilakukan karena karakteristik morfologi dan luas permukaan saja belum cukup untuk menjelaskan aktivitas

katalitik pada reaksi transesterifikasi, sehingga diperlukan konfirmasi secara langsung terhadap kekuatan basa dan jumlah situs basa aktif pada permukaan katalis. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan metode indikator Hammett yang dikombinasikan dengan titrasi asam benzoat untuk menentukan kekuatan dan jumlah situs basa, sebagaimana diterapkan pada penelitian sebelumnya dalam evaluasi katalis basa heterogen berbasis oksida logam (Man et al., 2021).

Penelitian ini juga memanfaatkan data difraksi sinar-X (XRD) yang diperoleh melalui penelitian kolaboratif pada material yang sama. Karakterisasi SEM dan BET memberikan informasi mengenai morfologi, komposisi unsur, serta karakteristik permukaan dan pori katalis, tetapi belum dapat mengidentifikasi fase kristal senyawa yang terbentuk setelah kalsinasi. Data pendukung seperti EDX dari instrumen SEM hanya menunjukkan keberadaan unsur seperti K, Ca, Mg, dan Si tanpa membedakan bentuk senyawanya, seperti  $K_2CO_3$ ,  $K_2O$ , atau KOH, yang dapat memiliki aktivitas katalitik berbeda (Changmai et al., 2020; Guo et al., 2013). Oleh karena itu, X-ray Diffraction (XRD) diperlukan untuk mengidentifikasi fase kristalin berdasarkan pola difraksinya. Dalam penelitian ini, data XRD diperoleh melalui kolaborasi pada material katalis yang identik dan digunakan sebagai data pendukung untuk memperkuat interpretasi hasil SEM dan BET.

Dalam penelitian ini, proses transesterifikasi dilakukan dengan menggunakan minyak kelapa sawit sebagai bahan baku utama. Pemilihan minyak kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) didasarkan pada ketersediaannya yang melimpah di Indonesia dan juga menempati posisi strategis sebagai bahan baku utama di Indonesia. Minyak ini memiliki kandungan trigliserida yang tinggi,

tersedia sepanjang tahun, dan mendukung efisiensi produksi biodiesel melalui proses transesterifikasi (Siaw et al., 2023). Minyak kelapa sawit menjadi bahan baku yang sangat menjanjikan dalam produksi biodiesel karena memiliki produktivitas minyak per hektar yang jauh lebih tinggi dibandingkan minyak nabati lainnya, seperti kedelai atau bunga matahari, serta mampu tumbuh sepanjang tahun dengan kebutuhan air dan input pertanian yang relatif rendah. (Lamba et al., 2024). Selain itu, karakteristik kimianya yang terdiri dari kombinasi asam lemak jenuh dan tak jenuh memungkinkan efisiensi konversi yang tinggi melalui proses transesterifikasi. Pada kondisi minyak sawit dengan kadar asam lemak bebas (FFA) yang tinggi, produksi biodiesel tetap dapat dilakukan secara optimal dengan menggunakan katalis heterogen berbasis logam alkali. (Nurhayati et al., 2025). Dengan menggunakan bahan baku minyak kelapa sawit ini, analisis performa katalis dapat dilakukan secara lebih representatif terhadap kondisi produksi biodiesel skala industri, sekaligus memastikan bahwa hasil karakterisasi, seperti luas permukaan dan morfologi pori, benar-benar berkontribusi terhadap peningkatan konversi trigliserida menjadi metil ester secara efisien.

Berdasarkan penelitian Hefney et al. (2025), produksi biodiesel dari campuran minyak sawit tak dimurnikan dan minyak jelantah dengan katalis CKD menghasilkan konversi mendekati 100% setelah optimasi parameter reaksi. Namun, kendala utama yang ditemukan adalah kestabilan katalis yang rendah akibat terjadinya *leaching* komponen aktif selama reaksi membuat pemakaian ulang katalis terbatas, dan fenomena serupa juga banyak dilaporkan pada katalis heterogen berbasis limbah biomassa maupun mineral. Rendahnya kestabilan ini

umumnya dipengaruhi oleh luas permukaan yang terbatas, morfologi yang kurang seragam, serta lemahnya ikatan gugus aktif, sehingga jumlah situs katalitik berkurang pada siklus berikutnya dan rendemen biodiesel menurun. Penelitian ini diarahkan untuk mengatasi permasalahan tersebut melalui kajian sifat fisik katalis, khususnya luas permukaan dan morfologi, dengan menawarkan pendekatan yang sederhana dan efektif agar katalis tetap stabil, efisien, serta mampu meningkatkan rendemen biodiesel.

Setelah tahap karakterisasi SEM dan BET, biodiesel yang dihasilkan dievaluasi melalui perhitungan rendemen untuk mengetahui tingkat konversi yang dicapai selama proses transesterifikasi. Namun, untuk memastikan bahwa senyawa metil ester benar-benar terbentuk, diperlukan analisis lanjutan menggunakan Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). Metode ini mampu mengidentifikasi senyawa-senyawa utama penyusun biodiesel seperti metil palmitat, metil oleat, dan metil stearat, sehingga memvalidasi bahwa hasil reaksi memang merupakan biodiesel dan bukan senyawa lain yang tidak diinginkan (Yudha et al., 2017).

Dengan mempertimbangkan urgensi pengembangan energi terbarukan, potensi besar limbah kulit pisang sebagai bahan baku katalis, serta perlunya pendekatan karakterisasi yang menyeluruh dan berbasis data eksperimental, maka penelitian ini difokuskan pada pengembangan katalis heterogen berbasis kulit pisang kepok melalui analisis luas permukaan menggunakan karakterisasi BET dan SEM. Diharapkan, pendekatan ini dapat berpotensi menghasilkan katalis yang aktif, stabil, dan mendukung proses produksi biodiesel secara lebih efisien dan

berkelanjutan, sekaligus memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan teknologi biodiesel berbasis limbah biomassa di Indonesia.

## **B. Batasan Masalah**

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini menggunakan kulit pisang yang spesifik, yakni kulit pisang kepok sebagai bahan baku katalis heterogen, dan minyak kelapa sawit sebagai bahan baku biodiesel.
2. Karakterisasi yang dilakukan adalah mengidentifikasi karakteristik katalis heterogen hasil kalsinasi kulit pisang kepok (*Musa acuminata x balbisiana Colla*) berdasarkan morfologi dan komposisi unsur menggunakan *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX), karakteristik permukaan dan pori berupa luas permukaan spesifik, volume pori, dan distribusi ukuran pori menggunakan metode *Brunauer–Emmett–Teller* (BET) serta pola difraksi sinar-X menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD).
3. Uji sifat kebasahan katalis dibatasi pada penentuan kekuatan basa dan jumlah situs basa menggunakan metode indikator Hammett (indikator fenolftalein) yang dikombinasikan dengan titrasi asam benzoat.
4. Penelitian ini difokuskan pada produksi FAME melalui reaksi transesterifikasi menggunakan alkohol metanol sebagai agen metilasi, mengingat metanol memiliki reaktivitas tinggi, harga relatif murah, dan kompatibilitas yang baik dengan katalis heterogen.

5. Evaluasi biodiesel dilakukan melalui pengukuran rendemen dan identifikasi senyawa hasil reaksi menggunakan Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) untuk memastikan terbentuknya metil ester.
6. Penelitian ini tidak membahas analisis gugus fungsi dan ikatan kimia menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), komposisi unsur total (XRF), serta pengujian sifat fisika-kimia biodiesel lainnya secara menyeluruh karena dilakukan oleh rekan peneliti dalam tim kolaboratif.

### C. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, maka dirumuskan masalah penelitian sebagai berikut:

1. Apakah katalis heterogen dari limbah kulit pisang kepok (*Musa acuminata x balbisiana Colla*) dapat disintesis dengan metode kalsinasi
2. Bagaimana karakteristik katalis heterogen hasil kalsinasi kulit pisang kepok (*Musa acuminata x balbisiana Colla*) berdasarkan morfologi dan komposisi unsur menggunakan *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX), karakteristik permukaan dan pori menggunakan metode *Brunauer–Emmett–Teller* (BET), serta analisis pola difraksi sinar-X menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD)?
3. Bagaimana kinerja katalis heterogen dari kulit pisang kepok (*Musa acuminata x balbisiana Colla*) dalam mengonversi minyak kelapa sawit menjadi FAME berdasarkan nilai rendemen dan hasil analisis Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS)?

#### **D. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Sintesis katalis heterogen dari limbah kulit pisang kepok (*Musa acuminata x balbisiana Colla*) menggunakan metode kalsinasi
2. Mengetahui karakteristik katalis heterogen hasil kalsinasi kulit pisang kepok (*Musa acuminata x balbisiana Colla*) berdasarkan morfologi dan komposisi unsur menggunakan *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX), karakteristik permukaan dan pori berupa luas permukaan spesifik, volume pori, dan distribusi ukuran pori menggunakan metode *Brunauer–Emmett–Teller* (BET), serta analisis pola difraksi sinar-X menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD).
3. Mengetahui kemampuan katalis berbasis kulit pisang kepok dalam mengonversi minyak kelapa sawit menjadi FAME melalui penentuan rendemen dan identifikasi senyawa metil ester menggunakan GC-MS.

#### **E. Manfaat Penelitian**

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan data eksperimental terkait potensi kulit pisang kepok sebagai bahan baku katalis heterogen melalui proses kalsinasi.
2. Menyediakan informasi ilmiah mengenai karakteristik fisik katalis berbasis kulit pisang kepok, khususnya struktur morfologi permukaan, komposisi unsur, dan luas permukaan spesifik yang dianalisis dengan SEM dan BET serta data lainnya.

3. Menegaskan pentingnya metode karakterisasi SEM dan BET dalam memahami hubungan sifat fisik katalis dengan efisiensinya pada reaksi transesterifikasi biodiesel.
4. Membuktikan kemampuan katalis berbasis limbah kulit pisang kepok dalam mengonversi minyak kelapa sawit menjadi biodiesel ditandai terbentuknya FAME, 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 morfologi, komposisi unsur, luas permukaan, dan struktur kristal katalis heterogen dari kulit pisang kepok (*Musa acuminata* × *balbisiana* Colla) serta aplikasinya pada transesterifikasi minyak kelapa sawit, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Sintesis katalis heterogen berbasis kulit pisang kepok melalui proses kalsinasi pada suhu 750°C selama 3 jam berhasil menghasilkan material berkarakteristik basa. Hasil uji kebasaan menunjukkan nilai  $H_+$  lebih dari 9,3 dengan total kebasaan sebesar 0,76 mmol/g.
2. Pengujian EDX mendeteksi unsur kalium sebagai komponen dominan dengan persentase 15,90 %. Analisis difraksi sinar-X menunjukkan terbentuknya enam fase kristalin, yaitu  $Ca_3(PO_4)_2$ ,  $CaCO_3$ ,  $K_4P_2O_7$ ,  $K_2SiO_3$ ,  $K_2CO_3$ , dan KCl. Perhitungan menggunakan persamaan Scherrer menunjukkan ukuran kristalit pada fase penyusun katalis berada pada rentang 3,65–43,64 nm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa katalis memiliki struktur kristalin dengan ukuran kristalit yang bervariasi. Pengujian porositas memperlihatkan luas permukaan spesifik sebesar 20,90 m<sup>2</sup>/g dengan diameter pori 16,54 nm yang masuk dalam kategori mesopori. Walaupun citra mikroskop elektron menampilkan wujud permukaan yang sedikit menggumpal secara keseluruhan sifat fisikokimia katalis ini sudah cukup mendukung potensinya untuk aplikasi reaksi transesterifikasi.

3. Penggunaan katalis heterogen berbasis kulit pisang kepok pada reaksi transesterifikasi minyak kelapa sawit menghasilkan produk FAME dengan estimasi rendemen massa sebesar 73,92%. Hasil analisis GC-MS menunjukkan adanya 13 senyawa FAME dengan total luas area sebesar 99,48%, dengan C18:1 sebagai komponen yang paling dominan sebesar 51,84%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa produk yang diperoleh didominasi oleh senyawa metil ester. Namun, persentase luas area kromatogram tidak dapat langsung digunakan untuk menentukan konsentrasi maupun konversi masing-masing senyawa secara kuantitatif. Identifikasi senyawa juga masih didasarkan pada pencocokan spektrum dengan pustaka melalui nilai *similarity index*, sehingga diperlukan penggunaan standar pembandingan untuk memastikan identitas dan kadar senyawa secara lebih akurat. Selain itu, rendemen massa sebesar 73,92% masih merupakan nilai estimasi karena perhitungannya menggunakan asumsi densitas FAME dan massa minyak awal yang ditentukan berdasarkan jumlah katalis. Dengan demikian, katalis kulit pisang kepok mampu menghasilkan produk yang didominasi FAME, tetapi penentuan rendemen dan kuantitas produk masih memiliki keterbatasan.

#### **B. Saran**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran untuk penelitian selanjutnya adalah melakukan optimasi kondisi kalsinasi, terutama variasi suhu dan waktu kalsinasi, untuk memperoleh komposisi fase dan karakteristik katalis yang lebih optimal. Hal ini penting karena XRD menunjukkan  $K_2CO_3$  masih menjadi fase dominan, sedangkan  $K_2O$ ,  $KOH$ , dan  $CaO$  teridentifikasi

sebagai fase lainnya. Optimasi dapat diarahkan untuk mengetahui kondisi yang menghasilkan keseimbangan antara pembentukan fase aktif, luas permukaan, porositas, serta struktur kristalin katalis.

Selanjutnya, perlu dilakukan optimasi kondisi transesterifikasi, meliputi rasio molar metanol:minyak, konsentrasi katalis, suhu, dan waktu reaksi karena rendemen berbasis massa secara estimasi masih sebesar 73,92%. Penelitian lanjutan juga dapat menguji penggunaan co-solvent yang sesuai untuk meningkatkan kontak antara fase minyak dan metanol sehingga transfer massa dan aksesibilitas reaktan terhadap situs aktif katalis dapat ditingkatkan. Penggunaan co-solvent dapat dibandingkan dengan kondisi tanpa co-solvent untuk mengetahui pengaruhnya terhadap rendemen, pemisahan fasa, dan karakteristik produk.

Selain itu, dapat dikembangkan modifikasi atau pengompositan katalis dengan material berpori seperti  $\text{SiO}_2$  atau material lain yang sesuai untuk meningkatkan dispersi fase aktif dan memperbaiki aksesibilitas situs katalitik. Hal ini menarik karena  $\text{SiO}_2$  telah teridentifikasi sebagai salah satu komponen minor pada katalis berdasarkan EDX. Penelitian berikutnya juga dapat membandingkan katalis tanpa modifikasi dan katalis termodifikasi untuk mengetahui pengaruhnya terhadap luas permukaan, distribusi pori, kebiasaan, dan aktivitas katalitik.

Stabilitas dan penggunaan ulang katalis (reusability) juga perlu diuji untuk mengetahui apakah fase aktif dan sifat katalitik tetap bertahan setelah beberapa siklus reaksi. Karakterisasi katalis sebelum dan sesudah penggunaan dapat dilakukan untuk melihat kemungkinan perubahan morfologi, luas permukaan, fase kristalin, maupun pencucian unsur aktif ke dalam produk.

Pada analisis biodiesel, identifikasi GC-MS sebaiknya dilengkapi dengan standar internal dan standar senyawa pembanding sehingga dapat diperoleh konsentrasi absolut dan kadar FAME secara kuantitatif, bukan hanya berdasarkan persentase area kromatogram. Senyawa dengan Similarity Index (SI) sedang, overlap, atau tailing juga perlu dikonfirmasi menggunakan standar pembanding atau teknik analisis yang lebih selektif. Selain itu, massa bahan awal dan biodiesel sebaiknya ditentukan melalui penimbangan langsung, sehingga rendemen massa tidak lagi bergantung pada asumsi densitas.

Terakhir, biodiesel yang dihasilkan perlu diuji berdasarkan SNI 7182, meliputi densitas, viskositas kinematik, angka asam, kadar air, titik nyala, dan parameter mutu lainnya. Dengan demikian, penelitian lanjutan tidak hanya mengoptimalkan aktivitas katalis dan rendemen, tetapi juga dapat mengevaluasi stabilitas katalis, efisiensi proses, kuantifikasi FAME, dan mutu biodiesel secara menyeluruh.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdi, C., Miftahul, R., & Saputra, M. W. (2015). *Pemanfaatan Limbah Kulit Pisang Kepok ( Musa Acuminate L .) Sebagai Karbon Aktif Untuk Pengolahan Air Sumur Kota Banjarbaru : Fe DAN Mn*. 1(1), 8–15.
- Akintunde, A. M., Ajala, S. O., & Betiku, E. (2015). Optimization of Bauhinia monandra seed oil extraction via artificial neural network and response surface methodology : A potential biofuel candidate. *Industrial Crops & Products*, 67, 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.01.056>
- Atadashi, I. M., Aroua, M. K., Aziz, A. R. A., & Sulaiman, N. M. N. (2011). Refining technologies for the purification of crude biodiesel. *Applied Energy*, 88(12), 4239–4251. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.029>
- Bardestani, R., Patience, G. S., & Kaliaguine, S. (2019). Experimental methods in chemical engineering: specific surface area and pore size distribution measurements—BET, BJH, and DFT. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 97(11), 2781–2791. <https://doi.org/10.1002/cjce.23632>
- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal American Chemical Society*, 60(2), 309–319. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/ja01269a023>
- Changmai, B., Vanlalveni, C., Ingle, A. P., Bhagat, R., & Rokhum, L. (2020). *RSC Advances Widely used catalysts in biodiesel production : a review*. November. <https://doi.org/10.1039/d0ra07931f>
- Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). *Elements of X-ray Diffraction (2nd ed.)* (Morris Cohen (ed.)). Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Ellingham, S. (2018). *Scanning Electron Microscopy-Energy-Dispersive X-Ray ( SEM / EDX ) : A Rapid Scanning Electron Microscopy – Energy- Dispersive X-Ray ( SEM / EDX ) : A Rapid Diagnostic Tool to Aid the Identification of Burnt Bone and Contested Cremains \**. June. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13541>
- Etim, A. O., Musonge, P., & Eloka-Eboka, A. C. (2022). A green process synthesis of bio-composite heterogeneous catalyst for the transesterification of linseed-marula bi-oil methyl ester. *Results in Engineering*, 16(July), 100645. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100645>
- Fabiano, B., Reverberi, A. P., Borghi, A. Del, & Dovi, V. G. (2012). *Biodiesel Production via Transesterification : Process Safety Insights from Kinetic Modeling 1*. November. <https://doi.org/10.1134/S0040579512060097>
- Fadilah, S., Rahmawati, R., & Pkim, M. (2015). *Pembuatan Biomaterial dari Limbah Kulit Pisang ( Musa Paradisiaca )*. 2015(Snips), 45–48.
- Faruque, M. O., Razzak, S. A., & Hossain, M. M. (2020). Application of heterogeneous catalysts for biodiesel production from microalgal oil—a review. *Catalysts*, 10(9), 1–25. <https://doi.org/10.3390/catal10091025>
- Foroutan, R., Peighambardoust, S. J., Mohammadi, R., Peighambardoust, S. H., &

- Ramavandi, B. (2024). The potential of biochar derived from banana peel/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/ZIF-67@K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> as magnetic nanocatalyst for biodiesel production from waste cooking oils. *Results in Engineering*, 22(February), 102005. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102005>
- Gargazi, Hendrawani, H. (2022). Identifikasi Karakter Biodisel Minyak Jelantah Menggunakan Instrumen Gas Cromatografi Mass Spectroscopy ( GC-MS ) Identification of Characteristics of Used Cooking Oil Biodiesel Using Gas Chromatography Mass Spectroscopy ( GC-MS ) Instruments. *Empiricism Journal*, 3(2), 333–340.
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2018). Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. In *Microscopy and X-Ray Microanalysis* (Latest Edi). SpringerScience+BusinessMediaLLC. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>
- Gražulis, S., Daškevič, A., Merkys, A., Chateigner, D., Lutterotti, L., Quirós, M., Serebryanaya, N. R., Moeck, P., Downs, R. T., & Le Bail, A. (2012). Crystallography Open Database (COD): An open-access collection of crystal structures and platform for world-wide collaboration. *Nucleic Acids Research*, 40(D1), 420–427. <https://doi.org/10.1093/nar/gkr900>
- Guo, P., Zheng, C., Zheng, M., Huang, F., Li, W., & Huang, Q. (2013). Solid base catalysts for production of fatty acid methyl esters. *Renewable Energy*, 53, 377–383. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.011>
- Hammond, K. D., & Conner, W. C. (2013). Analysis of catalyst surface structure by physical sorption. In *Advances in Catalysis* (Vol. 56). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420173-6.00001-2>
- Hefney, M. S., Abdelmigeed, M. O., Ahmed, T. S., & Ismail, I. M. (2025). Optimized transesterification of unrefined palm and waste cooking oil blend to biodiesel using cement kiln dust catalyst. *Scientific Reports*, 15(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11752-x>
- Hermawan, D., Lestari, W., Sepriani, Y., Saragih, Y., & Hartati, S. (2023). Analisis Unsur Hara Makro N , P , K dan Mg Pupuk Organik Cair dari Bahan Batang dan Kulit Buah Pisang. *Jurnal Mahasiswa Agroteknologi (JMATEK)*, 4(2), 64–73.
- Inkson, B. J. (2016). Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, 17–43. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00002-X>
- Irwansyah, F. S., Amal, A. I., Diyanthi, E. W., Hadisantoso, E. P., Noviyanti, A. R., Eddy, D. R., & Risdiana, R. (2024). How to Read and Determine the Specific Surface Area of Inorganic Materials using the Brunauer-Emmett-Teller (BET) Method. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, 4(1), 61–70. <https://doi.org/10.17509/ajse.v4i1.60748>
- Jannah, R. (2008). *Reaksi Transesterifikasi Trigliserida Minyak Jarak Pagar*

- dengan Metanol menggunakan Katalis Padatan Basa  $K_2CO_3/y-Al_2O_3$  (UISkrip). Universitas Indonesia. <https://lib.ui.ac.id/detail.jsp?id=123308>
- Karo-Karo, A. L. A., Simanjuntak, W., & Baringbing, D. (2020). Conversion of rubber seed oil into biodiesel with potassium oxide alumina supported by Conversion of rubber seed oil into biodiesel with potassium oxide alumina supported by (  $K_2O / Al_2O_3$  ) catalyst. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 980(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/980/1/012058>
- Khorsand Zak, A., Abd. Majid, W. H., Abrishami, M. E., & Yousefi, R. (2011). X-ray analysis of ZnO nanoparticles by Williamson-Hall and size-strain plot methods. *Solid State Sciences*, 13(1), 251–256. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2010.11.024>
- Knothe, G. (2005). Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1059–1070. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.002>
- Kurniati, Y., Cholilie, I. A., Setyaningrum, P., Martak, F., Anggraini, D. G., & Haryadi, V. A. (2023). Oxalic Acid Production Of Banana Peel (Musa Textilia) Through Optimum Temperature And Time With Alkaline Method. *Indonesian Journal of Applied Research (IJAR)*, 4(1), 42–52. <https://doi.org/10.30997/ijar.v4i1.270>
- Lamba, B. Y., Jain, S., & Jha, S. (2024). Biodiesel from Palm Vegetable Oil. *Natural Resources*, 15(02), 51–60. <https://doi.org/10.4236/nr.2024.152004>
- Lopez, Y. F. (2014). Kinetika Kimia. In *e-Learning Politeknik Negeri Kupang*.
- Mahardika, G. B., Prabowo, A., Syarifuddin Oko, Muh Irwan, & Alvyano. (2026). Gc–Ms Characterization of Fatty Acid Alkyl Esters in Biodiesel Produced From Waste Cooking Oil. *Jurnal Crystal : Publikasi Penelitian Kimia Dan Terapannya*, 8(1), 107–114. <https://doi.org/10.36526/jc.v8i1.6976>
- Malabadi, R. B., Kolkar, K. P., & Chalannavar, R. K. (2023). Biodiesel production via transesterification reaction Biodiesel production via transesterification reaction. November. <https://doi.org/10.53022/oarjst.2023.9.2.0064>
- 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>
- Maroa, S., & Inambao, F. (2021). A review of sustainable biodiesel production using biomass derived heterogeneous catalysts. 3, 790–824. <https://doi.org/10.1002/elsc.202100025>
- 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>
- Mukminin, A., Dewi, B. A., Rina, U., Rony, S., Hikmah, S. N., Achmad, & Maftukhin. (2022). Sang Pencerah - Sang Pencerah. *Jurnal Ilmiah Universitas*

- Muhammadiyah Buton, Volume 8,(2), 312–325.  
[https://id.wikipedia.org/wiki/Sang\\_Pencerah#/media/Berkas:Sang\\_Pencerah.jpg](https://id.wikipedia.org/wiki/Sang_Pencerah#/media/Berkas:Sang_Pencerah.jpg)
- Muliyah, P., Aminatun, D., Nasution, S. S., Hastomo, T., & Setiana Sri Wahyuni Sitepu, T. (2020). Rekayasa Bioenergi. In *Journal GEEJ* (Vol. 7, Issue 2).
- Naderi, M. (2015). Progress in Filtration and Separation. In S. Tarleton (Ed.), *Elsevier Ltd*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2009-0-64471-8>
- Nurhayati, N., Muhdarina, M., Linggawati, A., & Siregar, S. S. (2025). *Synthesis and Characterization of CaO-SiO<sub>2</sub> Heterogeneous Catalyst of Blood Cockle Shells and Coconut Fiber Ash for Biodiesel Production from Crude Palm Oil*. x, 1–14. <https://doi.org/10.22146/ijc.91444>
- Oko, S., Mustafa, Kurniawan, A., & Willain, D. (2021). Sintesis Biodiesel dari Minyak Kedelai Melalui Reaksi Transesterifikasi Dengan Katalis CaO/NaOH. *Jurnal Teknologi* Volume, 13(1), 1–6. <https://dx.doi.org/10.24853/jurtek.13.1.1-6>
- Oyeyinka, B. O., & Afolayan, A. J. (2019). Comparative evaluation of the nutritive, mineral, and antinutritive composition of musa sinensis l. (banana) and musa paradisiaca l. (plantain) fruit compartments. *Plants*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/plants8120598>
- 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>
- Pecharsky Vitalij K, & Zavalij Peter Y. (2008). *Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of*.
- Ramos, M., Dias, A. P. S., Puna, J. F., Gomes, J., & Bordado, J. C. (2019). Biodiesel production processes and sustainable raw materials. *Energies*, 12(23). <https://doi.org/10.3390/en12234408>
- Rezablina, M., Zamhari, M., & Zikri, A. (2023). Proses Transesterifikasi Biodiesel Menggunakan Katalis Sodium Methoxide Dan Katalis Berbasis Karbon Aktif Dari Tempurung Kelapa Yang Diimpregnasi NaOH. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(4), 7033–7039. <https://doi.org/10.32672/jse.v8i4.6773>
- Rezeika, S. H., Ulfin, I., & Ni'mah, Y. L. (2018). Sintesis Biodiesel dari Minyak Jelantah dengan Katalis NaOH dengan Variasi Waktu Reaksi Transesterifikasi dan Uji Performanya dengan Mesin Diesel. *Akta Kimia Indonesia*, 3(2), 175. <https://doi.org/10.12962/j25493736.v3i2.3098>
- Rosli, N. S., Siang, L. Y., Yahya, N. Y., & Abdul Halim, N. A. (2023). Synthesis of Biodiesel from Used Frying Oil Using Modified Banana Peel Waste as A Heterogeneous Catalyst. *Platform: A Journal of Engineering*, 7(3), 16. <https://doi.org/10.61762/pajevol7iss3art24133>
- Ruhaiya, F., Nisa, H. C., Hafidh, M., & Kurniasih, E. (2020). Jurnal Review : Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit Pada Produksi Biodiesel Dengan

- Katalis Heterogen CaO. *Jurnal Teknik Dan Teknologi*, 15(30), 23–29. [www.onlinedoctranslator.com](http://www.onlinedoctranslator.com)
- Salsabila, N., Ernah, E., Trimo, L., & Suminartika, E. (2024). Pengembangan Biodiesel Kelapa Sawit Indonesia dalam Mencapai Target Bauran Energi Baru Terbarukan Tahun 2025. *Mimbar Agribisnis : Jurnal Pemikiran Masyarakat Ilmiah Berwawasan Agribisnis*, 10(2), 1709. <https://doi.org/10.25157/ma.v10i2.13453>
- Santoso, A., Agustin, N., Sumari, S., Marfuah, S., Retnosari, R., Rachman, I. B., Wijaya, A. R., & Asrori, M. R. (2022). Synthesis of methyl esters from palm oil, candlenut oil, and sunflower seed oil and their corrosion phenomena on iron nail. *AIMS Materials Science*, 9(5), 719–732. <https://doi.org/10.3934/matricsci.2022044>
- Satapathy, A., Saikia, K., & Rokhum, S. L. (2023). *Biodiesel Production Using a Banana Peel Extract-Mediated Highly Basic Heterogeneous Nanocatalyst*.
- Schuetzke, J., Benedix, A., Mikut, R., & Reischl, M. (2021). Enhancing deep-learning training for phase identification in powder X-ray diffractograms. *IUCrJ*, 8, 408–420. <https://doi.org/10.1107/S2052252521002402>
- 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(July), 1057–1062. <https://doi.org/10.3303/CET23106177>
- Sinta, D., & Hasibuan, R. (2023). Analisis Morfologi Tanaman Pisang Kepok (Musa paradisiaca Var. Balbisiana colla) di Desa Tanjung Selamat Kabupaten Labuhanbatu Selatan. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 11(1), 86. <https://doi.org/10.33394/bioscientist.v11i1.7115>
- Sulastri, Y. (2010). *Sintesis Methyl Ester Sulfonic Acid ( Mesa ) Dari Crude Palm Oil ( CPO ) Menggunakan Single Tube Falling Film Reactor*. <https://pdfcookie.com/documents/yeni-sulastri-f351080121-5lq30r69k0v7>
- Tarigan, J. B., Sitepu, E. K., Perangin-angin, S., Simanungkalit, S. R., & Zega, N. P. (2023). Utilization of waste banana peels as heterogeneous catalysts in room-temperature biodiesel production using a homogenizer †. *RSC Advances*, 13, 6217–6224. <https://doi.org/10.1039/d3ra00016h>
- Tefera, N. T., Nallamothu, R. B., Alemayehu, G., & Kefale, Y. (2024). Optimization, characterization, and GC-MS analysis of CSOME produced using alkali catalyzed transesterification. *Energy Conversion and Management*: X, 22(February), 100549. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100549>
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>

- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Wang, J., & Azam, W. (2024). Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. *Geoscience Frontiers*, 15(2), 101757. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101757>
- Whetstine, C. R. (2020). GC-MS Analysis of Synthesized Biodiesel GC-MS Analysis of Synthesized Biodiesel. *Forensic Science Master's Projects*. 1, 1–52. [https://digitalcommons.buffalostate.edu/forensic\\_science\\_projects/1](https://digitalcommons.buffalostate.edu/forensic_science_projects/1)
- Williamson, G. K., & Hall, W. H. (1953). X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram. *Acta Metallurgica*, 1(1), 22–31. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(53\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0001-6160(53)90006-6)
- Yani, Handa, M., Nofita, & Husein, S. (2025). Analysis Of Mineral Content ( Calcium , Potassium , Phosphorus ) In Kepok Banana Peel And Ambon Banana With Mpaes Method. *Jurnal Riset Kefarmasian Indonesia*, 7(1). <https://www.jurnalfarmasi.or.id/index.php/jrki/article/view/705/287>
- Yani, M. H., Nofita, & Husein, S. (2025). Analysis of Mineral Content (Calcium, Potassium, Phosphorus) in Kepok Banana and Ambon Banana with MPAES Method. *Jurnal Riset Kefarmasian Indonesia*, 7(1), 153–170.
- Yudha, R. F., Setiawan, A., & Mayangsari, N. E. (2017). *Identifikasi Komponen FAME ( Fatty Acid Methyl Ester ) pada Biodiesel yang Disintesis dari Minyak Goreng Bekas*. 2623, 2013–2018.