

**PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT DENGAN PADUAN ZEOLIT
ALAM LAMPUNG TERMODIFIKASI SEBAGAI KATALIS DAN PASIR
PUTIH SEBAGAI *HEAT EXCHANGER***

Skripsi

Oleh

**MAULANA BINTANG RABBANI
2017011100**



**JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRACT

PALM OIL PYROLYSIS WITH MODIFIED LAMPUNG NATURAL ZEOLITE ALLOY AS CATALYST AND WHITE SAND AS HEAT EXCHANGER

By

MAULANA BINTANG RABBANI

In this reseach, the transformation of Lampung Natural Zeolite (LNZ) which has Si/Al ratio = 6.4 to 3.0 and calcination temperature variation of 600 °C (catalyst A), 700 °C (catalyst B), and 800 °C (catalyst C). The modified ZAL was characterized using X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and Particle Size Analyzer (PSA).

The XRD characterization results showed the presence of crystalline and amorphous phases with the best crystalline phase of modified LNZ which has similarities with zeolite-Y showing faujasite groups produced on catalyst B with a calcination temperature of 700°C. SEM characterization results show the surface morphology on catalyst A and catalyst B has a circular crystal shape. FTIR characterization results showed the presence of peaks indicating siloxane (Si-O-Si/Al-O-Al) and silanol (Si-OH/Al-OH) groups on modified LNZ. PSA characterization results showed only one particle group, which means the crystals are homogeneously distributed.

The transformed LNZ was tested for its catalytic activity in the pyrolysis process of palm oil to produce bio crude oil (BCO). The BCO produced was then characterized using Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS). GC-MS characterization results showed the highest hydrocarbon content in BCO using catalyst B and white sand heat exchanger, which was 74% with biogasoline content of 21.27% and non-biogasoline content of 52.46%.

Keywords: Lampung natural zeolite, transformed LNZ, heat exchanger, bio crude oil (BCO), pyrolysis, palm oil

ABSTRAK

PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT DENGAN PADUAN ZEOLIT ALAM LAMPUNG TERMODIFIKASI SEBAGAI KATALIS DAN PASIR PUTIH SEBAGAI *HEAT EXCHANGER*

Oleh

MAULANA BINTANG RABBANI

Pada penelitian ini telah dilakukan transformasi Zeolit Alam Lampung (ZAL) yang memiliki nisbah Si/Al= 6,4 menjadi 3,0 dan variasi suhu kalsinasi 600 °C (katalis A), 700 °C (katalis B), dan 800 °C (katalis C). ZAL termodifikasi dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction (XRD)*, *Scanning Electron Microscopy (SEM)*, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*, dan *Particle Size Analyzer (PSA)*.

Hasil karakterisasi XRD menunjukkan adanya fasa kristal dan amorf dengan fasa kristal terbaik ZAL termodifikasi yang memiliki kemiripan dengan zeolit-Y yang menunjukkan gugus faujasit dihasilkan pada katalis B dengan suhu kalsinasi 700 °C. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan morfologi permukaan pada katalis A dan katalis B mempunyai bentuk kristal lingkaran. Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan adanya puncak yang menunjukkan gugus siloksan (Si-O-Si/Al-O-Al) dan silanol (Si-OH/Al-OH) pada ZAL termodifikasi. Hasil karakterisasi PSA menunjukkan hanya terdapat 1 kelompok partikel, yang berarti kristal terdistribusi secara homogen.

ZAL hasil transformasi diuji aktivitas katalitiknya pada proses pirolisis minyak kelapa sawit yang menghasilkan *bio crude oil (BCO)*. BCO yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi menggunakan Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS). Hasil karakterisasi GC-MS menunjukkan kandungan hidrokarbon terbanyak pada BCO menggunakan katalis B dan *heat exchanger* pasir putih yaitu 74% dengan kandungan biogasolin sebesar 21,27% dan non biogasolin sebesar 52,46%.

Kata Kunci: zeolit alam Lampung, ZAL termodifikasi, *heat exchanger*, *bio crude oil (BCO)*, pirolisis, minyak kelapa sawit

**PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT DENGAN PADUAN ZEOLIT
ALAM LAMPUNG TERMODIFIKASI SEBAGAI KATALIS DAN PASIR
PUTIH SEBAGAI *HEAT EXCHANGER***

Oleh

MAULANA BINTANG RABBANI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

Judul Penelitian : **Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Dengan Paduan Zeolit Alam Lampung Termodifikasi Sebagai Katalis dan Pasir Putih Sebagai *Heat Exchanger***

Nama Mahasiswa : **Maulana Bintang Rabbani**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2017011100**

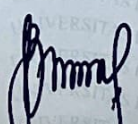
Jurusan : **Kimia**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



1. Komisi Pembimbing


Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D.
NIP. 195907061988111001


Prof. Dr. Kamisah D. Pandiangan, M.Si.
NIP. 197212051997032001

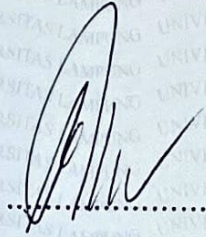
2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA


Dr. Mita Riliyanti, M.Si.
NIP. 197205302000032001

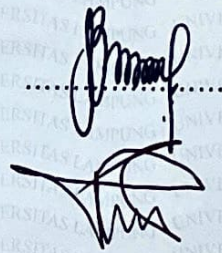
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D.



Sekretaris : Prof. Dr. Kamisah D. Pandiangan, M.Si.



Anggota : Prof. Sutopo Hadi, Ph.D.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 28 Oktober 2024

**SURAT PERNYATAAN
KEASLIAN SKRIPSI**

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa : Maulana Bintang Rabbani
Nomor Pokok Mahasiswa : 2017011100
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul **“Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Dengan Paduan Zeolit Alam Lampung Termodifikasi Sebagai Katalis Dan Pasir Putih Sebagai *Heat Exchanger*”** adalah benar karya sendiri dan saya tidak keberatan jika sebagian atau seluruh data di dalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi sesuai dengan kesepakatan.

Bandar Lampung, 24 November 2024
Menyatakan



Maulana Bintang Rabbani
2017011100

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Purwakarta, Jawa Barat pada tanggal 18 Mei 2002. Penulis bernama Maulana Bintang Rabbani merupakan putra kedua dari Bapak Budi Sugiarto dan Ibu Retno Risyanti (almarhumah), penulis memiliki kakak laki-laki bernama Satrio Abdurrahman. Penulis telah menyelesaikan pendidikan taman kanak-kanak di TK Sabili, sekolah dasar di SD Negeri Griya Bandung Indah, sekolah menengah pertama di SMP Negeri 48 Bandung, dan sekolah menengah atas di SMA Istiqamah Bandung. Setelah lulus SMA penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan S1 Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) pada tahun 2020.

Selama menjadi mahasiswa penulis banyak mengikuti berbagai kegiatan akademik maupun non akademik. Kegiatan akademik yang pernah diikuti penulis yaitu pernah menjadi anggota peneliti pada program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) di bidang penelitian pada tahun 2023, asisten Praktikum Kimia Dasar dan Praktikum Kimia pada semester ganjil tahun 2023, Praktikum Kimia Fisik 2 pada semester genap tahun 2024, mendapatkan pendanaan Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) pada tahun 2023 dari Belmawa Dikti., membuat jurnal terindeks Scopus Q3 yang berjudul “*Transport of Malachite Green Using the Poly Eugenol-Based Polymer Inclusion Membrane (PIM) Method*”, hak paten atas “Formula Membran Pim (*Polymer Inclusion Membrane*) Yang Mengandung *Polyeugenol* Untuk Transpor *Malachite Green* (Mg)”, Hak Cipta atas “Buku Saku: Polimerisasi Eugenol Menggunakan Asam Lewis Boron Triflouro Dietileter”, dan pembicara pada *The 4th Science and Mathematics International Conference (SMIC) 2024*.

Penulis dalam menyelesaikan pendidikannya telah melakukan kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Talagening, Kecamatan Kota Agung Barat, Kabupaten Tanggamus pada tahun 2023 dan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT. Clariant Indonesia yang diberi judul “Pengaruh Penambahan Wetting Agent Pada Performa Coloristik Pada Formula Cat *High Pigment Volume Concentration* (PVC)”.

Selain mengikuti kegiatan akademik, penulis juga mengikuti kegiatan non akademik. Kegiatan non akademik yang pernah diikuti penulis yaitu Himpunan Mahasiswa Kimia (Himaki) dimulai sebagai kader muda pada tahun 2020, anggota Bidang Sains dan Penalaran Ilmu Kimia pada tahun 2021, hingga aktif menjadi ketua Bidang Sains dan Penalaran Ilmu Kimia pada tahun 2022. Penulis juga aktif dalam menjadi anggota kepanitiaan baik sebagai peserta maupun panitia, seperti anggota Divisi Humas pada kegiatan Chemistry Expo XXV Tahun 2021 dan sebagai anggota Divisi Acara pada kegiatan KWI XXII Tahun 2021. Selain itu, penulis menjadi dewam pembina Himpunan Mahasiswa Kimia (Himaki) pada tahun 2023.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan segala kerendahan hati, kupersembahkan karya ini sebagai wujud tanda bakti dan tanggung jawabku kepada:

Allah SWT

Ketiga orang tuaku, Bapak Budi Sugiarto, Ibu Retno Risyanti (almarhumah), dan Ibu Lies Komarasari, yang senantiasa mendoakan, memberikan kasih sayang, cinta, dukungan, motivasi, dan segalanya untukku.

Kakakku tersayang, saudara-saudaraku, dan sahabat-sahabatku.

Pembimbing penelitianku Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D., Prof. Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, M.Si., dan Prof. Sutopo Hadi, Ph.D.

Almamater tercinta Universitas Lampung

Diriku

MOTTO

"Maka, sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan.
Sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan,"
(QS. Asy-Syarh [94]: 5-6)

"Orang yang hebat adalah orang yang memiliki kemampuan menyembunyikan kesusahan, sehingga orang lain mengira bahwa ia selalu senang."
(Imam Syafi'i)

"Semua ada waktunya, jangan membandingkan hidupmu dengan hidup orang lain. Tidak ada perbandingan antara matahari dan bulan, mereka bersinar saat waktunya tiba."
(BJ Habibie)

"Mari bangkit menjadi lebih kuat walaupun terasa sakit."

SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT atas Rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Dengan Paduan Zeolit Alam Lampung Termodifikasi Sebagai Katalis Dan Pasir Putih Sebagai *Heat Exchanger*”**. Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga dan para sahabat serta umatnya di akhir zaman. Semoga di yaumul akhir kelak mendapatkan syafa'atnya. *Aamiin yarabbal alamiin.*

Penulis menyadari bahwa dalam proses pengerjaan dan penulisan skripsi ini tidak terlepas dari kesulitan dan hambatan, namun semua itu dapat terlewati berkat rahmat dan ridho Allah SWT serta bantuan, arahan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini sebagai wujud rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa Sang pencipta langit dan bumi, serta memberikan kehidupan kepada kita semua.
2. Bapak Budi Sugiarto, Almarhumah Ibu Retno Risyanti, dan Ibu Lies Komarasari sebagai orang tua yang selalu mendukung penulis dalam segala hal.
3. Kakak penulis Satrio Abdurrahman yang senantiasa memberi semangat dan melatih kesabaran pada penulis
4. Keluarga besar penulis yang selalu mendukung dalam hal moral dan finansial, serta memberikan semangat kepada penulis hingga saat ini.
5. Bapak. Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D. selaku Dosen Pembimbing I atas segala bimbingan, arahan, masukan, kebaikan dan seluruh ilmu pengetahuan

- yang telah diberikan selama proses perkuliahan hingga penyelesaian skripsi.
6. Ibu Prof. Kamisah D. Pandiangan, M.Si. selaku Dosen Pembimbing II atas segala bimbingan, arahan, masukan, kebaikan dan seluruh ilmu pengetahuan yang telah diberikan selama proses perkuliahan hingga penyelesaian skripsi.
 7. Bapak Prof. Sutopo Hadi, Ph.D. selaku Dosen Pembahas yang telah membimbing, memberikan saran dan kritik yang membangun sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.
 8. Bapak Mulyono, Ph.D. selaku pembimbing akademik yang telah membimbing, mengarahkan, serta memberikan kesempatan untuk berdiskusi terkait perkuliahan dan kemajuan belajar.
 9. Ibu Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
 10. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung atas seluruh dedikasi dan ilmu yang diberikan kepada penulis selama masa perkuliahan.
 11. Bapak dan Ibu Tenaga Kependidikan khususnya Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
 12. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
 13. Mba Endah Pratiwi, S.Si., M.Si. selaku kakak, guru, pembimbing, sekaligus rekan penulis sejak penelitian dimulai. Terima kasih untuk segala bentuk dukungan, pembelajaran, saran, dan semangat yang telah ditularkan kepada penulis
 14. Sahabat terbaik penulis Fahmi, Mae, Hasan, Jihan, Ratu, Adam, Risma yang selalu bersedia mendoakan dan menemani penulis.
 15. Qori dan Nadia selaku teman penelitian yang selalu kebersamai penelitian penulis hingga selesai.
 16. Teman-teman penulis: Sylfia, Sabil, Jordy, Rahmad, Fadillah, Nurul, Gom teman-teman Kimia Angkatan 2020, dan teman-teman lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.
 17. Teman-teman laboratorium polimer: Wikka, Uli, Nisa, Rekia, dan Tasya terima kasih atas segala bantuannya dalam menemani penulis selama melakukan penelitian.

18. Teman PKL Roni, Sulaiman, dan Salwa terima kasih atas segala bantuannya selama 40 hari dalam menjalankan PKL.
19. Teman Hidup 40 hari: Dela, Nasti, Else, Aji, Ivan, Dini Oa terima kasih atas segala bantuan dan kebersamaan dalam menjalani KKN.
20. Teman PKM RE: Kak, Annuy, Ayu, dan Bagus terima kasih atas pengalaman berharga yang telah diberikan.
21. Pimpinan Himaki Periode 2022 Sabil, Cikal, Nabila, Arip, Fadillah, Qori, Sulaiman, Sylfia, Dwi, Ayu, Ibnah, Dian, Zidan, Nadia terima kasih telah tumbuh dan berkembang bersama baik suka maupun duka.
22. Seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung penulis yang tidak dapat dituliskan satu persatu.
23. Kepada diri saya sendiri, Maulana Bintang Rabbani, terima kasih karena telah berhasil menyelesaikan skripsi dengan segala hambatan yang telah dilalui. Terima kasih karena telah mampu bertahan hingga selesai dan mendapatkan gelar sarjana sains.

Semoga Allah SWT membalasnya dengan pahala yang berlipat ganda atas bantuan yang telah diberikan kepada penulis, Aamiin. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat beberapa kesalahan dan jauh dari kata kesempurnaan, namun penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan di masa yang akan datang.

Bandar Lampung, 22 November 2024

Penulis

Maulana Bintang Rabbani

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Manfaat Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Konversi Biomassa Menjadi Bioenergi	5
2.2. Pirolisis Biomassa.....	8
2.3. Transformasi Zeolit Alam.....	13
2.4. Karakterisasi Zeolit.....	14
2.5. Analisis dengan <i>Gas Chromatography–Mass Spectrometry</i> (GC-MS)..	17
III. METODE PENELITIAN	20
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	20
3.2. Bahan dan Alat.....	20
3.3. Prosedur Penelitian	21
3.4. Percobaan Pirolisis.....	23
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	24
4.1. Pengantar.....	24
4.2. Karakterisasi Zeolit Alam Lampung.....	24
4.3. Transformasi Zeolit Alam dan Karakterisasi Zeolit Alam Termodifikasi	26
4.4. Percobaan Pirolisis.....	31
V. KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1. Kesimpulan	43
5.2. Saran	44
DAFTAR PUSTAKA	45

LAMPIRAN.....	51
Lampiran 1. Perhitungan Penyesuaian Rasio Si/Al Transformasi ZAL.....	52
Lampiran 2. Perhitungan Penyesuaian Rasio NaOH.....	53
Lampiran 3. Kondisi Instrumen XRD	54
Lampiran 4. Komposisi Kimia BCO Dihasilkan Dari Percobaan Pirolisis Menggunakan Berbagai Katalis	55

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Perbandingan data XRD untuk zeolit-A Standar IZA dan zeolit-A Hasil Sintesis	15
2. Komposisi kimia <i>liquid fuel</i> dari pirolisis campuran limbah singkong dan minyak biji karet	19
3. Data hasil analisis XRF	25
4. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit	35
5. Komposisi relatif BCO yang dihasilkan menggunakan <i>heat exchanger</i> dan katalis yang berbeda	41
6. Komposisi BCO hasil pirolisis dengan penambahan katalis A	55
7. Komposisi BCO hasil pirolisis dengan penambahan katalis A dan <i>heat exchanger</i>	56
8. Komposisi BCO hasil pirolisis dengan penambahan katalis B dan <i>heat exchanger</i>	57
9. Komposisi BCO hasil pirolisis dengan penambahan katalis C dan <i>heat exchanger</i>	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Reaksi transesterifikasi	6
2. Mekanisme pirolisis	10
3. Struktur zeolit.....	12
4. Difraktogram zeolit alam Lampung teraktivasi	15
5. GC-Kromatogram <i>liquid fuel</i> dari pirolisis campuran limbah singkong	18
6. Hasil karakterisasi SEM ZAL sebelum ditransformasi.....	25
7. Difraktogram (a) standar IZA zeolit -Y (b) katalis A, (c) katalis B, dan (d) katalis C dan identifikasi fasa menggunakan Match! Version 3.	27
8. Perbandingan difraktogram (a) katalis A dengan zeolit-Y (b) katalis B dengan zeolit-Y (c) katalis C dengan zeolit-Y.....	28
9. Mikrograf (a) katalis A dengan perbesaran 5.000x (b) katalis B dengan perbesaran 5.000x (c) katalis C dengan perbesaran 5.000x	29
10. Spektrum FTIR (a) katalis A, (b) katalis B, dan (c) katalis C.....	30
11. Grafik hasil PSA (a) katalis A, (b) katalis b, dan (c) katalis C	31
12. Rangkaian alat pirolisis	32
13. Hasil pirolisis BCO (a) minyak kelapa sawit (b) penambahan katalis A (c) penambahan katalis A dan <i>heat exchanger</i> (d) penambahan katalis B dan <i>heat exchanger</i> (e) penambahan katalis C dan <i>heat exchanger</i>	33
14. Kromatogram GC-MS BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit	34
15. Komposisi relatif BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit.	36

16. Kromatogram GC-MS BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan penambahan katalis A.	36
17. Komposisi relatif BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan penambahan katalis A.	37
18. Kromatogram GC-MS BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan penambahan <i>heat exchanger</i> dan katalis (a) katalis A, (b) katalis B, (c) katalis C	38
19. Komposisi relatif BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan penambahan <i>heat exchanger</i> dan katalis (a) katalis A, (b) katalis B, (c) katalis C	39
20. Kandungan biogasolin BCO yang dihasilkan menggunakan katalis	42

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan energi yang berasal dari bahan bakar fosil di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan melonjaknya jumlah penduduk dan kegiatan ekonomi (Wiratmaja dan Elisa, 2020). Berdasarkan data dari Kementerian ESDM RI, sumber energi utama di Indonesia adalah bahan bakar fosil dengan konsumsi mencapai lebih dari 80% dari kebutuhan total, dan sekitar 50% merupakan Bahan Bakar Minyak (BBM), terutama untuk sektor transportasi (Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2021). Akibat dari penggunaan bahan bakar fosil yang terus meningkat, ketersediaan bahan bakar fosil, khususnya minyak bumi, terus berkurang. Untuk mengatasi masalah ketersediaan sumber energi tersebut, upaya pengembangan energi baru terbarukan (EBT) terus digiatkan di berbagai negara, termasuk Indonesia (Wisudawati dan Fijra, 2021).

Salah satu sumber energi baru terbarukan yang sangat potensial dan aman terhadap lingkungan adalah sumber energi yang dihasilkan dari biomassa. Secara umum, sumber energi yang berasal dari biomassa dikenal sebagai bioenergi (Ulya dan Siswani, 2017). Pemanfaatan biomassa terus dikembangkan karena biomassa dapat dikonversi menjadi berbagai jenis EBT dengan menggunakan proses biologi, kimia, dan fisika (Simanjuntak *et al.*, 2019).

Diantara proses konversi biomassa menjadi EBT, pirolisis menjadi salah satu metode yang terus dikembangkan. Pirolisis merupakan proses termal pada suhu antara 400-1400°C untuk merengkah/memecah molekul biomassa berukuran besar menjadi tiga jenis produk yang lebih sederhana (Papuga *et al.*, 2023), yakni gas berukuran molekul kecil seperti CO, CO₂, CH₄, dan H₂ (Collard and Blin, 2014), produk cair yang secara umum dikenal sebagai *bio-crude oil* (BCO), dan produk padat yang secara umum dikenal sebagai *biochar* (Simanjuntak *et al.*, 2021). Dari tiga jenis produk hasil pirolisis tersebut, BCO merupakan salah satu produk yang sangat penting dalam pengembangan EBT. BCO terdiri dari hidrokarbon C₅-C₂₀ yang karakteristiknya mirip dengan bahan bakar fosil sehingga dapat menjadi alternatif sebagai EBT (Simanjuntak *et al.*, 2021). Produksi BCO dari proses pirolisis telah banyak dilakukan dengan menggunakan berbagai macam biomassa seperti, jerami padi (Chen *et al.*, 2019), minyak biji karet (Khasanah dkk., 2023), minyak kelapa (Al-Muttaqii *et al.*, 2019), minyak jarak (Chauke *et al.*, 2019), dan minyak kelapa sawit (Febriyanti *et al.*, 2021).

Pada proses pirolisis dibutuhkan suhu yang relatif tinggi, sehingga diperlukan bantuan katalis untuk menurunkan suhu pada proses tersebut (Fadillah *et al.*, 2021). Selain menurunkan suhu, katalis juga berperan penting dalam menentukan komposisi BCO yang dihasilkan (Shah *et al.*, 2022). Berdasarkan penelitian sebelumnya, beberapa jenis katalis telah banyak digunakan seperti zeolit-A (Simanjuntak *et al.*, 2021), zeolit-X (Febriyanti *et al.*, 2021), dan zeolit alam Lampung (Ginting *et al.*, 2019). Zeolit alam Lampung (ZAL) memiliki kandungan klinoptilolit > 91% dengan rasio Si/Al pada rentang 5,0-6,0. ZAL memiliki karakteristik zeolit yang stabil, memiliki luas permukaan yang besar, pengayak molekul dan katalis yang baik, serta kapasitas tukar kation yang tinggi (Azizah and Rachman, 2023). Faktor lain untuk menurunkan biaya energi adalah dengan mempercepat terjadinya proses perengkahan. Untuk tujuan ini, salah satu cara yang dapat ditempuh adalah dengan menggunakan penukar panas (*heat exchanger*) yang membantu distribusi panas agar merata pada bahan baku yang diolah (Jamil *et al.*, 2023).

Berdasarkan peran katalis yang telah dipaparkan, dalam penelitian ini dipelajari pirolisis minyak kelapa sawit menggunakan ZAL termodifikasi dengan nisbah molar Si/Al= 3 sebagai katalis dikarenakan belum dipelajari tentang modifikasi ZAL menjadi zeolit sintetis dengan nisbah Si/Al= 3 serta pengaruh suhu kalsinasi terhadap sifat katalitik dari zeolit sintetis hasil modifikasi tersebut terhadap komposisi BCO yang dihasilkan. Zeolit alam termodifikasi dengan Si/Al= 3 yang terbentuk dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction (XRD)*, *Fourier Transform InfraRed (FTIR)*, *Scanning Electron Microscope (SEM)*, *X-Ray Fluorescence (XRF)*, dan *Particle Size Analyzer (PSA)* selanjutnya digunakan sebagai katalis pada pirolisis minyak kelapa sawit untuk mendapatkan BCO. BCO yang dihasilkan dianalisis menggunakan *Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS)*. Selain peran katalis pada proses pirolisis, peran *heat exchanger* pasir putih pada proses pirolisis juga dipelajari pada penelitian ini. Pasir putih dipilih sebagai *heat exchanger* karena pada penelitian terdahulu penggunaan *heat exchanger* menunjukkan bahwa pasir putih dapat mempercepat proses perengkahan pada proses pirolisis.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan yaitu sebagai berikut:

1. Mendapatkan ZAL termodifikasi dengan nisbah Si/Al=3.
2. Menghasilkan ZAL hasil termodifikasi dengan analisis XRD, SEM, FTIR, dan PSA.
3. Menguji coba ZAL termodifikasi pada proses pirolisis minyak kelapa sawit.
4. Menganalisis BCO yang dihasilkan dengan instrumen GC-MS.

1.3. Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat sebagai upaya pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi modifikasi zeolit alam Lampung dan teknologi pirolisis biomassa. Manfaat lain dari penelitian ini adalah mendapatkan informasi peran *heat exchanger* untuk proses pirolisis dan membuka peluang untuk meningkatkan nilai ekonomis zeolit alam Lampung.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Konversi Biomassa Menjadi Bioenergi

Biomassa adalah bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintesis, baik berupa produk pertanian maupun buangan seperti limbah organik dari kegiatan rumah tangga maupun industri (Parinduri dan Parinduri, 2020). Selain penggunaan tradisional, penggunaan lain dari biomassa yang terus dikembangkan saat ini adalah sebagai bahan baku untuk produksi sumber energi baru terbarukan (EBT) dalam upaya mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil yang cadangannya di alam terus menipis. EBT juga jauh lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan sumber energi fosil, sehingga dampak lingkungan yang timbul dari penggunaannya jauh lebih rendah (Yue *et al.*, 2014). Secara umum, produksi EBT dari biomassa dapat dilakukan dengan metode biokimia, metode kimia, dan metode termokimia.

2.1.1. Metode biokimia

Metode biokimia dalam pengolahan biomassa menghasilkan bioetanol dan biogas. Bioetanol adalah bahan bakar nabati yang memiliki potensi untuk sumber energi dan keamanan lingkungan dibandingkan bahan bakar fosil. Hingga saat ini, banyak sumber daya biomassa telah diselidiki untuk produksi bioetanol, yang secara luas dapat diklasifikasikan ke dalam gula, pati, dan lignoselulosa. Konversi biomassa menjadi bioetanol sangat bervariasi tergantung pada sifat bahan baku, sehingga hanya beberapa bahan baku yang telah dieksploitasi secara komersial

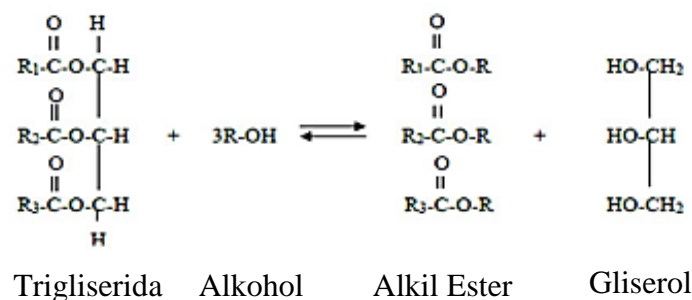
(Zabed *et al.*, 2017). Bioetanol dapat diperoleh dari beberapa biomassa seperti jerami padi (Sukaryani, 2018), tongkol jagung (Kalsum, 2017), limbah kulit jeruk (Rajeswari *et al.*, 2022), dan pelepah kelapa sawit (Muhammad *et al.*, 2023).

Selain bioetanol, biogas juga dapat diperoleh dengan metode biokimia. Biogas merupakan produk dari proses anaerobik yang sebagian besar disusun oleh gas metana (CH₄) (Bedoić *et al.*, 2019). Biogas dapat diperoleh dari berbagai baku antara lain limbah pertanian dan peternakan (Luthfi dan Fitria, 2022) dan sampah rumah makan dan rumah tangga (Hendrasarie dan Edison, 2021) sehingga berperan ganda sebagai sumber energi dan mengurangi dampak lingkungan oleh limbah maupun sampah. Biogas dapat dengan mudah disimpan, sehingga dapat berfungsi untuk menghasilkan panas dan listrik dalam skala rumah tangga (Kasinath *et al.*, 2021).

2.1.2. Metode Kimia

Pengolahan biomassa secara metode kimia dilakukan dengan memanfaatkan reaksi transesterifikasi minyak nabati atau lemak hewan untuk mengubah gliserida menjadi monoalkil ester asam lemak yang dikenal sebagai biodiesel (Ulya dan Siswani, 2017). Istilah biodiesel digunakan karena monoalkil ester asam lemak yang dihasilkan dari transesterifikasi minyak nabati atau lemak hewan memiliki sifat-sifat yang mirip dengan molekul yang terdapat dalam diesel fosil (petrokimia) (Suleman *et al.*, 2019).

Berikut merupakan mekanisme reaksi transesterifikasi trigliserida yang menghasilkan gliserol dan alkil ester (biodiesel).



Gambar 1. Reaksi transesterifikasi (Ulya dan Siswani, 2017)

Saat ini biodiesel telah digunakan sebagai bahan bakar dalam bentuk bauran dengan diesel petrokimia dalam berbagai perbandingan seperti 30% biodiesel dan 70% bahan bakar fosil (B30) (Asnawi *et al.*, 2022), 10% biodiesel dan 90% bahan bakar fosil (B20) (Igbokwe *et al.*, 2019) juga 75% solar dan 22% biodiesel (Caligiuri *et al.*, 2019). Untuk meningkatkan ketersediaan dan menurunkan harganya, produksi biodiesel terus dikembangkan dari beragam bahan baku, antara lain minyak kelapa (Rastini *et al.*, 2022), minyak jelantah (Elma *et al.*, 2018), minyak kelapa sawit (Daryono *et al.*, 2022) , dan minyak jarak kaliki (Riyanti, 2019)

2.1.3. Metode Termokimia

Proses produksi *biofuel* secara termokimia dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu gasifikasi, liquefaksi, dan pirolisis. Gasifikasi adalah teknologi yang menarik untuk menghasilkan gas bahan bakar yang kaya hydrogen, dengan mengolah bahan baku pada suhu tinggi berkisar 400°C hingga 1400°C dengan tekanan yang tinggi hingga 33 bar (480 psia) (Fadillah *et al.*, 2021). Gas yang dihasilkan dalam gasifikasi disebut gas sintesis atau syn-gas, yang dapat menjadi sumber energi penting, cocok untuk pembakaran langsung, digunakan pada mesin dan turbin, atau untuk menghasilkan gas alam sintetis (SNG) dan diesel (misalnya, diesel Fischer-Tropsch). Syn-gas sebagian besar terdiri dari karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H₂) dengan sejumlah kecil karbon dioksida (CO₂), air (H₂O), metana (CH₄), hidrogen sulfida (H₂S), amonia (NH₃), dan dalam kondisi tertentu, nitrogen (N₂). Nitrogen dan argon berasal dari penggunaan udara sebagai reaktan atau karena penggunaannya sebagai gas plasma (Simanjuntak *et al.*, 2021).

Liquefaksi adalah konversi termokimia biomassa menjadi *bio-oil* dengan memproses dalam lingkungan *hydrothermal* dan bertekanan dengan waktu yang cukup untuk memecah struktur biopolimer yang berwujud padat menjadi

komponen-komponen yang sebagian besar berwujud cair. Suhu yang digunakan dalam proses ini berkisar 250-374 °C dan tekanan tinggi berkisar 4 hingga 22 MPa (Shah *et al.*, 2022). *Bio-oil* merupakan senyawa yang sangat kompleks dan terdiri dari ratusan senyawa organik, seperti alkana, hidrokarbon aromatik, turunan fenol, keton, ester, eter, gula, amina, dan alkohol. Selain itu, rasio molar H terhadap C dalam *bio-oil* lebih tinggi dari 1,5. *Bio-oil* dapat langsung dibakar dalam boiler, atau ditingkatkan untuk menghasilkan bahan bakar dan bahan kimia yang berharga dengan menggunakan metode ekstraksi, emulsifikasi, esterifikasi atau alkoholisis, cairan superkritis, *hydrotreating*, perengkahan katalitik, dan reformasi uap (Zhang *et al.*, 2019).

2.2. Pirolisis Biomassa

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termal biomassa tanpa ada atau sedikit oksigen pada suhu tinggi (400-1400 °C) untuk memecah molekul besar menjadi molekul yang lebih sederhana untuk menghasilkan produk utama berupa BCO. Produk samping hasil pirolisis biomassa berupa produk padat seperti arang atau char, serta produk gas seperti campuran gas H₂, gas hidrokarbon (C₁-C₄), CO₂, dan CO. Metode ini dianggap sebagai pendekatan yang menjanjikan untuk valorisasi biomassa dalam menghasilkan BCO (Uddin *et al.*, 2018). Berdasarkan prosesnya, pirolisis dibagi menjadi tiga macam, yaitu *slow pyrolysis*, *fast pyrolysis* serta *flash pyrolysis*. *Slow pyrolysis* disebut juga teknik arang atau sistem kontiu dengan cara memanaskan biomassa secara perlahan hingga mencapai suhu 400°C dengan tanpa oksigen. Dalam *slow pyrolysis*, biomassa dipanaskan dengan laju pemanasan maksimum sekitar 10-100 °C /detik dan menghasilkan *biochar* sebagai produk utama (Goyal *et al.*, 2008).

Fast pyrolysis menggunakan suhu sekitar 500 hingga 650 °C dengan laju pemanasan cepat sekitar 102 hingga 200°C/detik. Proses menghasilkan produk utama yaitu cairan atau *bio-oil* (Aini *et al.*, 2022). Hasil *bio-oil* yang tinggi

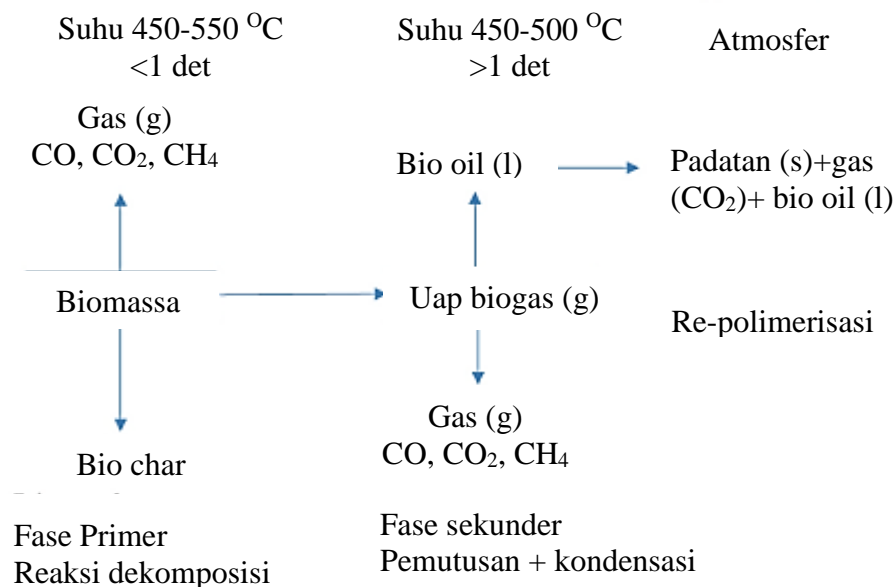
menjadikan metode *fast pyrolysis* banyak digunakan oleh industri *biofuel* untuk memproduksi bahan bakar cair yang umumnya dikenal sebagai BCO. (Uddin *et al.*, 2018).

Flash pyrolysis pada prosesnya menggunakan temperatur yang tinggi (>600 °C), tekanan atmosfer serta waktu yang sangat singkat (~ 1 detik) dan laju pemanasan 10^3 - 10^4 °C/detik. Pada proses ini, molekul kecil yang ringan diubah menjadi produk minyak melalui reaksi homogen dalam fase gas. *Flash pyrolysis* menghasilkan BCO lebih banyak namun dengan kualitas yang kurang baik (Ighalo *et al.*, 2022).

2.2.1. Mekanisme Dasar

Secara keseluruhan, pirolisis terdiri dari dua mekanisme yaitu primer dan sekunder. Mekanisme primer terdiri dari proses pemecahan ikatan kimia bahan baku dan melepaskan senyawa volatil di dalam reaktor di bawah panas, yang mengalami reaksi lebih lanjut sebagai bagian dari mekanisme sekunder. Fase awal dekomposisi termal menghasilkan pembentukan cincin benzena yang bergabung membentuk residu arang padat dengan bahan organik yang terus terurai. Pada reaksi penyusunan kembali residu dalam matriks yang berlangsung senyawa volatil yang tidak stabil dilakukan tambahan reaksi yang dideskripsikan sebagai mekanisme sekunder. Pada proses polimerisasi, polimer dipecah menjadi komponen monomer yang menurunkan derajat polimerisasi tersebut. Pelepasan akhir dilakukan pada tingkat yang lebih tinggi yaitu sekitar 250-300 °C dari tahap awal. Tahap akhir dari mekanisme primer adalah menghasilkan senyawa organik rantai pendek dan gas yang tidak dapat dikondensasi karena adanya ikatan kovalen (Al-Rumaihi *et al.*, 2022).

Pada mekanisme sekunder, senyawa yang tidak stabil akan pecah atau bergabung kembali untuk merestrukturisasi. Selama perengkahan, senyawa-senyawa ini terurai dan membentuk molekul dengan berat molekul rendah, sedangkan selama rekombinasi, senyawa volatil bergabung membentuk senyawa inert atau volatil dengan berat molekul tinggi. Selain itu, mekanisme sekunder juga dapat menghasilkan pembentukan arang dalam beberapa kasus. Kadar air sangat penting untuk proses pirolisis, karena jumlah kelembaban yang tinggi akan menghasilkan sebagian besar produk sampingan cair, sementara kadar air yang rendah akan menghasilkan lebih banyak kadar abu dari pada minyak. Pirolisis dengan laju pemanasan yang lambat dan suhu kurang dari 450 °C akan menghasilkan *biochar* dalam jumlah yang lebih tinggi, rentang suhu menengah dengan laju pemanasan yang sedikit lebih tinggi akan menghasilkan *bio-oil* dalam jumlah yang lebih tinggi, dan laju pemanasan yang tinggi akan menghasilkan gas dan abu dalam jumlah yang lebih besar. Dengan demikian, komposisi produk samping dan hasil produksinya bergantung pada kombinasi bahan baku, kadar air, jenis reaktor, laju pemanasan, kisaran suhu, waktu tinggal, tekanan, katalis, dan jenis serta laju alir gas fluidisasi (Al-Rumaihi *et al.*, 2022). Mekanisme primer dan sekunder dari proses pirolisis disajikan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Mekanisme pirolisis (Al-Rumaihi *et al.*, 2022)

2.2.2. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Pirolisis Biomassa

Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi proses pirolisis diantaranya adalah komposisi biomassa, ukuran partikel, suhu, laju pemanasan, dan katalis. Menurut Prakash Bamboriya *et al.* (2019), komposisi bahan baku biomassa harus dipertimbangkan ketika bertujuan untuk menghasilkan hasil yang lebih tinggi dari produk tertentu karena karakteristik fisika-kimia dari setiap komponen berbeda dalam berbagai jenis biomassa. Selain komposisinya, ukuran partikel biomassa juga memainkan peran penting dalam pirolisis. Garg *et al.* (2016) melaporkan bahwa perubahan ukuran partikel bahan baku biji babool dari 0 hingga 1 mm mempengaruhi hasil produk. Rendemen arang meningkat dari 18% menjadi 25,8% sedangkan, rendemen produk gas dan *bio-crude oil* (BCO) menurun dari 37% menjadi 29% dan 42,7% menjadi 41,8%. Dilaporkan juga bahwa hasil BCO maksimum (~ 32%) ditemukan pada diameter partikel 0,4 mm. Temuan mereka menunjukkan bahwa partikel kecil (dibawah 0,4 mm) cocok untuk mendapatkan hasil BCO yang tinggi.

Selain bahan baku biomassa, faktor lain yang dapat mempengaruhi pirolisis biomassa adalah katalis yang digunakan. Katalis berperan sebagai kunci dalam pirolisis biomassa, seperti menurunkan suhu pirolisis, meningkatkan BCO yang dihasilkan, dan mengubah proporsi produk (Zhang *et al.*, 2022).

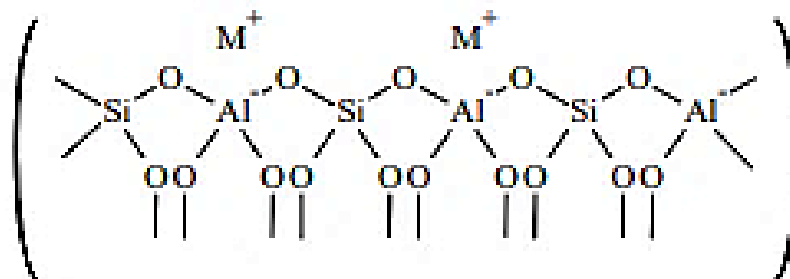
2.2.3. Katalis Pirolisis Biomassa

Pirolisis katalitik dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan mencampurkan biomassa dan katalis (*in-situ*), di mana katalis memainkan peran penting dalam membawa panas, atau dalam reaktor permukaan ganda. Selain itu, biomassa dan lapisan katalis dipisahkan (*ex-situ*). Metode *in-situ* membutuhkan modal yang

lebih rendah karena hanya membutuhkan satu reaktor. Namun, penonaktifan aktivitas katalitik dari katalis terjadi lebih cepat. Selain itu, kontak antara dua permukaan padat (biomassa dan lapisan katalis) mengarah untuk perpindahan panas yang buruk. Mode *ex-situ* sangat selektif untuk mendapatkan senyawa aromatik (Norouzi *et al.*, 2021).

Dalam pirolisis biomassa, katalis yang biasanya digunakan merupakan zeolit. Zeolit sendiri dibagi menjadi 2 jenis, yaitu zeolit alam dan zeolit sintetis. Zeolit alam sendiri merupakan *aluminosilikat* kristal terhidrasi yang memiliki bentuk sarang lebah struktur 3D yang terbentuk dari tetrahedral $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$ melalui keterkaitan atom oksigen. Zeolit alam bersifat hidrotermal dan sebagian besar berasal dari gunung berapi. Zeolit alam dapat terjadi baik dalam bentuk kristal yang ditemukan di batuan beku dan metamorf, serta dalam butiran berdiameter lebih kecil yang terakumulasi dalam batuan sedimen (Tran *et al.*, 2019).

Zeolit sintetis merupakan zeolit yang dibuat dari bahan baku murni berupa silika dan alumina melalui proses kimia. Zeolit sintetis mempunyai kelebihan dari pada zeolit alam seperti struktur yang sangat homogen, komponennya yang dapat dikendalikan dan juga dapat divariasikan sesuai dengan kepentingan, serta kemurniannya yang tinggi (Georgiev *et al.*, 2009). Berikut merupakan struktur kerangka dari zeolit ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar 3. Struktur zeolit (Poh and Lun, 2023)

2.2.4. *Heat Exchanger* Pirolisis Biomassa

Heat exchanger merupakan komponen pendukung dalam proses pirolisis dengan fungsi membantu mendistribusikan panas antara aliran yang berbeda di dalam reaktor, untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi, dan mempertahankan suhu reaksi yang diinginkan (Sun *et al.*, 2019). Proses ini melibatkan sifat logam yang dapat menghantarkan panas, radiasi panas, perpindahan panas secara konveksi dan proses lainnya (Liang, 2020).

2.2.5. Aplikasi Pirolisis Biomassa dan Komposisi BCO

Aplikasi pirolisis biomassa telah dilakukan oleh beberapa peneliti seperti pirolisis akar singkong yang dibakar dan minyak kelapa sawit dengan zeolit-A untuk menghasilkan biogasolin dengan kandungan hidrokarbon sebesar 74% (Simanjuntak *et al.*, 2021). Selain itu, aplikasi pirolisis biomassa telah dilakukan oleh beberapa peneliti seperti pirolisis minyak kelapa sawit dengan zeolit-X menghasilkan bahan bakar cair dengan kandungan hidrokarbon sebesar 77% (Febriyanti *et al.*, 2021). Selain mengandung hidrokarbon, hasil pirolisis BCO juga terdiri dari komposisi senyawa organik lain seperti keton, aldehida, fenol, ester (Pandiangan *et al.*, 2022), asam (Febriyanti *et al.*, 2021), dan alkohol (Supriyanto *et al.*, 2018).

2.3. Transformasi Zeolit Alam

Salah satu perbedaan mendasar antara zeolit alam dan zeolit sintetis adalah komposisi kimianya, terutama kandungan Si dan Al sebagai komponen utama dari zeolit. Berdasarkan dua komponen utama tersebut, komposisi zeolit biasanya dinyatakan dengan nisbah Si/Al. Pada umumnya, zeolit sintetis memiliki nisbah Si/Al dari 1-5, sementara zeolit alam memiliki nisbah Si/Al > 5. Berdasarkan perbedaan nisbah tersebut, modifikasi zeolit alam untuk menurunkan Si/Al dapat

dilakukan dengan penambahan aluminium misalnya menggunakan $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (Liu *et al.*, 2019). Dalam penelitian ini, modifikasi komposisi zeolit alam Lampung telah dilakukan hingga memiliki nisbah Si/Al = 3 dengan penambahan *food grade aluminium foil* (FGAF).

2.4. Karakterisasi Zeolit

Karakterisasi yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah XRF, XRD, SEM, FTIR, dan PSA

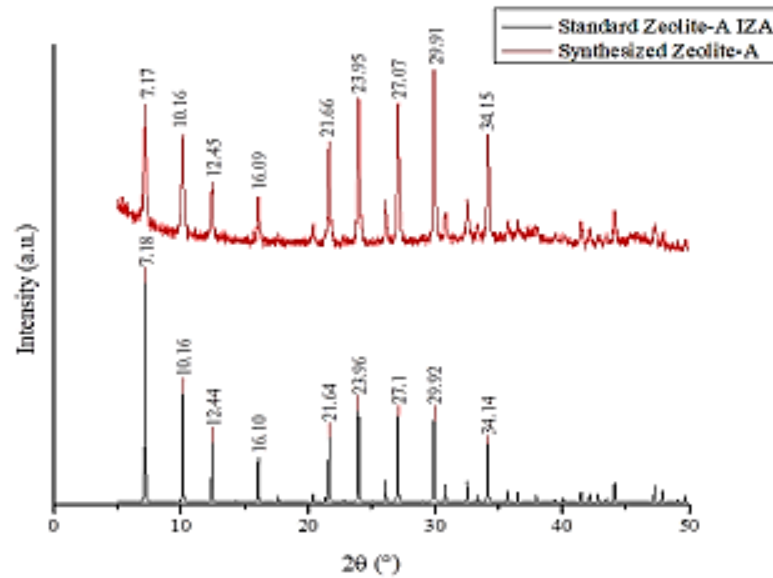
2.4.1. X-Ray Fluorescence (XRF)

X-Ray Fluorescence (XRF) merupakan alat yang digunakan untuk menentukan komposisi unsur sampel. Alat analisis XRF menentukan unsur penyusun sampel dengan mengukur sinar-X Fluoresen (X sekunder) yang dipancarkan dari sampel ketika dieksitasi oleh sumber sinar-X primer. Untuk zeolit, metode ini digunakan untuk menentukan kandungan unsur Si, Al, dan O, serta adanya unsur-unsur lain. Manfaat utama dari metode ini adalah untuk menentukan nisbah Si/Al dari zeolit yang diteliti.

2.4.2. X-Ray Diffraction (XRD)

Spektroskopi difraksi sinar-X merupakan salah satu metode karakteristik material yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin dalam material dengan cara menentukan parameter struktur kisi. Prinsip dari XRD adalah difraksi gelombang sinar-X mengalami *scattering* setelah bertumbukan dengan atom kristal. Pola difraksi yang dihasilkan merepresentasikan struktur kristal. Berdasarkan analisis pola difraksi dapat ditentukan parameter kisi, ukuran kristal, dan identifikasi kristalin. Jenis material dapat ditentukan dengan membandingkan hasil XRD dengan katalog hasil difraksi berbagai macam material (Setianingsih dan Sutarno, 2018). XRD menghasilkan pola difraksi dan memberikan informasi tentang struktur internal pada skala 0,1-100 nm. Hasil karakterisasi digambarkan dalam

bentuk difraktogram dengan sudut 2θ dan intensitas (Ameh, 2019). Menurut (Afifah, 2023) difraktogram zeolit-A hasil sintesis yang dibandingkan dengan standar IZA zeolit-A dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Difraktogram zeolit alam Lampung teraktivasi (Afifah, 2023)

Pola XRD yang disajikan pada Gambar 4 menunjukkan bahwa keberadaan zeolit-A yang disintesis sebagai bahan kristal cukup nyata, ditunjukkan dengan tajamnya puncak difraksi dan intensitas 2θ tinggi pada rentang $0-50^\circ$. Evaluasi lebih lanjut adalah dilakukan dengan membandingkan data XRD zeolit-A hasil sintesis dengan standar zeolit-A menurut IZA. Hasil perbandingan tersebut disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Perbandingan data XRD untuk zeolit-A standar IZA dan zeolit-A hasil sintesis (Afifah, 2023)

IZA		Zeolit-A hasil sintesis	
Difraksi sudut 2θ ($^\circ$)	Intensitas Relatif (%)	Difraksi sudut 2θ ($^\circ$)	Intensitas Relatif (%)
7,18	100	7,17	67,64
10,16	51,79	10,16	56,05
12,44	30,14	12,45	31,92
16,10	20,24	16,09	25,31
21,64	32,30	21,66	56,78
23,96	44,04	23,95	84,48
27,10	39,75	27,07	81,22
29,92	39,69	29,91	100
34,14	26,50	34,14	59,58

Berdasarkan hasil pola XRD antara zeolit-A hasil sintesis dengan zeolit-A standar IZA menegaskan bahwa zeolit-A telah berhasil disintesis menggunakan prosedur yang diterapkan.

2.4.3. *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Analisis SEM bertujuan untuk mengetahui morfologi permukaan sampel meliputi bentuk partikel, ukuran partikel, dan dsitribusi partikel pada permukaan. Dari tiga karakteristik permukaan di atas, bentuk partikel merupakan keunikan dari masing-masing zeolit, sehingga dapat digunakan untuk memastikan apakah zeolit tertentu sudah berhasil disintesis. Sebagai contoh, bentuk kristal zeolit-A adalah kubus (Indira and Abhitha, 2022), bentuk kristal zeolit-X adalah kubik berstruktur oktahedral (Febriyanti *et al.*, 2021), dan bentuk kristal zeolit-Y adalah tetrahedral (Pangesti *et al.*, 2021). Prinsip dasar operasinya adalah dengan memanfaatkan hamburan balik elektron dari permukaan objek saat berinteraksi dengan berkas elektron, dan kemudian mengambil gambar dengan mendeteksi elektron yang muncul dari permukaan objek tersebut. Penggunaan SEM yang semakin canggih memungkinkan pemindaian area yang lebih luas dan pengumpulan data yang besar untuk menggambarkan karakteristik sampel seperti, menghitung dan mengumpulkan statistik tentang objek dalam sampel dan termasuk analisis morfologi ukuran untuk menentukan distribusi ukuran (Indira dan Abhitha, 2022)

2.4.4. *Fourier Transform Infra-Red (FTIR)*

Spektroskopi FTIR merupakan salah satu teknik karakterisasi untuk mendeteksi gugus karakteristik dari pita spektral yang memungkinkan untuk mengetahui konjugasi antara nanomaterial dan biomolekul yang teradsorpsi. Spektroskopi FTIR didasari dengan prinsip bahwa ketika sampel diperiksa dengan sinar inframerah (IR), gugus fungsi dalam sampel tersebut akan menyerap radiasi IR,

dan karakteristik getaran setiap gugus fungsi kemudian akan dipantulkan. Untuk zeolit, karakterisasi dengan FTIR digunakan untuk mendeteksi gugus fungsi yang khas dalam zeolit, yakni gugus Si-O-Si (ditunjukkan oleh pita serapan pada bilangan gelombang 100-1200 cm^{-1}), gugus Al-O-Al (ditunjukkan oleh pita serapan pada bilangan gelombang 600-800 cm^{-1}), dan gugus Si-O-Al (ditunjukkan oleh pita serapan pada bilangan gelombang 300-1300 cm^{-1}) (Darmansyah *et al.*, 2021).

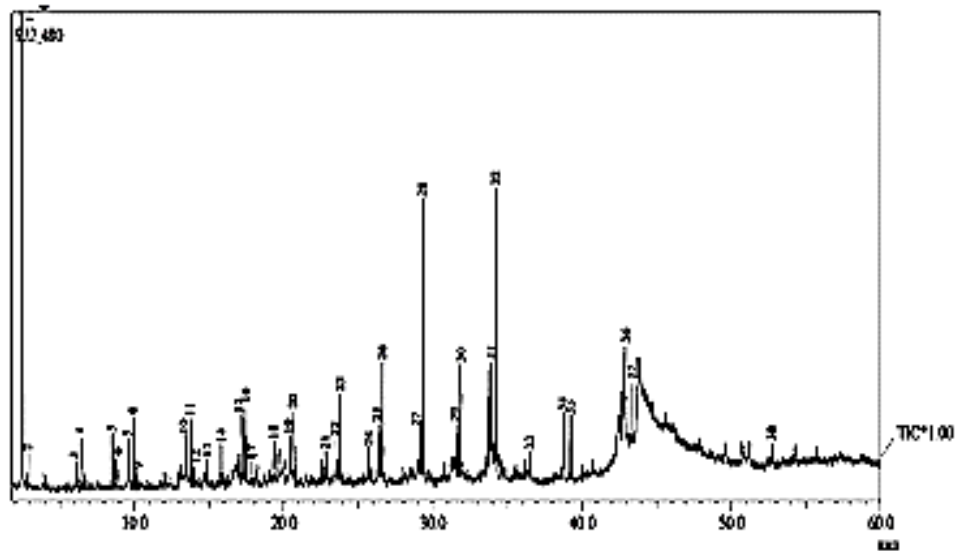
2.4.5. *Particle Size Analyzer (PSA)*

Analisis PSA bertujuan untuk menilai ukuran partikel dalam sedimen dengan memanfaatkan pola difraksi yang dihasilkan oleh laser yang melewati sampel. Pada dasarnya metode PSA adalah hubungan antara ukuran partikel dan sudut difraksi dengan partikel yang lebih kecil akan menyebabkan cahaya terdifraksi pada sudut yang lebih lebar (Pribadi *et al.*, 2014). Hasil analisis PSA digunakan mengetahui ukuran partikel yang dihasilkan dari preparasi zeolit. Semakin kecil ukuran partikel maka daya atau kemampuan dari zeolit akan semakin meningkat dengan energi kinetika yang dihasilkan (Setiawan *et al.*, 2018).

2.5. Analisis dengan *Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS)*

GC-MS adalah perangkat analisis yang merupakan gabungan dua instrumen, yakni kromatografi gas dan spektrometri massa, dengan fungsi masing-masing. Kromatografi gas berperan untuk memisahkan komponen-komponen penyusun sampel, yang akan muncul sebagai puncak-puncak dalam kromatogram GC yang dihasilkan. Selain menunjukkan jumlah komponen penyusun sampel, dalam kromatogram GC juga ditampilkan luas puncak, yang menunjukkan jumlah relatif komponen yang ada.

Spektrometri massa yang berperan sebagai detektor akan menghasilkan spektrum massa yang menunjukkan jenis senyawa penyusun sampel. Sebagai contoh, menurut (Simanjuntak *et al.*, 2019) BCO yang dihasilkan dari campuran limbah singkong dan minyak biji karet digambarkan pada kromatogram GC pada Gambar 5.



Gambar 5. GC-Kromatogram *liquid fuel* dari pirolisis campuran limbah singkong (Simanjuntak *et al.*, 2019)

Berdasarkan Gambar 5 didapatkan BCO hasil dari pirolisis campuran limbah singkong menghasilkan 38 puncak dengan komposisi hidrokarbon (76%), alkohol (9%), ester (7%), keton (4%) dan asam (3%) yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi kimia liquid fuel dari pirolisis campuran limbah singkong dan minyak biji karet (Simanjuntak *et al.*, 2019)

No Puncak	Waktu Ret. (Menit)	Persentase (%)	Nama Senyawa	Formula
1	2,435	8,07	Ethanol	C ₂ H ₆ O
2	2,905	0,99	Acetic acid	C ₂ H ₄ O ₂
3	6,173	0,64	Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀
4	6,439	1,40	1,2-Dimethylbenzene	C ₈ H ₁₀
5	8,533	1,70	2-Octene	C ₈ H ₁₆
6	8,829	1,24	Cyclooctane	C ₈ H ₁₆
7	9,652	2,40	Octane	C ₈ H ₁₈
8	9,975	2,27	2-Nonene	C ₈ H ₁₈
9	10,194	0,98	Nonane	C ₉ H ₂₀
10	13,441	1,66	Buthylbenzene	C ₁₀ H ₁₄
11	13,772	1,97	Limonene	C ₁₀ H ₁₆
12	13,977	0,71	1-Decene	C ₁₀ H ₂₀
13	14,848	0,84	3-Decene	C ₁₀ H ₂₀
14	15,828	1,74	Cyclodecane	C ₁₀ H ₂₀
15	17,072	2,17	3,5-Dimethyloctane	C ₁₀ H ₂₂
16	17,369	2,17	1-Undecene	C ₁₁ H ₂₂
17	17,847	0,79	2-Undecene	C ₁₁ H ₂₂
18	19,333	1,79	3-Undecene	C ₁₁ H ₂₂
19	20,427	1,98	4-Undecene	C ₁₁ H ₂₂
20	20,693	2,78	Pentylbenzene	C ₁₁ H ₁₆
21	22,834	1,78	Isobuthyltoluene	C ₁₁ H ₁₆
22	23,522	1,37	Undecane	C ₁₁ H ₂₄
23	23,771	2,92	1-Dodecene	C ₁₂ H ₂₄
24	25,681	1,40	Dodecane	C ₁₂ H ₂₆
25	26,412	2,11	Hexylbenzene	C ₁₂ H ₁₈
26	26,639	4,42	1-Tridecene	C ₁₃ H ₂₆
27	29,12	1,45	Tridecane	C ₁₃ H ₂₈
28	29,339	9,33	2-Phenyl Heptane	C ₁₃ H ₂₀
29	31,679	1,98	1-Methylhexylbenzene	C ₁₃ H ₂₀
30	31,864	3,83	1-Tetradecene	C ₁₄ H ₂₈
31	33,904	5,95	Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂
32	34,279	10,75	1-Hexadecene	C ₁₆ H ₃₂
33	36,536	0,92	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄
34	38,760	3,38	8-Pentadecanone	C ₁₅ H ₃₀ O
35	39,242	2,47	2-Heptadecanone	C ₁₇ H ₃₄ O
36	42,881	4,39	Linoleic acid	C ₁₈ H ₃₂ O ₂
37	43,266	2,39	Methyl Linolelaidate	C ₁₉ H ₃₄ O ₂
38	52,765	0,86	Methyl Stearate	C ₁₉ H ₃₈ O ₂

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Anorganik/Fisik, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung yang dimulai pada April hingga September 2024. Proses karakterisasi zeolit dilakukan menggunakan beberapa instrumen yaitu; *Scanning Electron Microscope* (SEM) ZEISS yang berada di Unit Pelaksana Teknis Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (UPT LTSIT) Universitas Lampung, *X-Ray Diffraction* (XRD) Panalytical Xpert 3 Powder, *Fourier Transform Infrared* (FTIR) Shimadzu 820PC, dan *Particle Size Analyzer* (PSA) HORIBA SZ-100 for Windows [Z Type] Ver2.50 di Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) Tanjung Bintang, Lampung, *X-Ray Fluorescence* (XRF) PANalytical Epsilon 3 yang dilakukan di Unit Pelaksana Teknis (UPT) pada Laboratorium Terpadu Universitas Negeri Padang. Karakterisasi *bio-crude oil* (BCO) dilakukan menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectroscopy* (GC-MS) tipe GCMS-QP2010S SHIMADZU di Laboratorium Terpadu dan Pusat Penelitian, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

3.2. Bahan dan Alat

3.2.1. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah minyak kelapa sawit, zeolit alam Lampung (ZAL) tipe klipnoptilolit dari CV. Minatama Utama,

larutan NaOH 4,376 M, *food grade aluminium foil* (FGAF), akuades, kertas pH universal, dan pasir putih.

3.2.2. Alat

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah alat-alat gelas, pipet tetes, neraca analitik, oven, *hot stirrer*, *magnetic stirrer*, cawan, mortar dan alu, peralatan pirolisis, autoklaf, ayakan *mesh* 300 mm, *heat exchanger* pasir putih, XRF PANalytical Epsilon 3, XRD Panalytical Xpert 3 Powder, SEM ZEISS, FTIR Shimadzu 820PC, *Particle Size Analyzer* (PSA) HORIBA SZ-100 for Windows [Z Type] Ver2.50, dan GCMS-QP2010S SHIMADZU.

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Transformasi Zeolit Alam Lampung dengan rasio Si/Al 3

Zeolit Alam Lampung (ZAL) dimodifikasi dengan rasio Si/Al 3 sebelumnya dikarakterisasi FTIR dahulu untuk mengetahui rasio Si/Al sebelum ditransformasi dan didapatkan rasio Si/Al=6,4. Setelah diketahui rasio Si/Al dari ZAL kemudian dilakukan modifikasi dengan melarutkan FGAF sebanyak 4,684 gram dengan 250 mL NaOH 10,4 M. Sebanyak 100 mL akuades akuades secara perlahan.

Kemudian, dicampurkan 50 gram ZAL ke dalam larutan secara merata. Campuran kemudian dimasukkan ke dalam autoklaf dan didiamkan selama 24 jam pada suhu kamar, lalu dikristalkan di dalam oven 100 °C selama 72 jam. Sampel dicuci sampai pH 7, disaring dan dikeringkan selama 8 jam di dalam oven 100 °C.

Kemudian, sampel dikalsinasi selama 6 jam dengan beberapa suhu yaitu 600 °C, 700 °C dan 800 °C dan dihaluskan dan diayak dengan ukuran 300 mesh (Aulia, 2022).

3.3.2 Karakterisasi Zeolit Alam Lampung Termodifikasi

a. *X-Ray Fluorescence (XRF)*

Analisis XRF digunakan untuk mengetahui komposisi dari sampel ZAL dan zeolit hasil transformasi dalam bentuk unsur maupun oksida menggunakan instrumen XRF PANanalytical Epsilon 3. Hasil analisis XRF pada sampel ZAL dapat digunakan untuk menghitung nisbah molar Si/Al sebelum melakukan tahap transformasi.

b. *X-Ray Diffraction (XRD)*

Analisis XRD dilakukan untuk mengetahui sifat kristal atau kristalinitas dari zeolit alam Lampung hasil transformasi serta mengetahui fasa kristal. Analisis XRD pada penelitian ini menggunakan Panalytical Xpert 3 Powder dengan material anoda Cu. Kemudian, data yang diperoleh dianalisis menggunakan software Match! Version 3.16 Build 288.

c. *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Analisis *Scanning Electron Microscope (SEM)* digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan sampel ZAL dan zeolit hasil transformasi. Analisis ini dilakukan menggunakan SEM ZEISS dengan instrument tegangan percepatan elektron 20,00 kV, WD 8,00 mm, dan perbesaran (*Magnification*) dari 1.000 hingga 15.000 kali

d. *Fourier Transform InfraRed (FTIR)*

Analisis FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi serta situs asam dari zeolit hasil transformasi. Analisis FTIR pada penelitian kali ini menggunakan menggunakan FTIR Shimadzu 820PC pada rentang bilangan gelombang 4000-300 cm^{-1} untuk mengetahui gugus fungsinya.

e. *Particle Size Analyzer (PSA)*

Analisis PSA digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi serta situs asam dari zeolit hasil transformasi. Analisis FTIR pada penelitian kali ini menggunakan menggunakan Nano Particle Size Analyzer SZ-100V2.

3.4. Percobaan Pirolisis

Proses pirolisis dilakukan dengan menggunakan alat reaktor pirolisis skala laboratorium menggunakan katalis hasil transformasi ZAL menjadi Si/Al=3 sebanyak 5 gram dan *heat exchanger* pasir putih sebanyak 5 gram yang dicampurkan dengan 100 mL minyak kelapa sawit. Proses pirolisis dilakukan sekitar 90 menit. Produk cair yang dihasilkan dari pirolisis yaitu fasa air dan fasa organik berupa *bio-crude oil* (BCO) yang selanjutnya dipisahkan menggunakan corong pisah. Fasa organik yang telah dipisahkan kemudian dikarakterisasi menggunakan GC-MS.

Pirolisis dilakukan dengan 5 variasi yaitu pirolisis minyak kelapa sawit tanpa katalis dan *heat exchanger*, pirolisis minyak kelapa sawit dengan katalis ZAL termodifikasi 600 °C, pirolisis minyak kelapa sawit dengan *heat exchanger* dan katalis ZAL termodifikasi dengan variasi suhu 600, 700, dan 800 °C.

3.4.1. Analisis *Bio Crude Oil* (BCO)

Bio Crude Oil (BCO) dianalisis untuk mengidentifikasi komponen apa saja yang terdapat didalamnya menggunakan *Gas Chromatography–Mass Spectrometry* (GC-MS). Analisis GC-MS dilakukan menggunakan GCMS-QP2010S SHIMADZU dengan tipe kolom Aglient DB-5MS UI (panjang 30 m; ID: 0,25 mm; ketebalan film 0,25 m; gas pembawa: Helium; dan EI 70 Ev). Suhu injektor yang digunakan 300 °C, laju alir pada tekanan 13 kPa, dan aliran total 34,6 mL/menit.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Zeolit alam Lampung (ZAL) dengan nisbah Si/Al=6,4 telah berhasil ditransformasi menjadi nisbah Si/Al=3 menggunakan metode hidrotermal, yang dibuktikan dengan analisis SEM dan XRD yang dibandingkan dengan standar IZA.
2. Hasil karakterisasi XRD zeolit hasil transformasi menunjukkan bahwa katalis B dengan suhu kalsinasi 700 °C merupakan zeolit hasil transformasi terbaik yang dibuktikan dengan memiliki kemiripan yang tinggi pada posisi 2θ dengan standar IZA zeolit-Y dan banyaknya kristal yang terbentuk dibuktikan dengan hasil karakterisasi SEM.
3. Proses pirolisis menggunakan katalis dengan *heat exchanger* menghasilkan lebih banyak hidrokarbon (>45%) dibandingkan pirolisis tanpa *heat exchanger* dan tanpa katalis.
4. Hasil analisis BCO dari minyak kelapa sawit yang terbaik dihasilkan dengan menggunakan katalis B dan *heat exchanger* dengan kandungan hidrokarbon sebesar 74% dan perbandingan senyawa biogasolin dan non-biogasolin sebesar 21,27% dan 52,46%.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang perlu dikaji pada penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Mengkaji lebih dalam pada proses transformasi zeolit alam Lampung menjadi zeolit tertransformasi Si/Al=3 dengan menambahkan variasi waktu proses kristalisasi lebih dari 72 jam dalam mentransformasi zeolit alam Lampung.
2. Asam yang terkandung dalam BCO yang didapatkan masih relatif tinggi, sehingga disarankan melakukan proses destilasi bertingkat untuk menghilangkan asam yang terkandung dalam BCO.

DAFTAR PUSTAKA

- Afifah, A. I. N. 2023. *Conversion of Coconut Oil Derived Methyl Esters Into Nitrogen Compounds As Green Corrosion Inhibitor*. Universitas Lampung.
- Aini, N. A., Jamilatun, S., & Pitoyo, J. 2022. Pirolisis Biomassa: Review. *Agroindustrial Technology Journal*. 6(1): 89–101.
- Al-Muttaqii, M., Kurniawansyah, F., Prajitno, D. H., and Roesyadi, A. 2019. Hydrocracking of coconut oil over Ni-Fe/HZSM-5 catalyst to produce hydrocarbon biofuel. *Indonesian Journal of Chemistry*. 19(2): 319–327.
- Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., Mckay, G., Mackey, H., and Al-Ansari, T. 2022. A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 167: 1–16.
- Ameh, E. S. 2019. A review of basic crystallography and x-ray diffraction applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 105: 3289–3302.
- Asnawi, Setiawan, A., Sayuthi, M., Waluyo, T., and Radian, H. 2022. An experimental study on the effects of bioethanol- Gasoline blends on spark-ignition engine performance. *Jurnal Polimesin*. 16(2): 87–92.
- Aulia, S. 2022. *Transformation of Lampung Natural Zeolite Into Zeolite-a By Aluminum Addition and Application As Catalyst for Biomass Pyrolysis*. Universitas Lampung.
- Azizah, Y. N., and Rachman, F. 2023. Physico-Chemical Characteristics Of Lampung Natural Zeolite Functionalized Mercapto-Silane. *EduChemia: Jurnal Kimia Dan Pendidikan*, 8(1), 56–67.
- Bedoić, R., Čuček, L., Čosić, B., Krajnc, D., Smoljanić, G., Kravanja, Z., Ljubas, D., Pukšec, T., and Duić, N. 2019. Green biomass to biogas – A study on anaerobic digestion of residue grass. *Journal of Cleaner Production*. 213: 700–709.

- Caligiuri, C., Bietresato, M., and Renzi, M. 2019. The effect of using diesel-biodiesel-bioethanol blends on the fuel feed pump of a small-scale internal combustion engine. *Energy Procedia*. 158: 953–958.
- Chauke, N. P., Mukaya, H. E., and Nkazi, D. B. 2019. Chemical modifications of castor oil: A review. *Science Progress*. 102(3): 199–217.
- Chen, D., Wang, Y., Liu, Y., Cen, K., Cao, X., Ma, Z., and Li, Y. 2019. Comparative study on the pyrolysis behaviors of rice straw under different washing pretreatments of water, acid solution, and aqueous phase bio-oil by using TG-FTIR and Py-GC/MS. *Fuel*. 252: 1–9.
- Collard, F. X., and Blin, J. 2014. A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 38: 594–608.
- Darmansyah, Ginting, S. B., Iryani, D. A., Sari, R. P., and Supriyadi, D. 2021. Characterization of Modified Lampung Natural Zeolite with Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (CTAB) for Adsorption Industrial Tapioca Wastewater. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Biomass*. 202: 230–235.
- Daryono, E. D., Fassa, F., dan Rahman, A. 2022. Penggunaan Metanol Sisa Reaksi Sebagai Reaktan Pada Proses Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit Menjadi Biodiesel. *Jurnal Teknologi*. 14(2): 155–162.
- Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2021. Statistik Minyak dan Gas Bumi Semester I 2021. In *Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*.
- Elma, M., Suhendra, S. A., dan Wahyuddin, W. 2018. Proses Pembuatan Biodiesel Dari Campuran Minyak Kelapa Dan Minyak Jelantah. *Konversi*. 5(1): 8-16.
- Fadillah, G., Fatimah, I., Sahroni, I., Musawwa, M. M., Mahlia, T. M. I., and Muraza, O. (2021). Recent progress in low-cost catalysts for pyrolysis of plastic waste to fuels. *Catalysts*. 11(837): 1–17.
- Febriyanti, T. D., Simanjuntak, W., and Pandiangan, K. D. 2021. Pyrolytic conversion of palm oil into liquid fuel using protonated zeolite-X prepared from rice husk silica and aluminum foil as catalyst. *Journal of Physics: Conference Series*. 1751: 1–9.
- Garg, R., Anand, N., and Kumar, D. 2016. Pyrolysis of babool seeds (*Acacia nilotica*) in a fixed bed reactor and bio-oil characterization. *Renewable Energy*. 96: 167–171.

- Georgiev, D., Bogdanov, B., Angelova, K., Markovska, I., and Hristov, Y. 2009. Synthetic Zeolites - Structure , Clasification , Current Trends in. *Economics and Society Development on the Base of Knowledge*. 7: 1–5.
- Ginting, S. B., Sari, D. P., Iryani, D. A., Hanif, M., dan Wardono, H. 2019. Engineering Sintesis Zeolit Lynde Type-A (LTA) Dari Zeolit Alam Lampung (Zal). *Journal of Chemical Process Engineering*. 4(2655): 32–44.
- Goyal, H. B., Seal, D., and Saxena, R. C. 2008. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12(2): 504–517.
- Hendrasarie, N., dan Edison, RP. 2021. Pelatihan Pembuatan Biogas Dari Limbah Rumah Makan Dan Tinja. *Abdimas Unwahas*. 6(2): 164–170.
- Igbokwe, J. O., Onuoha, L. N., I Nwafor, M. O., and Aviara, N. A. 2019. Characterization of Blends of Petrol and Bioethanol Synthesized From Nigerian Palm Bunch. *Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment*. 15(1): 142–152.
- Ighalo, J. O., Iwuchukwu, F. U., Eyankware, O. E., Iwuozor, K. O., Olotu, K., Bright, O. C., and Igwegbe, C. A. 2022. Flash pyrolysis of biomass: a review of recent advances. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 1(1): 1–16.
- Indira, V., and Abhitha, K. 2022. A review on recent developments in Zeolite A synthesis for improved carbon dioxide capture: Implications for the water-energy nexus. *Energy Nexus*. 7(5): 1–12.
- Jamil, M. A., Yaqoob, H., Imteyaz, B., Ali, H. M., Allahyar, K., Goraya, T. S., Alkasmoul, F., and Shahzad, M. W. 2023. On design and analysis of a concentric tube micro fin heat exchanger for applications of tire pyrolysis lube oil cooling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 146: 1–10.
- Kasinath, A., Fudala-Ksiazek, S., Szopinska, M., Bylinski, H., Artichowicz, W., Remiszewska-Skwarek, A., and Luczkiewicz, A. 2021. Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 150: 1–20.
- Khasanah, U., Ladini, T., Rusnadi, I., dan Yunanto, I. 2023. Pirolisis Biji Karet Sebagai Energi Alternatif Berdasarkan Pengaruh Temperatur dan Jumlah Katalis Zeolit. *Jurnal Pendidikan Tambusai*. 7(3): 21852–21860.
- Liang, D. 2020. Measurement of coal pyrolysis reaction heat by empirical baseline method. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. 1(1): 1–11.

- Liu, G. hua, Wang, Y., Zhang, Y., Xu, X., Qi, L., and Wang, H. 2019. Modification of natural zeolite and its application to advanced recovery of organic matter from an ultra-short-SRT activated sludge process effluent. *Science of the Total Environment*. 652: 1366–1374.
- Luthfi, S. A. C., dan Fitria, A. 2022. Optimalisasi Biogas Dari Kotoran Sapi Dengan Penambahan Bahan Organik Dari Limbah Pertanian Dan Pasar. *AGRISAINTEFIKA: Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian*. 6(1): 21-27.
- Muhammad, M., Sulhatun, S., Jalaluddin, J., Meriatna, M., dan Marpaung, S. A. 2023. Karakterisasi Bioetanol Dari Pelepah Kelapa Sawit. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*. 12(1): 34-42.
- Norouzi, O., Taghavi, S., Arku, P., Jafarian, S., Signoretto, M., and Dutta, A. 2021. What is the best catalyst for biomass pyrolysis? *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 158: 1–25.
- Nurlaela, A., Sriatun, S., dan Pardoyo, P. 2011. Pengaruh Penambahan Surfaktan Pada Sintesis Zeolit-Y Menggunakan Tetraethyl Orthosilicate (TEOS) sebagai Sumber Silika. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi Pengaruh*. 14(2): 32–36.
- Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Avista, D., Arinanda, A. G., Hadi, S., and Amrulloh, H. 2022. Synthesis of Hydroxy-Sodalite from Rice Husk Silica and Food-Grade Aluminum Foil as A Catalyst for Biomass Pyrolysis. *Trends in Sciences*. 19(20): 1–11.
- Pangesti, G. G., Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Sasori, S., and Rilyanti, M. 2021. Synthesis of zeolite-Y from rice husk silica and food grade aluminum foil using modified hydrothermal method. *Journal of Physics: Conference Series*. 1751(1).
- Papuga, S., Djurdjevic, M., Ciccioli, A., and Vecchio Cipriotti, S. 2023. Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste and Molecular Symmetry Effects: A Review. *Symmetry*. 15(1): 1–19.
- Parinduri, L., dan Parinduri, T. 2020. Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Journal of Electrical Technology*. 5(2): 88–92.
- Poh, N. E., dan Lun, W. K. 2023. *Zeolit Struktur, Sintesis, Pencirian, dan Aplikasi*. Penerbit Universiti Sains Malaysia.
- Prakash Bamboriya, O., Singh Thakur, L., Parmar, H., Kumar Varma, A., and Hinge, V. K. 2019. A review on mechanism and factors affecting pyrolysis of biomass. *International Journal of Research in Advent Technology*. 7(3): 1014–1024.

- Pribadi, G. A., Budi, S., dan Yusmaniar, Y. 2014. Pengaruh Waktu Reaksi Dalam Sintesis Besi Bervalensi Nol (Zvi) Dari Feso₄ Dengan Ekstrak Polifenol Kulit Pisang Kepok. *JRSKT: Jurnal Riset Sains Dan Kimia Terapan*. 4(2): 398–404.
- Rajeswari, S., Baskaran, D., Saravanan, P., Rajasimman, M., Rajamohan, N., and Vasseghian, Y. 2022. Production of ethanol from biomass – Recent research, scientometric review and future perspectives. *Fuel*. 317: 1–19.
- Rastini, E. K., Jimmy, dan Abdurrahman. 2022. Pembuatan Biodiesel dari Minyak Kelapa pada Suhu Ruang dengan Variasi Katalis Basa dan Waktu Pengadukan. *Prosiding Seniati*. 6(3): 589–595.
- Riyanti, F. 2019. *Pengolahan Minyak Biji Jarak Kaliki (Ricinus communis L.) Menjadi Biodiesel dengan Reaksi Transesterifikasi menggunakan Katalis ZSM-5 (Zeolite Socony Mobile-5)*. Universitas Lampung.
- Setianingsih, T., dan Sutarno. 2018. *Prinsip Dasar dan Aplikasi Metode Difraksi Sinar-X untuk Karakterisasi Material*. Universitas Brawijaya Press (UB Press). Malang
- Setiawan, Y., Mahatmanti, F. W., dan Harjono. 2018. Preparasi dan Karakterisasi Nanozeolit dari Zeolit Alam Gunungkidul dengan Metode Top-Down. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 7(1): 43–49.
- Shah, A. A., Sharma, K., Haider, M. S., Toor, S. S., Rosendahl, L. A., Pedersen, T. H., and Castello, D. 2022. The Role of Catalysts in Biomass Hydrothermal Liquefaction and Biocrude Upgrading. *Processes*. 10(207): 1–33.
- Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Sembiring, Z., and Sihombing, I. P. 2021. Biogasoline production by zeolite-A catalyzed co-pyrolysis of torrefied cassava root and palm oil. *Journal of Physics: Conference Series*. 1751(1): 1–9.
- Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Sembiring, Z., and Simanjuntak, A. 2019. Liquid Fuel Production by Zeolite-A Catalyzed Pyrolysis of Mixed Cassava Solid Waste and Rubber Seed Oil. *Oriental Journal of Chemistry*. 35(1): 71–76.
- Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Sembiring, Z., Simanjuntak, A., and Hadi, S. (2021). The effect of crystallization time on structure, microstructure, and catalytic activity of zeolite-A synthesized from rice husk silica and food-grade aluminum foil. *Biomass and Bioenergy*. 148: 1–7.
- Suleman, N., Abas, dan Papatungan, M. (2019). Esterifikasi dan Transesterifikasi Stearin Sawit untuk Pembuatan Biodiesel. *Jurnal Teknik*. 17(1): 66–77.

- Sun, B., Zhao, T., Li, L., Ren, Y. yuan, and Li, W. 2019. Flow field uniformity analysis and structural optimization of coal pyrolysis heat exchanger. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 13(1): 417–425.
- Supriyanto, R., Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Situmeang, R. T. M., and Ahmadhani, M. Y. 2018. Chemical composition of liquid fuel produced by co-pyrolysis of sugarcane bagasse and sludge palm oil using zeolite-Y as catalyst. *Oriental Journal of Chemistry*. 34(3): 1533–1540.
- Tran, Y. T., Lee, J., Kumar, P., Kim, K. H., and Lee, S. S. 2019. Natural zeolite and its application in concrete composite production. *Composites Part B: Engineering*. 165: 354–364.
- Uddin, M. N., Techato, K., Taweekun, J., Rahman, M. M., Rasul, M. G., Mahlia, T. M. I., and Ashrafur, S. M. 2018. An overview of recent developments in biomass pyrolysis technologies. *Energies*. 11: 1–24.
- Ulya, N., dan Siswani, E. D. (2017). Sintesis Biodiesel dari Minyak Biji Karet (*Hevea Brasiliensis*) pada Variasi Suhu Transesterifikasi dan Rasio (Metanol/Minyak) pada Waktu 60 Menit. *Jurnal Kimia Dasar*. 6(4): 120–127.
- Wiratmaja, I. G., dan Elisa, E. 2020. Kajian Peluang Pemanfaatan Bioetanol Sebagai Bahan Bakar Utama Kendaraan Masa Depan Di Indonesia. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*. 8(1): 1–8.
- Wisudawati, N., dan Fijra, R. 2021. Analisis Efektivitas Penggunaan Energi Baru Dan Terbarukan Di Provinsi Sumatera Selatan Guna Mendukung REUN 2025. *Integrasi : Jurnal Ilmiah Teknik Industri*. 6(1): 1–9.
- Yue, D., You, F., and Snyder, S. W. (2014). Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Computers and Chemical Engineering*. 66: 36–56.
- Zabed, H., Sahu, J. N., Suely, A., Boyce, A. N., and Faruq, G. 2017. Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 71: 475–501.
- Zhang, W., Xia, H., Deng, Y., Zhang, Q., and Xin, C. 2022. Slow pyrolysis of waste navel orange peels with metal oxide catalysts to produce high-grade bio-oil. *Green Processing and Synthesis*. 11(1): 218–228.