

**PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN ZEOLIT-P
HASIL TRANSFORMASI ZEOLIT ALAM LAMPUNG**

(Skripsi)

Oleh

NADIA MUTIARA



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

ABSTRAK

PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN ZEOLIT-P HASIL TRANSFORMASI ZEOLIT ALAM LAMPUNG

Oleh

NADIA MUTIARA

Pada penelitian ini telah dilakukan transformasi Zeolit Alam Lampung (ZAL) menjadi zeolit-P dengan mengubah rasio molar Si/Al dari 8,4 menjadi 2,0 dan variasi suhu kalsinasi 600 (P1), 700 (P2), dan 800 °C (P3). Zeolit-P dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF), dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), *X-Ray Diffraction* (XRD), *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Hasil karakterisasi XRF menunjukkan nilai rasio molar zeolit-P pada rentang 2,0-2,4. Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan adanya puncak yang menunjukkan gugus siloksan (Si-O-Si/Al-O-Al) dan silanol (Si-OH/Al-OH) pada zeolit-P. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan adanya fasa kristal dan amorf dengan fasa kristal terbaik zeolit-P yang disebut dengan gismondin dihasilkan pada zeolit-P1 dengan suhu kalsinasi 600°C. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan morfologi permukaan pada zeolit-P mempunyai bentuk kristal prisma segi empat. Zeolit-P hasil transformasi diuji aktivitas katalitiknya pada proses pirolisis minyak kelapa sawit menghasilkan *Bio Crude Oil* (BCO). BCO yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi menggunakan *Gas Chromatography Mass Spectrometry* (GC-MS) dan uji fisik. Hasil karakterisasi GC-MS menunjukkan kandungan hidrokarbon terbanyak pada BCO menggunakan katalis zeolit-P1 yaitu 51,64% dengan kandungan biogasolin sebesar 26,88%. Hasil uji fisik menunjukkan bahwa titik nyala dan viskositas BCO sudah memenuhi SNI, sedangkan densitasnya lebih tinggi dari standar SNI.

Kata kunci: zeolit alam Lampung, zeolit-P, *bio crude oil* (BCO), pirolisis, minyak kelapa sawit

ABSTRACT

PALM OIL PYROLYSIS USING ZEOLITE-P RESULTS FROM THE TRANSFORMATION OF LAMPUNG NATURAL ZEOLITE

By

NADIA MUTIARA

In this research, the transformation of Lampung Natural Zeolite (LNZ) into zeolite-P was carried out by changing the Si/Al molar ratio from 8.4 to 2.0 and varying the calcination temperature from 600 (P1), 700 (P2), and 800 °C (P3). Zeolite-P was characterized using X-Ray Fluorescence (XRF), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-Ray Diffraction (XRD), and Scanning Electron Microscopy (SEM). The XRF characterization results show the zeolite-P molar ratio value in the range of 2.0-2.4. The results of FTIR characterization show the presence of peaks indicating siloxane (Si-O-Si/Al-O-Al) and silanol (Si-OH/Al-OH) groups in zeolite-P. The results of XRD characterization show the presence of crystalline and amorphous phases with the best crystal phase of zeolite-P called gismondin which is produced in zeolite-P1 with a calcination temperature of 600°C. SEM characterization results show that the surface morphology of zeolite-P has a rectangular prism crystal shape. Zeolite-P as a result of the transformation was tested for its catalytic activity in the palm oil pyrolysis process to produce Bio Crude Oil (BCO). The results of BCO was then characterized using Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS) and physical tests. The GC-MS characterization results show that the highest hydrocarbon content in BCO using the zeolite-P1 catalyst is 51.64% with a biogasoline content of 26.88%. The physical test results show that the flash point and viscosity of BCO meet SNI, while the density is higher than SNI standards.

Key words: Lampung natural zeolite, zeolite-P, bio crude oil (BCO), pyrolysis, palm oil

**PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN ZEOLIT-P
HASIL TRANSFORMASI ZEOLIT ALAM LAMPUNG**

Oleh

NADIA MUTIARA

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 Skripsi : **PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT
MENGUNAKAN ZEOLIT-P HASIL
TRANSFORMASI ZEOLIT ALAM
LAMPUNG**

Nama Mahasiswa : **Nadia Mutiara**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2017011009

Program Studi : Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dr. Dra. Him, M.S.
NIP. 196505251990032002

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

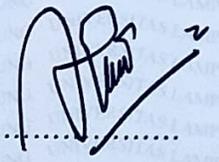
2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA

Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.
NIP. 197205302000032001

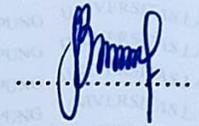
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

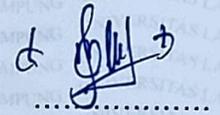
Ketua : Dr. Dra. Ilim, M.S.



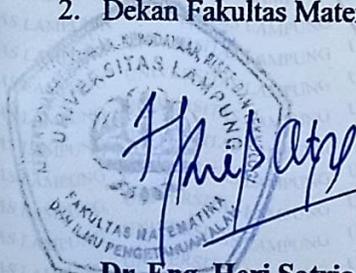
Sekretaris : Prof. Dr. Kamisah D. Pandiangan, M.Si.



**Penguji
Bukan Pembimbing : Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 22 Juli 2024

**SURAT PERNYATAAN
KEASLIAN SKRIPSI**

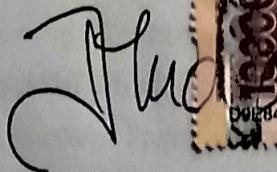
Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa : Nadia Mutiara
Nomor Pokok Mahasiswa : 2017011009
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 Menggunakan Zeolit-P Hasil Transformasi Zeolit Alam Lampung”** 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, 22 Juli 2024

Menyatakan

Nadia Mutiara

20170110009

RIWAYAT HIDUP



Nadia Mutiara lahir di Tanggamus, pada 9 Oktober 2022. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Ruzammi Karim dan Ibu Huriyah. Penulis memiliki seorang kakak bernama Zahria Humairoh dan seorang adik bernama Yafi Dzammar Ruzka. Penulis telah menyelesaikan pendidikan mulai dari taman kanak-kanak di TK Dharma Wanita Kedondong pada tahun 2008, pendidikan sekolah dasar di SDN 4 Kedondong pada tahun 2014, pendidikan sekolah menengah pertama di SMP Al-Kautsar Bandar Lampung pada tahun 2017, dan pendidikan sekolah menengah atas di SMA Al- Kautsar Bandar Lampung pada tahun 2020. Tahun 2020 penulis diterima sebagai mahasiswi di Universitas Lampung, program S-1 Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun non akademik. Kegiatan akademik yang pernah diikuti penulis yaitu pada Tahun 2024 penulis berhasil menyelesaikan laporan praktik kerja lapangan yang berjudul “Studi Transformasi Zeolit Alam Lampung menjadi Zeolit Kristalin” di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung. Penulis pernah menjadi anggota peneliti pada program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) di bidang penelitian pada Tahun 2023. Selain itu, peneliti pernah menjadi asisten Praktikum Kimia Dasar pada Semester Ganjil Tahun 2023 dan Praktikum Kimia Fisik 2 pada Semester Genap Tahun 2024. Penulis juga mengikuti kegiatan wajib selama perkuliahan seperti kegiatan Karya Wisata Ilmiah (KWI) tahun 2020 yang diselenggarakan oleh BEM FMIPA di Desa Kedondong dan kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Walur, Kecamatan

Kruki Selatan pada Tahun 2023. 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 Biro Usaha Mandiri pada tahun 2021, hingga aktif menjadi sekretaris Biro Usaha Mandiri pada Tahun 2022. Penulis juga aktif dalam anggota kepanitiaan baik sebagai peserta maupun panitia, seperti anggota Divisi Acara Chemgram pada kegiatan Chemistry Expo XXV dan sebagai koordinator Divisi Marketing dan Bazar pada kegiatan MIPA EXPO 2023. Selain itu, penulis aktif dalam kegiatan MBKM Kewirausahaan menjadi salah satu pengelola ChemCafe (2023) yang terletak di *Student Excellence Center (SEC)* di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung hingga Tahun 2024.

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”
(QS. Al Baqarah: 286)

*“Barang siapa keluar untuk mencari sebuah ilmu, maka ia akan berada di
jalan Allah hingga ia Kembali”*
(HR Tirmidzi)

*“Allah akan mengangkat derajat orang-orang yang beriman dan orang-orang
yang berilmu di antara kamu sekalian.”*
(QS. Al-Mujadilah: 11)

*“Dan janganlah kamu berputus asa dari rahmat Allah. Sesungguhnya tiada
berputus dari rahmat Allah melainkan orang-orang yang kufur.”*
(QS Yusuf: 87)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Puji Syukur kepada Allah SWT atas limpahan karunia-Nya. Kupersembahkan karya ini sebagai wujud bakti dan tanggung jawabku kepada:

Kedua orang tuaku tercinta,

Bapak Ruzammi Karim dan **Ibu Huriyah**. Bapak dan Ibu, lewat karya ini aku ingin berterima kasih atas segala kasih sayang, kesabaran, pengorbanan, serta ketulusan yang tidak henti-hentinya diberikan seperti doa-doa yang selama ini engkau panjatkan siang dan malam hanya untuk mendoakanku.

Pembimbing penelitian ku, **Ibu Dr. Dra. Ilim, M.S.** dan **Ibu Prof. Kamisah D. Pandiangan, M.Si.** yang selalu membimbingku dengan penuh kesabaran hingga terbitlah karya yang luar biasa ini.

Bapak Ibu Dosen Jurusan Kimia FMIPA Unila atas segala dedikasi dan ilmu yang telah diberikan selama menempuh pendidikan di kampus.

Serta
Almamaterku Tercinta

SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT atas Rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Menggunakan Zeolit-P Hasil Transformasi Zeolit Alam Lampung”**. 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 melewati 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. Ibu Dr. Dra. Ilim, M.S. selaku Dosen Pembimbing I atas segala bimbingan, arahan, masukan, kebaikan dan seluruh ilmu pengetahuan yang telah diberikan selama proses perkuliahan hingga penyelesaian skripsi;
2. 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;
3. Ibu Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembahas sekaligus Pembimbing Akademik dan Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung atas segala bimbingan, arahan, masukan, kebaikan dan seluruh

ilmu pengetahuan yang telah diberikan selama proses perkuliahan hingga penyelesaian skripsi.

4. Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D. selaku Dosen Jurusan Kimia yang telah memberikan saran dan masukan dalam penelitian ini;
5. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung atas seluruh dedikasi dan ilmu yang diberikan kepada penulis selama masa perkuliahan;
6. Bapak dan Ibu Tenaga Kependidikan, serta PLP Laboratorium Kimia Anorganik-Fisik Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung;
7. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung;
8. Orang tua penulis Bapak Ruzammi Karim dan Ibu Huriyah yang telah membesarkan dan membimbing penulis hingga menyelesaikan studi sarjana. Terima kasih karena selalu berusaha mendoakan dan memberikan yang terbaik kepada penulis tanpa henti serta selalu mendukung apa yang penulis lakukan;
9. Kakak dan adik penulis Zahria Humairoh dan Yafi Dzammar Ruzka, terima kasih karena selalu mendoakan, memberikan motivasi, memberikan keceriaan dan semangat kepada penulis;
10. Keluarga besar penulis yang selalu mendoakan, memberikan dukungan, dan semangat kepada penulis;
11. Sahabat terbaik penulis “Komik” yang selalu bersedia mendoakan dan menemani penulis sejak di bangku Sekolah Menengah Pertama;
12. Qori dan Maulana selaku teman penelitian yang selalu kebersamai penelitian penulis hingga selesai;
13. Teman-teman penulis: Lisa, Sylfia, Teh Delis, teman-teman Kimia Angkatan 2020, dan teman-teman lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu;
14. Teman-teman laboratorium polimer Wikka, Nurul, Uli, Nisa, Rekia, Sabil, Gom, Tasya, dan Roni terima kasih atas segala bantuannya dalam menemani penulis selama melakukan penelitian;

15. Seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung penulis yang tidak dapat dituliskan satu persatu;
16. Kepada diri saya sendiri, Nadia Mutiara, 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. Percayalah apa yang telah penulis tanam saat ini, akan penulis tuai suatu saat nanti dengan masa depan yang lebih cerah.

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 Juli 2024

Penulis

Nadia Mutiara

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan.....	4
1.3 Manfaat.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Platform Teknologi Untuk Produksi <i>Biofuel</i>	6
2.1.1 Metode Biokimia.....	6
2.1.2 Metode Kimia.....	7
2.1.3 Metode Termokimia	8
2.2 Pirolisis Biomassa	10
2.2.1 Mekanisme Pirolisis Biomassa	11
2.2.2 Faktor-faktor yang Memengaruhi Pirolisis Biomassa.....	12
2.2.3 Komposisi Kimia BCO	13
2.3 Zeolit-P.....	16
2.3.1 Teknik Preparasi	17
2.3.2 Karakterisasi.....	17
2.4 Aplikasi.....	20
III. METODE PENELITIAN	21
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	21
3.2 Bahan dan Alat	21
3.2.1 Bahan.....	21
3.2.2 Alat	212
3.3 Prosedur Penelitian.....	22

3.3.1 Transformasi Zeolit Alam Lampung menjadi Zeolit-P	22
3.3.2 Karakterisasi Zeolit-P	23
3.4 Percobaan Pirolisis	24
3.4.1 Analisis <i>Bio Crude Oil</i> (BCO)	24
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	26
4.1 Pengantar	26
4.2 Karakterisasi Zeolit Alam Lampung (ZAL).....	26
4.3 Transformasi ZAL menjadi Zeolit-P	31
4.4 Aktivasi Zeolit-P	36
4.5 Uji Aktivitas Zeolit-P Sebagai Katalis Pada Proses Pirolisis	45
4.6 Karakterisasi BCO.....	46
V. KESIMPULAN DAN SARAN	55
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA.....	57
LAMPIRAN.....	64
Lampiran 1. Perhitungan Penyesuaian Rasio Si/Al Zeolit-P	65
Lampiran 2. Kondisi Instrumen XRD	66
Lampiran 3. Komposisi Kimia BCO Dihasilkan Dari Percobaan Pirolisis Menggunakan Berbagai Katalis	67
Lampiran 4. Perhitungan Densitas	71
Lampiran 5. Perhitungan Viskositas.....	72
Lampiran 6. Perhitungan Penyesuaian Rasio NaOH Si/Al Zeolit-P	74
Lampiran 7. Hasil Spektrometri Massa BCO.....	75

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi BCO dari bahan baku dan katalis yang berberda	13
2. Komposisi kimia liquid fuel dari pirolisis campuran limbah singkong dan minyak biji karet	15
3. Data hasil analisis XRF ZAL.....	27
4. Perbandingan data XRD ZAL dengan standar IZA klinoptilolit dan mordenit.....	30
5. Data hasil analisis XRF zeolit-P0.....	32
6. Data Perbandingan puncak difraktogram zeolit-P0 dengan standar IZA klinoptilolit dan zeolit-P	35
7. Data Hasil Analisis XRF Sampel.....	36
8. Rasio molar Si/Al dan persen hasil transformasi zeolit.....	37
9. Perbandingan hasil FTIR zeolit-P hasil kalsinasi dengan zeolit-P0	37
10. Data perbandingan standar IZA klinoptilolit dengan zeolit hasil transformasi	41
11. Data perbandingan standar IZA zeolit-P dengan zeolit hasil transformasi..	42
12. Data perbandingan standar IZA sodalit dengan zeolit hasil transformasi ...	42
13. Data perbandingan standar IZA albit dengan zeolit hasil transformasi.....	43
14. Hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan katalis yang berbeda.....	46
15. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit tanpa katalis	49
16. Komposisi relatif BCO yang dihasilkan menggunakan katalis yang berbeda.....	51
17. Hasil uji kelayakan BCO	53
18. Komposisi kimia dari BCO menggunakan katalis ZAL.....	67
19. Komposisi kimia dari BCO menggunakan katalis zeolit-P0	68
20. Komposisi kimia dari BCO menggunakan katalis zeolit-P1	69
21. Komposisi kimia dari BCO menggunakan katalis zeolit-P2	70

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. GC-kromatogram <i>liquid fuel</i> yang dihasilkan dari pirolisis campuran limbah singkong dan minyak biji karet menggunakan katalis tanpa kalsinasi.....	14
2. Difraktogram standar IZA zeolit-P	18
3. Hasil SEM zeolit-P	18
4. Spektrum IR zeolit Na-P1	19
5. Spektrum FTIR ZAL.....	27
6. Difraktogram ZAL dan identifikasi fasa menggunakan Match!4.....	28
7. Perbandingan difraktogram ZAL (a) dengan standar IZA mordenit (b) dan klinoptilolit (c)	29
8. Mikrograf ZAL dengan perbesaran 20.000x.....	31
9. Spektrum FTIR (a) zeolit-P0, (b) zeolit-P1, (c) zeolit-P2, dan (d) zeolit-P3	33
10. Difraktogram zeolit-P0 dan identifikasi fasa menggunakan Match!4	34
11. Mikrograf zeolit-P0 dengan perbesaran 20.000x.....	35
12. Difraktogram zeolit-P1 dan identifikasi fasa menggunakan Match!4	38
13. Difraktogram zeolit-P2 dan identifikasi fasa menggunakan Match!4	39
14. Difraktogram zeolit-P3 dan identifikasi fasa menggunakan Match!4	39
15. Perbandingan difraktogram zeolit hasil transformasi dengan standar IZA (a) klinoptilolit, (b) zeolit-P, (c) sodalit, dan (d) albit.....	40
16. Mikrograf zeolit-P1 dengan perbesaran 20.000x.....	43
17. Mikrograf zeolit-P2 dengan perbesaran 20.000x.....	44
18. Mikrograf zeolit-P3 dengan perbesaran 20.000x.....	45
19. Hasil pirolisis minyak kelapa sawit menggunakan katalis (a) tanpa katalis; (b) ZAL; (c) zeolit-P0; (d) zeolit-P1; dan (e) zeolit-P2	46
20. Kromatogram BCO Minyak Kelapa Sawit Tanpa Katalis	47

21. Diagram komposisi BCO minyak kelapa sawit tanpa katalis	49
22. Kromatogram GC dan komposisi relatif BCO yang diperoleh dengan menggunakan katalis (a) ZAL; (b) zeolit-P0; (c) zeolit-P1; dan (d) zeolit-P2	50
23. Komposisi Relatif BCO yang dihasilkan menggunakan katalis yang berbeda	52
24. Kandungan biogasolin BCO yang dihasilkan menggunakan katalis yang diteliti	53

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini, bahan bakar fosil masih menjadi sumber utama bahan bakar global. Di Indonesia sendiri, dapat dipastikan masih mengandalkan bahan bakar fosil hingga tahun 2050. Hal ini disebabkan karena jumlah penduduk yang terus meningkat serta ekonomi yang terus berkembang dengan pesat. Jika bahan bakar fosil digunakan secara terus menerus, maka cadangan bahan bakar tersebut semakin menurun. Sebagai gambaran, jumlah cadangan minyak mentah Indonesia mengalami penurunan sekitar 19%, yakni dari 9,6 miliar barel pada tahun 2000 menjadi 7,8 miliar barel pada tahun 2010. Selain itu, penggunaan bahan bakar fosil secara berkelanjutan dapat menyebabkan berbagai masalah lingkungan, seperti perubahan iklim hingga pemanasan global. Untuk mengatasi permasalahan terkait penggunaan bahan bakar fosil, pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT) merupakan alternatif yang ditempuh di berbagai negara di dunia, termasuk di Indonesia.

Biofuel merupakan EBT yang sangat potensial karena didukung oleh dua faktor utama yaitu biomassa sebagai bahan baku yang jumlahnya sangat melimpah (*sustainable*) dan mudah diperbaharui (*renewable*). Proses pengolahan biomassa menjadi biofuel dapat dilakukan dengan beberapa metode yaitu; biokimia, kimia dan termokimia. Metode biokimia melibatkan fermentasi biomassa menggunakan populasi mikroba tertentu menjadi biogas seperti metana atau bioetanol seperti etanol, butanol dan sebagainya (Gamage *et al.*, 2010). Metode kimia dilakukan dengan proses transesterifikasi akan menghasilkan produk berupa biodiesel. Metode termokimia terdiri dari; gasifikasi, liquefaksi dan pirolisis. Gasifikasi

dianggap sebagai metode yang efektif dalam menghasilkan hidrogen dari biomassa (Ahmad *et al.*, 2016) dengan produk akhir berupa CO dan H₂ yang dikenal sebagai *syn gas* (Salam *et al.*, 2018). Liquefaksi pada dasarnya seperti proses pirolisis dalam *hot liquid water* yang dilakukan pada suhu antara 520-647 K atau 247-374 °C. Proses ini dikenal dengan *hydrothermal liquefaction* yang menghasilkan bahan bakar cair yaitu *bio-crude*. Sedangkan, pirolisis dianggap sebagai metode yang paling unggul untuk mengkonversi biomassa. Hal ini dikarenakan bahan baku pirolisis yang tidak terbatas dan hasil yang diinginkan dapat disesuaikan dengan mengatur suhu yang dibutuhkan. Pirolisis menghasilkan produk berupa *Bio-Crude Oil* (BCO), padatan (*char*) serta gas (*fuel-gas*) berupa CO, CO₂, H₂ dan CH₄ (Collard and Blin, 2014).

Dari berbagai metode pengolahan biomassa menjadi EBT, pirolisis menjadi metode yang terus dikembangkan karena dapat mengolah semua jenis biomassa menjadi bahan bakar. Beberapa contoh biomassa berasal dari residu pertanian adalah; ampas tebu (Supriyanto *et al.*, 2018), jerami padi (Song *et al.*, 2014) dan ampas singkong atau onggok (Jefriadi *et al.*, 2019) serta bahan minyak nabati non-pangan, seperti; minyak jarak (Li *et al.*, 2017) dan minyak biji karet (Chaiya and Reubroycharoen, 2013). Pada penelitian ini, proses pirolisis menggunakan biomassa minyak kelapa sawit. Kelapa sawit merupakan biomassa yang potensial mengingat ketersediaannya melimpah. Minyak sawit mengandung trigliserida, senyawa yang dapat diubah menjadi *bio oil* yang kaya akan senyawa hidrokarbon. Produk cair hasil pirolisis yang dikenal sebagai *bio crude oil* (BCO) sangat berpotensi sebagai pengganti bahan bakar fosil (Abdullah *et al.*, 2019). BCO memiliki karakteristik dasar yaitu campuran yang bersifat kompleks dan terdiri dari berbagai jenis senyawa organik seperti hidrokarbon. Selain hidrokarbon, terdapat komponen lain yang tidak dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar seperti; aldehid, keton dan asam karboksilat. Oleh karena itu, faktor-faktor yang dapat mengatur komposisi BCO pada proses pirolisis sangat diperlukan. Proses pirolisis dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya adalah; reaktor (Syamsiro *et al.*, 2014), waktu, suhu, laju pemanasan, adanya unsur-unsur beracun dan berbahaya, komposisi bahan baku dan penggunaan katalis (Miandad

et al., 2017). Dari faktor-faktor tersebut, penggunaan bahan baku dan katalis merupakan dua faktor utama yang sangat berpengaruh pada proses pirolisis. Penggunaan katalis pada proses pirolisis dapat menurunkan suhu pirolisis serta menentukan jenis produk yang dihasilkan (Simanjuntak *et al.*, 2019). Penggunaan katalis sintetik yang berasal dari reagen kimia memerlukan biaya yang cukup mahal, sehingga digunakan zeolit alam sebagai prekursor pada pembuatan zeolit sintetik. Zeolit alam mempunyai kelemahan yaitu perlu dilakukan *pretreatment* sebelum digunakan. *Pretreatment* dilakukan untuk memodifikasi atau mentransformasi zeolit dengan perlakuan asam basa atau kalsinasi atau impregnasi atau perlakuan lainnya. Penggunaan zeolit sebagai katalis memiliki keunggulan karena dapat mengurangi jumlah oksigenat (deoksigenasi) dalam produk cair (Yoo *et al.*, 2016) dan dapat menghilangkan senyawa yang tidak diinginkan dalam BCO (Mullen and Boateng, 2013; Norouzi *et al.*, 2017) sehingga BCO yang dihasilkan dominan berbentuk hidrokarbon yang berpotensi sebagai bahan bakar.

Katalis yang umum digunakan secara ekonomis yaitu silikon (Si) dan katalis berbasis zeolit. Zeolit merupakan bahan aluminosilikat yang mengandung mikropori (Yoo *et al.*, 2016) dengan penggunaan yang sangat luas karena zeolit bersifat tidak beracun, tidak korosif, memiliki kemampuan dalam memacu deoksigenasi dan dapat mengoptimalkan pembentukan senyawa hidrokarbon. Beberapa jenis zeolit yang telah digunakan yaitu; zeolit-A (Simanjuntak *et al.*, 2019), zeolit-Y (Supriyanto *et al.*, 2018), HZSM-5 (Mullen and Boateng, 2013; Norouzi *et al.*, 2017), Zeolit Alam Lampung (Aulia, 2022), zeolit-X (Febriyanti *et al.*, 2021) dan jenis zeolit lainnya.

Salah satu hasil transformasi zeolit alam yang telah dilakukan pada penelitian ini adalah zeolit-P. Zeolit-P memiliki rumus umum yaitu $M_{2/n}O \cdot Al_2O_3 \cdot 1.80-5.00 SiO_2 \cdot 5H_2O$ dengan M adalah logam (biasanya alkali) bervalensi-n. Zeolit-P dengan berbagai rasio Si/Al memiliki bentuk kerangka yang sama yaitu *gismodine* disingkat GIS (Novembre *et al.*, 2021). Zeolit-P dapat disintesis dengan beberapa metode yaitu metode sol-gel, sonokimia, hidrotermal dan metode sintesis lainnya.

Proses sintesis zeolit-P telah dilakukan sebelumnya dari *epidesmine* menggunakan metode hidrothermal dan didapatkan kondisi optimal untuk sintesis zeolit-P yaitu rasio molar Si/Al = 3,7 dan H₂O/Na₂O = 55 dengan struktur mesopori yang seragam sekitar 3,2 μm (Meng *et al.*, 2019).

Zeolit-P tidak hanya berfungsi sebagai katalis, namun dapat juga digunakan sebagai pengolahan limbah yang dapat menghilangkan ion arsenik, kalsium, nikel, besi, tembaga hingga mangan. Hal ini disebabkan karena zeolit sintetis memiliki kemampuan adsorpsi yang sangat baik. Zeolit-P juga dapat digunakan sebagai pengganti kompos untuk mengurangi potensi mobilitas logam tanah dan proses transfer antara tanah dengan tanaman (Nissen *et al.*, 2000). Selain itu, zeolit-P juga memiliki aplikasi yang luas dalam pemurnian logam, sebagai pembawa agen antibakteri dan pemisahan gas (Meng *et al.*, 2019).

Pada penelitian ini, zeolit-P yang sudah ditransformasi dari ZAL dengan menambah rasio molar Si/Al nya juga digunakan sebagai katalis untuk proses pirolisis minyak kelapa sawit. Perubahan rasio molar Si/Al dilakukan berdasarkan penelitian sebelumnya (Aulia, 2022), dengan rasio molar Si/Al bernilai 2,0. ZAL yang telah ditransformasi menjadi zeolit-P telah dikalsinasi dengan tiga suhu yang berbeda, yaitu; 600, 700 dan 800°C. Zeolit-P yang terbentuk dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF), *Fourrier Transform InfraRed* (FTIR), *X-Ray Diffraction* (XRD), dan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Selanjutnya, zeolit-P digunakan sebagai katalis pada pirolisis minyak kelapa sawit untuk mendapatkan BCO. BCO yang dihasilkan dianalisis menggunakan GC-MS dan uji sifat fisik yaitu uji titik nyala, densitas, dan viskositas.

1.2 Tujuan

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Memperoleh zeolit-P dari transformasi Zeolit Alam Lampung (ZAL).

- b. Mendapatkan data karakterisasi zeolit-P.
- c. Menggunakan zeolit-P sebagai katalis pada proses pirolisis minyak kelapa sawit menjadi *Bio Crude Oil* (BCO).
- d. Menganalisis produk BCO yang dihasilkan.

1.3 Manfaat

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Meningkatkan nilai ekonomis ZAL dengan memanfaatkannya sebagai bahan baku katalis zeolit-P.
2. Meningkatkan persediaan dan penggunaan *biofuel* agar mengurangi pemakaian terhadap bahan bakar fosil.
3. Meningkatkan ketersediaan katalis untuk mendukung pengembangan EBT.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Platform Teknologi Untuk Produksi Biofuel

Potensi biomassa yang ada di Indonesia belum dimanfaatkan secara optimal sebagai bahan baku produksi *biofuel*. Hal ini dikarenakan harga jual *biofuel* lebih mahal dibandingkan bahan bakar konvensional atau bahan bakar fosil. Namun, saat ini *biofuel* telah menjadi titik fokus penelitian sebagai pengembangan bahan bakar berbasis biomassa yang dianggap dapat memberikan dampak positif terhadap pembangunan berkelanjutan. Secara umum, produksi biofuel dari biomassa dapat dilakukan dengan tiga metode yaitu; biokimia, kimia serta termokimia.

2.1.1 Metode Biokimia

Pengolahan biomassa secara biokimia menghasilkan biogas atau bioetanol. Bioetanol (etanol) merupakan jenis alkohol paling terkenal yang dibuat dari sumber daya petrokimia atau dari sumber EBT. Pembuatan bioetanol dari sumber EBT lebih murah dibandingkan dengan sumber daya petrokimia. Bioetanol tidak boleh mengandung air untuk mencegah terjadinya masalah pada mesin. Namun, bioetanol bukanlah bahan bakar yang ideal jika dibandingkan dengan bensin karena energi yang dihasilkan lebih sedikit. Bioetanol juga tidak dapat digunakan sebagai pengganti solar (Gamage *et al.*, 2010). Bahan baku untuk pembuatan bioetanol dikategorikan menjadi tiga generasi. Generasi pertama terdiri dari gula dan pati, di mana gula akan langsung dimanfaatkan oleh mikroorganisme untuk

membentuk etanol melalui fermentasi, sedangkan pati merupakan salah satu jenis karbohidrat dengan ikatan α yang harus dihidrolisis terlebih dahulu untuk menghasilkan gula dalam bentuk monosakarida. Generasi kedua berasal dari lignoselulosa yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa serta lignin yang dapat ditemukan pada limbah pertanian, limbah rumah tangga serta limbah industri. Sedangkan, generasi ketiga berasal dari mikroalga yang di dalamnya terkandung karbohidrat. Mikroalga digunakan karena dapat menggantikan bahan baku generasi pertama dan kedua yang sifatnya terbatas serta tidak bersaing dengan bahan pangan (Zahroh *et al.*, 2021).

Selain bioetanol, biogas juga dihasilkan pada proses biokimia. Biogas merupakan produk dari proses anaerobik yang sebagian besar disusun oleh gas metana (CH_4). Biogas dapat dimanfaatkan untuk memasak, penerangan serta mesin pembakar untuk menggerakkan pompa air dan generator listrik. Biogas dapat diperoleh secara biokimia dari bahan baku seperti; sisa buah dan sayur, limbah rumah tangga, serta sisa kotoran ternak. Ada empat proses dalam proses anaerobik yaitu; hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis serta metanogenesis. Hidrolisis merupakan proses di mana bahan baku terdegradasi menjadi rantai sederhana seperti glukosa dan asam amino. Asidogenesis merupakan proses degradasi lebih lanjut yang menghasilkan asam lemak volatil (VFA), karbon dioksida, amoniak, serta hidrogen sulfida. Asetogenesis merupakan proses di mana bakteri mendegradasi molekul organik sederhana menjadi asam asetat, karbon dioksida dan hidrogen. Proses yang terakhir adalah metanogenik, yaitu proses pembentukan produk menjadi metana, karbon dioksida, dan air dengan pH optimum 6,5 hingga 8 (Sanjaya *and* Haryanto, 2015).

2.1.2. Metode Kimia

Secara kimia, pengolahan biomassa dilakukan secara transesterifikasi menghasilkan biodiesel. Biodiesel dapat dihasilkan dari; minyak nabati (minyak kelapa, minyak kelapa sawit, minyak jarak, minyak biji kapas sutra) atau minyak hewani. Ada beberapa cara untuk menghasilkan biodiesel, namun transesterifikasi

menjadi metode yang paling banyak digunakan karena prosesnya lebih mudah dan murah (Khalid *and* Khalid, 2011).

Proses transesterifikasi diawali dengan triasilgliserol (minyak atau lemak) yang dimurnikan lalu direaksikan dengan alkohol (umumnya metanol atau etanol) dan biasanya menggunakan katalis homogen asam kuat seperti; HCl, H₂SO₄, dan HNO₃ serta basa kuat seperti NaOH dan KOH. Namun, penggunaan katalis basa dapat membentuk air dan terjadi reaksi saponifikasi (penyabunan) yang menyebabkan terbentuknya emulsi, sehingga biodiesel sulit terbentuk. Oleh karena itu, transesterifikasi juga dapat menggunakan katalis heterogen seperti; zeolit, logam aktif dan logam oksida dimana produk dan katalis berada dalam fasa yang berbeda sehingga mudah untuk dipisahkan diakhir reaksi (Pandiangan *and* Simanjuntak, 2013). Triasilgliserol kemudian diubah menjadi ester dan gliserol, ester yang terbentuk disebut sebagai biodiesel (Khalid *and* Khalid, 2011).

2.1.3. Metode Termokimia

Secara termokimia, proses produksi biofuel dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu gasifikasi, liquefaksi, dan pirolisis. Gasifikasi merupakan metode yang sangat baik untuk menghasilkan hidrogen. Proses ini menghasilkan produk akhir berupa CO dan H₂ yang dikenal sebagai *syn gas* (Salam *et al.*, 2018). *Syn gas* merupakan sumber dari hydrogen murni dan karbon monoksida. Selain itu, *syn gas* juga mengandung sedikit nitrogen (N₂), air, karbon dioksida (CO₂), hidrokarbon seperti; C₂H₄, CH₄, C₂H₆, abu, tar, dan sebagainya bergantung pada bahan baku dan suhu yang digunakan (Fernández *and* Menéndez, 2011).

Gasifikasi dilakukan pada suhu tinggi yaitu antara 500 hingga 1400 °C dengan tekanan yang tinggi hingga 33 bar (480 psia). Gas sintesis yang dihasilkan dari proses gasifikasi dapat digunakan untuk produksi listrik dan konversi menjadi bahan bakar cair melalui rute Fischer–Tropsch (Ahmad *et al.*, 2016). Gasifikasi diawali dengan devolatilasi biomasa menghasilkan uap dan arang (*char*) yang diikuti oleh perengkahan dan pembentukan kembali zat-zat volatil serta gasifikasi

arang. Uap pada atmosfer dapat meningkatkan reformasi dan gasifikasi arang sehingga lebih banyak gas-gas ringan yang diproduksi seperti; H₂, CO dan CO₂. Ada beberapa hal yang harus diperhatikan pada proses gasifikasi, yaitu; suhu, tekanan, waktu, jenis gasifier yang digunakan (*fixed-bed*, *fluidized-bed* dan *entrained flow*), agen pengoksidasi (udara, oksigen, uap CO₂ atau *steam water*) dan katalis (Ahmad *et al.*, 2016).

Liquefaksi merupakan proses konversi biomassa yang menghasilkan *bio oil* sebagai produk akhir. Liquefaksi yang menggunakan air sebagai pelarut disebut juga sebagai hidrotermal liquefaksi. Liquefaksi pada dasarnya mirip dengan pirolisis dan tidak memerlukan katalis, namun tetap dilakukan pengembangan liquefaksi menggunakan katalis. Katalis yang umum digunakan adalah katalis basa karena menghasilkan reaksi kondensasi dibandingkan katalis asam yang menghasilkan reaksi polimerisasi. Liquefaksi menggunakan air sebagai pelarut pada suhu yang lebih rendah, namun memerlukan tekanan tinggi sekitar 5 hingga 20 MPa. Namun, proses ini kurang menarik di kalangan peneliti disebabkan hasil *bio oil* yang didapat lebih rendah yaitu sekitar 20-55% berat (Ahmad *et al.*, 2020).

Bio oil yang dihasilkan berbentuk semi-cair, kental, berwarna gelap, berbau seperti asap, viskositas *bio oil* biasanya 10 hingga 10.000 kali lebih tinggi dibandingkan dengan solar dan biodiesel. Selain itu, karakteristik fisik *bio oil* bergantung pada kondisi liquefaksi berlangsung serta penggunaan bahan baku (Ramirez *et al.*, 2015). Beberapa bahan baku yang telah digunakan seperti; limbah hutan (Karagöz *et al.*, 2005), limbah pertanian (Chumpoo and Prasassarakich, 2010), lumpur limbah (Li *et al.*, 2010) dan alga (Neveux *et al.*, 2014).

Pirolisis dianggap sebagai proses yang menjanjikan untuk mengonversi biomassa dan membutuhkan suhu lebih rendah hingga 500 °C dibandingkan dengan proses gasifikasi. Pirolisis merupakan metode yang paling unggul digunakan untuk mengkonversi biomassa menjadi *biofuel*. Selain karena bahan baku yang digunakan tidak terbatas, pirolisis mampu menghasilkan produk berupa padatan (*char* atau arang), cair (*bio-oil*) dan gas (*fuel-gas*) di mana hasil yang diinginkan

dapat disesuaikan dengan kebutuhan dengan berbagai faktor (Collard *and* Blin, 2014).

2.2 Pirolisis Biomassa

Pirolisis merupakan proses konversi secara termokimia melalui pemanasan tanpa adanya oksigen. Pirolisis biomassa telah menjadi topik yang semakin populer untuk menghasilkan hidrokarbon yang biasanya dihasilkan dari minyak bumi. Hal ini, dilakukan karena dua masalah utama yaitu; menipisnya minyak mentah dan maraknya pencemaran lingkungan akibat pembuangan limbah sembarangan (Norouzi *et al.*, 2021). Pirolisis biomassa merupakan suatu teknik yang digunakan untuk menghasilkan hidrokarbon yang diturunkan dari minyak bumi. Biomassa biasanya dikonversi dengan mengurangi kadar air bahan dan menghasilkan peningkatan nilai termal serta potensi pengawetan dengan simultan. Berdasarkan prosesnya, pirolisis dibagi menjadi tiga macam, yaitu; *slow pyrolysis*, *fast pyrolysis* serta *flash pyrolysis*.

Slow pyrolysis menggunakan kisaran suhu antara 400 hingga 600 °C dengan laju pemanasan yang sangat lambat yaitu 0,1-1°C/det. Proses ini menghasilkan arang lebih banyak dibandingkan cairan dan gas (Aini *et al.*, 2022). *Slow pyrolysis* telah dilakukan sebelumnya oleh (Hernandez *et al.*, 2014) menggunakan bahan baku bambu. *Fast pyrolysis* menggunakan suhu sekitar 400 hingga 650 °C dengan laju pemanasan cepat sekitar 10 hingga >1000 °/det. Proses menghasilkan produk utama yaitu cairan atau *bio-oil* (Aini *et al.*, 2022). Penelitian menggunakan *fast pyrolysis* telah dilakukan oleh (Mullen and Boateng, 2013) menggunakan bahan baku rumput gajah dan (Gao and Wu, 2011) menggunakan biomassa kayu. *Flash pyrolysis* pada prosesnya menggunakan temperatur yang tinggi antara 450 hingga 500 °C, tekanan atmosfer serta waktu yang sangat singkat (~ 1 detik). Pada proses ini, molekul kecil yang ringan diubah menjadi produk minyak melalui reaksi homogen dalam fasa gas. *Flash pyrolysis* memerlukan biaya modal yang rendah serta menghasilkan minyak lebih banyak namun dengan kualitas yang kurang

baik. *Flash pyrolysis* telah dilakukan sebelumnya oleh (Sowmya *et al.*, 2022) menggunakan bahan baku dari kulit kayu.

2.2.1 Mekanisme Pirolisis Biomassa

Proses pirolisis mengalami tiga tahap reaksi primer dan sekunder. Reaksi primer terdiri dari; fragmentasi, deoksigenasi, dan pembentukan arang. Proses fragmentasi merupakan pemecahan ikatan pada monomer yang kemudian diubah menjadi gas yang tidak dapat terkondensasi maupun beragam senyawa organik. Umumnya, proses ini terjadi pada suhu 600 °C. Depolimerasi merupakan reaksi terjadinya pemutusan ikatan rangkap antara unit-unit monomer. Setelah ikatan rantai terputus, terjadi reaksi stabilisasi dari dua ujung rantai. Reaksi ini mengakibatkan terjadinya penurunan derajat polimerisasi rantai hingga molekul yang dihasilkan menjadi mudah menguap. Proses ini dapat terjadi pada suhu berkisar antara 250 hingga 500 °C. Proses pembentukan arang merupakan proses dimana biomassa menjadi residu padat (*char*) yang diakibatkan oleh penataan ulang cincin benzena menjadi rantai polisiklik yang stabil. Selain itu, terdapat produk sampingan dari proses ini yaitu terdapat air dan gas yang tidak dapat terkondensasi (Sarangi *et al.*, 2018).

Reaksi sekunder yang dapat terjadi seperti; polimerisasi, *cracking*, dan kondensasi. Reaksi sekunder dapat terjadi apabila produk pirolisis primer mengalami reaksi lanjutan pada suhu yang lebih tinggi dan waktu yang lebih lama. Reaksi ini terjadi dalam fasa uap dan atau diantara fasa uap dan fasa padat. Saat mengalami *cracking*, zat-zat volatil mengalami putusan ikatan kimia membentuk molekul yang lebih ringan (Sarangi *et al.*, 2018). Polimerisasi merupakan reaksi pembentukan polimer dari ribuan hingga jutaan monomer. Pada pirolisis, reaksi polimerisasi terjadi antara gas atau tar akan bergabung dengan rantai karbon pada arang (Syamsudin *et al.*, 2016). Kondensasi atau pengembunan merupakan proses berubahnya wujud suatu material dari uap menjadi cair. Pada proses pirolisis, reaksi kondensasi terjadi pada uap panas pirolisis yang telah

berubah menjadi cairan (cairan pirolisis) atau asap cair melalui alat pendingin uap atau kondenser (Simanjuntak *et al.*, 2022).

2.2.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pirolisis Biomassa

Beberapa faktor yang dapat memengaruhi hasil dari produk pirolisis antara lain; bahan baku, reaktor yang digunakan, waktu, suhu serta tipe katalis. Pengaruh suhu serta waktu pirolisis akan memengaruhi rendemen serta pH dari produk yang dihasilkan. Semakin meningkatnya suhu dan waktu akan meningkatkan rendemen BCO hingga kondisi dimana produksi gas sulit dikondensasi dan rendemen BCO menurun. Sedangkan, meningkatnya suhu dan waktu pirolisis menyebabkan BCO memiliki pH yang semakin rendah. Pemilihan reaktor pirolisis juga dapat memengaruhi proses pirolisis, seperti reaktor dengan *batch* tertutup efektif untuk memproduksi minyak bermutu tinggi dan reaktor *fluidized bed* dapat meningkatkan perpindahan panas sehingga sebagian produk cair akan diubah menjadi gas (Syamsiro *et al.*, 2014).

Selain itu, katalis menjadi salah satu faktor utama dalam proses pirolisis. Katalis pirolisis dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu; (i) *in-situ*, dilakukan dengan mencampurkan katalis dan biomassa, dimana katalis berperan penting dalam membawa panas dan; (ii) *ex-situ*, dilakukan dengan memisahkan biomassa dan katalis. Metode *in-situ* memerlukan biaya yang murah karena hanya menggunakan satu reaktor. Namun, metode ini dapat menyebabkan perpindahan panas yang buruk sebab kontak permukaan padat antara biomassa dan katalis. Metode *ex-situ* sangat selektif terhadap senyawa aromatik yang diinginkan karena metode ini memungkinkan dapat dikontrolnya biomassa dan katalis yang berada dalam reaktor yang berbeda, namun metode ini memerlukan biaya yang mahal. Sehingga, katalis yang sangat umum digunakan secara ekonomi adalah katalis komersial seperti silikon dan zeolit (Norouzi *et al.*, 2021).

2.2.3 Komposisi Kimia BCO

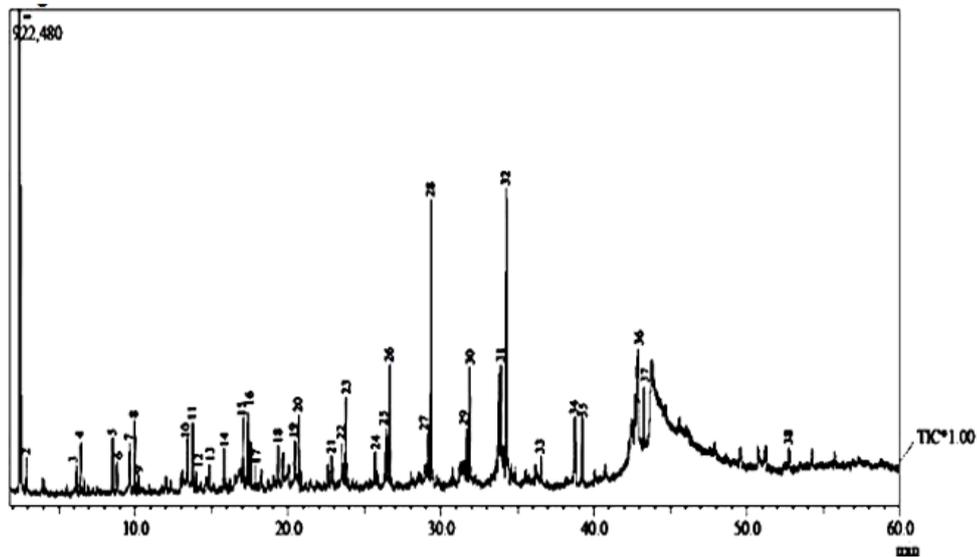
Bio Crude Oil (BCO) memiliki komposisi kimia yang kompleks, di mana terdapat senyawa yang hidrokarbon C₅-C₁₂ yang merupakan komponen penting pada bahan bakar yang disebut biogasolin (Simanjuntak *et al.*, 2021). BCO berwarna coklat tua, kental, memiliki bau yang khas, korosif, relatif tidak stabil, asam dan kompleks secara kimia. BCO mengandung senyawa kimia seperti; air, aldehid, asam karboksilat, keton, karbohidrat, serta alkohol. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mendapatkan komposisi kimia dari BCO dengan berbagai jenis bahan baku dan katalis yang digunakan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi BCO dari bahan baku dan katalis yang berberda

No	Bahan Baku	Katalis	Komposisi Kimia BCO	Referensi
1.	Campuran onggok dan minyak biji karet	Zeolit-A	Hidrokarbon (78%), Alkohol (8%), Ester (7%), Keton (4%), dan Asam (3%)	(Simanjuntak <i>et al.</i> , 2019)
2.	Minyak kelapa sawit	Zeolit-X Terprotonasi	Hidrokarbon (77%), Asam (16% dan keton (7%)	(Febriyanti <i>et al.</i> , 2021)
3.	Campuran ampas tebu dan lumpur minyak kelapa sawit	Zeolit-Y	Hidrokarbon (76%), Alkohol (13%), Ester (5) dan keton (3%)	(Supriyanto <i>et al.</i> , 2018)
4.	Minyak kelapa sawit	Zeolit teraktivasi NaOH 1 M (KZ-NaOH-1)	Hidrokarbon (84,21%), Keton (12,21%) dan ester (3,1%)	(Abdullah <i>et al.</i> , 2019)

BCO yang dihasilkan telah dianalisis komposisi kimianya menggunakan *Gas Chromatography Mass Spectrometry* (GC-MS) yang merupakan teknik kromatografi yang digabungkan dengan spektrometri massa. GC digunakan untuk mencari senyawa volatil pada kondisi vakum tinggi dan tekanan yang rendah jika dipanaskan. Sedangkan, spektrometri massa digunakan untuk menentukan rumus molekul, bobot molekul serta menghasilkan molekul bermuatan. Sebagai contoh,

menurut (Simanjuntak *et al.*, 2019) BCO yang dihasilkan dari campuran limbah singkong dan minyak biji karet digambarkan pada kromatogram GC pada Gambar 1.



Gambar 1. GC-kromatogram *liquid fuel* yang dihasilkan dari pirolisis campuran limbah singkong dan minyak biji karet menggunakan katalis tanpa kalsinasi (Simanjuntak *et al.*, 2019)

Hasil kromatogram BCO pada Gambar 1 menunjukkan 38 puncak yang masing-masing puncak mewakili satu senyawa. Puncak-puncak tersebut dipisahkan berdasarkan senyawa dari massa molekul rendah ke massa molekul tinggi. Kemudian, kromatogram pada Gambar 1 diidentifikasi masing-masing puncaknya yang ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil identifikasi senyawa pada Tabel 2 terdiri dari beberapa senyawa dengan kandungan hidrokarbon (76%), alkohol (9%), ester (7%), keton (4%) dan asam (3%).

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	Etanol	C ₂ H ₆ O
2	2,905	0,99	Asam Asetat	C ₂ H ₄ O ₂
3	6,173	0,64	Etilbenzena	C ₈ H ₁₀
4	6,439	1,40	1,2-Dimetilbenzena	C ₈ H ₁₀
5	8,533	1,70	2-Oktena	C ₈ H ₁₆
6	8,829	1,24	Siklooktana	C ₈ H ₁₆
7	9,652	2,40	Oktana	C ₈ H ₁₈
8	9,975	2,27	2-Nonena	C ₈ H ₁₈
9	10,194	0,98	Nonana	C ₉ H ₂₀
10	13,441	1,66	Butilbenzena	C ₁₀ H ₁₄
11	13,772	1,97	Limonen	C ₁₀ H ₁₆
12	13,977	0,71	1-Dekena	C ₁₀ H ₂₀
13	14,848	0,84	3-Dekena	C ₁₀ H ₂₀
14	15,828	1,74	Siklodekana	C ₁₀ H ₂₀
15	17,072	2,17	3,5-Dimetiloktana	C ₁₀ H ₂₂
16	17,369	2,17	1-Undekena	C ₁₁ H ₂₂
17	17,847	0,79	2-Undekena	C ₁₁ H ₂₂
18	19,333	1,79	3-Undekena	C ₁₁ H ₂₂
19	20,427	1,98	4-Undekena	C ₁₁ H ₂₂
20	20,693	2,78	Pentilbenzena	C ₁₁ H ₁₆
21	22,834	1,78	Isobutiltoluena	C ₁₁ H ₁₆
22	23,522	1,37	Undekana	C ₁₁ H ₂₄
23	23,771	2,92	1-Dodekena	C ₁₂ H ₂₄
24	25,681	1,40	Dodekana	C ₁₂ H ₂₆
25	26,412	2,11	Heksilbenzena	C ₁₂ H ₁₈
26	26,639	4,42	1-Tridekena	C ₁₃ H ₂₆
27	29,120	1,45	Tridekana	C ₁₃ H ₂₈
28	29,339	9,33	2-Fenilheptana	C ₁₃ H ₂₀
29	31,679	1,98	1-Metilheksilbenzena	C ₁₃ H ₂₀
30	31,864	3,83	1-Tetradekena	C ₁₄ H ₂₈
31	33,904	5,95	Pentadekana	C ₁₅ H ₃₂
32	34,279	10,75	1-Heksadekena	C ₁₆ H ₃₂
33	36,536	0,92	Heksadekana	C ₁₆ H ₃₄
34	38,760	3,38	8-Pentadekanon	C ₁₅ H ₃₀ O
35	39,242	2,47	2-Heptadekanon	C ₁₇ H ₃₄ O
36	42,881	4,39	Asam Linoleat	C ₁₈ H ₃₂ O ₂
37	43,266	2,39	Metil Linolelaidat	C ₁₉ H ₃₄ O ₂
38	52,765	0,86	Metil Streatat	C ₁₉ H ₃₈ O ₂

2.3 Zeolit-P

Zeolit merupakan kristal terhidrasi yang terdiri dari unit TO_4 tetrahedral (T = Si atau Al) yang membentuk rongga dan saluran antarkristal teratur dengan dimensi atom yang dihubungkan oleh oksigen. Zeolit memiliki banyak manfaat antara lain; sebagai katalis, mengumpulkan limbah panas dan energi panas matahari, keperluan rumah tangga seperti deterjen serta penggunaan dalam peningkatan energi terbarukan untuk mengubah biomassa menjadi bahan bakar. Zeolit terbagi ke dalam dua jenis, yaitu zeolit alam dan sintetis. Dalam beberapa tahun terakhir, zeolit sintetis dibuat menggunakan mineral alam dikarenakan pembuatan reagen kimia memerlukan biaya yang mahal. Zeolit sintetis tersebut meliputi; mordenit, pirofilit, epidesmin, klinoptinolit, *chabazite* serta zeolit sintetis lainnya (Meng *et al.*, 2019).

Zeolit sintetis dibuat menggunakan prekursor sintetis untuk menekan biaya reagen kimia yang mahal, prekursor yang telah digunakan adalah silika sekam padi (Wittayakun, 2001), limbah nuklir (Katz *et al.*, 2000) serta *fly ash* (Kazemian *et al.*, 2010). Salah satu contoh dari zeolit sintetis adalah zeolit-P. Menurut *International Zeolite Association (IZA)*, zeolit-P berstruktur menarik yaitu dengan dua set saluran berpotongan dan strukturnya disebut dengan “Gismodin” (GIS). Zeolit ini memiliki pori-pori yang kecil sehingga dapat digunakan untuk aplikasi pemisahan gas (Pal *et al.*, 2013). Terdapat tiga polimorf untuk zeolit Na-P; (a) fasa kubik, disebut Na-P1, (b) fasa ortorombik, disebut Na-P2, (c) fasa tetragonal digunakan untuk variasi silika tinggi Na-P dan; (d) aluminium P (MAP) digunakan untuk zeolit-P lainnya dengan rasio Si/Al 1,0 (Novembre *et al.*, 2021).

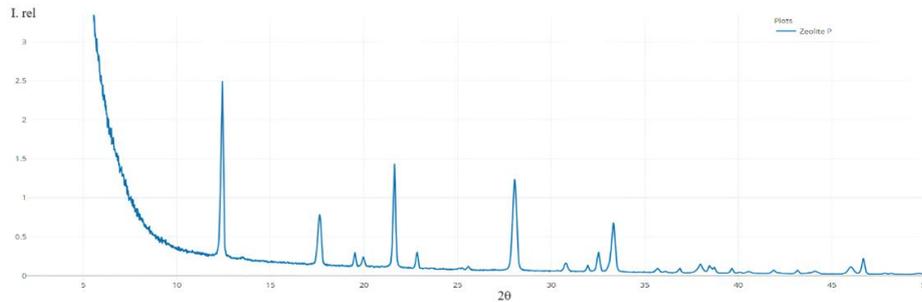
2.3.1 Teknik Preparasi

Beberapa tahun terakhir penggunaan zeolit sintetis semakin meningkat dengan menggunakan mineral alami, seperti; klinoptilolit, pirofit, *chabazite*, mordenit epidesmin dan mineral lainnya. Zeolit-P dapat disintesis dengan beberapa metode yaitu; metode sol-gel, sonokimia, hidrotermal dan metode sintesis lainnya. Namun, metode yang umum digunakan untuk sintesis zeolit-P adalah hidrotermal. Metode hidrotermal memungkinkan kelarutan air yang efektif dan kelarutan serta reaktivitas reaktan untuk sintesis zeolit, dapat mengontrol ukuran morfologi kristal produk serta menata ulang dan melarutkan gel primer awal yang dapat meningkatkan laju kristalisasi (Meng *et al.*, 2019).

2.3.2 Karakterisasi

a. *X-Ray Diffraction (XRD)*

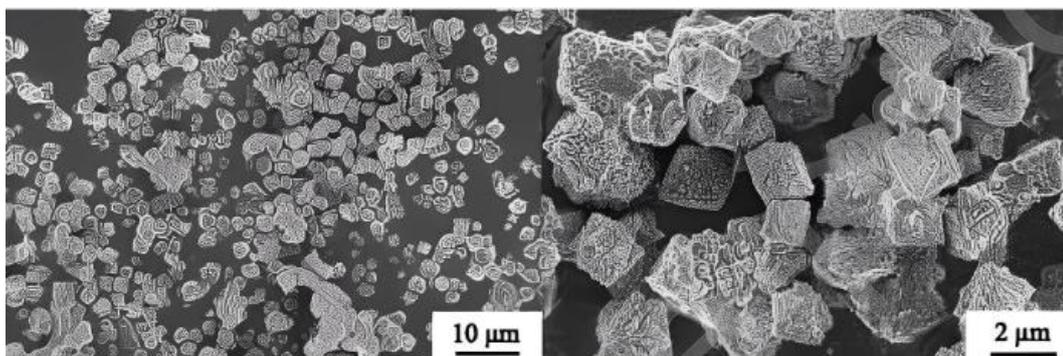
XRD merupakan teknik pengujian nondestruktif yang digunakan untuk mengkarakterisasi berbagai macam sampel termasuk polimer, logam, mineral, plastik, keramik dan berbagai bahan lainnya. XRD digunakan untuk mengkarakterisasi struktur atom yang meliputi posisi atom, susunanya dalam setiap satuan sel dan jarak antar bidang atom. XRD menghasilkan pola difraksi yang memberikan informasi tentang struktur internal pada skala 0,1-100 nm. Sampel yang dikarakterisasi menggunakan XRD berupa padatan kristal sebab susunan atomnya teratur yang dapat memantulkan sinar X. Hasil karakterisasi digambarkan dalam bentuk difraktogram dengan sudut 2θ dan intensitas. Difraktogram zeolit-P menurut *International Zeolite Association (IZA)* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Difraktogram standar IZA zeolit-P (*Database struktur zeolit*)

b. Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM merupakan teknik yang digunakan untuk melihat morfologi permukaan pada suatu sampel. SEM sangat efektif dalam menganalisis pada skala nanometer hingga mikrometer. SEM bekerja pada perbesaran mencapai 300.000 hingga 1.000.000 kali untuk menghasilkan gambar presisi dari berbagai sampel yang digunakan. Pada Gambar 3. terdapat contoh hasil SEM dari zeolit-P di mana hasil SEM menunjukkan morfologi berbentuk prisma segi empat (Liu *et al.*, 2021).

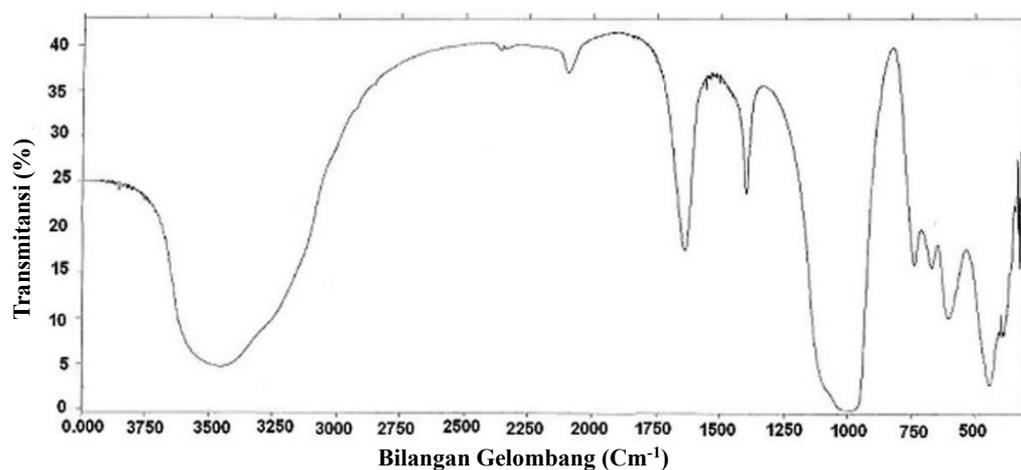


Gambar 3. Hasil SEM zeolit-P (Liu *et al.*, 2021)

c. Fourier Transform Infrared (FTIR)

FTIR pada prinsipnya didasari oleh sifat interaksi radiasi IR dengan getaran molekul. Spektrum IR disebabkan oleh perubahan energi getaran yang disertai dengan perubahan energi rotasi. Radiasi IR terbentuk dari masing-masing ikatan

dalam molekul sehingga menghasilkan spektrum yang umumnya ditetapkan sebagai %transmitansi terhadap bilangan gelombang (cm^{-1}). Terdapat tiga macam vibrasi pada FTIR yaitu; (i) *stretching vibration*, terdiri dari vibrasi simetris dan asimetris; dan (ii) *bending vibration*, terdiri dari *wagging*, *rocking*, *twisting* dan *scissoring*. Spektrum IR zeolit mencakup dua kelompok vibrasi; (i) vibrasi internal unit TO_4 (T=Si, Al dalam zeolit); dan (ii) vibrasi *linkage* eksternal unit TO_4 . Namun, vibrasi *stretching* dan *bending* juga tetap diamati pada semua struktur zeolit. Sampel yang dikarakterisasi pada FTIR dapat berupa padatan, cairan maupun keadaan gas (Maniar *et al.*, 2023). Spektrum IR dari zeolit Na-P1 pada rentang bilangan gelombang $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Spektrum IR zeolit Na-P1 (Kazemian *et al.*, 2010)

Menurut Gambar 4. pita serapan diantara $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ mewakili keberadaan atom Al tersubstitusi dalam bentuk kerangka silika tetrahedral. Pita pada 565, 1061, 650, 1115, 480, 3400, 1375 cm^{-1} berhubungan dengan regangan ganda, regangan asimetris, regangan simetris, regangan T-O, regangan T-O, regangan H-O dan mode pembengkokan H-O. Semua pita ini kurang lebih bergantung pada struktur kristal (Kazemian *et al.*, 2010).

d. *X-Ray Fluorescence (XRF)*

XRF merupakan alat yang digunakan untuk menganalisis unsur yang terkandung dalam sampel secara kualitatif maupun kuantitatif, di mana analisis kualitatif memberikan informasi terkait jenis unsur yang terkandung dalam sampel, sedangkan kuantitatif memberikan informasi terkait jumlah unsur dalam sampel yang ditunjukkan pada puncak-puncak spektrum. XRF didasarkan pada prinsip dispersif panjang gelombang yang menyatakan bahwa atom memancarkan foton sinar-X (peristiwa efek foto listrik) yang relatif melimpah dengan panjang gelombang yang dapat diperkirakan. Efek foto listrik dapat terjadi karena elektron pada sampel terkena radiasi sinar gamma, sinar-X (Jamaludin *and* Adiantoro, 2012).

2.4 Aplikasi

Selain sebagai katalis, zeolit-P memiliki banyak manfaat seperti zeolit-P dapat digunakan sebagai pengolahan limbah yang digunakan untuk menghilangkan ion arsenik, kalsium, nikel, besi, tembaga hingga mangan, hal ini disebabkan karena zeolit memiliki kemampuan adsorpsi yang sangat baik. Selain itu, zeolit-P juga dapat digunakan sebagai pemurnian logam, pembawa agen antibakteri dan pemisahan gas (Meng *et al.*, 2019) serta dapat digunakan sebagai pengganti kompos untuk mengurangi potensi mobilitas logam tanah serta proses transfer antara tanah dengan tanaman (Nissen *et al.*, 2000). Menurut Novembre *et al.*, (2011), zeolit-P digunakan sebagai deterjen yang ramah lingkungan, sebab sifatnya dapat melembutkan air. Zeolit-P juga dapat digunakan sebagai sorben Cr (VI) yang lebih baik dibandingkan dengan klipnotilolit (Szala *et al.*, 2015).

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 Oktober 2023 hingga April 2024. Proses karakterisasi zeolit dilakukan menggunakan beberapa instrumen yaitu; *Scanning Electron Microscope* (SEM) ZEISS dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) Shimadzu 820PC yang berada di Unit Pelaksana Teknis Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (UPT LTSIT) Universitas Lampung, *X-Ray Diffraction* (XRD) PANalytical dan *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 klinoptilolit dari CV. Minatama Utama,

larutan NaOH, kertas saring, *food grade aluminium foil* (FGAF), aquades, dan kertas pH universal.

3.2.2 Alat

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah; alat-alat gelas, neraca analitik, oven, *hotplate stirrer*, *magnetic stirrer*, autoklaf, cawan, mortar dan alu, peralatan pirolisis skala laboratorium, viskometer Ostwald, piknometer 5 mL, ayakan 300 *mesh*, instrumen XRD PANalytical, FTIR Shimadzu 820PC, SEM ZEISS, XRF PANalytical Epsilon 3, dan GCMS-QP2010S SHIMADZU.

3.3 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini terdiri dari empat tahap antara lain; transformasi ZAL menjadi zeolit-P, karakterisasi zeolit-P, percobaan pirolisis, dan karakterisasi BCO.

3.3.1 Transformasi Zeolit Alam Lampung (ZAL) menjadi zeolit-P

ZAL ditransformasi menjadi zeolit P dengan rasio Si/Al 2 dengan melarutkan *food grade aluminium foil* (FGAF) ke dalam 250 mL NaOH 4,41 M. Kemudian, larutan aluminium dicampur dengan 50 g ZAL 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, 700 dan 800 °C lalu dihaluskan dan diayak dengan ayakan 300 *mesh*. Bubuk zeolit-P yang dihasilkan dilakukan karakterisasi dan digunakan sebagai katalis pada proses pirolisis minyak kelapa sawit.

3.3.2 Karakterisasi Zeolit-P

Zeolit yang dikarakterisasi pada penelitian ini yaitu; ZAL, zeolit-P tanpa kalsinasi, zeolit-P kalsinasi 600, 700, dan 800 °C.

a. *X-Ray Fluorescence (XRF)*

Analisis XRF digunakan untuk mengetahui komposisi dari sampel ZAL dan zeolit-P dalam bentuk unsur maupun oksida menggunakan instrumen XRF PANalytical Epsilon 3. Analisis menggunakan XRF tidak memerlukan preparasi sampel sebelum diuji dan waktu pengujian yang singkat. Sehingga, hal tersebut menjadi keunggulan bagi instrumen XRF sebagai analisis uji paling awal sebelum masuk ke tahap uji lainnya. Hasil analisis XRF pada sampel ZAL dapat digunakan untuk menghitung rasio molar Si/Al sebelum melakukan tahap transformasi.

b. *Fourier Transform InfraRed (FTIR)*

ZAL dan zeolit-P hasil transformasi dikarakterisasi menggunakan FTIR Shimadzu 820PC pada rentang bilangan gelombang 4000-500 cm^{-1} untuk mengetahui gugus fungsinya.

c. *X-Ray Diffraction (XRD)*

Analisis XRD digunakan untuk mengetahui sifat kristal atau fasa kristal dari sampel ZAL dan zeolit-P. Analisis XRD pada penelitian ini menggunakan PANalytical dengan material anoda Cu, energi 40 kV, arus 30 mA, dan sudut difraksi pada rentang 5-50° untuk mengidentifikasi pola XRD. Kemudian, data yang diperoleh dianalisis menggunakan *software* Match!4 ver. 4.0 dan membandingkan hasil data sampel dengan data standar pada *database* IZA.

d. *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Analisis SEM digunakan untuk mengetahui morfologi dari permukaan sampel ZAL dan zeolit-P. Analisis ini dilakukan menggunakan SEM ZEISS dengan instrument tegangan percepatan elektron 20,00 kV, WD 8,00 mm, dan perbesaran (Mag) dari 1.000 hingga 20.000 kali.

3.4 Percobaan Pirolisis

Proses pirolisis dilakukan dengan alat reaktor pirolisis skala laboratorium menggunakan katalis zeolit-P hasil transformasi ZAL sebanyak 5 g yang dicampurkan dengan 100 mL minyak kelapa sawit. Proses pirolisis dilakukan sekitar 90 menit, dihasilkan produk cair dari pirolisis yaitu fasa air dan fasa organik berupa BCO yang selanjutnya dipisahkan menggunakan corong pisah. BCO yang telah dipisahkan kemudian dikarakterisasi menggunakan GC-MS dan uji karakterisasi fisik yaitu; titik nyala, denistas, dan viskositas.

3.4.1. Analisis *Bio Crude Oil (BCO)*

a. *Gas Chromatography-Mass Spectroscopy (GC-MS)*

GC-MS digunakan untuk mengidentifikasi komponen yang ada pada BCO. 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 133 kPa, dan aliran total 34,6 mL/menit.

b. Uji Titik Nyala, Densitas, dan Viskositas

Uji titik nyala BCO dilakukan dengan menggunakan cawan tertutup pensky-Martens dan diukur sesuai standar ASTM D93.

Densitas (massa jenis) BCO diukur menggunakan piknometer dan data yang didapatkan dihitung menggunakan rumus pada Persamaan (1).

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

Keterangan:

- ρ = densitas sampel BCO (g/mL)
- W_2 = berat piknometer dan BCO (g)
- W_1 = berat piknometer kosong (g)
- V = volume piknometer (mL)

Viskositas BCO diukur untuk mengetahui tingkat kekentalannya menggunakan viskosimeter Ostwald dengan senyawa pembanding air. Data yang didapatkan dimasukkan kedalam Persamaan (2).

$$\eta = \eta_0 \frac{t_1 \rho_1}{t_0 \rho_0} \quad (2)$$

Keterangan:

- η : Viskositas BCO (cP)
- η_0 : Viskositas air (cP)
- t_1 : Waktu alir BCO (det)
- t_0 : Waktu alir air (det)
- ρ_1 : Densitas BCO (g/mL)
- ρ_0 : Densitas air (g/mL)

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Zeolit-P telah berhasil ditransformasi dari Zeolit Alam Lampung (ZAL) menggunakan metode hidrotermal, yang telah dibuktikan dengan analisis XRD dan dibandingkan dengan *database* standar IZA serta hasil analisis SEM menunjukkan morfologi zeolit-P dengan bentuk kristal prisma segiempat.
2. Hasil karakterisasi XRD zeolit hasil transformasi menunjukkan bahwa zeolit-P1 dengan suhu kalsinasi 600 °C merupakan zeolit hasil transformasi terbaik yang dibuktikan dengan memiliki kemiripan yang tinggi pada posisi 2θ dengan perbandingan menggunakan standar IZA zeolit-P.
3. Proses pirolisis minyak kelapa sawit menggunakan katalis zeolit-P menghasilkan BCO dengan kandungan hidrokarbon lebih banyak (>30%) dibandingkan pirolisis tanpa katalis.
4. Hasil analisis BCO dari minyak kelapa sawit yang terbaik dihasilkan dengan menggunakan katalis zeolit-P1 atau zeolit-P dengan suhu kalsinasi 600 °C dengan kandungan hidrokarbon sebesar 51,64% dan perbandingan senyawa biogasolin dan non-biogasolin sebesar 26,88% dan 73,12%.

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-P dari Zeolit Alam Lampung dengan suhu kalsinasi 600 °C dan menggunakan variasi lainnya agar mencari komposisi terbaik dalam mentransformasi zeolit-P.
2. BCO yang dihasilkan mengandung asam terlalu tinggi, yang kemungkinan berasal dari bahan baku yang digunakan, sehingga disarankan menggunakan bahan baku lain atau mencampur bahan baku dengan biomassa lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, Apriyanti, M., Sunardi, Santoso, U. T., Junaidi, A. B., Aditiya, D., and Irawati, U. 2019. Pyrolysis of palm oil using zeolite catalyst and characterization of the boil-oil. *Green Processing and Synthesis*, 8(1), 649–658.
- Ahmad, A. A., Zawawi, N. A., Kasim, F. H., Inayat, A., and Khasri, A. 2016. Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1333–1347.
- Ahmad, S. F. K., Ali, U. F. M., and Isa, K. M. 2020. Compilation of liquefaction and pyrolysis method used for bio-oil production from various biomass: A review. *Environmental Engineering Research*, 25(1), 18–28.
- Aini, N. A., Jamilatun, S., and Pitoyo, J. 2022. Pirolisis Biomassa: Review. *Agroindustrial Technology Journal*, 6(1), 89.
- Aulia, S. 2022. *Transformation Of Lampung Natural Zeolite Into Zeolite-A By Aluminum Addition And Application As Catalyst For Biomass Pyrolysis*. Skripsi. Universitas Lampung.
- Chaiya, C., and Reubroycharoen, P. 2013. Production of bio oil from para rubber seed using pyrolysis process. *Energy Procedia*, 34(662), 905–911.
- Chumpoo, J., and Prasassarakich, P. 2010. Bio-oil from hydro-liquefaction of bagasse in supercritical ethanol. *Energy and Fuels*, 24(3), 2071–2077.

- 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.
- Eviva, N., Shofiyani, A., and Sayekti, E. 2023. Synthesis of NaP Zeolite Based on Bauxite Red Mud Using Hydrothermal Method on Mole Ratio of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ Variations. *Positron*, 13(1), 77-85.
- 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). 1-9.
- Fernández, Y., and Menéndez, J. A. 2011. Influence of feed characteristics on the microwave-assisted pyrolysis used to produce syngas from biomass wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 91(2), 316–322.
- Gamage, J., Lam, H., and Zhang, Z. 2010. Bioethanol production from lignocellulosic biomass, a review. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 4(1), 3–11.
- Gao, X., and Wu, H. 2011. Combustion of volatiles produced in situ from the fast pyrolysis of woody biomass: Direct evidence on its substantial contribution to submicrometer particle (PM1) emission. *Energy and Fuels*, 25(9), 4172–4181.
- Hernandez-Mena, L. E., Pecora, A. A. B., and Beraldo, A. L. 2014. Slow pyrolysis of bamboo biomass: Analysis of biochar properties. *Chemical Engineering Transactions*, 37(3), 115–120.
- Hwang, G. C., Hwang, H., Bang, Y., Choi, J., Park, Y., Jeon, T. Y., Chae, B., Jung, H., and Lee, Y. 2021. A role for subducted albite in the water cycle and alkalinity of subduction fluids. *Nature Communications*, 12(1), 1–8.
- Jamaludin, A., and Adiantoro, D. 2012. Analisis Kerusakan X-Ray Fluoresence (XRF). *Batan*, 5, 19–28.

- Jefriadi, J., Bahri, S., Sunarno, S., and Jelita, R. 2019. Pyrolysis Of Cassava Bagasse Into Bio-Oil Using Ni/Nza Catalysts. *Konversi*, 8(2), 92–98.
- Karagöz, S., Bhaskar, T., Muto, A., and Sakata, Y. 2005. Comparative studies of oil compositions produced from sawdust, rice husk, lignin and cellulose by hydrothermal treatment. *Fuel*, 84(8), 875–884.
- Katz, A., Brough, A. R., Kirkpatrick, R. J., Struble, L. J., and Young, J. F. 2000. Effect of solution concentration on the properties of a cementitious grout wasteform for low-level nuclear waste. *Nuclear Technology*, 129(2), 236–245.
- Kazemian, H., Naghdali, Z., Ghaffari Kashani, T., and Farhadi, F. 2010. Conversion of high silicon fly ash to Na-P1 zeolite: Alkaline fusion followed by hydrothermal crystallization. *Advanced Powder Technology*, 21(3), 279–283.
- Khalid, K., and Khalid, K. 2011. Transesterification of palm oil for the production of biodiesel. *American Journal of Applied Sciences*, 8(8), 804–809.
- Li, H., Niu, S., and Lu, C. 2017. Pyrolysis Characteristics of Castor Oil through Thermogravimetric Coupled with Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Procedia Engineering*, 205(7), 3705–3710.
- Li, H., Yuan, X., Zeng, G., Huang, D., Huang, H., Tong, J., You, Q., Zhang, J., and Zhou, M. 2010. The formation of bio-oil from sludge by deoxy-liquefaction in supercritical ethanol. *Bioresource Technology*, 101(8), 2860–2866.
- Liu, W., Aldahri, T., Xu, C., Li, C., and Rohani, S. 2021. Synthesis of sole gismondine-type zeolite from blast furnace slag during CO₂ mineralization process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 1-35.
- Maniar, V., Kalsara, K., and Upadhyay, U. 2023. A Review of Ftir-An Useful Instrument. *International Journal of Pharmaceutical Research and Applications*, 8(1), 2486.
- Meng, X., Guo, X., Zhong, Y., Pei, Y., Chen, N., and Xie, Q. 2019. Synthesis of a high-quality NaP zeolite from epidesmine by a hydrothermal method. *Bulletin of Materials Science*, 42(5). 1-8.

- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Rehan, M., Ismail, I. M. I., and Nizami, A. S. 2017. Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 119(3), 239–252.
- Mourhly, A., Khachani, M., El Hamidi, A., Kacimi, M., Halim, M., and Arsalane, S. 2015. The synthesis and characterization of low-cost mesoporous silica SiO₂ from local pumice rock. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 5(2), 1-4.
- Mullen, C. A., and Boateng, A. A. 2013. Accumulation of inorganic impurities on HZSM-5 zeolites during catalytic fast pyrolysis of switchgrass. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(48), 17156–17161.
- Neveux, N., Yuen, A. K. L., Jazrawi, C., Magnusson, M., Haynes, B. S., Masters, A. F., Montoya, A., Paul, N. A., Maschmeyer, T., and de Nys, R. 2014. Biocrude yield and productivity from the hydrothermal liquefaction of marine and freshwater green macroalgae. *Bioresource Technology*, 155(8), 334–341.
- Nissen, L. R., Lepp, N. W., and Edwards, R. 2000. Synthetic zeolites as amendments for sewage sludge-based compost. *Chemosphere*, 41(2), 265–269.
- 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(7), 1-25.
- Norouzi, O., Tavasoli, A., Jafarian, S., and Esmailpour, S. 2017. Catalytic upgrading of bio-products derived from pyrolysis of red macroalgae *Gracilaria gracilis* with a promising novel micro/mesoporous catalyst. *Bioresource Technology*, 243(4), 1–8.
- Novembre, D., di Sabatino, B., Gimeno, D., and Pace, C. 2011. Synthesis and characterization of Na-X, Na-A and Na-P zeolites and hydroxysodalite from metakaolinite. *Clay Minerals*, 46(3), 339–354.
- Novembre, D., Gimeno, D., and Del Vecchio, A. 2021. Synthesis and characterization of Na-P1 (GIS) zeolite using a kaolinitic rock. *Scientific Reports*, 11(1), 1–11.

- Novembre, D., Pasculli, A., Pace, C., Gimeno, D., and Di Sabatino, B. 2010. Synthesis of sodalite from natural kaolinite: A way to simulate the loss in weight of chlorine during the synthesis process by an analytical and mathematical modeling. *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana*, 11(2), 548–549
- Nugroho, A., and Redjeki, A. S. 2015. Pengaruh Waktu Pemanasan Pada Pembuatan Senyawa Alum Dari Limbah Foil Blister Untuk Keperluan Industri Farmasi. *Jurnal Konversi*, 4(2), 1.
- Pal, P., Das, J. K., Das, N., and Bandyopadhyay, S. 2013. Synthesis of NaP zeolite at room temperature and short crystallization time by sonochemical method. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 314–321.
- Pandiangan, K. D., and Simanjuntak, W. 2013. Transesterification of coconut oil using dimethyl carbonate and TiO₂/SiO₂ heterogeneous catalyst. *Indonesian Journal of Chemistry*, 13(1), 47–52.
- Ramirez, J. A., Brown, R. J., and Rainey, T. J. 2015. A review of hydrothermal liquefaction bio-crude properties and prospects for upgrading to transportation fuels. *Energies*, 8(7), 6765–6794.
- Salam, M. A., Ahmed, K., Akter, N., Hossain, T., and Abdullah, B. 2018. A review of hydrogen production via biomass gasification and its prospect in Bangladesh. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(32), 14944–14973.
- Sanjaya, D., and Haryanto, A. 2015. Biogas Production From a Mixture of Cow Manure With Chicken Manure. *Teknik Pertanian Lampung*, 4(2), 127–136.
- Sarangi, P. K., Nanda, S., and Mohanty, P. 2018. Recent advancements in biofuels and bioenergy utilization. In *Recent Advancements in Biofuels and Bioenergy Utilization*, 10(3), 227-259.
- Simanjuntak, J. P., Hasan, H., Pakpahan, B. M. T., dan Putra, A. N. 2022. Pengaruh Suhu Kondensasi Pada Produksi Asap Cair Dari Biomassa Tempurung Kelapa Dengan Proses Pirolisis. *SJoME*, 4(1), 1–9.

- Simanjuntak, W., Delilawati Pandiangan, K., 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., 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).
- Song, C., Pawłowski, A., Ji, A., Shan, S., and Cao, Y. 2014. Catalytic pyrolysis of rice straw and product analysis. *Environment Protection Engineering*, 40(1), 35–43.
- Sowmya, C., Kaliappan, S., Mohammed Ali, H., Sekar, S., Depoures, M. V., Patil, P. P., Subbaiah, B. S., Socrates, S., and Birhanu, H. A. 2022. Flash Pyrolysis Experiment on Albizia odoratissima Biomass under Different Operating Conditions: A Comparative Study on Bio-Oil, Biochar, and Noncondensable Gas Products. *Journal of Chemistry*, 2022.
- 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.
- Syamsiro, M., Cheng, S., Hu, W., Saptoadi, H., Pratama, N. N., Trisunaryanti, W., and Yoshikawa, K. 2014. Liquid and Gaseous Fuel from Waste Plastics by Sequential Pyrolysis and Catalytic Reforming Processes over Indonesian Natural Zeolite Catalysts. *Waste Technology*, 2(2), 44-51.
- Syamsiro, M., Saptoadi, H., Norsujianto, T., Noviasri, P., Cheng, S., Alimuddin, Z., and Yoshikawa, K. 2014. Fuel oil production from municipal plastic wastes in sequential pyrolysis and catalytic reforming reactors. *Energy Procedia*, 47(1), 180–188.
- Syamsudin, S., Purwati, S., Surachman, A., and Wattimena, R. B. I. 2016. Pirolisis Isotermal Sludge Cake Dan Pulp Reject Pabrik Pulp Kraft (Isothermal Pyrolysis Of Sludge Cake And Pulp Reject From Kraft Pulp Mill). *Jurnal Selulosa*, 6(2), 71–82.

- Szala, B., Bajda, T., and Jeleń, A. 2015. Removal of chromium(VI) from aqueous solutions using zeolites modified with HDTMA and ODTMA surfactants. *Clay Minerals*, 50(1), 103–115.
- Wittayakun, J. 2001. Transformation of zeolite NaY synthesized from rice husk silica to NaP during hydrothermal synthesis. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 15(3), 225–231.
- Yoo, M. L., Park, Y. H., Park, Y. K., and Park, S. H. 2016. Catalytic pyrolysis of wild reed over a zeolite-based waste catalyst. *Energies*, 9(3), 1–9.
- Zahroh, S. F., Syamsu, K., Haditjaroko, L., and Kartawiria, I. S. 2021. Potential and prospect of various raw materials for bioethanol production in Indonesia: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 749(1), 1-12.