

**SINTESIS ZEOLIT-P DARI BENTONIT SEBAGAI KATALIS UNTUK
PENGOLAHAN MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI
BIOHIDROKARBON DENGAN METODE PIROLISIS**

(Skripsi)

Oleh

**KHAIRI HAYAD FEBRIANA
NPM 2117011047**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

SINTESIS ZEOLIT-P DARI BENTONIT SEBAGAI KATALIS UNTUK PENGOLAHAN MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI BIOHIDROKARBON DENGAN METODE PIROLISIS

Oleh

KHAIRI HAYAD FEBRIANA

Cadangan minyak bumi yang semakin menipis dan naiknya permintaan energi menimbulkan kekhawatiran global. Indonesia berpotensi mengembangkan Energi Baru Terbarukan (EBT), termasuk bioenergi dari minyak kelapa sawit yang melimpah. Pengembangan ini penting untuk mengurangi ketergantungan Indonesia pada minyak bumi. Bioenergi dapat berupa gas (*biogas*), padat (*biochar*), atau cair (*biofuel*). Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan zeolit-P dan mendapatkan informasi karakteristik *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) kemudian mendapatkan hasil uji katalitik katalis dengan indikator kandungan biohidrokarbon yang dihasilkan.

Pada penelitian ini digunakan metode pirolisis untuk menghasilkan bioenergi menggunakan bahan dasar minyak kelapa sawit dengan bantuan katalis zeolit-P yang disintesis menggunakan bentonit alam yang telah dipurifikasi untuk menghasilkan *Bio-Crude Oil* (BCO) yang mengandung biohidrokarbon. Bentonit alam yang telah dipurifikasi menggunakan HCl 1M, di analisis XRF menunjukkan pengurangan signifikan logam Fe dari 33,954% menjadi 4,483%.

Bentonit purifikasi ditransformasi menjadi zeolit-P dengan metode hidrotermal, menyesuaikan rasio Si/Al dari 4,00 menjadi 2,5. Sintesis awal dengan variasi waktu kristalisasi 72, 96, 120 jam pada 600°C kalsinasi. Analisis XRD menunjukkan waktu 96 jam yang paling optimal membentuk kristalin zeolit-P, dilanjutkan ke skala lebih besar pada waktu kristalisasi 96 jam dengan variasi suhu kalsinasi 500, 700, 800 °C, tanpa kalsinasi. Analisis XRD mengkonfirmasi zeolit-P sesuai standar IZA, terbaik pada 700°C puncak 2θ 12,45°, 21,65°, 28,07°. SEM menunjukkan morfologi prisma segi empat. Kemudian katalis zeolit-P diuji katalitik dengan metode pirolisis menggunakan minyak sawit, menghasilkan BCO. Analisis *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) BCO menunjukkan katalis 700°C menghasilkan hidrokarbon terbanyak yaitu 80,77%, asam 11,54%, keton 3,85%, dan alkohol 3,85%.

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

ABSTRACT

SYNTHESIS OF ZEOLITE-P FROM BENTONITE AS A CATALYST FOR THE PYROLYSIS METHOD OF PALM OIL TO PRODUCE BIOHYDROCARBONS

By

KHAIRI HAYAD FEBRIANA

Depleted petroleum reserves and increase energy demand are global supply concerns. Indonesia has great potential to develop New Renewable Energy (NRE), including bioenergy from abundant palm oil. This development is important to reduce Indonesia's dependence on petroleum. Bioenergy can be in the form of gas (biogas), solid (biochar), or liquid (biofuel). This study aims to produce zeolite-P and obtain information on the characteristics of X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) then obtain the results of the catalytic test catalyst with an indicator of the biohydrocarbon content produced.

In this study, the pyrolysis method was used to produce bioenergy using palm oil base material with the help of a zeolite-P catalyst synthesized using natural bentonite that has been purified to produce Bio-Crude Oil (BCO) containing biohydrocarbons. Natural bentonite that has been purified using HCl 1M, with XRF analysis showing a significant reduction of the metal Fe from 33.954% to 4.483%.

Purified bentonite is transformed into zeolite-P by hydrothermal method, adjusting the Si/Al ratio from 4.00 to 2.5. Early synthesis with crystallization time variations of 72, 96, 120 hours at 600°C calcination. XRD analysis showed the most optimal 96-hour time of crystalline zeolite-P, followed by a larger scale at a 96-hour crystallization time with calcination temperature variations of 500, 700, 800°C, without calcination. XRD analysis confirmed zeolite-P to the IZA standard, best at 700°C peak of 2θ 12.45°, 21.65°, 28.07°. SEM indicates the morphology of a rectangular prism. Then the zeolite-P catalyst was tested catalytically by pyrolysis method using palm oil, producing BCO. The Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) BCO analysis showed that the 700°C catalyst produced the most hydrocarbons of 80.77%, acid 11.54%, ketone 3.85%, and alcohol 3.85%.

Keywords: palm oil, bentonite, zeolite-P, bio crude oil(BCO), pyrolysis

**SINTESIS ZEOLIT-P DARI BENTONIT SEBAGAI KATALIS UNTUK
PENGOLAHAN MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI
BIOHIDROKARBON DENGAN METODE PIROLISIS**

Oleh

Khairi Hayad Febriana

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

Jurusan Kimia

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Lampung



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Penelitian : **SINTESIS ZEOLIT-P DARI BENTONIT
SEBAGAI KATALIS UNTUK
PENGOLAHAN MINYAK KELAPA
SAWIT MENJADI BIOHIDROKARBON
DENGAN METODE PIROLISIS**

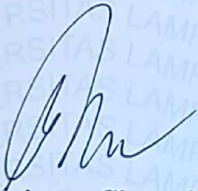
Nama : **Khairi Hayad Febriana**

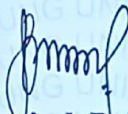
Nomor Pokok
Mahasiswa : **2117011047**

Jurusan : **Kimia**

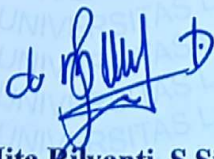
Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**




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


Prof. Dr. Kamisah D. P., S.Si., M.Si.
NIP. 197212051997032001

Ketua Jurusan Kimia FMIPA


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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D.

Sekretaris : Prof. Dr. Kamisah D. P., S.Si., M.Si.

Penguji

Bukan Pembimbing : Dr. Dian Herasari, M.Si.

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Penegtauhan Alam



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 9 Juli 2025

**LEMBAR PERNYATAAN
KEASLIAN SKRIPSI**

Yang bertandatangan dibawah ini,

Nama : Khairi Hayad Febriana
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117011047
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul
“Sintesis Zeolit-P Dari Bentonit Sebagai Katalis Untuk Pengolahan Minyak Kelapa Sawit Menjadi Biohidrokarbon Dengan Metode Pirolisis” adalah benar karya saya sendiri, baik gagasan, hasil, dan analisisnya. Selanjutnya saya juga tidak keberatan jika sebagian atau seluruhnya data di dalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi, sepanjang nama saya disebutkan dan terdapat kesepakatan sebelum dilakukan publikasi.

Bandar Lampung, 15 Juli 2025
Yang menyatakan,



Khairi Hayad Febriana
NPM. 2117011047

RIWAYAT HIDUP



Penulis yang bernama lengkap Khairi Hayad Febriana lahir di Jakarta, pada tanggal 22 Februari 2003. Penulis merupakan anak ke tiga dari tiga bersaudara lahir dari pasangan Bapak Muhayadsyah dan Ibu Yunida. Penulis memulai pendidikan di Taman Kanak-kanak An-Nur pada tahun 2007 dan lulus pada tahun 2009. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Dasar Negeri 05 Pondok Kelapa pada tahun 2009 dan lulus pada tahun 2015. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Pertama Negeri 135 Jakarta Timur dan lulus pada tahun 2018. Kemudian, penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Atas Negeri 17 Kota Bekasi dan lulus pada tahun 2021.

Pada tahun 2021, penulis diterima sebagai mahasiswa baru Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai organisasi, di antaranya sebagai kader muda dan anggota inti Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) pada tahun 2021 dan 2023.

Pada tahun 2023, penulis menjabat sebagai anggota Bidang Kaderisasi dan Pengembangan Organisasi HIMAKI. Penulis dikenal aktif dan bertanggung jawab dalam setiap kegiatan organisasi yang diikuti, serta tetap menunjukkan komitmen tinggi dalam bidang akademik. Penulis mengikuti Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Laboratorium Polimer dan Anorganik/Fisik dari bulan Januari hingga Maret pada tahun 2024.

Setelah mengikuti program PKL, penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) selama 40 hari di Desa Braja Luhur, Kecamatan Braja Selehah, Lampung Timur pada Juni hingga Agustus 2024. Selain itu, penulis juga pernah menjadi Asisten Praktikum Kimia Fisik I untuk mahasiswa angkatan 2023 di Jurusan Kimia.

Penulis menyelesaikan penelitian di Laboratorium Polimer dan Anorganik/Fisik dengan judul " *Sintesis Zeolit-P Dari Bentonit Sebagai Katalis Untuk Pengolahan Minyak Kelapa Sawit Menjadi Biohidrokarbon Dengan Metode Pirolisis*" pada tahun 2025.

MOTTO

*"Ingatlah, sesungguhnya pertolongan Allah itu dekat."
(QS. Al-Baqarah ayat 214)*

*"As long as you continue living, good things will come your way.
Lots of a good things."
(Eiichiro Oda)*

*"The harder you work for something,
the greater you'll feel when you achieve it"
(Khairi Hayad Febriana)*

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan menyebut nama Allah yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang

Segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat, kasih sayang, dan hidayah-Nya yang tiada henti, sehingga penulis dapat menyelesaikan pendidikan di jenjang perguruan tinggi ini. Dengan penuh rasa syukur dan cinta, penulis mempersembahkan karya ini kepada:

Ayah dan Mamahku tercinta yang telah membesarkan, mendidik mendukung, dan mencintai tanpa syarat, serta mendoakan tanpa lelah.

Keluarga Tersayang Nenek, Abang Raedi, Abang Rama, keluarga besar mamah dan ayah terima kasih atas segala perhatian, semangat, dan do'a yang menjadi kekuatan dalam setiap perjuangan.

Bapak/Ibu Dosen Jurusan Kimia, yang telah membimbing dengan penuh dedikasi, membagikan ilmu dan motivasi yang menjadi bekal berharga dalam proses ini.

Para sahabat dan semua orang yang hadir dalam perjalanan ini, yang telah menemani dalam suka dan duka, memberi senyum saat sedih, dan pelukan saat lelah.

Almamater Tercinta Universitas Lampung

SANWACANA

Puji syukur saya ucapkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Sintesis Zeolit-P Dari Bentonit Sebagai Katalis Untuk Pengolahan Minyak Kelapa Sawit Menjadi Biohidrokarbon Dengan Metode Pirolisis**”. Skripsi ini disusun berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan di Labotarium Anorganik/Fisik, Jurusan Kimia, Fakultas MIPA Universitas Lampung. Dalam penyusunan skripsi ini, penulis mendapat bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua yang saya sayangi, Ayah Muhayadsyah dan Mamah Yusnida, serta keluarga yang selalu mendukung, memberikan semangat, serta mendoakan penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini dengan baik.
2. Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D. selaku dosen pembimbing I sekaligus orang tua kedua bagi penulis atas segala bimbingan, nasehat, serta saran yang telah diberikan hingga selesainya penelitian ini.
3. Prof. Dr. Kamisah D. P., S.Si., M.Si selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan masukan dan saran selama penulis mengerjakan penelitian ini.
4. Ibu Dr. Dian Herasari, M.Si. selaku dosen pembahas sekaligus Sekertaris Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan kritik dan saran.
5. Ibu Devi Nur Anisa, S.Pd., M.Sc. selaku dosen pembimbing akademik atas segala saran yang telah diberikan.
6. Dr. Mita Rilyanti, M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung.

7. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan FMIPA Unila beserta jajaran FMIPA lainnya.
8. Bapak serta Ibu dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, pengalaman, dan motivasi selama penulis menjalankan pendidikan di kampus.
9. Nenek, Abang Raedi, Abang Rama, dan keluarga besar yang mendukung baik materi maupun memberi semangat serta mendoakan penulis.
10. Nja selaku teman sekamar penulis yang sudah menemani selama masa perkuliahan dan mendengarkan keluh kesah penulis serta memberikan semangat.
11. Paguyuban Prof. Wasinton Dedes, Adit, dan Tyas selaku teman penelitian penulis, yang sudah berjuang bersama-sama hingga akhir penelitian.
12. Anggota grup logical girls pildja dan triee penulis yang sudah menemani penulis selama perkuliahan dan berjuang bersama hingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
13. Anggota grup Njytm Fildza, Alya, Ais, dan Linda yang sudah menemani penulis selama awal perkuliahan offline dan penelitian hingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
14. Anggggota grup $\frac{1}{2}$ Saham Gacoan Fildza , Dedes, dan Gita, yang telah menemani penulis selama perkuliahan dan mendengarkan keluh kesah penulis, serta memberikan warna selama perkuliahan dan penelitian ini.
15. Paguyuban KIW Jijah, Bella, Melissa, Dapa, Hanna, Ayu, Nurul, dan Lili atas segala dukungan dan bantuan selama menjalani penelitian di Lab. Polimer dan *Teaching Factory* yang senantiasa membantu penulis dalam menyelesaikan tugasnya baik dalam suka maupun duka.
16. Teman-teman Keluarga Be(re)ncana Hapis, Margel, Windi dan Bila yang telah memberikan penulis pengalaman dan kenangan yang berharga.
17. Teman-teman seperjuangan Kimia angkatan 2021 khususnya anggota kelas A. Terima kasih telah memberikan kesempatan bagi penulis untuk menjadi bagian dari kalian semua.
18. Icak dan Ismak yang selalu siap medengarkan keluh kesah penulis, memberikan semangat dan mendukung serta selalu membersamai Penulis,

sehingga Penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan skripsi dengan baik.

19. Patla, Dira, Laras, dan Ghepira yang selalu siap mendengarkan keluhan Penulis, memberikan semangat dan mendukung serta selalu membersamai Penulis, sehingga Penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan skripsi dengan baik.

Dengan kerendahan hati penulis menyadari bahwa skripsi ini masih banyak kekurangan dan kesalahan, sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dari pembaca demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis juga berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan pembaca.

Bandar Lampung, 15 Juli 2025

Penulis

Khairi Hayad Febriana

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR TABEL.....	iii
DAFTAR GAMBAR.....	iv
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	4
1.3 Manfaat Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Bentonit.....	5
2.2 Katalis	6
2.3 Zeolit-P	8
2.4 Pirolisis	9
2.5 Biohidrokarbon	10
2.6 Karakterisasi	11
2.6.1 <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF).....	11
2.6.2 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	12
2.6.3 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) <i>Analysis</i>	13
2.6.4 <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS)	14
III. METODE PENELITIAN	16
3.1 Waktu dan Tempat.....	16
3.2 Alat dan Bahan.....	16
3.3 Prosedur Penelitian	17
3.3.1 Preparasi bentonit.....	17
3.3.2 Sintesis zeolit-P.....	17
3.3.3 Pembuatan <i>Bio-Crude Oil</i> (BCO) dengan metode pirolisis.....	18
3.3.4 Karakterisasi	19
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	21
4.1 Lingkup Penelitian	21
4.2 Purifikasi Bentonit	21

4.3 Karakterisasi Bentonit.....	22
4.3.1 <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF).....	22
4.3.2 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	23
4.3.3 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	25
4.4 Sintesis Zeolit-P	26
4.5 Karakterisasi Zeolit-P	27
4.5.1 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	27
4.5.2 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	35
4.6 Pirolisis Minyak Curah Menjadi BCO.....	36
4.7 Karakterisasi BCO	36
V. KESIMPULAN DAN SARAN	36
5.1 Kesimpulan	42
5.2 Saran	43
DAFTAR PUSTAKA.....	44
LAMPIRAN.....	49

DAFTAR TABEL

	Halaman
1. Komposisi kimia distilat BCO yang dihasilkan dari akar singkong yang tidak dikeringkan.....	15
2. Data komposisi bentonit alam dengan XRF.....	22
3. Data komposisi bentonit setelah purifikasi dengan XRF.	23
4. Data fasa kristalin sampel dengan variasi waktu kristalisasi.	29
5. Data fasa keristalin zeolit-P dengan variasi suhu kalsinasi.....	32
6. Perbandingan data XRD standar IZA zeolit-P dan sampel variasi suhu kalsinasi.	34
7. Perbandingan data XRD standar IZA sodalit dan sampel suhu variasi kalsinasi.	34
8. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit menggunakan katalis zeolit-P tanpa kalsinasi.....	37
9. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit curah dengan katalis zeolit-P kalsinasi 500°C.....	51
10. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit curah dengan katalis zeolit-P kalsinasi 600°C.	52
11. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit curah dengan katalis zeolit-P kalsinasi 700°C.	53
12. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit curah dengan katalis zeolit-P kalsinasi 800°C.	54

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
1. Bentonit.	5
2. Struktur zeolit-P.	8
3. XRD Standar IZA zeolit-P.	12
4. Karakterisasi SEM pada zeolit-P.	13
5. Kromatografi GC dari distilat BCO yang dihasilkan dari akar singkong yang tidak <i>ditorrefied</i>	15
6. Skema metode pirolisis.	18
7. Difraktogram Match!3 (a) bentonit alam dan (b) bentonit purifikasi.	24
8. Difraktogram Origin (a) bentonit alam dan (b) bentonit setelah purifikasi.	24
9. Mikrograf SEM bentonit alam dengan perbesaran (a) 1000x, (b) 5000x, (c) 10.000x, dan (d) 15000x.	25
10. Mikrograf SEM bentonit yang telah dipurifikasi dengan perbesaran (a) 1000x, (b) 5000x, (c) 10.000x, dan (d) 15000x.	26
11. Difraktogram Match!3 sampel dengan waktu kristalisasi: (a) 72 jam, (b) 96 jam, dan (c) 120 jam.	29
12. Difraktogram sampel (a) Standar IZA zeolit-P, (b) Standar IZA sodalit, zeolit-P yang disintesis pada waktu kristalisasi: (c) 72 jam, (d) 96 jam, dan (e) 120 jam.	30
13. Difraktogram menggunakan aplikasi Match!3 sampel zeolit-P yang dikalsinasi pada suhu: (a) 500, (b) 600, (c) 700, (d) 800°C dan (e) tanpa kalsinasi.	32
14. Difraktogram menggunakan sampel (a). Standar IZA zeolit-P, (b). Standar IZA sodalit, (c). Sintesis zeolit-P suhu kalsinasi 500, (d). 600, (e). 700, (f). 800°C dan (g). tanpa kalsinasi.	33

15. Mikrograf sampel dengan perbesaran 15.000x.	35
16. Rangkaian alat pirolisis.	36
17. Kromatogram BCO minyak kelapa sawit curah dengan katalis tanpa kalsinasi.	37
18. Komposisi reaktif BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit curah dengan penambahan katalis zeolit-P tanpa kalsinasi.	38
19. Kromatogram BCO minyak kelapa sawit dengan kalsinasi (a) 500, (b) 600, (c) 700, dan (d) 800°C.....	40
20. Komposisi relatif BCO hasil pirolisis dengan katalis zeolit-P variasi kalsinasi suhu (a) 500, (b) 600, (c) 700, dan (d) 800°C.	41
21. Hasil purifikasi bentonit.....	50
22. Hasil sintesis zeolit-P variasi kalsinasi.	50
23. Hasil pirolisis minyak kelapa sawit curah (BCO)dengan katalis zeolit-P suhu (a) tanpa kalsinasi, (b) 500, (c) 600, (d) 700, dan (e) 800°C.....	50

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Krisis energi global telah menjadi perhatian utama dunia. Ketergantungan manusia pada minyak bumi sebagai sumber energi utama telah mencapai titik kritis. Cadangan minyak bumi yang semakin menipis, diiringi dengan peningkatan permintaan energi yang tak terelakkan, telah memicu kekhawatiran akan kelangkaan dan ketidakstabilan pasokan energi. Selain itu, pembakaran bahan bakar fosil secara masif telah menyebabkan berbagai masalah lingkungan, seperti perubahan iklim akibat emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi alternatif yang bersih dan berkelanjutan menjadi sangat mendesak (Mahroni dan Supriyatna, 2024). Indonesia memiliki potensi besar untuk mengembangkan energi baru terbarukan (EBT), seperti energi surya, panas bumi, dan bioenergi. Energi baru terbarukan (EBT) menawarkan sumber yang bersih, berkelanjutan dan berlimpah. Pengembangan energi baru terbarukan (EBT) dapat membantu Indonesia mengurangi ketergantungan pada minyak bumi, meningkatkan ketahanan energi, dan mengurangi perubahan iklim.

Dalam hal ini, Indonesia memiliki ketersediaan biomassa yang salah satunya yaitu minyak kelapa sawit (Adiiba *et al.*, 2024). Indonesia merupakan produsen kelapa sawit terbesar di dunia, dengan produksi mencapai lebih dari 60 juta ton per tahun. Hal ini berarti terdapat pasokan bahan baku yang melimpah untuk pengolahan minyak kelapa sawit menjadi biofuel. Minyak kelapa sawit memiliki sifat kimia yang cocok untuk dikonversi menjadi biodiesel, yaitu bahan bakar nabati yang dapat digunakan sebagai solar. Biomassa, yang berasal dari bahan organik seperti tanaman kelapa sawit, limbah pertanian, dan limbah

kayu, dapat dikonversi menjadi berbagai bentuk energi, termasuk bioenergi (Wardhana dan Marifatullah, 2020). Bioenergi dapat berupa gas (biogas), padat (biochar), atau cair (biofuel). Untuk menghasilkan bioenergi tersebut dapat menggunakan metode pirolisis, yaitu pemanasan bahan organik tanpa adanya oksigen pada suhu tinggi, merupakan salah satu metode konversi biomassa yang paling menjanjikan untuk menghasilkan biofuel (Simanjuntak *et al.*, 2021).

Keuntungan utama dari proses pirolisis adalah fleksibilitasnya dalam mengolah berbagai jenis biomassa, serta kemampuannya menghasilkan produk yang bernilai tambah tinggi, seperti *bio-oil* yang kaya akan hidrokarbon. Pirolisis dapat dilakukan dengan teknologi yang relatif sederhana dan dapat membantu mengurai gas rumah kaca dengan Minyak kelapa sawit dipanaskan dalam reactor tanpa oksigen pada suhu tinggi (400-600° C) (Sharifzadeh *et al.*, 2019). Bio-oil ini memiliki potensi besar untuk menggantikan bahan bakar fosil konvensional (Simanjuntak *et al.*, 2019). Salah satu komponen utama bio-oil adalah biohidrokarbon. Biohidrokarbon memiliki sifat fisik dan kimia yang mirip dengan hidrokarbon fosil, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk memproduksi berbagai jenis bahan bakar, seperti *bio-gasoline*, *bio-avtur*, dan *biodiesel* (Simanjuntak *et al.*, 2021). Namun, bio-oil yang dihasilkan dari proses pirolisis umumnya mengandung komponen lain selain biohidrokarbon, seperti asam, alkohol, keton, dan ester (Simanjuntak *et al.*, 2021).

Adanya komponen-komponen non-biohidrokarbon dapat menurunkan kualitas *bio-oil* dan membatasi penggunaannya. Oleh karena itu, upaya untuk meningkatkan komposisi biohidrokarbon dalam bio-oil menjadi sangat penting. Salah satu cara untuk meningkatkan kandungan biohidrokarbon dalam *bio-oil* adalah dengan menggunakan katalis. Katalis adalah zat yang dapat mempercepat laju reaksi kimia tanpa ikut bereaksi (Pandiangan *et al.*, 2022). Selain itu, katalis juga dapat mempengaruhi selektivitas reaksi, yaitu proporsi produk yang dihasilkan. Dalam proses pirolisis, katalis mendorong terjadinya reaksi deoksigenasi, yaitu reaksi pengurangan kandungan oksigen dalam molekul bio-oil. Reaksi deoksigenasi ini sangat penting karena dapat meningkatkan jumlah biohidrokarbon, karena biohidrokarbon memiliki kandungan oksigen yang lebih

rendah dibandingkan dengan komponen lain dalam bio-oil. Sehingga pada penelitian ini digunakan katalis zeolit sintesis yaitu zeolit-P.

Zeolit-P memiliki rumus kimia $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{-}5\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Zeolit-P salah satu jenis zeolit yang memiliki struktur pori yang unik dan sifat asam yang kuat. Struktur pori zeolit-P memungkinkan molekul-molekul reaktan untuk berinteraksi dengan situs aktif katalis, sehingga meningkatkan efisiensi reaksi (Latosińska, 2019). Selain itu, sifat asam zeolit-P dapat mempercepat reaksi deoksigenasi. Pada penelitian yang dilakukan oleh Liu et al. (2019) menggunakan *fly ash* sebagai bahan baku utama yang berhasil menghasilkan zeolit-P selain itu zeolite-P dapat dihasilkan dari batuan potasik (Yang et al., 2021), kaolinit (Meftah et al., 2009), tebu (Rahman dan Hayat, 2019), abu lumpur limbah (Latosińska, 2019), dan zeolit alami (Hong and Um, 2021).

Pada penelitian ini pembuatan zeolit-P menggunakan bahan dasar bentonit. Bentonit merupakan mineral yang terdiri dari kristal alumino-silikat terhidrasi yang mengandung kation alkali atau alkali tanah dalam kerangka tiga dimensi. Ion-ion logam tersebut dapat diganti oleh kation lain tanpa merusak struktur bentonit dan dapat menyerap air secara *reversible* (Mahmudha dan Nugraha, 2016). Bentonit digunakan karena bentonit merupakan mineral lempung yang terdiri dari partikel lempung montmotillonit (Maha et al., 2024). Bentonit merupakan mineral yang kaya akan kandungan silika dan alumina, yang merupakan komponen utama dalam sintesis zeolit. Selain itu, bentonit memiliki struktur lapisan yang fleksibel, kapasitas pertukaran ion yang tinggi, dan tersedia dalam jumlah melimpah di Indonesia. Bentonit juga relatif murah dibandingkan dengan bahan baku lainnya, sehingga ekonomis untuk digunakan dalam sintesis zeolit-P. Keunggulan lain bentonit adalah kemampuannya untuk dimodifikasi dengan baik dalam proses sintesis zeolit, menjadikannya pilihan yang ideal untuk menghasilkan zeolit berkualitas tinggi. Bentonit memiliki kemampuan mengembang, sifat penukar ion, luas permukaan yang besar dan mudah menyerap air sehingga memungkinkan penggunaannya sebagai bahan baku pembuatan katalis. Bentonit dapat kemungkinan berhasil dengan menambahkan beberapa *aluminium foil* yang dilarutkan dalam NaOH. Apabila zeolit-P yang dihasilkan

dapat di uji karakterisasinya menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy analysis* (SEM), sehingga zeolit-P dapat digunakan secara maksimal dan dapat meningkatkan hasil *bio oil*, meningkatkan kualitas *bio oil*, serta meningkatkan efesiensi proses pirolisis. Berdasarkan uraian diatas, maka dilakukan penelitian ini pada penggunaan bentonit untuk mensintesis zeolit-P. Zeolit-P yang dihasilkan dari bahan baku bentonit digunakan sebagai katalis pada proses pirolisis minyak kelapa sawit untuk menghasilkan biohidrokarbon dan dimanfaatkan menjadi bahan bakar alternatif dalam pengembangan energi baru terbarukan (EBT).

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Purifikasi bentonit menggunakan HCl 1M dan mendapatkan informasi karakteristik bentonit setelah purifikasi menggunakan XRF.
2. Menghasilkan zeolit-p dari bahan dasar bentonit dan *aluminium foil*
3. Mendapatkan informasi karakteristik zeolit-p dengan menggunakan XRD dan SEM
4. Mendapatkan data aktivitas katalitik zeolit-P yang disintesis, dengan indikator rendemen dan kandungan biohidrokarbon BCO yang dihasilkan

1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Meningkatkan ketersediaan katalis untuk pirolisis
2. Membuka peluang peningkatan nilai ekonomi dari bentonit
3. Membuka peluang untuk ketersediaan energi baru terbarukan (EBT)

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bentonit

Bentonit merupakan salah satu adsorben yang banyak digunakan untuk berbagai keperluan. Bentonit adalah jenis adsorben dengan bahan struktural berlapis silikat. Komponen utama dari bentonit adalah montmorillonite yang memiliki ukuran partikel kecil, luas permukaan yang spesifik besar dan kapasitas adsorpsi air yang kuat, bentuk bentonit dapat dilihat seperti pada Gambar 1. Proses adsorpsi dan transesterifikasi secara simultan ini sangat prospektif dikembangkan lebih lanjut untuk mendapatkan proses produksi biodiesel menggunakan bahan baku murah yang lebih efisien (Yulanda *et al.*, 2018). Katalis yang digunakan yaitu katalis bentonit yang telah diaktivasi dengan H_2SO_4 . Penggunaan katalis bentonit ini bertujuan untuk mempermudah dalam pemisahan produk, gliserol, dan sisa katalis (Purwaningsih *et al.*, 2012).



Gambar 1. Bentonit (Anonim, 2024)

Bentonit merupakan mineral yang terdiri dari kristal alumino-silikat terhidrasi yang mengandung kation alkali atau alkali tanah dalam kerangka tiga dimensi. Ion-ion logam tersebut dapat diganti oleh kation lain tanpa merusak struktur bentonit dan dapat menyerap air secara *reversible*.

Bentonit memiliki kemampuan mengembang, sifat penukar ion, luas permukaan yang besar dan mudah menyerap air sehingga memungkinkan penggunaannya sebagai adsorben. Selain itu adanya keasaman permukaan bentonit terkait dengan asam Brønsted dan asam Lewis memungkinkan penggunaan bentonit sebagai katalis (Zhu *et al.*, 2024). Bentonit merupakan salah satu jenis mineral yang memiliki beragam manfaat dalam kehidupan sehari-hari.

Bentonit dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan semen, keramik, kosmetik, krayon serta sebagai adsorben, bleaching earth maupun sebagai katalis heterogen dalam proses pengolahan minyak baik minyak lemak atau minyak atsiri (Mahmudha dan Nugraha, 2016).

Bentonit adalah mineral yang cukup luas penggunaannya baik dalam bidang pertambangan maupun sebagai pengikat pasir cetak dalam bidang pengecoran logam. Secara alami bentonit ada dua jenis yaitu Na bentonit (*swelling bentonit*) dan Ca bentonit (*non swelling bentonit*) (Ruskandi *et al.*, 2020). Silikon oksida tetrahedral dan satu aluminium oksida octahedral merupakan struktur penyusum montmorillonite. Produk sampingannya seperti arang dan lilin dari proses pirolisis dengan tanah liat bentonit tidak dihasilkan. Hal itu disebabkan oleh sifat bentonit yang asam, sehingga membuatnya terdekomposisi menjadi produk yang lebih ringan (Kamal, 2022).

2.2 Katalis

Katalis adalah suatu zat yang mempercepat laju reaksi kimia pada suhu tertentu, tanpa mengalami perubahan atau terpakai oleh reaksi itu sendiri. Suatu katalis berperan dalam reaksi tapi bukan sebagai pereaksi ataupun produk. Katalis

memungkinkan reaksi berlangsung lebih cepat atau memungkinkan reaksi pada suhu lebih rendah akibat perubahan yang dipicunya terhadap pereaksi. Katalis menyediakan suatu jalur pilihan dengan energi aktivasi yang lebih rendah. Katalis mengurangi energi yang dibutuhkan untuk berlangsungnya reaksi (Purnami *et al.*, 2015).

Katalis dapat dibedakan ke dalam dua golongan utama yaitu, katalis homogen dan katalis heterogen. Katalis heterogen adalah katalis yang ada dalam fasa berbeda dengan pereaksi dalam reaksi yang dikatalisinya, sedangkan katalis homogen berada dalam fasa yang sama. Satu contoh sederhana untuk katalisis heterogen yaitu bahwa katalis menyediakan suatu permukaan di mana pereaksi-pereaksi (atau substrat) untuk sementara terjepit. Ikatan dalam substrat- substrat menjadi lemah sedemikian sehingga memadai terbentuknya produk baru. Ikatan antara produk dan katalis lebih lemah, sehingga akhirnya terlepas (Purnami *et al.*, 2015). Kebanyakan katalis akan mengalami penurunan aktivitas dan selektivitas seiring dengan waktu pemakaian (*time on stream*) katalis.

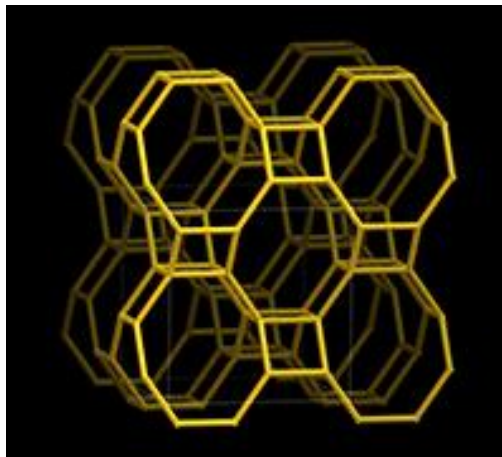
Berkurangnya atau bahkan hilangnya aktivitas dan selektivitas suatu katalis, merupakan masalah serius pada penggunaan katalis dalam suatu reaksi kimia. Penurunan aktivitas dan selektivitas katalisis suatu katalis terjadi karena katalis terdeaktivasi (Utomo dan Laksono, 2007).

Reaksi katalisis heterogen adalah reaksi yang menggunakan katalis yang mempunyai fasa yang berbeda dengan fasa reaktannya. Reaksi katalisis heterogen biasanya menggunakan katalis padatan dimana interaksi terjadi di permukaan padatan/gas atau cairan/padatan. Pusat aktivitas katalis terjadi di permukaan pori padatan katalis. Agar interaksi reaktan dengan pusat aktif katalis dapat berlangsung, reaktan harus berpindah dari fasa cair ke permukaan katalis (Utomo dan Laksono, 2007). Katalisis heterogen adalah katalis yang mempunyai fasa berbeda dengan fasa reaktannya. Katalisis heterogen biasanya menggunakan katalis padatan dimana interaksi terjadi di permukaan padatan/gas atau cairan/padatan (Djawa, 2016).

2.3 Zeolit-P

Zeolit adalah sejenis kristal aluminium silikat berpori, memiliki kinerja adsorpsi dan kemampuan pertukaran ion yang baik, yang telah banyak digunakan dalam pengendalian limbah dan gas. pemisahan kimia reaksi katalitik dan industri material (Era *et al.*, 2016). Pada tahap awal sintesis zeolit, reagen kimia murni sering digunakan sebagai bahan baku, sehingga menyebabkan persiapan yang tidak ekonomis dan pencemaran lingkungan. Untuk menghemat biaya sintesis zeolit, banyak peneliti mencoba memanfaatkan limbah atau bahan bernilai rendah sebagai bahan baku, bukan reagen kimia murni (Liu *et al.*, 2019).

Zeolit merupakan salah satu kristal alumina silikat yang terdiri dari kation bermuatan positif dari unsur alkali dan alkali tanah. Struktur zeolit terdiri dari rongga-rongga yang saling berhubungan dan terisi dari kation-kation yang relatif besar serta molekul air (Astuti *et al.*, 2006). Zeolit sintetis sangat murni dengan ukuran kristal seragam dan kegunaannya berguna untuk aplikasi industri tertentu. Sebaliknya, zeolit alam mengandung bahan asing berbeda yang ukuran kristalnya tidak seragam. Zeolit-P memiliki struktur tetragonal yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur zeolit-P (*International Zeolit Association*, 2007)

Pembuatan zeolit alam membutuhkan waktu beberapa hari hingga puluhan tahun, sedangkan zeolit sintetis dapat dibuat di laboratorium dalam waktu beberapa jam hingga beberapa hari dengan ukuran pori yang dapat dikontrol, karakteristik

permukaan adsorben, dan stabilitas termal yang sangat baik (Khaleque *et al.*, 2020). Adanya kation-kation alkali dan alkali tanah yang dapat dipertukarkan dengan ion logam Fe, pori-pori yang banyak, daya serap yang besar serta luas permukaan yang tinggi menyebabkan zeolit dapat digunakan sebagai adsorben untuk mengurangi konsentrasi besi terlarut dalam air (Selvianata *et al.*, 2019). Zeolit sintesis merupakan senyawa kimia yang memiliki sifat fisik dan kimia sama dengan zeolit alam (Abukhadra *et al.*, 2019). Zeolit dapat disintesis menggunakan bahan yang mengandung Si dan Al. Salah satu bahan yang dapat digunakan untuk mensintesis zeolit yaitu lumpur perusahaan daerah air minum PDAM. Lumpur PDAM merupakan endapan yang dihasilkan dari proses pengolahan air. Lumpur PDAM tersebut memiliki kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 yang cukup tinggi yaitu 49,11 dan 29,45% (Hajar *et al.*, 2014).

2.4 Pirolisis

Pirolisis merupakan teknologi yang cukup menjanjikan dalam mengkonversi biomassa menjadi bahan bakar yang dapat diperbaharui. Teknologi pirolisis sangat berpotensi untuk dikembangkan karena ketersediaan sumber bahan biomassa yang sangat melimpah, teknologinya mudah untuk dikembangkan, bersifat ramah lingkungan dan menguntungkan secara ekonomi. Produk hasil pirolisis dapat dimanfaatkan untuk energi terbarukan, sumber bahan kimia, penghasil energi dan sebagainya.

Teknik pirolisis merupakan sebuah metode termokimia dimana limbah biomassa dikonversikan menjadi bahan bakar padat (*char*), produser gas (*syngas*), dan liquid (*bio-oil*) tanpa kehadiran oksigen dalam sebuah reaktor (Novita *et al.*, 2021). Pirolisis adalah proses dekomposisi termokimia dari material organik, yang berlangsung tanpa udara atau oksigen. Proses yang mengubah bahan organik menjadi arang, biofuel dan gas sintetik melalui dekomposisi bahan organik dengan suhu dan tekanan tinggi (Ohliger *et al.*, 2013)..

Pirolisis biomassa umumnya berlangsung pada rentang temperatur 300°C sampai dengan 600°C. Teknik pirolisis lebih efisien dan fleksibel dibandingkan dengan proses konversi termokimia yang lain. Cairan yang dihasilkan dalam proses ini merupakan awal terbentuknya bio-oil, yang dalam perlakuan selanjutnya bisa menjadi biodiesel atau bioethanol (Basu, 2010). Suhu pembakaran pirolisis biasanya berkisar 300°C, dengan temperatur optimum untuk menghasilkan bio-oil adalah 450 sampai 550°C, tergantung pada jenis biomassa yang digunakan dan parameter yang mempengaruhi produksinya. Suhu yang lebih rendah dari 300°C lebih tepat digunakan untuk biomassa yang kering dan tidak dapat dijadikan sebagai awal proses pirolisis (Li *et al.*, 2008).

Jumlah bio-oil yang dihasilkan akan meningkat seiring dengan peningkatan suhu optimal setelah itu akan menurun jika suhunya terlalu tinggi. Selain itu, minyak pirolisis mentah tidak dapat langsung digunakan dalam infrastruktur energi saat ini, karena sifat yang tidak diinginkan seperti kandungan energi yang rendah dan sifat korosif akibat kandungan oksigennya yang tinggi. Oleh karena itu, perlu ditingkatkan dan difraksinasi menjadi spesifikasi yang diinginkan (Sharifzadeh *et al.*, 2019).

Minyak kelapa sawit adalah salah satu bahan mentah yang memegang peranan dalam perekonomian Indonesia, laksana sumber pendapatan, penyedia lapangan kerja dan untuk arus kas tanah. Kemajuan industri kelapa sawit di Indonesia berkembang secara ekspres (Fanani dan Ningsih, 2019). Produksi minyak kelapa sawit tahun 2018, mencapai 43 juta ton, meningkat 12% dari tahun 2017 dengan jumlah 28 juta ton (Levia dan Mhubaligh, 2023).

2.5 Biohidrokarbon

Biohidrokarbon merupakan senyawa hidrokarbon yang memiliki jumlah atom karbon berbeda. Senyawa biohidrokarbon dapat dibedakan menjadi *biogasoline*, yaitu campuran hidrokarbon dengan rantai karbon C₅-C₁₂, bahan bakar kerosene

atau bioavtur, yang merupakan campuran hidrokarbon dengan rantai karbon C_{13} - C_{17} , dan biodiesel, yang merupakan campuran C_{18} - C_{28} . Peluang produksi biohidrokarbon didorong oleh pengembangan teknologi pirolisis, di mana *Minyak kelapa sawit* dipanaskan dalam kondisi minim atau tanpa oksigen, menghasilkan produk cair, yang dikenal sebagai minyak pirolisis atau *Bio Crude Oil* (BCO). BCO adalah campuran kompleks dari berbagai senyawa, termasuk hidrokarbon dan senyawa organik teroksidasi seperti asam, aldehida, keton, ester, dan fenol (Simanjuntak *et al.*, 2024).

2.6 Karakterisasi

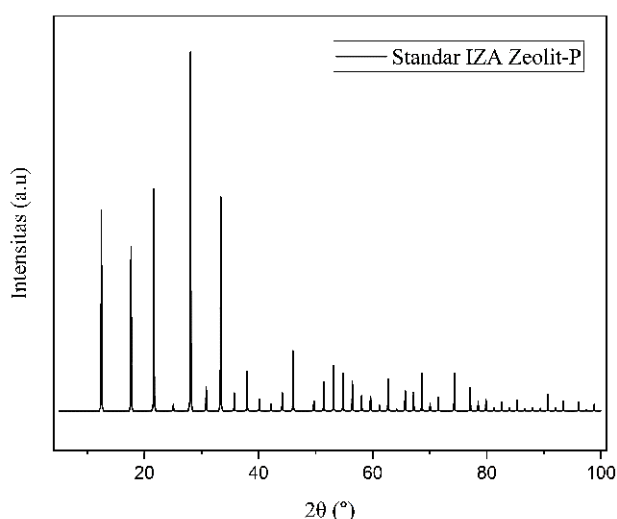
2.6.1 X-Ray Fluorescence (XRF)

X-ray Fluorescence (XRF) adalah teknik analisis non-destruktif yang digunakan untuk menentukan komposisi unsur dari suatu material. Analisator XRF menentukan komposisi kimia suatu sampel dengan mengukur sinar-X fluoresen (atau sekunder) yang dipancarkan dari sampel ketika dirangsang oleh sumber sinar-X primer. Sampel zeolit dimuat ke dalam instrumen XRF. Sampel tersebut disinari dengan sinar-X berenergi tinggi dari tabung sinar-X yang terkontrol. Ketika atom dalam sampel terpapar sinar-X dengan energi yang cukup (lebih besar dari energi ikat kulit K atau L atom), elektron dari salah satu kulit orbital atom dilepaskan. Atom tersebut mendapatkan kembali kestabilannya dengan mengisi kekosongan yang tersisa di kulit orbital bagian dalam dengan elektron dari salah satu kulit orbital berenergi lebih tinggi. Elektron turun ke tingkat energi yang lebih rendah dengan melepaskan sinar-X fluoresensi. Energi sinar-X ini sama dengan perbedaan energi spesifik antara dua keadaan kuantum elektron. Pengukuran energi fluoresensi ini adalah dasar dari analisis XRF (ThermoFisher, 2019).

2.6.2 X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) merupakan teknik yang umum digunakan untuk menentukan dan menganalisis fasa kristalin, komposisi, kristalinitas, dan pergeseran puncak produk zeolit yang disintesis. Dalam penelitian ini, difraktogram zeolit-P yang diperoleh dibandingkan dengan standar zeolit-P dari Asosiasi Zeolit Internasional (IZA) menggunakan perangkat lunak Match!3 untuk memverifikasi pembentukan fasa zeolit-P. Selain itu, analisis XRD juga dapat memberikan informasi tentang ukuran kristal dan tingkat kekristalan produk zeolit. Padatan amorf memiliki atom penyusun yang tersusun secara acak sehingga tidak akan menimbulkan pola difraksi yang khas karena strukturnya yang tidak teratur (Zhang *et al.*, 2022).

Hasil karakterisasi dengan XRD ini diilustrasikan dengan difraktogram yang menampilkan plot sudut 2θ dengan intensitas (Zhang *et al.*, 2022). Padatan amorf memiliki atom penyusun yang tersusun secara acak sehingga tidak akan menimbulkan pola difraksi yang khas karena strukturnya yang tidak teratur. Hasil karakterisasi dengan XRD ini diilustrasikan dengan difraktogram yang menampilkan plot sudut 2θ dengan intensitas yang dapat dilihat pada Gambar 3.

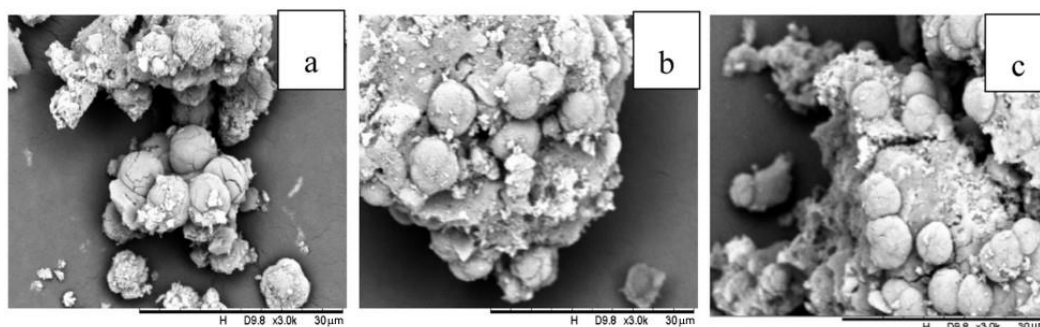


Gambar 3. XRD Standar IZA zeolit-P (*International Zeolit Association, 2007*)

2.6.3 Scanning Electron Microscopy (SEM) Analysis

Scanning Electron Microscopy analysis (SEM) adalah teknik mikroskopi yang digunakan untuk mengamati permukaan sampel dengan resolusi tinggi. Dengan menggunakan berkas elektron yang terfokus, SEM dapat menghasilkan gambar tiga dimensi yang sangat detail dari permukaan suatu material. Prinsip kerja SEM adalah sebagai berikut: Sumber elektron mampu memancarkan elektron yang dipercepat oleh tegangan yang diterapkan. Lensa magnetik menyatukan aliran elektron menjadi berkas yang terfokus, yang kemudian menumbuk permukaan sampel pada titik yang halus dan tepat (ThermoFisher, 2019).

Berkas elektron kemudian memindai permukaan spesimen dalam raster persegi panjang. Pengguna dapat meningkatkan perbesaran dengan mengurangi ukuran area yang dipindai pada spesimen. Detektor mengumpulkan elektron sekunder (SE) dan backscattered. Sinyal yang sesuai diukur dan nilainya dipetakan sebagai variasi kecerahan pada tampilan gambar. Elektron sekunder lebih sering digunakan sebagai sinyal pembacaan. Mereka menyorot topografi permukaan sampel, yaitu area terang yang mewakili tepi sementara area gelap pada cahaya mikroskop. (ThermoFisher, 2019). Sintesis zeolit-P yang pernah dilakukan oleh Liu *et al.*, (2019) yang berhasil mensintesis zeolit-P dari bahan baku *fly ash* berbentuk tetragonal yang menandakan terbentuknya zeolit-P menggunakan SEM yang dapat dilihat pada Gambar 4.

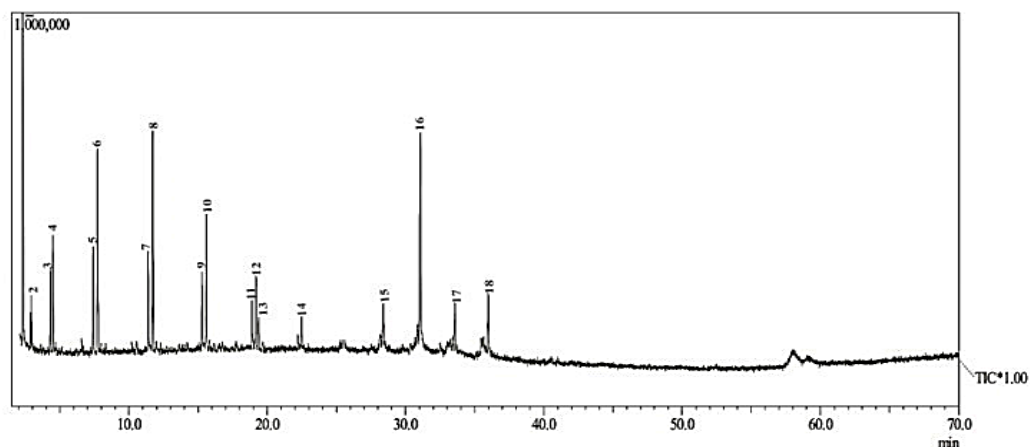


Gambar 4. Karakterisasi SEM pada zeolit-P (Liu *et al.*, 2019)

2.6.4 Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

Gas chromatography-Mass spectrometry (GC-MS) merupakan metode analisis yang kuat untuk mengidentifikasi komponen dalam suatu sampel. Prinsip kerjanya adalah dengan memisahkan campuran senyawa menjadi komponen-komponen individu menggunakan kolom kromatografi gas, lalu mengidentifikasi masing-masing komponen berdasarkan massa molekul dan pola fragmentasinya menggunakan spektrometri massa. Proses ini dimulai dengan menginjeksikan sampel ke dalam GC, di mana senyawa-senyawa akan diuapkan dan dibawa oleh gas pembawa melalui kolom. Dalam kolom, senyawa-senyawa akan terpisah berdasarkan perbedaan volatilitasnya. Senyawa yang terpisah kemudian masuk ke dalam MS, di mana mereka diionisasi dan dipecah menjadi fragmen-fragmen bermuatan. Fragmen-fragmen ini kemudian dipisahkan berdasarkan rasio massa terhadap muatan (m/z) dan dideteksi. Pola fragmentasi yang dihasilkan unik untuk setiap senyawa, sehingga dapat digunakan sebagai sidik jari untuk identifikasi (Nuriah *et al.*, 2023).

Pada penelitian kali ini menggunakan GC-MS untuk melihat senyawa hasil BCO. Proses identifikasi dilakukan dengan menggunakan sistem perpustakaan GC-MS dimana setiap senyawa yang terdapat pada BCO dianalisis berdasarkan luas puncak yang diukur dalam satuan persentase relatif kemudian dibandingkan dengan perpustakaan spektrum. Persentase relatif memberikan gambaran yang komprehensif mengenai suatu sampel. Dengan membandingkan luas area puncak setiap senyawa. Berikut merupakan contoh kromatogram GC-MS yang telah dilakukan Simanjuntak *et al.*, (2021) dari hasil pirolisis *cassava root* menggunakan zeolit-A yang dapat dilihat pada Gambar 5 dan tabel komposisi BCO yang dihasilkan pada penelitian tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 5. Kromatografi GC dari distilat BCO yang dihasilkan dari akar singkong yang tidak *ditorrefied* (Simanjuntak *et al.*, 2021).

Tabel 1. Komposisi kimia distilat BCO yang dihasilkan dari akar singkong yang tidak dikeringkan (Simanjuntak *et al.*, 2021).

Puncak No.	Waktu retensi (Min)	Senyawa	Struktur kimia	Relatif (%)
1	2,321	Propanon	C_3H_6O	25,92
2	2,949	Hekasana	C_6H_{14}	0,84
3	4,311	1-Heptena	C_7H_{14}	1,99
4	4,500	Heptana	C_7H_{16}	2,70
5	7,411	1-Oktena	C_8H_{16}	3,09
6	7,730	Oktana	C_8H_{18}	12,21
7	11,380	1-Nonena	C_9H_{18}	2,87
8	11,722	Nonana	C_9H_{20}	16,27
9	15,292	1-Dekena	$C_{10}H_{20}$	2,13
10	15,610	Dekana	$C_{10}H_{22}$	3,91
11	18,903	Isomer undekena	$C_{11}H_{22}$	1,46
12	19,186	Isomer undekena	$C_{11}H_{22}$	2,23
13	19,374	Undekena	$C_{11}H_{24}$	1,10
14	22,473	Isomer dodekena	$C_{12}H_{24}$	0,92
15	28,370	Isomer dodekena	$C_{12}H_{24}$	1,68
16	31,062	Dodekana	$C_{12}H_{26}$	17,33
17	33,582	Tridekana	$C_{13}H_{28}$	1,44
18	35,976	1-Tetradekena	$C_{14}H_{28}$	1,91

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian telah dilaksanakan pada bulan Oktober 2024 - Maret 2025 di Laboratorium Kimia Anorganik Kimia Fisik Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Karakterisasi dan analisis sampel dilakukan di beberapa tempat institusi yaitu karakterisasi *X-Ray Fluorescence* (XRF) dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Negeri Padang, *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Negeri Padang (UNP), karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi Universitas Lampung, serta analisis hasil pirolisis menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) dilakukan di Laboratorium Universitas Gajah Mada.

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini, yaitu *autoclave*, *oven*, alat pirolisis, *beaker glass* 100 ml, batang pengaduk, spatula, corong, gelas ukur 100 ml, ayakan 300 mesh, corong pisah, mortar dan alu, wadah plastik, botol *vial*, *thermometer*, *magnetic stirrer bar*, *hot plate*, karakterisasi *X-ray Fluorescence* (XRF) PANalytical Epsilon 3, *Scanning Electron Microscopy analysis* (SEM) ZEISS EVO MA 10, *X-Ray Diffraction* (XRD) XPERT PRO PANalytical PW3040/60, dan *Gas chromatography-Mass spectrometry* (GC-MS) QP2010S SHIMADZU..

Bahan yang digunakan pada penelitian ini, yaitu bentonit, $\text{NaOH}_{(\text{pa})}$, HCl 1M, *aluminium foil food grade* (FGAF), akuades, minyak kelapa sawit curah, kertas saring, kertas TBA, dan indikator universal.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Preparasi bentonit

Bentonit komersial yang telah dilakukan karakterisasi menggunakan *X-Ray Fluoresence* (XRF) untuk mengukur kandungan yang terkandung pada bentonit. Bentonit komersial yang digunakan berupa serbuk halus berwarna kekuningan. Bentonit komersial yang telah dikarakterisasi dengan XRF dipurifikasi untuk menghilangkan zat pengotor, terutama logam berat yang dapat mengganggu proses pembentukan zeolit seperti besi dan magnesium, sehingga didapatkan bentonit komersial yang lebih murni. Purifikasi dilakukan dengan cara direndam bentonit menggunakan HCl 1M dalam wadah plastik dengan perbandingan bentonit: HCl (1:5) sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer* untuk melarutkan logam secara perlahan yang terkandung selama 24 jam, setelah itu bentonit komersial dikeringkan menggunakan kertas saring dan dicuci menggunakan akuades hingga pH larutan netral untuk menghilangkan sisa-sisa asam, setelah itu dikeringkan menggunakan oven dengan suhu 100°C selama 8 jam, kemudian dikarakterisasi menggunakan XRF, XRD dan SEM untuk mengukur kandungan yang terkandung pada bentonit komersial yang telah dipurifikasi.

3.3.2 Sintesis zeolit-P

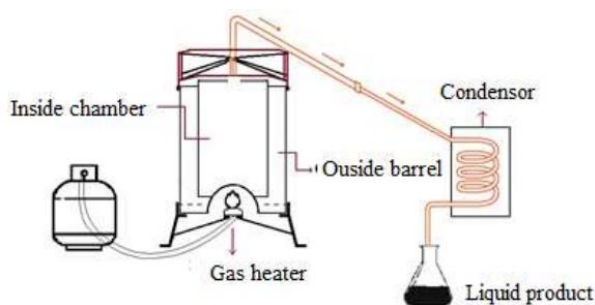
Sampel bentonit komersial dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mendapatkan nilai Si/Al agar dapat menentukan jumlah Al pada zeolit-P. Dilakukan sintesis dengan penambahan *aluminium foil* pada bentonit.

Proses sintesis dilakukan dengan menggunting *aluminium foil* menjadi potongan-potongan kecil kemudian dilarutkan kedalam larutan NaOH menggunakan *stirrer* hingga homogen. Setelah larutan NaOH dan *aluminium foil* telah homogen ditambahkan bubuk bentonit secara perlahan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* hingga homogen. Dimasukkan kedalam *autoclave* campuran yang telah homogen selama 24 jam untuk melakukan aging. Setelah dilakukan aging dimasukan kedalam oven selama 72, 96, dan 120 jam.

Kemudian adonan dimasukkan kembali ke dalam oven selama 24 jam untuk menghilangkan kadar air pada adonan. Setelah dioven adonan yang sudah mengering digerus kemudian diayak menggunakan ayakan 300 mesh untuk mendapatkan sampel dengan ukuran partikel yang realtif homogen, kemudian dikalsinasi pada suhu 600°C. Sampel yang telah dikalsinasi dikarakterisasi menggunakan XRD untuk menentukan variasi waktu kristalisasi yang optimal pada sampel, kemudian sampel yang optimal dilakukan karakterisasi SEM. Sampel optimal yang telah ditentukan kemudian diperbanyak menggunakan metode yang sama untuk dikalsinasi dengan variasi suhu kalsinasi 500, 600, 700, dan 800°C, kemudian sampel dikarakterisasi kembali menggunakan XRD.

3.3.3 Pembuatan *Bio-Crude Oil* (BCO) dengan metode pirolisis

Percobaan pirolisis menggunakan perangkat skala laboratorium seperti ditunjukkan dalam Gambar 6.



Gambar 6. Skema metode pirolisis (Simanjuntak *et al.*, 2024)

Untuk pelaksanaan percobaan, sebanyak 200 mL minyak kelapa sawit dicampur dengan 10 gram katalis. Campuran kemudian dimasukkan ke dalam reaktor. Reaktor kemudian dipanaskan dan cairan hasil pirolisis ditampung kemudian dimasukkan ke dalam corong pisah dan dibiarkan selama 24 jam hingga lapisan air dan lapisan organik terpisah. Lapisan organik kemudian dianalisis dengan *Gas Chromatography-Massa Spectroscopy* (GC-MS) untuk mengidentifikasi komposisi kimianya. Sebagai indikator kinerja, kadar senyawa hidrokarbon (biohidrokarbon) digunakan sebagai acuan.

3.3.4 Karakterisasi

3.3.4.1 X-Ray Fluorescence (XRF)

Karakterisasi bentonit alam dan sesudah purifikasi menggunakan analisis XRF untuk menentukan komposisi unsur-unsur yang terkandung dalam bentonit yang dioperasikan dengan tegangan 30 kV, dan arus 300 μ A, sehingga dapat memberikan informasi mengenai kandungan oksida logam atau unsur lain.

3.3.4.2 X-Ray Diffraction (XRD)

Dilakukan karakterisasi dengan XRD untuk menganalisis struktur kristalografi sampel katalis bentonit alam sebelum dan sesudah purifikasi serta zeolit-P, dengan melihat sifat amorf atau kristalin pada sampel. Data difraktogram memberikan informasi mengenai struktur ataupun fasa berdasarkan letak sudut 2θ .

Difraktometer yang digunakan yaitu PANalytical tipe X'Pert Pro 3040/60. Pola XRD dihasilkan setelah pemindaian radiasi Cu-K α ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$) dengan energi 40 kV dan arus 30 mA. Pola direkam pada sudut (2θ) dengan rentang 10-100°. Kemudian dilakukan perbandingan zeolit hasil sintesis dengan standar yang telah ditetapkan oleh *International Zeolite Association* (IZA). Pola difraksi yang

diperoleh selanjutnya dianalisis secara kualitatif menggunakan aplikasi Match! untuk mengidentifikasi fasa kristalin sampel.

3.3.4.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Dilakukan karakterisasi menggunakan SEM bertujuan untuk memberikan informasi mengenai morfologi permukaan sampel. Alat SEM yang digunakan yaitu ZEISS EVO® MA 10, yang dioperasikan pada 8 kV dengan tegangan percepatan elektron 20 kV. Katalis hasil sintesis dipindai pada perbesaran 1.000; 5.000; 10.000x, dan 15.000x untuk mendapatkan tampilan permukaan yang lebih baik.

3.3.4.4 Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

Karakterisasi menggunakan *Gas Chromatography-Massa Spectroscopy* (GC-MS) dilakukan terhadap lapisan organik atau BCO yang dihasilkan. Karakterisasi bahan bakar cair dilakukan dengan menggunakan GC-MS tipe QP2010S Shimadzu untuk mengidentifikasi komponen dalam sampel dengan kolom tipe Rtx 5 (panjang 30 m; ID 0,25 mm; ketebalan film: 0,25 m; gas pembawa: Helium; EI 70 Ex). Suhu injektor adalah 310°C dengan mode split, suhu detektor adalah 250°C, suhu kolom oven adalah 40°C, laju alir pada tekanan 13 kPa dan aliran total 34,5 mL.min⁻¹. Standar yang digunakan untuk karakterisasi bahan bakar cair adalah dengan menggunakan standar GC-MS. Analisis ini dilakukan untuk mengidentifikasi komponen dalam sampel dan secara khusus untuk melihat apakah senyawa-senyawa dalam sampel mampu diubah menjadi hidrokarbon.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Bentonit telah berhasil dipurifikasi menggunakan HCl 1M, yang telah dibuktikan dengan analisis XRF dengan melihat hasil pengurangan jumlah logam Fe yang mengurang secara signifikan.
2. Zeolit-P telah berhasil ditransformasi dari bentonit alam yang telah dipurifikasi menggunakan metode hidrotermal, yang telah dibuktikan dengan analisis XRD yang dibandingkan dengan *database* standar dan analisis SEM.
3. Hasil karakterisasi XRD pada sampel menunjukkan bahwa sampel dengan waktu kristalisasi dan suhu kalsinasi yang ditunjukkan pada 96 jam dan 700°C merupakan zeolit hasil transformasi terbaik yang dibuktikan dengan memiliki kemiripan yang tinggi pada posisi 2 θ dengan perbandingan menggunakan IZA Zeolit-P.
4. Hasil analisis BCO dari minyak kelapa sawit yang terbaik dihasilkan dengan menggunakan katalis sampel pada suhu kalsinasi 700°C dengan kandungan hidrokarbon sebesar 64,93%, yang menunjukkan adanya pengaruh suhu kalsinasi terhadap pembentukan senyawa hidrokarbon.

5.2 Saran

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

1. Melakukan Pengembangan metode purifikasi menggunakan HCl dengan menambahkan beberapa variasi konsentrasi atau menambahkan reagen lain yang efektif menurunkan kadar logam pengotor, sehingga dapat meningkatkan kemurnian kadar Si/Al pada bentonit.
2. Mengkaji lebih dalam proses modifikasi bentonit menjadi zeolit-P menggunakan variasi rasio lainya pada rentang 2-5 agar mendapatkan komposisi terbaik untuk sintesis zeolit-P.
3. Melakukan *upgrading* untuk meningkatkan kandungan hidrokarbon atau pra-perlakukan pada minyak kelapa sawit untuk mendapatkan hasil persentase hidrokarbon yang lebih maksimal pada proses pirolisis, karena BCO yang dihasilkan pada penelitian ini masih terdapat kandungan asam yang relatif tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abukhadra, M. R., Ibrahim, S. M., Yakout, S. M., El-Zaidy, M. E., and Abdeltawab, A. A. 2019. Synthesis of Na⁺ trapped bentonite/zeolite-P composite as a novel catalyst for effective production of biodiesel from palm oil; Effect of ultrasonic irradiation and mechanism. *Energy Conversion and Management*, 196(1): 739–750.
- Adiiba, S. H., Song, C. P., Lee, Y. Y., Amelia, Chang, M. Y., and Chan, E. S. 2024. Effects of water-soluble secondary antioxidants on the retention of carotene and tocopherols during hydrolysis of crude palm oil catalysed by Eversa® Transform 2.0 for alcohol-free production of palm phytonutrients concentrate. *Industrial Crops and Products*, 209(1): 117-929.
- Anonim. 2024. Pada Kamis, 3 Oktober. Pukul 00.21 WIB.
- Astuti, W., Amin, M., dan Aprimal. 2006. Pemucatan Minyak Kelapa Sawit (CPO) dengan cara Adsorpsi Menggunakan Zeolit Alam Lampung. *Jurnal Zeolit Indonesia*, 5(2): 85–88.
- Basu, P. 2010. Biomass Characteristics. In *Biomass Gasification and Pyrolysis* (First Edit). Amsterdam. 27-63.
- Berghuis, N. T., Mutaqqin, M., Hidayat, F. I., Sugianto, S., Pratama, H., Kirana, A., Rifaldi, D. A., Jesica, A., Maulana, P., dan Thufail, A. 2022. Perbandingan Penggunaan Katalis Alam (Zeolit dan Bentonit) dalam Sintesis Biodiesel dari Minyak Goreng Komersil. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 18(2): 1-174.
- Djawa, J. P. T. 2016. Sintesis Dan Karakterisasi Katalis Mg_{1-x} Zn_x FOH Serta Aplikasinya Pada Reaksi Trimetilhidrokuinon Dan Isofitol. Program Magister, Bidang Keahlian Kimia Anorganik, Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. 1-107.
- Era, L., Zaharah, T. A., dan Syahbanu, I. 2016. Zeolit Sintesis Dari Sekam Padi dan Aplikasinya Dalam Menurunkan Kadar Ion Fe (II) Pada Air Gambut. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 5(4): 36.

- 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): 1-77.
- Fanani, N., dan Ningsih, E. 2019. Analisis Kualitas Minyak Goreng Habis Pakai yang Digunakan oleh Pedagang Penyetan di Daerah Rungkut Surabaya Ditinjau dari Kadar Air dan Kadar Asam Lemak Bebas (ALB). *Jurnal IPTEK*, 22(2): 59–66.
- Ferrarini, S. F., Cardoso, A. M., Alban, L., and Pires, M. J. R. 2018. Evaluation of the sustainability of integrated hydrothermal synthesis of zeolites obtained from Waste. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 29(7): 1464–1479.
- Hajar, S., Wahyuni, N., dan Destiarti, L. 2014. Karakterisasi Zeolit A Sintesis dari Lumpur PDAM Kota Pontianak dan Alumina. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 3(1): 12–16.
- Hong, S., and Um, W. 2021. Top-down synthesis of nap zeolite from natural zeolite for the higher removal efficiency of cs, sr, and ni. *Minerals*, 11(3), 1–15.
- IZA (International Zeolite Association). 2007. <https://www.iza-structure.org/database/>. Diakses pada tanggal 20 Mei 2024 11.58 WIB.
- Kamal, D. M. 2022. Penambahan Katalis Karbon Aktif dan Tanah Liat Bentonit Pada Pirolisis Sampah Plastik Polyethylene Terephthalate (PETE). *Jurnal Energi Dan Teknologi Manufaktur*, 5(01): 23–28.
- Khaleque, A., Alam, M. M., Hoque, M., Mondal, S., Haider, J. Bin, Xu, B., Johir, M. A. H., Karmakar, A. K., Zhou, J. L., Ahmed, M. B., and Moni, M. A. 2020. Zeolite synthesis from low-cost materials and environmental applications: A review. *Environmental Advances*, 2(1): 1-24.
- Latosińska, J. 2019. Synthesis of zeolite P from sewage sludge ash. *E3S Web of Conferences*, 108(7): 1-8
- Levia, D., dan Mhubaligh. 2023. Analisis Proses Produksi CPO Untuk Mengidentifikasi Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Kualitas Mutu CPO. *Jurnal Teknologi Dan Manajemen Industri Terapan*, 2(2): 82–89.
- Li, Z., Wang, L., Hays, T. S., and Cai, Y. 2008. Dynein-mediated apical localization of crumbs transcripts is required for Crumbs activity in epithelial polarity. *Journal of Cell Biology*, 180(1): 31–38.
- Liu, Y., Wang, G., Wang, L., Li, X., Luo, Q., and Na, P. 2019. Zeolite P synthesis based on fly ash and its removal of Cu(II) and Ni(II) ions. In *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 27(2): 341–348.

- Maha F, A., Al-yaqoobi, A. M., and Abdul-Majeed, W. S. 2024. Catalytic Microwave Pyrolysis of Albizia Branches Using Iraqi Bentonite Clays. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 25(2): 175–186.
- Mahmudha, S., dan Nugraha, I. 2016. Pengaruh Penggunaan Bentonit Teraktivasi Asam Sebagai Katalis Terhadap Peningkatan Kandungan Senyawa Isopulegol Pada Minyak Sereh Wangi Kabupaten Gayo Lues – Aceh. *Chimica et Natura Acta*, 4(3): 1-123.
- Mahroni, dan Supriyatna, D. 2024. Energi Baru Terbarukan dalam Pembangunan yang Berkelanjutan dan Pemanfaatan Energi Terbarukan. *Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek*, 2(11): 66–76.
- Meftah, M., Oueslati, W., and Ben, H. A. 2009. Synthesis process of zeolite P using a poorly crystallized kaolinite. *Physics Procedia*, 2(3): 1081–1086.
- Novita, S. A., Santosa, S., Nofialdi, N., Andasuryani, A., dan Fudholi, A. 2021. Artikel Review: Parameter Operasional Pirolisis Biomassa. *Agroteknika*, 4(1): 53–67.
- Nugraha, T., Yuliantina, Y., and Suminta, S. 2010. Activation and Purification of Bentonite for the Treatment of Crude Palm Oil As Vegetable Oil. *Indonesian Journal of Materials Science*, 8(2): 91–95.
- Nuriah, S., Putri, M. D., Rahayu, S., Advaita, C. V., Nurfadhila, L., dan Utami, M. R. 2023. Analisis Kualitatif Senyawa Parasetamol Pada Sampel Biologis Menggunakan Metode Gas Chromatography - Mass Spectrometry (GC-MS). *Journal of Pharmaceutical and Sciences*, 6(2): 795–803.
- Ohliger, A., Förster, M., and Kneer, R. 2013. Torrefaction of beechwood: A parametric study including heat of reaction and grindability. *Fuel*, 104(1): 607–613.
- 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.
- Pratiwi, I., dan Khair, M. 2023. Sintesis Zeolit NaP Melalui Metode Sintesis Zeolit NaX, Efek Gelombang Mikro Sebagai Aktivator. *Cheds: Journal of Chemistry, Education, and Science*, 7(1):5–10.
- Purnami, P., Wardana, I., dan K, V. 2015. Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap Laju Dan Efisiensi Pembentukan Hidrogen. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 6(1): 51–59.

- Purwaningsih, E., Supartono, dan Harjono. 2012. Reaksi Transesterifikasi Minyak Kelapa Dengan Metanol Menggunakan Katalis Bentonit. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 1(2): 133–139.
- Rahman, M. ur, and Hayat, A. 2019. Green synthesis, properties, and catalytic application of zeolite (P) in production of biofuels from bagasse. *International Journal of Energy Research*, 43(9): 4820–4827.
- Ruskandi, C., Siswanto, A., dan Widodo, R. 2020. Karakterisasi Fisik dan Kimiawi Bentonite Untuk Membedakan Natural Sodium Bentonite dengan Sodium Bentonite Hasil Aktivasi. *Polimesin*, 18(01): 53–60.
- Selvianata, V., Zaharah, T. A., dan Rahmalia, W. 2019. Sintesis Zeolit Sodalit Dari Lumpur Pdam Untuk Menurunkan Konsentrasi Besi Terlarut. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 8(1): 49–54.
- Sharifzadeh, M., Sadeqzadeh, M., Guo, M., Borhani, T. N., Murthy Konda, N. V. S. N., Garcia, M. C., Wang, L., Hallett, J., and Shah, N. 2019. The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 71(1): 1–80.
- 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., Febriyanti, T. D., Islami, A. P., Hadi, S., and Ilim, I. 2024. Catalytic upgrading of palm oil derived bio-crude oil for bio-hydrocarbon enrichment using protonated zeolite-Y as catalyst. *AIMS Energy*, 12(3): 600–616.
- 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.
- ThermoFisher. 2019. *Scanning Electron Microscopy Working Principle Table of contents*. Scanning Electron Microscopy Working Principle.
- Utomo, M. P., dan Laksono, E. W. 2007. Tinjauan Umum Tentang Deaktivasi Katalis Pada Reaksi Katalisis Heterogen. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan Dan Penerapan MIPA Yogyakarta*. 110–115.
- Wardhana, A. R., dan Marifatullah, W. H. 2020. Transisi Indonesia Menuju Energi Terbarukan. *Jurnal Tashwirul Afkar*, 38(2): 269–283.

- Yang, K., Li, Y., Guo, H., Liu, X., Chen, X., and Cao, J. 2021. Rapid synthesis of zeolite P from potassic rocks by gel-like-solid phase method. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 16(4): 1–10.
- Yulanda, A., Wahyuni, L., Safitri, R., Bakar, A., dan Supardan, M. D. 2018. Pemanfaatan Bentonit sebagai Penyerap Air pada Proses Transesterifikasi Minyak Jelantah Menjadi Biodiesel. *Jurnal Teknologi Dan Industri Pertanian Indonesia*, 10(2): 14–19.
- Zhang, J., Tang, X., Yi, H., Yu, Q., Zhang, Y., Wei, J., and Yuan, Y. 2022. Synthesis, characterization and application of Fe-zeolite: A review. *Applied Catalysis A: General*, 630(1): 1-50.
- Zhu, J., Zhang, H., Chen, X., and Ji, Z. 2024. Modifying the linear packing model for predicting the packing density of GMZ bentonite pellet mixtures. *Construction and Building Materials*, 419(1): 1-14.