

**SINTESIS ZEOLIT-X DARI BENTONIT SEBAGAI KATALIS UNTUK
PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI BIOHIDROKARBON**

(Skripsi)

Oleh

**DESRITA PRATIWI
NPM 2117011026**



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

ABSTRAK

SINTESIS ZEOLIT-X DARI BENTONIT SEBAGAI KATALIS UNTUK PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI BIOHIDROKARBON

Oleh

DESRITA PRATIWI

Kebutuhan energi yang terus meningkat dan terbatasnya cadangan bahan bakar fosil mendorong pengembangan energi baru dan terbarukan (EBT). Salah satu alternatif yang potensial adalah biohidrokarbon dari minyak kelapa sawit melalui proses pirolisis. Indonesia sebagai produsen kelapa sawit terbesar di dunia memiliki ketersediaan bahan baku yang melimpah. Proses pirolisis minyak kelapa sawit menghasilkan BCO, yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif. Penggunaan katalis, seperti zeolit-X, berperan penting dalam meningkatkan hasil dan kualitas produk.

Penelitian ini bertujuan mensintesis zeolit-X dari bentonit sebagai katalis pirolisis minyak kelapa sawit. Bentonit dipurifikasi menggunakan larutan HCl 1 M untuk mengurangi kandungan logam, seperti Fe. Sintesis zeolit-X dilakukan melalui metode hidrotermal pada suhu 100 °C dengan variasi waktu kristalisasi 3, 4, dan 5 hari. Sampel terbaik kemudian dikalsinasi pada suhu 500, 600, 700, dan 800 °C. Karakterisasi dilakukan menggunakan XRD dan SEM, sedangkan produk cair hasil pirolisis dianalisis menggunakan GC-MS.

Hasil menunjukkan zeolit-X dengan kristalisasi 3 hari dan kalsinasi 800 °C memiliki fasa kristalin tertinggi. Kandungan senyawa hidrokarbon tertinggi dalam BCO sebesar 71,79% diperoleh dari penggunaan katalis pada suhu kalsinasi 800 °C. Dengan demikian, zeolit-X hasil sintesis dari bentonit efektif digunakan sebagai katalis dalam produksi biohidrokarbon melalui pirolisis minyak kelapa sawit.

Kata kunci: zeolit-X, bentonit, pirolisis, biohidrokarbon, dan katalis

ABSTRACT

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

By

DESRITA PRATIWI

The increasing global energy demand and the depletion of fossil fuel reserves have encouraged the development of renewable energy sources. One promising alternative is biohydrocarbon production from palm oil through the pyrolysis process. As the world's largest palm oil producer, Indonesia has abundant raw material availability. Pyrolysis of palm oil yields BCO, which can be utilized as an alternative fuel. The use of catalysts, such as synthetic zeolite-X, plays a crucial role in improving the yield and quality of pyrolysis products.

This study aims to synthesize zeolite-X from bentonite as a catalyst for the pyrolysis of palm oil. The bentonite was first purified using 1 M HCl solution to reduce excess metals such as iron (Fe). Zeolite-X was synthesized via the hydrothermal method at 100 °C with crystallization times of 3, 4, and 5 days. The best-performing sample was then calcined at temperatures of 500, 600, 700, and 800 °C. Characterization was carried out using XRD to identify crystal phases and SEM to observe morphology. The liquid products of pyrolysis were analyzed using GC-MS to determine hydrocarbon composition.

The results showed that zeolite-X with a crystallization time of 3 days and calcination at 800 °C produced the highest crystallinity. GC-MS analysis indicated the highest hydrocarbon content in BCO, reaching 71.79%, with the catalyst calcined at 800 °C. Thus, zeolite-X synthesized from bentonite proved effective as a catalyst for producing biohydrocarbons from palm oil pyrolysis.

Keywords: zeolite-X, bentonite, pyrolysis, biohydrocarbon, and catalyst

**SINTESIS ZEOLIT-X DARI BENTONIT SEBAGAI KATALIS UNTUK
PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI BIOHIDROKARBON**

Oleh

DESRITA PRATIWI

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-X DARI BENTONIT
SEBAGAI KATALIS UNTUK PIROLISIS
MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI
BIOHIDROKARBON

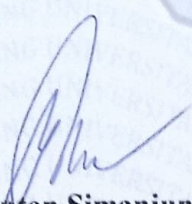
Nama : **Desrita Pratiwi**

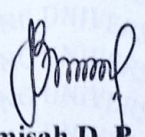
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117011026

Jurusan : Kimia

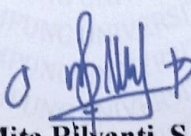
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI
Komisi pembimbing


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


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

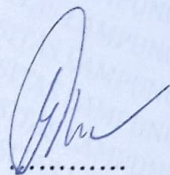
Ketua Jurusan Kimia FMIPA


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

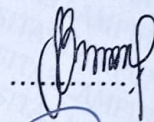
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.

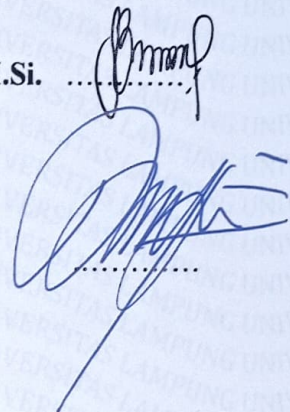


Sekretaris : Prof. Dr. Kamisah D. P., S.Si., M.Si.



Penguji

Bukan Pembimbing : Diky Hidayat, S.Si., M.Sc.



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 bertanda tangan dibawah ini,

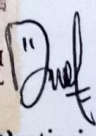
Nama : Desrita Pratiwi
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117011026
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul
**“Sintesis Zeolit-X dari Bentonit Sebagai Katalis Untuk Pirolisis Minyak
Kelapa Sawit Menjadi Biohidrokarbon”** 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, 12 Juli 2025

yatakan,




Desrita Pratiwi
NPM. 2117011026

RIWAYAT HIDUP



Penulis yang bernama lengkap Desrita Pratiwi lahir di Bandar Lampung pada tanggal 15 Desember 2003. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara lahir dari pasangan Bapak Suhaimi dan Ibu Budhi Hastuti. Penulis memulai pendidikan kanak-kanak di TK Riana Al-Amin pada tahun 2008, dan dilanjutkan pendidikan dasar di SDN 1 Sawah Lama hingga tahun 2015. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMPN 5 Bandar Lampung hingga lulus pada tahun 2018. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SMK-SMTI Bandar Lampung dan lulus tahun 2021. Pada tahun yang sama, penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung (Unila) melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama masa perkuliahan selain aktif dalam bidang akademik, penulis juga aktif dalam kegiatan organisasi. Organisasi yang pernah penulis ikuti adalah Himpunan Mahasiswa Kimia (Himaki) FMIPA Unila mulai sebagai kader muda pada tahun 2021, hingga sebagai anggota bidang Kaderisasi & Pengembangan Organisasi (KPO) pada tahun 2022/2023. Penulis juga aktif dalam Unit Kegiatan Mahasiswa Penelitian (UKM-P) pada tahun 2022/2023 di Bidang Informasi dan Komunikasi (Infokom). Selama berorganisasi penulis banyak mengikuti kegiatan baik sebagai peserta maupun panitia. Pada tahun 2023 penulis mengikuti acara Karya Wisata Ilmiah (KWI) XXXIV yang diadakan oleh BEM FMIPA dan penulis sebagai bendahara pelaksana di acara tersebut. Pada tahun yang sama, penulis menjadi

salah satu peraih pendanaan bidang Program Kreativitas Mahasiswa Pengabdian Masyarakat (PKM-PM) dengan judul “PISANGAUL LAMPUNG: Inovasi Digital *Agrosociopreneurship* Berbasis Pemanfaatan Potensi Tanaman Pisang di Desa Sumur sebagai Sentra Oleh-oleh Khas Lampung”. Pada tahun 2023 akhir, penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) dengan judul “Pirolisis Limbah *Fiber* Kelapa Sawit Untuk Produksi *Biochar*” dilaksanakan di Kecamatan Padang Ratu, Lampung Tengah dan laboratorium polimer Jurusan Kimia, FMIPA Unila..

Pada tahun 2024 penulis diamanahkan menjadi asisten praktikum pada masa kuliah yaitu Kimia Fisik I dan Kimia Fisik II untuk mahasiswa Kimia angkatan 2023. Pada kesempatan tersebut, penulis banyak belajar mengenai berbagai hal mulai dari mengulas dan mengingat kembali materi yang pernah penulis pelajari, sampai meningkatkan *soft skill* penulis dalam *public speaking* agar materi dapat tersampaikan dengan baik dan tepat kepada mahasiswa.

MOTTO

“Ya Allah, jauhkanlah aku dari banyaknya berfikir dan rasa risau yang berlebihan, serta berikanlah aku ketenangan hati dan fikiran.”
(Q.S. Taha Ayat 25)

“Sesungguhnya Allah bersamaku, Dia akan memberi petunjuk kepadaku.”
(Q.S. As-Syu‘ara Ayat 62)

"Sebuah titik koma digunakan ketika seorang penulis bisa saja memilih untuk mengakhiri kalimat mereka, tetapi mereka memilih untuk tidak mengakhirinya. Dan penulis tersebut adalah kita."
(Amy Bleuel)

"Tuhan tau waktu yang tepat dan jawaban yang tepat untuk semua doa-doa kita."
(Rony Parulian)

“Proses setiap orang itu beda-beda, ada yang milih lari kencang atau jalan santai. Tapi tenang aja, kita semua akan sampai pada tujuan yang sama.”
(Desrita Pratiwi)



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:

Ayahanda Suhaimi dan Ibunda Budhi Hastuti, yang telah membimbing penulis dengan cinta dan kasih sayang sejak kecil hingga penulis bisa menyelesaikan studi sarjana ini, yang selalu memberikan motivasi dan segalanya.

Kakak tercinta Mirandhi Pratiwi, S.T., M.T. yang selalu mendoakan dan mendukung penulis.

Kakek tersayang Bapak Solikin yang telah mendukung dan memberikan motivasi kepada penulis.

Pembimbing penelitian, Bapak Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D. dan Ibu Prof. Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, S.Si., M.Si. yang selalu sabar dalam membimbing penulis, dengan penuh dedikasi membagikan ilmu dan motivasi yang menjadi bekal berharga dalam proses ini.

Para sahabat dan semua orang yang hadir dalam perjalanan ini.

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-X dari Bentonit Sebagai Katalis Untuk Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Menjadi Biohidrokarbon”**. Skripsi ini disusun berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan di Laboratorium 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. Bapak Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D. selaku pembimbing pertama penelitian atas segala bimbingan, bantuan, nasihat, saran, kesabaran, dan segala kebaikannya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
2. Ibu Prof. Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, S.Si., M.Si. pembimbing kedua penelitian yang telah memberikan masukan dan saran selama penulis menyelesaikan penelitian ini.
3. Bapak Diky Hidayat, S.Si., M.Sc. selaku pembahas/penguji penelitian atas segala saran, kritik, motivasi, inspirasi, dan kesabaran dalam memberikan masukan kepada penulis.
4. Bapak Dr. Eng Suropto Dwi Yuwono, M.T. selaku dosen pembimbing akademik atas segala saran dan bantuan selama menjalani masa-masa perkuliahan hingga selesai.
5. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan FMIPA Unila beserta jajaran FMIPA lainnya.
6. Orang tua penulis Bapak Suhaimi dan Ibu Budhi Hastuti yang telah membimbing penulis sejak kecil hingga menyelesaikan studi sarjana ini.

Terima kasih atas kepercayaannya dan mendukung segala keputusan yang penulis pilih, selalu memberikan kasih sayang, nasihat, motivasi, semangat, dan segalanya.

7. Kakak penulis Mirandhi Pratiwi, S.T., M.T., yang membantu penulis dalam segala hal, memberikan nasihat, dan dukungan untuk menyelesaikan skripsi ini.
8. Robin, kucing kesayangan penulis yang telah tiada menjadi salah satu motivasi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini dan menjadi kenangan terindah selama masa perkuliahan menemani penulis mengerjakan laporan praktikum dan tugas-tugas kuliah.
9. Keluarga besar penulis Solikin family dan Kodimi family yang telah mendukung dalam segala hal dan memberikan kasih sayang, motivasi, serta nasihat kepada penulis.
10. Khairi Hayad Febriana, Tyas Nurfitria, dan Aditya Anugrah Sahyani selaku partner dalam penelitian penulis yang memberikan semangat, membantu, menemani, dan bekerja bersama-sama hingga penelitian dan skripsi ini dapat terselesaikan.
11. Teman seperjuangan Ber-6 Ber S.Si. Tiara Zalfa Nur'Alifah, Desvica Romanda, Sajidah Talfah, Amelia Rizki Az-Zahra, dan Anisah Isti Rohmah, yang selalu memberikan dukungan, mendengarkan keluh kesah, dan memberikan semangat dalam menjalankan perkuliahan dan penelitian ini.
12. Gita Jenika Sari dan Fildza Amalia, selaku teman dekat penulis yang memberikan warna selama masa perkuliahan ini, mendengarkan keluh kesah, memberikan dukungan, dan semangat kepada penulis.
13. Zulva Astrid As-Sihab dan Marsya Tri Amanda, selaku teman dekat dari kecil yang selalu mendukung dan mendoakan, serta memberikan semangat kepada penulis.
14. Paguyuban KIW 21 Erwanda Lili Utari, Adryan Daffa Dzulfiqar, Nurul Natasha Berliani, Hanna Luthfia Maghfiroh, Bella Agustin, Melissaputri, Azizah Rosihana Tiara Putri, dan Ayu Fortune Lisa Hutabarat atas segala dukungan, bantuan, dan semangat selama menjalani penelitian bersama di laboratorium polimer dan *Teaching Factory* dalam suka maupun duka.

15. M. Rizky Arpan Zein yang telah bersedia mengajarkan penulis hingga akhirnya bisa menyelesaikan penelitian ini dengan baik.
16. Kak Endah Pratiwi (Gege) yang telah membantu penulis dalam mengerjakan penelitiannya baik dalam *sharing* ilmu dan pengalaman.
17. Rekan-rekan Kimia Kelas A dan Kimia 2021 seperjuangan yang telah memberikan bantuan dan semangat kepada penulis.
18. Kakak dan teman di UKM Penelitian yang telah memberikan kesempatan bagi penulis untuk menjadi bagian dari kalian dan memberikan kesan menyenangkan.
19. Teman-teman Himaki yang telah banyak memberikan penulis pengalaman, hal baru, pelajaran, dan kepercayaan yang berharga bagi penulis.
20. Teman-teman KKN Negeri Katon dan keluarga Bapak Dian Fajri yang telah memberikan penulis pengalaman dan kenangan yang berharga.
21. Terima kasih banyak atas segala bantuan dan doanya bagi seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.
22. *Last but not least, I wanna thank me, for believing in me, for doing all this hard work, for having no days off, for never quitting, for just being me at all times.*

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, 9 Juli 2025

Penulis

Desrita Pratiwi

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Manfaat Penelitian.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Zeolit.....	4
2.1.1. Zeolit-X	6
2.1.2. Sintesis Zeolit-X.....	7
2.2. Karakterisasi Zeolit-X	7
2.2.1. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	8
2.2.2. <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	9
2.2.3. <i>Gas Chromatography – Mass Spectrometry</i> (GC-MS).....	9
2.3. Bentonit	10
2.4. Modifikasi Bentonit.....	12
2.5. Karakterisasi Bentonit	13
2.5.1. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRF)	13
2.5.2. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	14
2.5.3. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	15
2.6. Katalis.....	16
2.7. Pirolisis	16
2.8. Biohidrokarbon.....	17
III. METODE PENELITIAN.....	18
3.1. Waktu Penelitian.....	18
3.2. Alat dan Bahan	18
3.3. Prosedur Penelitian	19
3.3.1. Preparasi Bentonit	19
3.3.2. Purifikasi Bentonit.....	19
3.3.3. Sintesis Zeolit-X Dari Bentonit	19
3.3.4. Aplikasi Zeolit-X Sebagai Katalis Pirolisis Minyak Kelapa Sawit..	20
3.3.5. Karakterisasi Sampel	21

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	23
4.1. Lingkup Penelitian.....	23
4.2. Karakterisasi Bentonit	23
4.3. Purifikasi Bentonit dan Karakterisasi Hasil Purifikasi	27
4.4. Sintesis Zeolit-X Dari Bentonit	30
4.5. Karakterisasi Zeolit-X	31
4.5.1. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	31
4.5.2. <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	37
4.6. Uji Aktivitas Zeolit-X Sebagai Katalis Pirolisis.....	38
4.7. Karakterisasi BCO hasil pirolisis	39
V. KESIMPULAN	48
5.1. Kesimpulan.....	48
5.2. Saran	49
DAFTAR PUSTAKA	50
LAMPIRAN	54

DAFTAR TABEL

	Halaman
1. Data analisis XRF daerah Jambi	13
2. Data hasil analisis bentonit dengan XRF	24
3. Data hasil analisis bentonit sesudah purifikasi dengan XRF	27
4. Data fasa kristalin sampel zeolit-X waktu kristalisasi 3,4 dan 5 hari	32
5. Data fasa kristalin sampel zeolit-X dengan variasi kalsinasi	34
6. Perbandingan data XRD zeolit-X standar IZA dan sampel dengan variasi kalsinasi	35
7. Perbandingan data XRD sodalit standar IZA dan sampel dengan variasi kalsinasi	36
8. Perbandingan data XRD faujasit standar IZA dan sampel dengan variasi kalsinasi	36
9. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit menggunakan katalis zeolit-X tanpa kalsinasi	40
10. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan katalis zeolit-X kalsinasi 500°C	56
11. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan katalis zeolit-X kalsinasi 600°C	57
12. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan katalis zeolit-X kalsinasi 700°C	58
13. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan katalis zeolit-X kalsinasi 800°C	59

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
1. Struktur zeolit-X.....	6
2. Difraktogram XRD zeolit-X (a) <i>aging 24 hours</i> (b) IZA	8
3. Mikrograf zeolit-A hasil sintesis dengan perbesaran (a) 5.000x dan (b) 15.000x	9
4. Hasil GC kromatogram dari minyak kelapa sawit dengan zeolit H-X.....	10
5. Bentuk fisik bentonit.....	11
6. Difaktogram adsorben bentonit (B) dan bentonit aktivasi (BA).....	14
7. Hasil SEM ZnO-bentonit perbesaran (a) 1000x (b) 5000x.....	15
8. Skema metode pirolisis	21
9. Pola difraksi XRD bentonit alam	25
10. Komposisi fasa bentonit alam berdasarkan karakterisasi menggunakan program Match! <i>version 3.16 Build 288</i>	25
11. Mikrograf SEM bentonit dengan perbesaran yang berbeda (a) 1.000x, (b) 5.000x, (c) 10.000x, dan (d) 15.000x	26
12. Pola difraksi XRD bentonit purifikasi.....	28
13. Komposisi fasa bentonit purifikasi berdasarkan karakterisasi menggunakan program Match! <i>version 3.16 Build 288</i>	28
14. Mikrograf SEM bentonit hasil purifikasi dengan perbesaran yang berbeda (a) 1.000x, (b) 5.000x, (c) 10.000 x, dan (d) 15.000x.	29
15. Komposisi fasa sampel zeolit-X dengan waktu kristalisasi: (a) 3 hari, (b) 4 hari, dan (c) 5 hari.	31

16. Difraktogram (a) zeolit-X standar IZA, (b) faujasit standar IZA, (c) sodalit standar IZA, hasil modifikasi bentonit pada waktu kristalisasi: (d) 3 hari, (e) 4 hari, dan (f) 5 hari	34
17. Komposisi fasa sampel zeolit-X kalsinasi pada suhu yang berbeda: (a) tanpa kalsinasi, (b) 500, (c) 600, (d) 700, dan (e) 800 °C	33
18. Difraktogram sampel (a) zeolit-X standar IZA, (b) faujasit standar IZA, (c) sodalit standar IZA, (d) zeolit-X sintesis kristalisasi 3 hari tanpa kalsinasi, (e) 500, (f) 600, (g) 700, dan (h) 800 °C	34
19. Mikrograf sampel yang dipreparasi dengan waktu kristalisasi 3 hari dan kalsinasi 600 °C pada perbesaran 15.000x.	37
20. Rangkaian alat pirolisis	38
21. Kromatogram BCO minyak kelapa sawit curah dengan katalis tanpa kalsinasi	39
22. Komposisi relatif BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan penambahan katalis zeolit-X tanpa kalsinasi.	40
23. Kromatogram BCO hasil pirolisis dengan katalis zeolit-X kalsinasi suhu (a) 500, (b) 600, (c) 700, dan (d) 800 °C.	42
24. Komposisi relatif BCO hasil pirolisis dengan katalis zeolit-X kalsinasi suhu (a) 500, (b) 600, (c) 700, dan (d) 800 °C.	42
25. Hasil purifikasi bentonit.	55
26. Hasil sintesis zeolit-X variasi kalsinasi (a) tanpa kalsinasi, (b) 500, (c) 600, (d) 700, dan (e) 800°C.	55
27. Hasil pirolisis minyak kelapa sawit curah (BCO) dengan katalis zeolit-X suhu (a) tanpa kalsinasi, (b) 500, (c) 600, (d) 700, dan (e) 800°C.	55

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan energi global diperkirakan terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan industrialisasi, sementara cadangan energi fosil seperti minyak bumi dan batu bara semakin menipis. Penggunaan bahan bakar fosil secara terus-menerus juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbon di atmosfer, yang memicu pemanasan global dan krisis iklim. Oleh karena itu, pengembangan dan pemanfaatan energi alternatif yang ramah lingkungan menjadi suatu keharusan. Energi Baru dan Terbarukan (EBT) menjadi salah satu solusi untuk menyediakan energi secara berkelanjutan, karena bersumber dari alam yang dapat diperbarui, seperti tenaga air, matahari, angin, serta biomassa (Setyono *et al.*, 2019).

Dalam kurun waktu satu dekade, energi Indonesia mengalami kenaikan konsumsi dalam sektor industri, transportasi, dan rumah tangga. Indonesia memiliki sumber energi terbarukan yang melimpah, tetapi belum dimanfaatkan secara optimal. Dalam menyikapi tantangan tersebut, pengembangan EBT berbasis biomassa merupakan salah satu upaya yang terus digiatkan di berbagai negara, termasuk Indonesia. Salah satu upaya yang dilakukan yaitu penggunaan minyak kelapa sawit. Indonesia merupakan negara dengan perkebunan kelapa sawit terluas di dunia. Tahun 2021 luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia mencapai 15.5 juta hektar dan luas perkebunan kelapa sawit di Provinsi Riau adalah 2.89 juta hektar (Yanti *et al.*, 2022). Adanya ketersediaan minyak kelapa sawit yang melimpah, dapat berpotensi sebagai bahan baku yang sangat besar dalam

pengolahan biohidrokarbon dengan metode pirolisis. Pada proses pirolisis energi panas mendorong terjadinya dekomposisi termal sehingga molekul karbon kompleks terurai menjadi senyawa yang lebih sederhana, sebagian besar berupa karbon padat (arang) dan produk cair (Syafira *et al.*, 2022).

Salah satu produk cair yang dihasilkan dari pirolisis dikenal sebagai *Bio Crude Oil* (BCO), yaitu campuran beragam senyawa organik, termasuk senyawa biohidrokarbon dengan panjang rantai karbon yang bervariasi. Selain pirolisis, proses pemisahan senyawa juga dapat dilakukan melalui distilasi, yaitu metode pemisahan campuran berdasarkan perbedaan titik didih dengan menggunakan panas sebagai agen pemisah.

Komposisi BCO sangat dipengaruhi oleh bahan baku dan jenis katalis yang digunakan. Dalam pirolisis minyak kelapa sawit, salah satu katalis yang dapat digunakan adalah zeolit-X. Zeolit merupakan mineral alam yang tersebar luas di berbagai wilayah dunia, dan hingga kini telah ditemukan sekitar 40 jenis zeolit alam. Namun, karena zeolit alam memiliki beberapa keterbatasan, banyak peneliti mengembangkan zeolit sintetis untuk memenuhi kebutuhan industri yang tidak dapat dipenuhi oleh zeolit alam. Saat ini, telah berhasil disintesis sekitar 180 jenis zeolit, salah satunya adalah zeolit-X ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2,5\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) yang memiliki karakteristik serupa dengan zeolit alam dan dapat dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi industri (Krisnawati dan Wardani, 2018).

Pada penelitian ini, zeolit-X dibuat menggunakan bahan baku bentonit. Bentonit memiliki sifat fisik dan kimia yang spesifik dengan biaya yang rendah dan ketersediaannya yang luas. Komponen utama dari bentonit adalah *montmorillonite* yang memiliki ukuran partikel kecil, luas permukaan yang spesifik besar dan kapasitas adsorpsi air yang kuat (Yulanda dkk., 2018). Bentonit memiliki kemampuan mengembang, sifat penukar ion, luas permukaan yang besar dan mudah menyerap air sehingga memungkinkan penggunaannya sebagai bahan baku pembuatan katalis. Mengingat bentonit yang melimpah dan senyawanya secara global berbiaya rendah, sintesis zeolit-

X dari bentonit untuk penangkapan CO₂ dapat bermanfaat untuk sumber daya bentonit secara kimia di masa depan. Kemampuan zeolit-X sebagai katalis berhubungan dengan keaktifannya pada ketersediaan di saluran antara zeolit. (Febriyanti dkk., 2021).

Berdasarkan uraian diatas, maka dilakukan penelitian ini pada penggunaan bentonit untuk mensintesis zeolit-X. Zeolit-X 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.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghasilkan zeolit-X dari bahan baku bentonit yang dikalsinasi pada suhu yang berbeda.
2. Mendapatkan data karakterisasi hasil sintesis zeolit-X menggunakan XRD dan SEM.
3. Mendapatkan data aktivitas katalitik zeolit-X yang disintesis dengan indikator rendemen dan kandungan biohidrokarbon BCO yang dihasilkan.

1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya alam yaitu minyak kelapa sawit menjadi biohidrokarbon.
2. Memanfaatkan ketersediaan bentonit sebagai zeolit-X yang jumlahnya melimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Zeolit

Zeolit adalah mineral kristalin berpori yang tersusun dari aluminosilikat dengan struktur kerangka tiga dimensi yang terbentuk dari jaringan tetrahedral, di mana setiap tetrahedron terdiri atas empat atom oksigen yang mengelilingi kation silikon atau aluminium. Material ini dikenal luas karena sifatnya yang mendukung berbagai aplikasi seperti pemurnian gas dan air, katalis, serta sebagai bahan penyerap. Seiring meningkatnya kebutuhan industri, banyak peneliti mulai mengembangkan zeolit sintetis karena zeolit alam sering kali tidak mampu memenuhi spesifikasi teknis tertentu (Masoudian *et al.*, 2013). Zeolit dapat ditemukan secara alami maupun disintesis melalui teknik tertentu. Zeolit sintetis cenderung memiliki karakteristik yang lebih seragam dan dapat dikontrol, berbeda dengan zeolit alam yang sifatnya sangat bergantung pada kondisi geologis dan geografis tempat terbentuknya (Simanjuntak *et al.*, 2016).

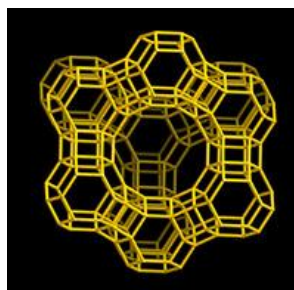
Zeolit mengandung kation-kation untuk menstabilkan muatan zeolit serta sejumlah molekul air dan memiliki kemampuan melakukan pertukaran kation. Kation-kation tersebut dapat dipertukarkan dengan kation sejenis, kemampuan inilah yang banyak dimanfaatkan di industri, salah satunya pada industri deterjen, diantaranya menurunkan kesadahan air dengan cara pertukaran ion natrium yang dilepaskan zeolit dan digantikan ion kalsium dari air sadah. Zeolit memiliki berbagai jenis seperti zeolit jenis A, X, dan P. Zeolit jenis A memiliki kemampuan dalam selektifitas adsorpsi yang tinggi terhadap ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} serta memiliki diameter pori-pori sebesar 0,42

nm dan rasio Si/Al mendekati 1. Zeolit jenis X memiliki pori-pori yang lebih besar dibandingkan dengan zeolit A, yaitu sekitar 0,74 nm. Hal ini memungkinkan adsorpsi molekul yang lebih besar. Rasio Si/Al pada zeolit-X berkisar antara 1 hingga 1,5, yang membuatnya memiliki sifat yang lebih hidrofilik (menarik air) dan kemampuan pertukaran ion yang kuat (Arnelli *et al.*, 2017).

2.1.1. Zeolit-X

Zeolit-X merupakan salah satu material aluminosilikat sintetik yang memiliki komposisi kimia khas $\text{Na}_{86}(\text{AlO}_2)_{86}(\text{SiO}_2)_{106} \cdot 264\text{H}_2\text{O}$ (Rizal dkk., 2022). Tipe ini termasuk dalam kelompok Faujasit (FAU) karena memiliki topologi struktur kerangka yang sama, meskipun memiliki karakteristik yang berbeda. Secara struktural, zeolit-X dibentuk oleh 8 kubo-oktahedron yang dihubungkan melalui 12 kuboid ke suatu rongga yang disebut sebagai sangkar β , pori-pori sangkar ini memiliki diameter 0,42 nm (Srilai *et al.*, 2020).

Zeolit-X memiliki pori berukuran $8\text{\AA}$ dan morfologi permukaan kubik. Meskipun memiliki topologi kerangka yang sama dengan zeolit-Y, rasio Si/Al zeolit-X (1,1-1,5) lebih rendah dibandingkan zeolit-Y (1,5-3,0). Karakteristik unik zeolit-X meliputi luas permukaan dan volume pori yang besar, pori yang seragam, serta struktur yang menyerupai sarang lebah (Enrik, 2024). Bentuk kristalnya adalah oktahedral seperti yang dapat terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur zeolit-X (*International Zeolite Association (IZA), 2017*).

2.1.2. Sintesis Zeolit-X

Zeolit sintesis memungkinkan terjadi karena terbentuk dari pembuatan zeolit sintetik menggunakan silika yang diperoleh dari hasil pengekstraksian abu sekam padi dengan metode sol-gel, kemudian metode yang dilakukan dengan cara pencampuran bahan baku larutan yaitu larutan natrium silika dan natrium alumina menggunakan metode hidrotermal (Krisnawati dan Wardani, 2018). Metode hidrotermal merupakan salah satu teknik yang umum digunakan dalam proses kristalisasi zeolit. Metode ini memanfaatkan tekanan dan suhu tinggi, sehingga memerlukan reaktor khusus berbahan *stainless steel* yang relatif mahal serta konsumsi energi yang tinggi. Kondisi tersebut menjadi kendala dalam efisiensi dan efektivitas sintesis zeolit-X. Oleh karena itu, untuk mengatasi kelemahan metode hidrotermal, para peneliti mulai mengembangkan alternatif sintesis dengan suhu rendah yang lebih hemat energi dan berbiaya lebih rendah (Kadja *et al.*, 2016).

Zeolit-X biasanya disintesis dalam bentuk natrium dengan rasio Si / Al 1–1,5, sehingga sangat hidrofilik, dan ukuran pori-pori yang diperkirakan dari struktur kristalnya adalah 0.74 nm. Zeolit-X termasuk dalam zeolit struktural Faujasit. Zeolit biasa digunakan sebagai penukar ion, penjerap, dan katalis. Tren ke arah aplikasi yang lebih maju menciptakan kebutuhan untuk mengontrol sifat fisik dan kimia dari zeolit dengan cara modifikasi (Rizal, Abidin, dan Hiedayati, 2022).

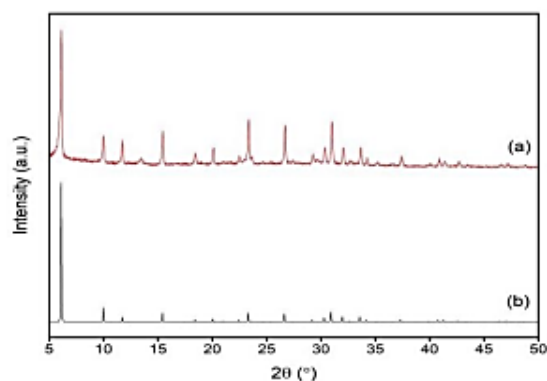
2.2. Karakterisasi Zeolit-X

Karakterisasi dari Zeolit-X dapat menggunakan beberapa metode seperti XRD untuk melihat struktur dari zeolit yang terbentuk. SEM untuk melihat morfologi permukaan dari zeolit-X yang telah disintesis dan menggunakan metode Gas GC-MS untuk melihat komponen senyawa BCO yang terbentuk dari pirolisis minyak kelapa sawit.

2.2.1. X-Ray Diffraction (XRD)

XRD adalah teknik yang tidak merusak dan digunakan untuk mengidentifikasi bahan kristalin. XRD memberikan informasi tentang struktur, fasa, orientasi kristal (tekstur), dan parameter struktural lainnya, seperti ukuran butiran rata, kristalinitas, ketegangan, dan cacat kristal (Alfarisa dkk., 2018). Prinsip dasar XRD adalah mendifraksi cahaya yang melalui celah kristal. Difraksi cahaya oleh kisi-kisi atau kristal ini dapat terjadi apabila difraksi tersebut berasal dari radius yang memiliki panjang gelombang yang setara dengan jarak antar atom, yaitu sekitar $1\text{\AA}$ (Hakim *et al.*, 2019).

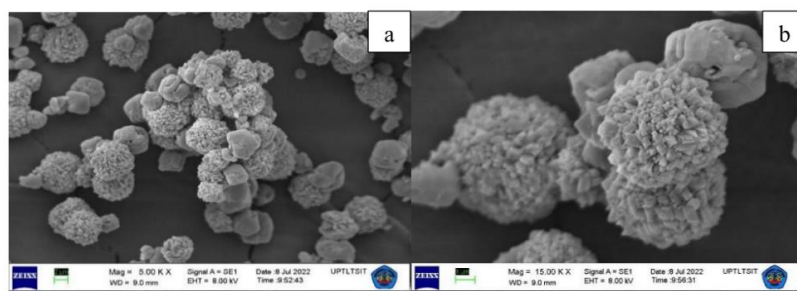
Proses hidrotermal menyebabkan perombakan gel *amorf* dan penataan ulang struktur yang mengakibatkan terbentuknya embrio inti kristal. Pembentukan kristal zeolit dari bahan geopolimer terbentuk sebagai hasil pertumbuhan domain kristal di bahan geopolimer serta pada antarmuka cair-padat. Hasil XRD menunjukkan bahwa peningkatan waktu *aging* menyebabkan peningkatan derajat kristalinitas zeolit. Peningkatan kristalinitas tersebut disebabkan oleh semakin banyaknya inti kristal yang terbentuk selama waktu *aging*. Peningkatan Waktu *aging* cenderung menghasilkan konsentrasi agregat partikel primer yang relatif tinggi sehingga mengarah pada peningkatan luas permukaan agregat yang menyebabkan laju kristalisasi menjadi lebih cepat (Setiawan *et al.*, 2021). Berikut adalah contoh hasil XRD yang dapat terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Difraktogram XRD zeolit-X (a) *aging* 24 hours (b) IZA (Febriyanti *et al.*, 2021).

2.2.2. Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM adalah jenis mikroskop elektron yang memvisualisasikan permukaan sampel melalui proses pemindaian dengan menggunakan energi tinggi dari elektron dalam pola *scan* (Rafika, 2023). SEM menggunakan serangkaian elektron yang diarahkan pada permukaan objek untuk menghasilkan citra yang diperbesar. SEM digunakan untuk memeriksa topografi secara menyeluruh. Penggunaan SEM dalam karakterisasi zeolit-X bertujuan untuk mengidentifikasi mikrostruktur dengan menampilkan dengan jelas morfologi permukaan yang ditandai oleh pembentukan *cluster* dengan ukuran dan bentuk yang bervariasi (Yuliyanda, 2023). Pada Gambar 3 diberikan contoh mikrograf dari sampel zeolit-X.



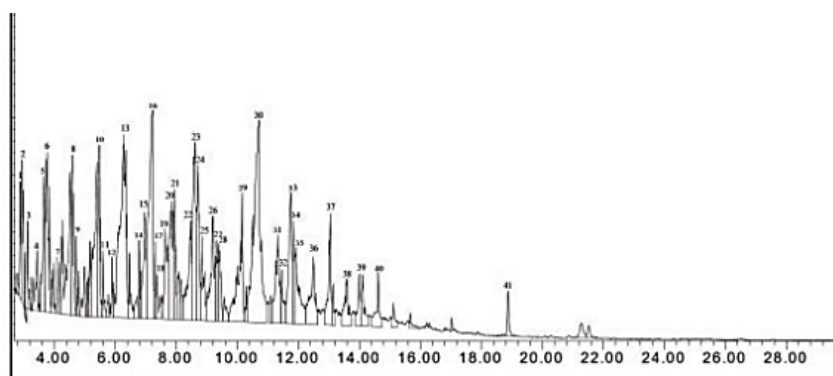
Gambar 3. Mikrograf zeolit-A hasil sintesis dengan perbesaran (a) 5.000x dan (b) 15.000x (Rezani, 2022).

2.2.3. Gas Chromatography – Mass Spectrometry (GC-MS)

GC-MS adalah metode analitik yang menggabungkan prinsip kromatografi gas dan spektrometri massa untuk mengidentifikasi berbagai senyawa dalam suatu sampel. Kromatografi gas memisahkan campuran berdasarkan waktu retensinya, yaitu waktu yang dibutuhkan masing-masing komponen untuk melewati kolom pemisah. Sampel yang dipanaskan dibawa oleh gas *inert*, seperti helium, melalui kolom kromatografi, di mana komponen-komponennya terpisah. Setelah keluar dari kolom, masing-masing komponen dialirkan ke

spektrometer massa. Spektrometri massa kemudian mengidentifikasi senyawa berdasarkan rasio massa terhadap muatan (m/z) dari ion-ion yang terbentuk. Dalam proses ini, molekul sampel diionisasi hingga menghasilkan fragmen-fragmen bermuatan. Fragmen tersebut dianalisis untuk menghasilkan spektrum massa, yaitu grafik yang menunjukkan intensitas relatif terhadap rasio massa per muatan (m/z), yang menjadi dasar identifikasi senyawa dalam sampel (Hotmian *et al.*, 2021).

Analisis GC-MS digunakan dalam proses pirolisis untuk mengidentifikasi senyawa-senyawa yang terkandung dalam BCO sebagai produk hasil pirolisis. Pada penelitian pirolisis minyak kelapa sawit menggunakan katalis zeolit H-X, diperoleh BCO yang terdiri atas hidrokarbon sebesar 77%, asam 16%, dan keton 7% (Febriyanti *et al.*, 2021). Hasil analisis senyawa tersebut dapat dilihat pada kromatogram GC yang ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil GC kromatogram dari minyak kelapa sawit dengan zeolit H-X (Febriyanti *et al.*, 2021).

2.3. Bentonit

Bentonit merupakan mineral alumino-silikat terhidrasi yang memiliki struktur kristal tiga dimensi dan mengandung kation alkali atau alkali tanah yang dapat dipertukarkan tanpa merusak kerangkanya. Mineral ini memiliki kemampuan menyerap air secara reversibel, serta menunjukkan sifat-sifat penting seperti

kemampuan mengembang, kapasitas tukar kation, luas permukaan yang besar, dan afinitas tinggi terhadap air, sehingga sangat efektif digunakan sebagai adsorben (Yulanda dkk., 2018).

Bentonit terbagi menjadi 2 kelompok, yaitu sodium bentonit (*swelling bentonite*) dan kalsium bentonit (*nonswelling bentonite*). Sodium bentonit memiliki kandungan ion Na^+ relatif lebih banyak dibandingkan dengan ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} . Bentonit ini dapat mengembang sampai dengan 815 kali apabila dicelupkan ke dalam air dan bentonit ini tetap terdispersi beberapa waktu di dalam air. Dibandingkan dengan natrium bentonit, calcium bentonit cenderung untuk mengandung ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} yang lebih banyak jika dibandingkan dengan ion Na^+ . Sifat yang dimiliki *calcium* bentonit yaitu kurang menyerap air, akan tetapi secara alamiah 5 ataupun setelah bentonit diaktifkan, bentonit ini dapat memiliki sifat menghisap yang baik dan akan tetap terdispersi dalam air (Ruskandi *et al.*, 2020).

Bentonit terbentuk melalui proses mekanik dan kimiawi yang terjadi akibat pelapukan batuan vulkanik, terutama pada lingkungan yang bersifat alkali. Batuan asal bentonit umumnya berasal dari material letusan gunung api, seperti andesit, riolit, basal, dan batuan vulkanik lainnya, yang sebagian besar merupakan batuan berumur Tersier. Di Indonesia, bentonit ditemukan melimpah dan tersebar di beberapa wilayah, antara lain di Pulau Jawa, Sumatra, sebagian Kalimantan Timur, dan Sulawesi. Secara fisik, bentonit kering berbentuk partikel halus dengan warna bervariasi, seperti kuning muda, putih, atau abu-abu. Bentonit memiliki karakteristik fisik sebagai berikut: memiliki massa jenis $2,2 - 2,7 \text{ g/cm}^3$ dan massa molekul relatif: $\pm 549,07 \text{ g/mol}$. Bentuk fisik bentonit dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Bentuk fisik bentonit (Tama dkk., 2013).

2.4. Modifikasi Bentonit

Modifikasi bentonit merupakan upaya penting untuk meningkatkan karakteristik dan kinerja material ini dalam berbagai aplikasi, seperti adsorben, penukar ion, bahan baku katalis, serta dalam bidang lingkungan dan industri kimia. Modifikasi dilakukan untuk mengubah struktur fisik dan kimia bentonit agar memperoleh sifat baru yang lebih unggul, seperti peningkatan luas permukaan, kemampuan tukar kation, dan stabilitas termal. Modifikasi bentonit dapat dibagi menjadi tiga kategori utama: fisik, kimia, dan organik. Modifikasi fisik meliputi proses seperti pengeringan, pemanasan, penggilingan, dan pemrosesan dengan tekanan tinggi yang bertujuan memperbaiki distribusi ukuran partikel atau membuka pori-pori pada struktur lamelanya. Modifikasi kimia, yang paling umum dilakukan, mencakup aktivasi asam dan basa, terutama dengan larutan HCl atau NaOH. Aktivasi asam, misalnya, dapat melarutkan sebagian kation logam (seperti Al^{3+} , Fe^{3+}) dari struktur bentonit dan meningkatkan porositas serta luas permukaannya. Modifikasi organik dilakukan dengan mengganti kation alami dalam interlayer bentonit (biasanya Na^+ atau Ca^{2+}) dengan senyawa organik seperti surfaktan kationik (contoh: CTAB atau HDTMA-Br), menghasilkan organobentonit yang bersifat lebih organofilik dan cocok untuk menyerap senyawa non-polar (Gunawan *et al.*, 2010).

Secara kimia, bentonit mengandung SiO_2 , Al_2O_3 , serta unsur logam lain seperti Fe_2O_3 , CaO , MgO , dan Na_2O . Namun, dalam bentuk alaminya, bentonit sering kali mengandung pengotor logam yang dapat mengganggu kinerja material saat digunakan dalam aplikasi katalitik. Oleh karena itu, diperlukan proses purifikasi untuk meningkatkan kualitas bentonit sebagai prekursor dalam sintesis zeolit. Salah satu metode purifikasi yang umum digunakan adalah aktivasi asam, seperti menggunakan HCl atau H_2SO_4 . Proses ini membantu melarutkan kation logam seperti Fe^{3+} , Ca^{2+} , dan Mg^{2+} , sekaligus meningkatkan rasio Si/Al dalam struktur montmorillonit. Peningkatan rasio Si/Al penting untuk pembentukan kerangka zeolit dengan struktur yang lebih stabil dan aktif secara katalitik (López-González *et al.*, 2014).

2.5. Karakterisasi Bentonit

Karakterisasi bentonit penting untuk mengetahui komposisi kimia, struktur kristal, serta morfologi permukaan, terutama setelah melalui proses aktivasi atau modifikasi. Beberapa teknik yang umum digunakan dalam karakterisasi ini meliputi XRF untuk analisis unsur kimia, XRD untuk mengidentifikasi fasa kristalin, dan SEM untuk mengamati morfologi permukaan bentonit.

2.5.1. *X-Ray Diffraction* (XRF)

XRF adalah teknik analisis non-destruktif yang digunakan untuk menentukan komposisi unsur dalam suatu sampel padat, cair, atau bubuk. Prinsip dasar XRF adalah pemanfaatan emisi sinar-X sekunder (fluoresen) yang dihasilkan ketika atom dalam sampel tereksitasi oleh sinar-X primer. Energi sinar-X yang dipancarkan bersifat khas untuk masing-masing unsur, sehingga XRF dapat mengidentifikasi unsur dan mengukur kadarnya secara kuantitatif. Teknik XRF sangat berguna dalam karakterisasi bentonit karena mampu mendeteksi unsur utama seperti Si, Al, Fe, Ca, Mg, dan Na. Penggunaan XRF memungkinkan peneliti mengetahui kemurnian mineral dan keberhasilan proses aktivasi atau modifikasi kimia bentonit (Simon, 2018).

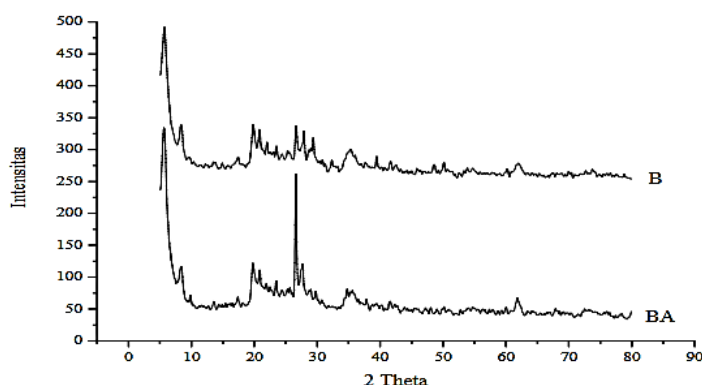
Tabel 1. Data analisis XRF daerah Jambi

Komponen	Jumlah Relatif (%)
SiO ₂	44,11
Al ₂ O ₃	33,61
TiO ₂	0,66
CaO	0,01
MgO	0,19
K ₂ O	0,04
Na ₂ O	-
FeO	2,22
CuO	3,85
C	14,24

Dapat dilihat pada Tabel 1. analisis XRF menunjukkan bahwa bentonit dari daerah Jambi memiliki kandungan utama SiO_2 sebesar 50,01% dan Al_2O_3 sebesar 30,65% berat, yang menunjukkan dominasi mineral montmorillonit dalam sampel tersebut (Naswir et al.,2013).

2.5.2. X-Ray Diffraction (XRD)

XRD digunakan untuk mengidentifikasi fasa mineral dan struktur kristal dalam sampel. Teknik ini mengukur pola difraksi sinar-X yang dihasilkan oleh kristal dalam sampel, memungkinkan identifikasi mineral berdasarkan posisi dan intensitas puncak difraksi (Naswir *et al.*, 2013). Teknik ini juga dapat mengukur jarak antar bidang kristal (*d-spacing*), yang menjadi indikator struktur berlapis dari mineral smektit seperti montmorillonit. Dengan membandingkan difraktogram sebelum dan sesudah aktivasi kimia, peneliti dapat mengetahui apakah terjadi perubahan struktur kristalin pada bentonit, seperti pergeseran puncak difraksi atau munculnya fasa baru. Karakterisasi XRD mampu memberikan informasi yang lengkap mengenai komposisi mineral penyusun adsorben bentonit, selain itu dapat menentukan besarnya pergeseran jarak antar lapis *d-spacing* silikat bentonit. Difraktogram dan hasil analisis *d-spacing* berdasarkan pola difraksi sinar-X untuk bentonit (B) dan bentonit aktivasi (BA) disajikan pada Gambar 6.

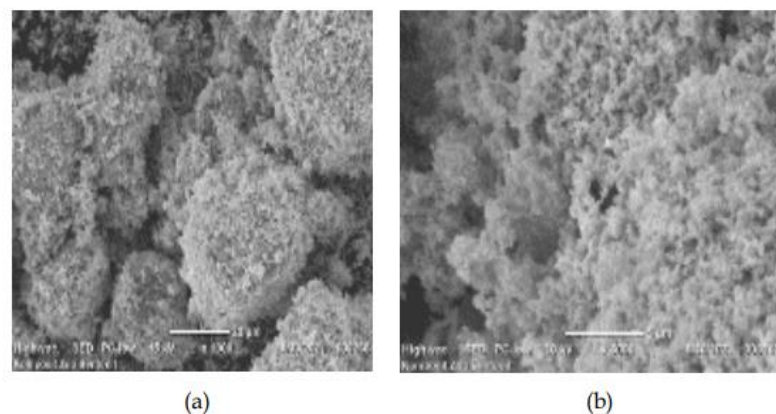


Gambar 6. Difraktogram adsorben bentonit (B) dan bentonit aktivasi (BA) (Darmadinata dkk., 2019).

2.5.3. Scanning Electron Microscopy (SEM)

SEM digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dan struktur mikro bentonit. SEM menghasilkan gambar tiga dimensi dengan resolusi tinggi, memungkinkan identifikasi tekstur permukaan, distribusi pori, dan ukuran partikel. Dalam karakterisasi bentonit, SEM membantu melihat perubahan permukaan akibat aktivasi kimia, seperti peningkatan porositas atau terbentuknya agregat baru. Permukaan yang lebih berpori setelah aktivasi menunjukkan peningkatan luas permukaan spesifik, yang penting untuk aplikasi adsorpsi atau katalisis (Goldstein *et al.*, 2017).

Karakterisasi SEM pada material komposit ZnO-bentonit menunjukkan adanya dua jenis material yang dibedakan berdasarkan warna hitam dan putih, serta permukaan yang tidak merata akibat fenomena aglomerasi. Aglomerasi ini terjadi karena proses kalsinasi pada suhu 400 °C pada tahap akhir sintesis, yang meningkatkan energi permukaan total sehingga partikel cenderung menyatu dan membentuk gumpalan besar untuk menurunkan energi total tersebut. Morfologi sampel dianalisis menggunakan SEM, ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Hasil SEM ZnO-bentonit perbesaran (a) 1000x (b) 5000x (Pratiwi dkk., 2022).

2.6. Katalis

Pengembangan katalis memberikan keuntungan signifikan karena lebih aktif, stabil, dan memiliki umur pemakaian yang lebih panjang secara ekonomis. Zeolit yang diolah dengan logam transisi dapat meningkatkan aktivasi hidrogen, sementara penambahan logam tanah jarang dapat memperkuat stabilitas katalis dalam reaksi hidrogenasi. Dalam proses regenerasi katalis, katalis berbiaya rendah yang biasanya terbuat dari bahan alami atau limbah menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap suhu tinggi dibandingkan katalis berbasis zeolit, menjadikannya alternatif yang lebih ekonomis. Pirolisis katalitik biomassa menggunakan reaktor sekrup auger dengan campuran katalis seperti sepiolit, bentonit, attapulgit, dan lumpur merah efektif dalam menurunkan viskositas dan meningkatkan stabilitas bio-oil. (Han *et al.*, 2019).

Beberapa penelitian telah mengaplikasikan zeolit-X sebagai katalis pada proses transesterifikasi minyak kelapa sawit dengan metanol untuk menghasilkan bahan bakar cair (Pandiangan *et al.*, 2017), pada proses pirolisis minyak kelapa sawit dengan memodifikasi menjadi zeolit-X terprotonasi (H-X) untuk menghasilkan bahan bakar cair. Pada pirolisis limbah plastik untuk menindaklanjuti pengaruh katalis pada minyak yang dihasilkan dan sebagai adsorben untuk menghilangkan kandungan logam berat pada pengolahan air limbah industri (Febriyanti *et al.*, 2021).

2.7. Pirolisis

Proses pirolisis dihasilkan campuran gas yang terdiri dari CO₂, CO, H₂, dan CH₄ produk padat yang dikenal sebagai biochar, dan produk cair yang dikenal sebagai *bio crude oil* (BCO). Tiap produk tersebut umumnya dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang, misalnya biochar dapat dimanfaatkan sebagai adsorben, sedangkan bio oil sebagai bahan bakar cair (Pandiangan *et al.*, 2022). Berdasarkan penelitian sebelumnya, beberapa jenis katalis telah digunakan seperti zeolit-X. Zeolit menjadi pilihan utama untuk pirolisis karena

jenis katalis ini diketahui memiliki kemampuan yang tinggi untuk mendorong reaksi deoksigenasi sehingga kandungan biohidrokarbon meningkat.

Kemampuan zeolit sintetis untuk mendorong reaksi deoksigenasi menjadi dasar sintesis zeolit-X dan aplikasinya untuk pirolisis CPO yang diajukan dalam penelitian ini (Febriyanti *et al.*, 2021).

Metode yang digunakan untuk mengkonversi minyak sawit menjadi bahan bakar adalah metode pirolisis. Metode pirolisis layak dikembangkan untuk mengatasi kelangkaan minyak bumi di masa mendatang. Senyawa kimia yang dihasilkan melalui proses pirolisis berguna dalam kehidupan sebagai bahan baku dalam kimia industri untuk produksi pelumas, pelarut, atau lak. Melalui proses pirolisis, senyawa dengan ukuran molekul besar diubah menjadi molekul kecil, untuk memudahkan senyawa menguap dan terbakar. Dengan demikian, senyawa yang dihasilkan dari proses pirolisis berpotensi sebagai bahan bakar (Abdullah *et al.*, 2019).

2.8. Biohidrokarbon

Biohidrokarbon adalah energi terbarukan yang bersih dan ramah lingkungan karena menghasilkan emisi gas polutan jauh lebih sedikit jika dibandingkan dengan sumber energi fosil dampak negatif emisi CO₂ sehingga penerapannya tidak konvensional. Bahan bakar seperti biohidrokarbon diperlukan untuk mengurangi konsentrasi CO₂ di atmosfer (Saragih *et al.*, 2023). Biohidrokarbon terdiri dari hidrokarbon dengan jumlah karbon berbeda. Biohidrokarbon dapat dibedakan menjadi biogasoline, yaitu campuran hidrokarbon dengan rantai karbon C₅-C₁₂, bahan bakar minyak tanah atau *bioavtural*, yaitu campuran hidrokarbon dengan rantai C₁₃-C₁₇, dan biodiesel yang merupakan campuran C₁₈-C₂₈. Peluang produksi biohidrokarbon didorong oleh pengembangan teknologi pirolisis, di mana *Crude Palm Oil* (CPO) dipanaskan dalam kondisi minim atau tanpa oksigen, menghasilkan produk cair, yang dikenal sebagai minyak pirolisis atau *Bio Crude Oil* (BCO). (Simanjuntak *et al.*, 2024).

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2024 hingga Maret 2025 di Laboratorium Kimia Anorganik Fisik, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Karakterisasi dan analisis sampel dilakukan di beberapa institusi, antara lain: karakterisasi XRF dan XRD dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Negeri Padang (UNP); karakterisasi SEM dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi Universitas Lampung; sedangkan analisis hasil pirolisis menggunakan GC-MS dilakukan di Laboratorium Universitas Gadjah Mada.

3.2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi beaker glass 100 mL, batang pengaduk, spatula, corong, gelas ukur 100 mL, autoklaf, oven, ayakan 300 mesh, corong pisah, mortar dan alu, wadah plastik, botol vial, alat pirolisis, termometer, *magnetic stirrer bar*, *hot plate*, serta alat karakterisasi berupa XRF PANalytical Epsilon 3, SEM ZEISS EVO MA 10, XRD XPERT PRO PANalytical PW3040/60, dan GC-MS QP2010S SHIMADZU.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari bentonit, natrium hidroksida (NaOH) pro analisis, larutan asam klorida (HCl) 1 M, *aluminium foil food grade* (FGAF), akuades, minyak kelapa sawit curah, kertas saring, kertas TBA, dan indikator universal.

3.3. Prosedur Penelitian

Adapun metode penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

3.3.1. Preparasi Bentonit

Bentonit yang digunakan dalam penelitian ini telah dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui kandungan unsur di dalamnya. Bentonit tersebut berbentuk serbuk halus berwarna kekuningan.

3.3.2. Purifikasi Bentonit

Proses purifikasi bentonit dilakukan dengan merendam bentonit dalam larutan HCl 1 M dengan perbandingan bentonit:HCl sebesar 1:5 (b/v) di dalam erlenmeyer. Campuran diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 24 jam untuk melarutkan logam-logam pengotor secara perlahan. Setelah proses perendaman, bentonit disaring menggunakan kertas saring, kemudian dicuci dengan akuades hingga pH netral guna menghilangkan sisa asam. Selanjutnya, bentonit dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C selama 8 jam. Bentonit hasil purifikasi kemudian dikarakterisasi ulang menggunakan XRF untuk mengetahui perubahan komposisi kimia, khususnya untuk memastikan penurunan kandungan logam berat dan peningkatan kemurnian.

3.3.3. Sintesis Zeolit-X Dari Bentonit

Proses persiapan bentonit sebagai katalis diawali dengan melarutkan bentonit ke dalam 100 mL larutan NaOH 1,0 N. Untuk meningkatkan kandungan alumina, potongan kecil aluminium foil ditambahkan ke dalam larutan dan

diaduk menggunakan magnetic stirrer hingga homogen. Bubuk bentonit kemudian ditambahkan secara perlahan ke dalam larutan tersebut sambil terus diaduk hingga tercampur merata. Campuran yang telah homogen dimasukkan ke dalam autoklaf dan didiamkan selama 24 jam untuk proses *aging*. Setelah itu, autoklaf dipanaskan dalam oven pada suhu 100 °C selama 72, 96, dan 120 jam untuk proses kristalisasi. Padatan hasil reaksi disaring dan dicuci dengan akuades hingga pH netral, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C selama 24 jam.

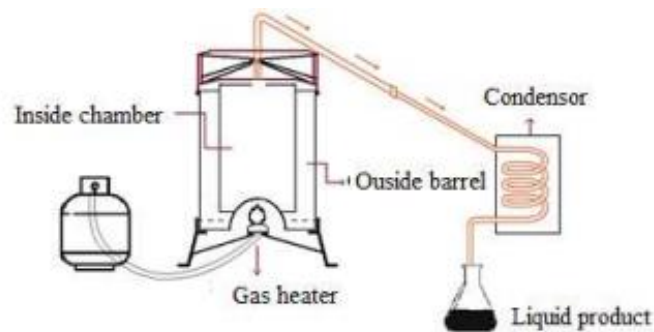
Padatan yang telah kering digerus dan diayak menggunakan ayakan 300 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Selanjutnya, sampel dikalsinasi pada suhu 500, 600, 700, dan 800 °C selama 8 jam untuk meningkatkan stabilitas termal dan aktivitas katalitik dengan menghilangkan sisa pengotor atau bahan organik. Sampel hasil kalsinasi dikarakterisasi menggunakan XRD untuk mengidentifikasi struktur kristal, serta SEM untuk mengamati morfologi permukaan.

3.3.4. Aplikasi Zeolit-X Sebagai Katalis Pirolisis Minyak Kelapa Sawit

Percobaan ini melibatkan proses pirolisis minyak sawit dengan bantuan katalis. Sebanyak 200 mL minyak sawit dicampurkan dengan 10 g katalis zeolit-X, kemudian campuran tersebut dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis yang dilengkapi dengan *heat exchanger*. Proses pirolisis dilakukan selama 1 jam, dimulai dengan pemanasan menggunakan api besar. Setelah beberapa waktu, muncul tetesan pertama, yang dihitung dalam 15 menit. Setelah itu, suhu reaktor dipertahankan dengan api sedang selama 45 menit. Proses ini ditandai dengan tidak adanya lagi cairan yang keluar dari selang pirolisis, yang menandakan bahwa proses pirolisis telah selesai.

Setelah proses pirolisis selesai, cairan hasil pirolisis dikumpulkan dan dimasukkan ke dalam corong pisah. Cairan tersebut dibiarkan selama 24

jam agar lapisan air dan lapisan organik dapat terpisah dengan jelas. Lapisan organik, yang mengandung biohidrokarbon, kemudian diambil dan dianalisis menggunakan GC-MS untuk mengidentifikasi komposisi kimianya. Pirolisis ini menggunakan perangkat skala laboratorium seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Skema metode pirolisis (Simanjuntak *et al.*, 2024).

3.3.5. Karakterisasi Sampel

Karakterisasi dilakukan untuk mengamati perubahan sifat bentonit sebelum dan sesudah purifikasi, serta untuk mengidentifikasi keberhasilan sintesis zeolit-X dan efektivitas katalis dalam pirolisis minyak kelapa sawit menghasilkan biohidrokarbon. Analisis XRF digunakan untuk menentukan komposisi unsur dan kandungan oksida logam dalam sampel bentonit. Pengukuran dilakukan pada tegangan 30 kV dan arus 300 μ A.

Karakterisasi XRD dilakukan untuk menganalisis fasa mineral dan kristalinitas pada bentonit alam (sebelum dan sesudah purifikasi), serta zeolit-X hasil sintesis. Pengujian XRD dilakukan menggunakan difraktometer PANalytical tipe X'Pert Pro 3040/60 dengan sumber radiasi Cu-K α ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$), tegangan 40 kV, arus 30 mA, serta pemindaian pada rentang sudut 2θ antara 10–100°. Pola difraktogram yang diperoleh dianalisis secara kualitatif menggunakan perangkat lunak Match! dan dibandingkan dengan data standar dari

International Zeolite Association (IZA) untuk memastikan kemiripan struktur kristal dengan zeolit-X yang diharapkan.

Karakterisasi morfologi permukaan dilakukan SEM untuk mengamati bentuk, struktur, dan ukuran partikel sampel secara mikroskopis dengan alat ZEISS EVO® MA 10, yang dioperasikan pada tegangan percepatan elektron sebesar 20 kV. Sampel dipindai pada perbesaran 1.000x, 5.000x, 10.000x, dan 15.000x untuk memperoleh informasi visual mengenai bentuk, ukuran, dan distribusi partikel dari bentonit serta zeolit-X hasil sintesis.

Karakterisasi hasil pirolisis dilakukan menggunakan GC-MS tipe QP2010S Shimadzu untuk mengidentifikasi senyawa kimia yang terdapat dalam lapisan organik (BCO) hasil pirolisis. Pengujian dilakukan menggunakan kolom tipe Rtx-5 (panjang 30 m; ID 0,25 mm; ketebalan film 0,25 μ m) dengan gas pembawa helium, metode ionisasi elektron (EI) 70 eV, suhu injektor 310°C (mode split), suhu detektor 250°C, suhu kolom oven awal 40°C, tekanan 13 kPa, dan aliran total 34,5 mL/menit. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi komponen senyawa hidrokarbon dalam BCO, yang menjadi indikator utama keberhasilan proses pirolisis.

V. KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

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

1. Proses purifikasi bentonit berhasil dilakukan menggunakan HCL 1 M dengan ditandai penurunan kandungan logam seperti Fe.
2. Zeolit-X berhasil disintesis dari bentonit terpurifikasi melalui metode hidrotermal, dengan hasil terbaik diperoleh pada waktu kristalisasi 3 hari pada suhu kalsinasi 800 °C, dibuktikan dengan analisis XRD yang dibandingkan dengan standar IZA dan SEM.
3. Zeolit-X yang dihasilkan menunjukkan aktivitas katalitik yang baik dalam proses pirolisis minyak kelapa sawit, menghasilkan fraksi biohidrokarbon dengan kandungan hidrokarbon menggunakan zeolit-X kalsinasi 800°C mencapai 71,79% dan distribusi senyawa C₈–C₂₀ yang mendekati karakteristik bahan bakar cair.
4. Penggunaan katalis zeolit-X terbukti meningkatkan selektivitas terhadap pembentukan senyawa hidrokarbon dibandingkan pirolisis tanpa katalis, serta menunjukkan bahwa suhu kalsinasi mempengaruhi komposisi BCO yang dihasilkan.

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 variasi konsentasi atau menggunakan reagen lain seperti HNO_3 guna menurunkan kadar logam pengotor, sehingga dapat meningkatkan kemurnian bentonit sebagai bahan baku sintesis zeolit-X.
2. Melakukan penelitian lebih lanjut dapat difokuskan pada modifikasi bentonit menjadi zeolit-X dengan menggunakan variasi rasio dalam rentang 2-5 guna menentukan komposisi terbaik dalam menghasilkan zeolit-X berkualitas tinggi.
3. Melakukan *upgrading* untuk meningkatkan kandungan hidrokarbon, karena BCO yang dihasilkan paada penelitian ini masih mengandung asam dalam kadar yang relatif tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A., Putra, Y. A. P., and Irwan, A. 2019. Pirolisis Minyak Goreng Bekas Dengan Katalis Zeolit Teraktivasi NaOH. *Konversi*.8(1): 29-38.
- Alfarisa, S., Ahmad Rifai, D., dan Lumban Toruan, P. 2018. Studi Difraksi Sinar-X Struktur Nano Seng Oksida (ZnO) 53 Studi Difraksi Sinar-X Struktur Nano Seng Oksida (ZnO) X-ray Diffraction Study on ZnO Nanostructures. *Jurnal Risalah Fisika*. 2(2): 53-57.
- Arnelli, A., Solichah, F., Alfiansyah, A., Suseno, A., dan Astuti, Y. 2017. Sintesis Zeolit dari Abu Sekam Padi menggunakan Metode Hidrotermal: Variasi Waktu dan Temperatur. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 20(2): 58-61.
- Darmadhinata. M., Jumaeri, dan Triastuti. S. 2019. Pemanfaatan Bentonit Teraktivasi Asam Sulfat Sebagai Adsorben Anion Fosfat dalam Air. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 8(1).
- Enrik, R. 2024. *Konversi Metil Ester Dari Minyak Biji Karet (Hevea Brasiliensis) Menggunakan Katalis Zeolit-X Dengan Reaktor Autoclave Menjadi Senyawa Nitrogen Dan Uji Aktivitas Sebagai Inhibitor Korosi Baja Lunak*. (Skripsi). Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- 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).
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., and Joy, D. C. 2017. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Springer.
- Gunawan, N. S., Indraswati, N., Ju, Y.-H., Soetaredjo, F. E., Ayucitra, A., and Ismadji, S. (2010). Bentonites modified with anionic and cationic surfactants for bleaching of crude palm oil. *Applied Clay Science*. 47(4): 462–464.

- Hakim, L., Dirgantara, M., dan Nawir, M. 2019. Karakterisasi Struktur Material Pasir Bongkahan Galian Golongan C Dengan Menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) Di Kota Palangkaraya. *Jurnal Jejaring Matematika dan Sains*. 1(1): 44-51.
- Han, T., Ding, S., Yang, W., and Jönsson, P. 2019. Catalytic pyrolysis of lignin using low-cost materials with different acidities and textural properties as catalysts. *Chemical Engineering Journal*. 373. 846-856.
- Hotmian, H., Setiawan, A., dan Pratiwi, Y. 2021. Analisis senyawa hasil pirolisis menggunakan GC-MS. *Jurnal Ilmu dan Teknologi*. 12(2): 55-63.
- IZA (International Zeolite Association). 2017. <https://www.iza-structure.org/databases/>. Diakses pada tanggal 20 Mei 2024 10:55.
- Kadja, G. T. M., Azhari, N. J., Apriadi, F., Novita, T. H., Safira, I. R., and Rasrendra, C. B. 2023. Low-temperature synthesis of three-pore system hierarchical ZSM-5 zeolite for converting palm oil to high octane green gasoline. *Microporous and Mesoporous Materials*. 360.
- Krisnawati, J., dan Wardani, S. 2018. Sintesis Dan Karakterisasi Zeolit X Dari Abu Sekam Padi Melalui Proses Hidrotermal. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 7(1): 17-20.
- López-González, D., Huang, S., and Kang, Z. 2014. Influence of acid activation on the structure of bentonite and its effect on zeolite synthesis. *Microporous and Mesoporous Materials*. 197: 160-168.
- Masoudian, S. K., Sadighi, S., and Abbasi, A. 2013. Synthesis and characterization of high aluminum zeolite X from technical grade materials. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*. 8(1): 54-60.
- Naswir, M., Arita, S., Marsi, and Salni. 2013. Characterization of Bentonite by XRD and SEM-EDS and Use to Increase PH and Color Removal, Fe and Organic Substances in Peat Water. *Journal of Clean Energy Technologies*. 1(4): 313-317.
- Nura Aditama, S. 2015. Sintesis dan Karakterisasi Zeolit X Dari Abu Vulkanik Gunung Kelud Dengan Variasi Suhu Hidrotermal Menggunakan Variasi Suhu Hidrotermal Menggunakan Metode Sol Gel. (Skripsi). Universitas Islam Negri (UIN) Maulana Malik Ibrahim. Malang.
- Pandiangan, K. D., Arief, S., Jamarun, N., and Simanjuntak, W. 2017. Synthesis of zeolit-X from rice husk silica and aluminum metal as a catalyst for transesterification of palm oil. *Journal of Materials and Environmental Science*. 8(5): 1797-1802.

- Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Jamarun, N., and Arief, S. 2021. The Use of MgO/SiO₂ as Catalyst for Transesterification of Rubber Seed Oil with Different Alcohols. *Journal of Physics: Conference Series*. 1751(1).
- Pratiwi, J., Putri, E. S., Pratiwi, E. D., and Ramadani, S. W. I. 2022. Sintesis Dan Karakterisasi Komposit Zno-Bentonit. *Jambura Physics Journal*. 4(1): 70-76.
- Rafika, C. 2023. *Pengaruh Suhu Kalsinasi Terhadap Aktivitas CaO/SiO₂ Dengan Komposisi Massa 1:5 Sebagai Katalis Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit*. (Skripsi). Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Rezani, A. 2022. *Pengolahan Lanjut Bio-Crude Oil Hasil Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Dengan Metode Catalytic Upgrading Menggunakan Zeolit-X Terprotonasi (H-X) Sebagai Katalis*. (Skripsi). Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Rizal, H., Abidin, Z., Trivadila, dan Hiedayati, N. 2022. Sintesis Komposit Zeolit X/Oksida Perak Dan Tembaga Melalui Reaksi Tollens Serta Aplikasinya Sebagai Adsorben. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*. 24(2): 87-95.
- Ruskandi, C., Siswanto, A., dan Widodo, R. 2020. Karakterisasi Fisik Dan Kimiawi Bentonite Untuk Membedakan Natural Sodium Bentonite Dengan Sodium Bentonite Hasil Aktivasi. *Jurnal Polimesin*. 18(1).
- Saragih, M. A., Hasibuan, M. I., Simangunsong, L., Pulungan, A. N., and Sihombing, J. L. 2023. Hydrodeoxygenation of Castor Oil As an Alternative Source of Biohydrocarbon Using Nickel Catalyst Loaded On H₂sm-5 Zeolite. *Elkawnie*. 8(2): 221.
- Sari, D., Purwaningsih, R., dan Hidayat, A. 2021. Pengaruh Aktivasi Asam terhadap Karakteristik Bentonit sebagai Prekursor Zeolit-X. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 24(3): 115-122.
- Setiawan, A., Rahmadania, A. N., dan Mayangsari, N. E. 2021. Adsorpsi Cu(II) Menggunakan Zeolit Sintesis Kombinasi Abu Terbang Dan Abu Dasar Dengan Variasi Waktu Aging Cu(II) Adsorption By Using Synthetic Zeolite Combination Of Fly Ash And Bottom Ash With Aging Time Variation. *Jurnal Riset Teknologi Industri*. 15(1): 113-124.
- Setyono, J., Hari, M. F., Febrina, K. A. M., dan Soedarto. 2019. Potensi Pengembangan Energi Baru dan Energi Terbarukan di Kota Semarang. *Jurnal Riptek*. 13(2): 177-186.
- Shabani, M., Yaripour, F., and Safarifard, V. 2013. Synthesis of NaX zeolite: Influence of crystallization time, temperature and batch molar ratio (SiO₂/Al₂O₃) on the particulate properties of zeolite crystals. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 44(4): 585-589.

- Simanjuntak, W., Aulia, S., Pandiangan, D. K., dan Rilyanti, M. 2019. Transformation Of Lampung Natural Zeolit into Zeolit-A by Alumunium Addition and Application as Catays for Biomassa Pyrolysis. *Indonesia Jurnal Of Energi*. 2(7): 124-140.
- Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Febriyanti, T. D., and Putri, A. 2024. Catalytic upgrading of palm oil derived oil for bio-hydrocarbon enrichment using protonated zeolite-Y as catalyst. *Renewable Energy Journal*. 12(1): 600-616.
- Simanjuntak, W., Sembiring, S., Pandiangan, K. D., Syani, F., and Situmeang, R. T. M. 2016. The use of Liquid Smoke as a Substitute for Nitric Acid for Extraction of Amorphous Silica from Rice Husk Through Sol-Gel Route. *Oriental Journal of Chemistry*. 32(4): 2079-2085.
- Simon, A. 2018. X-Ray Fluorescence In Material Science. *Advances in X-Ray Analysis*. 61: 1-12.
- Srilai, S., Tanwongwan, W., Onpecth, K., Wongkitikun, T., Panpiemrasda, K., Panomsuwan, G., and Eiad-Ua, A. 2020. Synthesis Of Zeolite X From Bentonite Via Hydrothermal Method. *Materials Science Forum*. 990 MSF: 144-148.
- Syafira, R. Z., Anwar, S. H., dan Rozali, Z. F. 2022. Pengendalian Mutu Crude Palm Oil (CPO) Dengan Metode Control Chart dan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Pada Pabrik Kelapa Sawit PT.XYZ. *Jurnal Teknologi dan Industri Pertanian Indonesia*. 14(2): 81-87.
- Tama, A. W. A., Priadi, E., dan Aprianto, A. 2013. Analisa Deformasi Tanah Lempung Bentonite. *Jurnal Mahasiwa Teknik Sipil Universitas Tanjungpura*. 1(1): 191.
- Yanti, R. N., Ratnaningsih, A. T., dan Ikhsani, H. 2022. Pembuatan bio-briket dari produk pirolisis biochar cangkang kelapa sawit sebagai sumber energi alternatif: Production of bio-briquettes derived from biochar pyrolysis of oil palm shells as sustainable fuel sources. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*. 19(1): 11-18.
- 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.
- Yuliyanda, D. 2023. *Optimasi Waktu Konversi Metil Ester Dari Minyak Biji Karet (Hevea Brasiliensis) Menjadi Senyawa Nitrogen Dan Uji Aktivitas Sebagai Inhibitor Korosi Baja Lunak*. (Skripsi). Universitas Lampung. Bandar Lampung.