

**STUDI PRA-PERLAKUAN PEMANASAN TERHADAP
KARAKTERISTIK *BIO CRUDE OIL* (BCO) YANG DIHASILKAN
DARI PROSES PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN
ZEOLIT-P HASIL MODIFIKASI BENTONIT**

(Skripsi)

Oleh

**HANNA LUTHFIA MAGHFIROH
2117011013**



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

ABSTRAK

STUDI PRA-PERLAKUAN PEMANASAN TERHADAP KARAKTERISTIK *BIO CRUDE OIL* (BCO) YANG DIHASILKAN DARI PROSES PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN ZEOLIT-P HASIL MODIFIKASI BENTONIT

Oleh

HANNA LUTHFIA MAGHFIROH

Indonesia merupakan negara dengan potensi biomassa yang melimpah yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil yang tidak terbarukan dan semakin menipis. Salah satu sumber biomassa yang potensial adalah minyak kelapa sawit karena ketersediaannya yang melimpah.

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan *Bio Crude Oil* (BCO) melalui pirolisis minyak kelapa sawit menggunakan katalis zeolit-P termodifikasi dari bentonit. Zeolit-P disintesis dari bentonit dengan penambahan aluminium foil. Bentonit dipurifikasi menggunakan HCl 1 M kemudian dianalisis menggunakan *Diffraction Fluorescence* (XRF), *X-Ray Diffraction* (XRD), dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Hasil XRF menunjukkan penurunan kadar Fe serta peningkatan Si dan Al. Analisis XRD mengidentifikasi fase kristal montmorillonit, albit, kuarsa, dan kristobalit. Hasil analisis SEM menunjukkan permukaan bentonit yang teraglomerasi dengan struktur amorf. Sintesis zeolit-P dilakukan dengan metode hidrotermal pada suhu 100°C selama 72, 96, dan 120 jam, lalu dikalsinasi pada suhu 600°C selama 8 jam. Karakterisasi zeolit-P menggunakan XRD dan SEM menunjukkan bahwa waktu kristalisasi optimal adalah 96 jam, dengan pola difraksi sesuai dengan zeolit-P standar *International Zeolite Association* (IZA) dan morfologi prisma segi empat hasil analisis SEM.

Uji aktivitas katalitik zeolit-P pada proses pirolisis minyak kelapa sawit dilakukan variasi waktu pra-perlakuan pemanasan berbeda. Hasil analisis *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) menunjukkan kandungan hidrokarbon tertinggi sebesar 79,27% diperoleh pada waktu pemanasan 30 menit.

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

ABSTRACT

HEATING PRE-TREATMENT STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF BIO CRUDE OIL (BCO) PRODUCED FROM PALM OIL PYROLYSIS PROCESS USING ZEOLITE-P MODIFIED BENTONITE

By

HANNA LUTHFIA MAGHFIROH

Indonesia is a country with abundant biomass potential that can be utilized as an alternative energy source to reduce dependence on non-renewable and increasingly scarce fossil fuels. One potential source of biomass is palm oil due to its abundant availability.

This study aims to produce Bio Crude Oil (BCO) through the pyrolysis of palm oil using a modified zeolite-P catalyst derived from bentonite. Zeolite-P was synthesized from bentonite with the addition of aluminum foil. Bentonite was purified using 1 M HCl and then analyzed using Diffraction Fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD), dan Scanning Electron Microscopy (SEM). XRF results showed a decrease in Fe content and an increase in Si and Al. XRD analysis identified the crystalline phases of montmorillonite, albite, quartz, and cristobalite. SEM analysis showed that the bentonite surface was agglomerated with an amorphous structure. Zeolite-P synthesis was carried out using the hydrothermal method at 100°C for 72, 96, and 120 hours, then calcined at 600°C for 8 hours. Characterization of zeolite-P using XRD and SEM showed that the optimal crystallization time was 96 hours, with diffraction patterns consistent with the International Zeolite Association (IZA) standard for zeolite-P and a prismatic morphology as determined by SEM analysis.

The catalytic activity of zeolite-P in the pyrolysis process of palm oil was tested by varying the pre-treatment heating time. The results of Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) analysis showed that the highest hydrocarbon content of 79.27% was obtained at a heating time of 30 minutes.

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

**STUDI PRA-PERLAKUAN PEMANASAN TERHADAP
KARAKTERISTIK *BIO CRUDE OIL* (BCO) YANG DIHASILKAN
DARI PROSES PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN
ZEOLIT-P HASIL MODIFIKASI BENTONIT**

Oleh

HANNA LUTHFIA MAGHFIROH

Skripsi

**Sebagai Salah Satu untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Universitas Lampung**



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

Judul Penelitian

: STUDI PRA-PERLAKUAN PEMANASAN
TERHADAP KARAKTERISTIK *BIO CRUDE*
OIL (BCO) YANG DIHASILKAN DARI
PROSES PIROLISIS MINYAK KELAPA
SAWIT MENGGUNAKAN ZEOLIT-P HASIL
MODIFIKASI BENTONIT

Nama Mahasiswa

: *Hanna Luthfia Maghfiroh*

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2117011013

Jurusan

: Kimia

Fakultas

: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



1. Komisi Pembimbing

[Signature]
Prof. Dr. Kamisah D. Pandiangan, M.Si. **Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D.**
NIP. 197212051997032001 NIP. 195907061988111001

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung

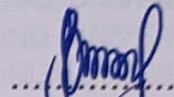
[Signature]
Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.
NIP. 197205302000032001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

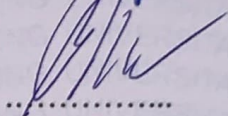
Ketua

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



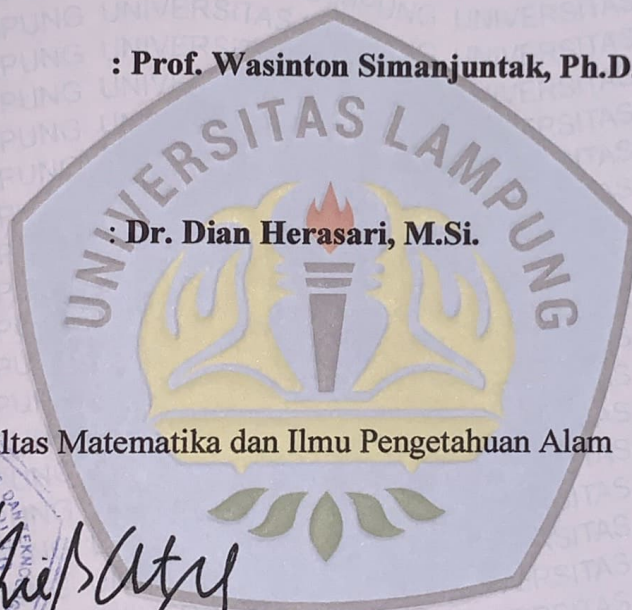
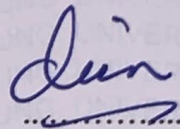
Sekretaris

: **Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D.**

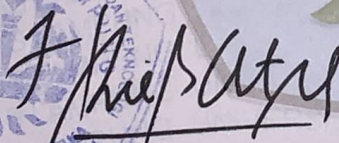


Anggota

: **Dr. Dian Herasari, M.Si.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **9 Juli 2025**

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa : Hanna Luthfia Maghfiroh
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117011013
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul **“Studi Pra-Perlakuan Pemanasan Terhadap Karakteristik *Bio Crude Oil* (BCO) yang dihasilkan dari Proses Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Menggunakan Zeolit-P Hasil Modifikasi Bentonit”** adalah benar karya sendiri dan saya tidak keberatan jika sebagian atau seluruh data di dalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi sesuai dengan kesepakatan.

Bandar Lampung, 9 Juli 2025
Yang Menyatakan,



Hanna Luthfia Maghfiroh
2117011013

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Hanna Luthfia Maghfiroh, lahir di Ambarawa pada 8 September 2002, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Sobirin dan Ibu Johariyah, penulis memiliki kakak laki-laki bernama Zakaria Rafsanjani. Penulis sekarang bertempat tinggal di Desa Ambarawa Barat, Kecamatan Ambarawa,

Kabupaten Pringsewu, Lampung. Riwayat pendidikan penulis dimulai dari taman kanak-kanak di TK Al-Qur'an Mujahidin pada tahun 2008, kemudian melanjutkan pendidikan dasar di MI YASMIDA Ambarawa dan lulus pada tahun 2015. Pendidikan menengah pertama ditempuh di MTsN 1 Pringsewu dan diselesaikan pada tahun 2018, lalu dilanjutkan ke jenjang sekolah menengah atas di MAN 1 Lampung Timur hingga lulus pada tahun 2021. Pada tahun yang sama, penulis diterima sebagai mahasiswa baru Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama masa perkuliahan, penulis tidak hanya fokus pada akademik, tetapi juga aktif dalam kegiatan organisasi. Penulis bergabung dalam Himpunan Mahasiswa Kimia (Himaki) FMIPA Unila sebagai kader muda pada tahun 2021, kemudian menjadi anggota Biro Penerbitan pada tahun 2022 dan 2023. Selama berorganisasi di Himaki penulis banyak mengikuti kegiatan baik sebagai peserta maupun panitia, salah satunya sebagai anggota divisi Kreatif dan Desain *Chemistry Expo XXVII*.

Selain mengikuti organisasi, penulis juga pernah menjadi anggota peneliti pada program Penelitian Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) pada tahun

2023. Pada tahun 2023 penulis juga mengikuti kegiatan magang industri program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) yang sekaligus dikonversi sebagai Praktik Kerja Lapangan yang berlokasi di Balai Uji Standar Karantina Ikan, Pengendalian Mutu, dan Keamanan Hasil Perikanan (BUSKIPM) Jakarta dengan judul laporan “Pengujian Logam Berat Timbal (Pb) pada Ikan Kerapu (*Epinephelinae*) Menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS)”. Penulis juga aktif mengikuti kegiatan pengembangan diri, seperti melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Hurun, Kecamatan Teluk Pandan, Pesawaran pada tahun 2024. Penulis juga pernah menjadi asisten Praktikum Kimia Dasar pada Semester Ganjil 2024-2025 dan Praktikum Kimia Fisik II pada Semester Genap 2024-2025.

MOTTO

“Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan”

(Q.S. Al-Insyirah:6)

“Setiap orang bertanggungjawab atas apa yang telah dilakukannya”

(Q.S. Al-Mudatsir: 38)

*“Jika kamu berbuat baik (berarti) kamu berbuat
baik bagi dirimu sendiri dan jika kamu berbuat jahat,
maka (kejahatan) itu bagi dirimu sendiri*

(Q.S. Al-Isra’: 7)

*Apapun yang menjadi takdirmu,
akan mencari jalannya menemukanmu*

(Ali bin Abi Thalib)



*Puji syukur kepada Allah SWT atas limpahan karunia-Nya,
kupersembahkan karya ini sebagai wujud bukti dan
tanggung jawabku kepada:*

*Kedua orang tuaku
Bapak Sobirin dan Ibu Johariyah
yang senantiasa mendo'akanku, mengajarku,
mendidikku, membimbingku dengan penuh kasih sayang,
memberikan dukungan motivasi, dan segalanya untukku.*

*Kakakku, saudara-saudaraku, dan teman-temanku
yang selalu mendo'akan, memberi dukungan, semangat,
dan keceriaan dalam menyelesaikan karya ini.*

*Pembimbing penelitianku, Ibu Prof, Kamisah Delilawati Pandiangan, M.Si.,
dan Bapak Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D. yang selalu sabar dalam
membimbingku.*

*Bapak dan Ibu dosen Jurusan Kimia atas dedikasi
dan ilmu yang telah diberikan selama menempuh pendidikan di kampus.*

*Almamater tercinta
Universitas Lampung*

SANWACANA

Alhamdulillah *rabbi alamin* segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia kepada hamba-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Studi Pra-Perlakuan Pemanasan Terhadap**

Karakteristik *Bio Crude Oil* (BCO) yang dihasilkan dari Proses Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Menggunakan Zeolit-P Hasil Modifikasi Bentonit”.

Selawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW., beserta keluarga, sahabat, dan para pengikutnya yang istiqamah di jalan Allah. Semoga kita semua memperoleh syafa'at beliau di hari akhir kelak. *Aamiin*.

Penulis menyadari bahwa dalam proses pengerjaan dan penulisan skripsi ini tidak lepas dari rintangan dan kesulitan yang penulis hadapi, namun dapat melewati berkat rahmat dan ridho Allah SWT. dengan bantuan, pengarahan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, pada kesempatan ini sebagai wujud rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, M.Si., selaku dosen pembimbing I, yang dengan sabar membimbing, memberikan motivasi, arahan, serta meluangkan waktu dan pemikirannya dalam penulisan skripsi ini.
2. Bapak Prof. Wasinton Simanjuntak, PhD., sebagai pembimbing II serta pembimbing akademik yang telah mendampingi, membantu, serta memberikan ilmu dan dukungan selama proses penyusunan skripsi.
3. Ibu Dr. Dian Herasari, M.Si., selaku dosen pembahas/penguji yang telah membimbing, memberikan saran dan kritik yang membangun sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.

4. Ibu Dr. Mita Rilyanti, M.Si., sebagai Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
5. Bapak dan Ibu dosen Kimia FMIPA Universitas Lampung atas segala bimbingan, edukasi, dan dedikasinya yang telah diberikan kepada penulis.
6. Bapak Dr. Eng. Heri satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
7. Seluruh staf dan tenaga kependidikan di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung yang turut membantu kelancaran proses akademik dan penelitian.
8. Orang tua penulis Bapak Sobirin dan Ibu Johariyah yang telah membimbing penulis sejak kecil hingga menyelesaikan studi sarjana ini, serta Zakaria Rafsanjani sebagai kakak penulis. Terima kasih atas kepercayaan dan dukungan atas segala keputusan yang penulis pilih, serta selalu mendo'akan untuk menyelesaikan skripsi ini.
9. *Partner* penelitian penulis: Erwanda Lili Utari, Adryan Daffa Dzulfiqar, dan Nurul Natasha Berliani atas segala kesabaran, dukungan, saran, motivasi, dan waktu selama penelitian. Semoga Allah selalu memberikan kebaikan dan kesuksesan dalam hidup.
10. Rekan-rekan di laboratorium polimer Kimia Fisik: Khairi, Tyas, Adit, Desrita, Ayu, Azizah, Bella, Melisa, dan lainnya, terima kasih atas segala bantuannya berupa waktu dan tenaganya selama penulis melakukan penelitian.
11. Teman-teman seperjuangan Asrama Putri Ayu: Avi, Aziza, Rika, Tyas, Lili, Nadira, Caca, Vanessa, Ayu, dan Hasma terima kasih atas kebersamaan dan bantuannya baik tenaga maupun moral selama menjalani perkuliahan.
12. Teman-teman *Rusuh Squad*: Maila, Nindi, Septi, Adel, Silvia, Bila, Izul, Atun, dan Mala yang memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis.
13. Teman-teman Kimia 21 yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terima kasih atas segala kebersamaan dalam menjalani perkuliahan di kampus dari maba sampai sekarang.
14. Kakak dan adik tingkat penulis di Jurusan Kimia angkatan 2019, 2020, dan 2022.

15. Seluruh pihak yang telah membantu yang tidak dapat dituliskan satu-persatu, terima kasih banyak telah membantu dan mendukung penulis dalam menyusun dan menyelesaikan skripsi ini.
16. Kepada diri saya sendiri Hanna Luthfia Maghfiroh, terima kasih telah berjuang, tidak menyerah, dan bertahan hingga saat ini.

Semoga seluruh kebaikan dan bantuan yang telah diberikan mendapat balasan pahala yang berlipat ganda dari Allah SWT. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan, namun besar harapan penulis semoga karya ini dapat memberikan manfaat bagi mahasiswa Jurusan Kimia dan pembaca lainnya.

Bandar Lampung, 9 Juli 2025
Penulis,

Hanna Luthfia Maghfiroh

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	4
1.3 Manfaat Penelitian.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 <i>Bio Crude Oil</i> (BCO)	5
2.2 Minyak Kelapa Sawit.....	8
2.3 Pirolisis	9
2.4 Zeolit-P	12
2.5 Bentonit.....	14
2.5.1 Pemanfaatan bentonit	14
2.5.2 Modifikasi bentonit menjadi zeolit-P	15
2.5.3 Karakterisasi bentonit	17
2.6 Karakterisasi Zeolit-P Hasil Modifikasi Bentonit.....	21
2.6.1 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	21
2.6.2 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	23
2.7 Analisis <i>Bio Crude Oil</i> (BCO) Hasil Pirolisis dengan <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS).....	25
III. METODE PENELITIAN	29
3.1 Waktu dan Tempat.....	29
3.2 Alat dan Bahan.....	29
3.2.1 Alat-alat	29
3.2.2 Bahan-bahan	30
3.3 Prosedur Penelitian	30
3.3.1 Analisis bentonit sebelum purifikasi	30
3.3.2 Purifikasi bentonit	30
3.3.3 Modifikasi bentonit menjadi zeolit-P	31
3.3.4 Karakterisasi zeolit-P hasil modifikasi bentonit.....	31

3.3.5 Uji aktivitas katalitik zeolit-P hasil modifikasi pada proses pirolisis minyak kelapa sawit	32
3.3.6 Analisis produk hasil pirolisis dengan <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS)	33
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1 Pengantar.....	35
4.2 Purifikasi Bentonit	35
4.3 Modifikasi Bentonit Menjadi Zeolit-P	40
4.4 Uji Aktivitas Katalitik Zeolit-P Hasil Modifikasi pada Proses Pirolisis Minyak Kelapa Sawit.....	45
4.5 Karakterisasi <i>Bio Crude Oil</i> (BCO) dengan <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS)	47
V. SIMPULAN DAN SARAN	53
5.1 Simpulan.....	53
5.2 Saran.....	54
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN.....	63

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Sifat-sifat <i>bio-oil</i> dan minyak bumi	7
2. Komposisi asam lemak pada minyak kelapa sawit	9
3. Karakterisasi bentonit menggunakan XRF	18
4. Komposisi kimiawi dari BCO	27
5. Data hasil analisis bentonit dengan XRF	36
6. Perbandingan data XRD zeolit-P standar IZA terhadap zeolit-P hasil sintesis dengan variasi waktu kristalisasi	42
7. Perbandingan data XRD sodalit standar IZA terhadap zeolit-P hasil sintesis dengan variasi waktu kristalisasi	43
8. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit tanpa pemanasan	48
9. Komposisi relatif BCO dengan variasi waktu pra-perlakuan pemanasan.....	51
10. Komposisi relatif BCO dengan variasi waktu pemanasan 10 menit.....	67
11. Komposisi relatif BCO dengan variasi waktu pemanasan 20 menit.....	68
12. Komposisi relatif BCO dengan variasi waktu pemanasan 30 menit.....	69
13. Komposisi relatif BCO dengan variasi waktu pemanasan 40 menit.....	70
14. Nilai kristalinitas bentonit dan zeolit-P dengan waktu kristalisasi terbaik	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Alat pirolisis skala laboratorium.	10
2. Struktur zeolit-P.	13
3. Difraktogram bentonit (B) dan bentonit terpurifikasi (BA).	19
4. Difraktogram bentonit; (a) bentonit alam dan (b) bentonit terpurifikasi HCl... 20	20
5. Morfologi bentonit; (a) bentonit alam dan (b) bentonit terpurifikasi..... 21	21
6. Difraktogram standar zeolit-P (<i>International Zeolite Association (IZA)</i>) 22	22
7. Bentonit (A) dan (B-D) menunjukkan distribusi prisma segi empat zeolit-P pada permukaan partikel bentonit 24	24
8. Morfologi zeolit-P..... 25	25
9. Skema proses kromatografi..... 26	26
10. Kromatogram GC-MS dari BCO. 27	27
11. Difraktogram bentonit; (a) sebelum purifikasi dan (b) setelah purifikasi..... 37	37
12. Difraktogram bentonit dari analisis program Match! <i>Version 3.16 Build 288</i> ; (a) sebelum purifikasi dan (b) setelah purifikasi..... 38	38
13. Mikrograf bentonit dengan perbesaran 15.000x; (a) sebelum purifikasi dan (b) setelah purifikasi 39	39
14. Perbandingan difraktogram; (a) Zeolit-P standar IZA, (b) Sodalit standar IZA, (c) Z-72, (d) Z-96, dan Z-120 41	41
15. Difraktogram zeolit-P dari analisis program Match! <i>Version 3.16 Build 288</i> , variasi waktu kristalisasi; (a) 72, (b) 96, dan (c) 120 jam..... 44	44
16. Mikrograf sampel Z-96 dengan perbesaran 15.000x 45	45

17. Hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan variasi waktu pra-perlakuan pemanasan; (a) tanpa pemanasan, (b) 10, (c) 20, (d) 30, dan (e) 40 menit....	46
18. Kromatogram BCO minyak kelapa sawit tanpa pra-perlakuan pemanasan....	47
19. Komposisi BCO minyak kelapa sawit tanpa pra-perlakuan pemanasan.....	49
20. Kromatogram BCO dengan variasi waktu pra-perlakuan pemanasan; (a) 10, (b) 20, (c) 30, dan (d) 40 menit	50
21. Komposisi relatif hidrokarbon dengan variasi waktu pra-perlakuan pemanasan.....	51

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang sangat kaya akan sumber daya alam, termasuk energi yang harus dimanfaatkan untuk kemakmuran masyarakat. Energi adalah aspek penting yang tidak bisa dipisahkan dari kehidupan, terutama manusia. Ketersediaan energi di Indonesia sangat kaya, terutama dalam hal energi fosil maupun energi terbarukan (Gigin dkk., 2022). Indonesia masih sangat bergantung pada energi fosil, dengan penggunaan energi fosil mencapai 95% dari total kebutuhan energinya. Berdasarkan jumlah tersebut, 50% berasal dari minyak bumi (Putra dkk., 2020). Penggunaan energi baru terbarukan di Indonesia baru mencapai 2,5%, dengan sumber energi terbesar berasal dari tenaga surya (Arsita dkk., 2021). Energi baru terbarukan dapat berasal dari sumber-sumber yang dapat diperbaharui tanpa ada batasan seperti sumber yang dapat diproduksi secara berkelanjutan yaitu biomassa (Setyono dkk., 2019).

Pemanfaatan biomassa di Indonesia memiliki potensi besar, karena jumlah limbah pertanian, perkebunan, dan limbah lainnya sangat melimpah. Pada tahun 2020 potensi biomassa mencapai 146,7 juta ton, pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi memberikan tiga keuntungan utama, yaitu peningkatan efisiensi energi, penghematan biaya, dan pengurangan tempat penimbunan sampah (Sulasminingsih dkk., 2023). Selain itu, sumber energi biomassa dapat diperbaharui (*renewable*) sehingga dapat menyediakan sumber energi secara berkesinambungan (*sustainable*) (Parinduri dan Parinduri, 2020).

Salah satu sumber biomassa adalah minyak kelapa sawit yang dikenal sebagai tanaman serbaguna karena setiap bagiannya dapat dimanfaatkan, termasuk sebagai sumber energi atau bahan bakar nabati. Potensi Indonesia dalam produksi minyak kelapa sawit didukung oleh iklim tropis yang dimilikinya, sehingga Indonesia menjadi produsen minyak kelapa sawit terbesar dunia melampaui Malaysia, dengan nilai ekspor mencapai 29,52 juta ton pada tahun 2019 (Kaniapan *et al.*, 2021). Minyak kelapa sawit dapat diolah menjadi biohidrokarbon yang berpotensi menjadi alternatif energi fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas alam. Biohidrokarbon adalah salah satu jenis bahan bakar yang dihasilkan dari nabati yang dapat diperbaharui dan ramah lingkungan. Penggunaan biohidrokarbon menjadi salah satu cara untuk mengantisipasi penurunan cadangan bahan bakar fosil (Aziz dkk., 2023). Biohidrokarbon dihasilkan dari proses pirolisis yang diuraikan pada suhu tinggi tanpa oksigen yang menghasilkan tiga produk utama yaitu *Bio Crude Oil* (BCO) sebagai gas terkondensasi, gas sintetik yang tidak terkondensasi seperti CO₂ dan H₂ serta arang atau *biochar* (Solikhah dkk., 2022).

Penggunaan metode pirolisis memiliki beberapa keuntungan diantaranya lebih fleksibel karena dapat digunakan untuk mengolah hampir semua jenis biomassa menjadi bahan bakar cair seperti *Bio Crude Oil* (BCO), prosesnya sederhana, serta dapat menghasilkan produk dengan kualitas yang sesuai dengan aplikasi yang diperlukan (Simanjuntak *et al.*, 2021). Untuk mendapatkan hasil yang optimal produk pirolisis dalam bentuk cair, dapat ditambahkan dengan katalis (Simanjuntak *et al.*, 2019). Katalis merupakan suatu zat yang dapat meningkatkan laju reaksi tanpa ikut bereaksi. Katalis dibagi menjadi dua yaitu katalis homogen dan katalis heterogen. Katalis homogen adalah katalis dengan fase yang sama dengan reaktan dan fase produk reaksi sedangkan katalis heterogen adalah katalis yang memiliki fase berbeda dengan fase reaktannya (Kusniawati dkk., 2021).

Katalis homogen, baik dari golongan asam kuat seperti asam klorida, asam sulfat, dan asam nitrat, maupun basa kuat seperti natrium hidroksida dan kalium hidroksida, banyak digunakan karena memiliki aktivitas katalitik tinggi, mudah digunakan, dan waktu reaksi yang relatif singkat. Meskipun demikian, katalis homogen memiliki keterbatasan seperti sulitnya pemisahan antara produk dengan

katalis, korosif, tidak dapat digunakan kembali, dan memerlukan reagen dalam jumlah besar. Oleh karena itu, dikembangkan katalis heterogen karena memiliki keunggulan berupa kemudahan pemisahan dari produk, dapat digunakan kembali, lebih ramah lingkungan, dan mendukung proses berkelanjutan (Pandiangan *et al.*, 2017). Katalis heterogen sering digunakan untuk proses pirolisis, salah satu contohnya yaitu zeolit. Zeolit dikenal sebagai katalis asam yang dapat meningkatkan proses deoksigenasi selama pirolisis, sehingga mengurangi jumlah produk yang mengandung oksigen dan menghasilkan lebih banyak hidrokarbon (Simanjuntak *et al.*, 2019).

Berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Pandiangan *et al.* (2023), zeolit dapat disintesis menggunakan bahan baku sekam padi (*rice husk*). Salah satu zeolit yaitu zeolit-P dapat disintesis dari bahan-bahan seperti kaolin (Eiad-Ua *et al.*, 2018), abu batu bara (Liu *et al.*, 2019), dan abu sekam padi (Flores *et al.*, 2021). Dalam upaya pengembangan lebih lanjut, bentonit digunakan sebagai alternatif bahan baku yang potensial untuk disintesis menjadi zeolit (Simanjuntak *et al.*, 2024). Bentonit memiliki keunggulan yaitu sebagai bahan pengikat basah yang kuat sehingga memudahkan dispersibilitas dalam suspensi berair. Selain itu, bentonit memiliki kapasitas pertukaran kation yang baik, yang memungkinkan interaksi lebih baik dengan partikel zeolit (Vajglová *et al.*, 2018). Sintesis zeolit-P dapat dilakukan menggunakan metode hidrotermal (Dongoran *et al.*, 2021). Metode hidrotermal adalah metode kristalisasi pada sistem tertutup dengan memanfaatkan suhu $>100^{\circ}\text{C}$ dan tekanan >1 atm. Kelebihan metode ini yaitu dapat menghasilkan material dengan kehilangan bahan yang minimal dan menghasilkan produk dengan kemurnian tinggi (Eviva dkk., 2023).

Pada penelitian ini digunakan zeolit-P karena memiliki beberapa keunggulan diantaranya memiliki ukuran partikel nano dengan luas permukaan yang besar dan struktur berpori yang memungkinkan peningkatan reaktivitas dalam proses katalitik (Rahman and Hayat, 2019). Zeolit-P dapat disintesis dengan rasio 2,5 seperti yang dilaporkan oleh Simanjuntak dkk. (2019) yang menyebutkan bahwa zeolit-P memiliki rumus senyawa $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{-}5\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Berdasarkan rumus tersebut rasio yang digunakan untuk sintesis zeolit-P adalah 2,5. Selanjutnya,

zeolit-P hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

Uji aktivitas katalitik zeolit-P dilakukan pada proses pirolisis dengan melakukan pra-perlakuan pemanasan minyak kelapa sawit dengan waktu yang berbeda. Fungsi dilakukan pemanasan tersebut adalah untuk mengurangi kadar air dalam minyak kelapa sawit serta dapat mengetahui waktu optimal pemanasan sehingga menghasilkan produk biohidrokarbon dengan kemurnian tinggi (Nurfiqih dkk., 2021). Oleh karena itu, pada penelitian ini dikaji pengaruh suhu pemanasan pra-perlakuan pirolisis pada variasi waktu pemanasan 10, 20, 30, 40 menit, dan tanpa pemanasan. Selanjutnya produk hasil pirolisis dianalisis menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) untuk mengetahui senyawa kimia yang terkandung dalam produk hasil pirolisis.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mempurifikasi bentonit menggunakan pelarut asam.
2. Memperoleh zeolit-P modifikasi bentonit dengan metode hidrotermal.
3. Mendapatkan data karakteristik zeolit-P menggunakan teknik XRD dan SEM.
4. Mendapatkan informasi tentang komposisi BCO yang dihasilkan dari pirolisis minyak kelapa sawit dengan waktu pra-perlakuan pemanasan yang bervariasi.
5. Menganalisis BCO yang terbentuk menggunakan GC-MS.

1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Meningkatkan nilai ekonomis bentonit sebagai bahan baku pembuatan katalis.
2. Memberikan informasi tentang teknik pirolisis minyak kelapa sawit untuk menghasilkan biohidrokarbon sebagai sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Bio Crude Oil (BCO)*

BCO merupakan minyak dari biomassa yang berperan penting dalam energi terbarukan dan berpotensi menjadi sumber energi alternatif selain minyak bumi, bahan bakar mesin, aspal, busa poliuretan, resin fenol-formaldehida, dan resin lainnya (Wang *et al.*, 2021). BCO adalah bahan bakar berwarna cokelat gelap, berbentuk cairan yang mudah mengalir, dan memiliki aroma berasap yang khas. BCO terdiri dari campuran kompleks senyawa organik, terutama terdiri dari asam, alkohol, aldehida, ester, keton, fenol, dan oligomer turunan lignin, serta senyawa hidrokarbon lainnya. Sebagai bahan bakar cair terbarukan, BCO berfungsi sebagai bahan bakar minyak atau diesel dalam aplikasi statis seperti boiler, tungku, mesin, dan turbin untuk pembangkit listrik. Penggunaan BCO diantaranya sebagai bahan bakar pembakaran dalam sistem tungku untuk menghasilkan panas, produksi bahan kimia dan resin seperti bahan kimia pertanian, pupuk, asam dan agen pengendali emisi, serta BCO dapat digunakan dalam pembuatan perekat, misalnya sebagai pengikat untuk aspal (Xiu and Shahbazi, 2012).

BCO mengandung biohidrokarbon berbeda dengan minyak bumi yang kandungan utamanya hidrokarbon murni, yaitu senyawa yang hanya mengandung dua elemen seperti karbon dan hidrogen. Hidrokarbon ini merupakan komponen utama minyak bumi yang membentuk sekitar 50-98% selebihnya senyawa non-hidrokarbon seperti sulfur, nitrogen, oksigen, dan beberapa logam berat lainnya. Senyawa hidrokarbon penyusun minyak bumi terdiri dari beberapa jenis, diantaranya paraffin, naftena, aromatik dan aspaltena (Wardhani dan Titah, 2021).

Sedangkan BCO mengandung biohidrokarbon, yaitu senyawa organik terdiri dari karbon, hidrogen, dan oksigen yang berasal dari biomassa. Biohidrokarbon merupakan bahan bakar yang dapat diperbarui dan dihasilkan melalui proses deoksigenasi katalitik asam. Proses ini menghasilkan produk dengan komposisi yang mirip dengan bensin, minyak tanah, dan fraksi diesel yang biasanya diperoleh dari minyak bumi (Siregar *et al.*, 2023).

Keberadaan senyawa hidrokarbon (biohidrokarbon) sebagai komponen dominan dalam BCO memiliki potensi sebagai alternatif pengganti bahan bakar yang bersumber dari petrokimia. Berdasarkan panjang rantai karbonnya, biohidrokarbon dapat dibedakan menjadi tiga kelompok, yaitu biogasolin dengan rentang rantai karbon C_5 - C_{12} , biokerosin dengan rentang rantai karbon C_{13} - C_{17} , dan biodiesel dengan rentang rantai karbon C_{18} - C_{28} (Pandiangan *et al.*, 2024).

Hidrokarbon juga dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis komponen dalam rentang karbon C_5 - C_{35} yang mempengaruhi volatilitas dan stabilitasnya. Secara umum dapat dibagi menjadi tiga fraksi berdasarkan rentang karbonnya. Fraksi pertama yaitu *Low Range Hydrocarbon* (LRH), mencakup senyawa dengan karbon C_5 - C_9 , yang memiliki sifat mudah menguap dan tersusun dari hidrokarbon ringan. Senyawa ini lebih cepat menguap ke udara dan banyak ditemukan pada bahan bakar seperti bensin. Fraksi kedua yaitu *Medium Range Hydrocarbon* (MRH), mencakup karbon C_9 - C_{19} . MRH mencakup senyawa hidrokarbon dengan volatilitas sedang, seperti yang ditemukan dalam bahan bakar jet dan diesel. Fraksi ini umumnya lebih stabil dibanding LRH dan dapat digunakan pada aplikasi yang memerlukan pembakaran lebih lanjut. Fraksi ketiga yaitu *High Range Hydrocarbon* (HRH), mencakup rentang karbon C_{19} - C_{35} . Fraksi ini lebih stabil, memiliki titik didih yang lebih tinggi, dan banyak digunakan dalam pelumas serta aplikasi industri yang membutuhkan hidrokarbon berat dengan ketahanan lama (Kuppusamy *et al.*, 2020).

Bio-oil dihasilkan dari proses pirolisis biomassa dengan kandungan air yang tinggi yaitu sekitar 15-30% yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar fosil yang kurang dari 0,1%, serta memiliki kandungan oksigen maksimum hingga

60%. Oksigen ini berasal dari komponen seperti aldehida, alkohol, dan fenol. Rasio hidrogen terhadap karbon (H/C) dalam *bio-oil* berkisar antara 0-0,5 sementara bahan bakar fosil, seperti minyak bumi memiliki rasio H/C antara 1,0-2,0, menunjukkan kadar hidrogen yang lebih rendah dalam *bio-oil* (Chen *et al.*, 2021). Adapun sifat-sifat *bio-oil* dan minyak bumi ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat-sifat *bio-oil* dan minyak bumi

Sifat	Bio-oil	Minyak Bumi
C (%)	54-58	85-87
H (%)	5,5-8,6	11
O (%)	35-60	1
N (%)	0-0,2	0,1-0,3
S (%)	0-0,05	0,2
pH	2,0-3,0	-
Berat jenis (kg/m ³)	1,2	0,94
Kadar air (%)	15-30	<0,1
Abu (%)	0-0,2	0,1
Padatan (%)	0,2-1	1
Massa jenis (kg/m ³)	1,1-1,3	0,9
Nilai kalor (MJ/kg)	13-19	40
Viskositas (pada 50°C) (Cp)	40-100	180
Residu penyulingan (%)	>50	1

Sumber: Chen *et al.*, 2021.

Kandungan BCO yang dihasilkan tergantung pada sumber biomassa yang digunakan. Biomassa dikonversi menjadi bioenergi dan bahan kimia melalui proses biologis dan termokimia. Proses termokimia dilakukan pada suhu tinggi antara 300 dan 1400°C. Diantara proses termokimia, pirolisis menjadi metode yang banyak digunakan untuk konversi biomassa dengan energi panas yang tinggi tanpa adanya oksigen. Biomassa dapat dikelompokkan menjadi empat sub kelompok yaitu biomassa bersumber dari residu pertanian dan kehutanan, sampah kota dan industri, tanaman herba serta biomassa akuatik dan laut. Adapun contoh biomassa pada sektor pertanian dan kehutanan yaitu sekam padi, sorgum manis, kayu birch, kulit kayu putih, oak, kayu pinus, dan kayu cemara. Pada tanaman herba contohnya yaitu rumput *switch*, *arundo donax*, bambu, tanaman alfalfa, dan *achnatherum splendens*. Biomassa dari limbah kota dan industri contohnya limbah lumpur, serbuk furnitur, kotoran ayam, dan sekam kopi. Biomassa akuatik dan laut seperti *Spirulina sp.*, *Nannochloropsis*, dan *Enteromorpha clathrata*

(Dada *et al.*, 2023). Selain itu, *Bio Crude Oil* (BCO) juga dapat dihasilkan dari minyak kelapa sawit dengan proses pirolisis (Simanjuntak *et al.*, 2024).

2.2 Minyak Kelapa Sawit

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) merupakan tanaman tropis yang berasal dari Nigeria, Afrika Barat. Kelapa sawit dibudidayakan untuk menghasilkan Tandan Buah Segar (TBS) yang kemudian diolah menjadi minyak kelapa sawit (Aprilia, 2020). Minyak kelapa sawit merupakan salah satu jenis minyak nabati yang banyak digunakan dalam industri makanan. Minyak ini diperoleh dari hasil ekstraksi mesokarp atau daging buah kelapa sawit, kemudian melalui proses pemurnian dan fraksinasi untuk menghasilkan produk akhir yang siap digunakan. Minyak kelapa sawit dikenal karena harganya yang terjangkau, ketersediaannya yang melimpah, serta kestabilannya yang tinggi terhadap oksidasi, sehingga cocok digunakan dalam proses pengolahan dan penggorengan makanan (Taufik dan Seftiono, 2018). Terdapat dua jenis minyak goreng, yaitu minyak kemasan yang berwarna cerah dan jernih, serta minyak curah yang cenderung lebih keruh. Minyak curah memiliki kadar asam lemak bebas yang lebih tinggi yaitu 0,16% dibandingkan minyak kemasan yaitu 0,12% (Novita dkk., 2021).

Minyak kelapa sawit mengandung lebih dari 95% trigliserida yang terbentuk dari berbagai jenis asam lemak. Asam lemak utama dalam minyak kelapa sawit meliputi asam miristat, palmitat, stearat, oleat, dan linoleat yang sebagian besar terdapat dalam bentuk trigliserida (Marliyati dkk., 2021). Menurut Husain dan Marzuki (2021), minyak kelapa sawit tersusun dari lemak jenuh sekitar 50,12%, lemak tak jenuh sebesar 49,20%, dan sisanya berupa komponen anorganik sekitar 0,68%. Komponen penyusun minyak sawit dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi asam lemak pada minyak kelapa sawit

Jenis asam lemak	Komposisi (%)
Asam palmitat	43,75
Asam stearate	5,11
Asam miristat	1,4
Asam laurat	0,12
Asam oleat	38,71
Asam linoleat	10,14
Asam alfa linoleat	0,35

Sumber: Husain dan Marzuki, 2021.

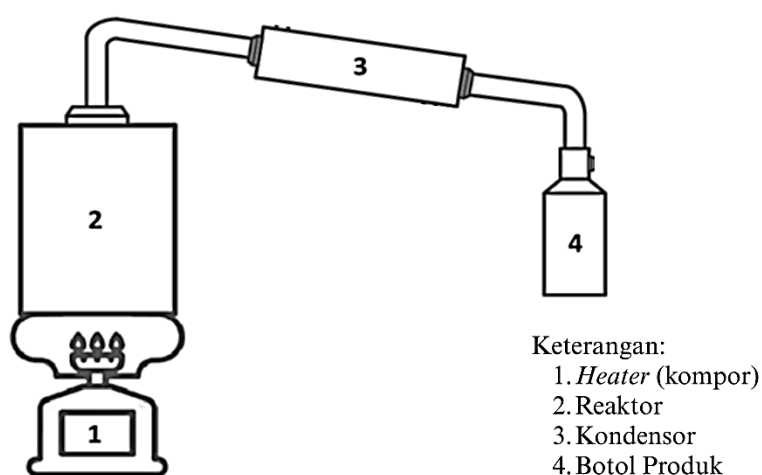
Minyak kelapa sawit memiliki berbagai kelebihan yang menjadikannya sebagai bahan utama dalam banyak produk pangan. Beberapa keunggulan minyak kelapa sawit diantaranya harganya cukup terjangkau, ketersediaannya melimpah karena produksinya dalam jumlah besar, kandungan antioksidan alaminya dapat berperan sebagai pengawet alami, tidak mengandung lemak trans, serta dapat meningkatkan cita rasa makanan (Husain dan Marzuki, 2021). Minyak kelapa sawit juga memiliki potensi besar sebagai bahan dasar pembuatan bahan bakar alternatif karena sifatnya terbarukan. Penggunaan minyak kelapa sawit sebagai bahan bakar bertentangan dengan kebutuhan industri pangan seperti minyak goreng dan produk makanan lainnya. Oleh karena itu, diperlukan sumber minyak nabati yang belum dimanfaatkan secara optimal, seperti minyak kelapa sawit *off grade* (curah). Minyak jenis ini memiliki kadar asam lemak yang sangat tinggi sehingga kurang layak untuk dikonsumsi dalam jangka panjang tanpa proses pemurnian lebih lanjut (Mardawati dkk., 2019). Salah satu proses konversi biomassa minyak kelapa sawit menjadi energi menggunakan metode pirolisis, karena keunggulannya yang dapat mengolah berbagai jenis biomassa menjadi bahan bakar cair yang dikenal dengan *Bio Crude Oil* (BCO) (Simanjuntak *et al.*, 2021).

2.3 Pirolisis

Pirolisis adalah metode yang digunakan untuk menghasilkan asap cair melalui proses dekomposisi material pada suhu tinggi tanpa kehadiran oksigen. Bahan yang digunakan dalam proses pirolisis dapat berupa biomassa atau polimer. Pada proses ini, ikatan kimia dalam biomassa atau polimer terurai membentuk molekul-

molekul yang lebih kecil dan sederhana. Pirolisis biomassa menghasilkan tiga produk utama yaitu bahan padat berupa arang aktif, gas, dan aerosol. Gas-gas yang terkondensasi menjadi bahan cair yang stabil pada suhu ruangan dikenal dengan *biofuel* atau *bio-oil*. Faktor-faktor yang mempengaruhi pirolisis meliputi waktu, kadar air bahan, suhu, dan ukuran bahan. Ukuran bahan berperan penting, dimana bahan yang lebih kecil memiliki luas permukaan yang lebih besar, memungkinkan panas menyebar lebih cepat dan meningkatkan frekuensi tumbukan antar molekul (Afriliana dkk., 2021).

Pirolisis merupakan metode dekomposisi biomassa yang memiliki potensi besar karena mampu memanfaatkan berbagai jenis bahan baku tanpa memperhatikan karakteristik seperti jenis, bentuk, serta fisik dan kimianya. Proses pirolisis bersifat fleksibel dalam pemilihan material, dapat dilakukan dalam berbagai rentang suhu dan atmosfer, serta menghasilkan tiga jenis produk utama yaitu padat, cair, dan gas. Reaksi dalam proses pirolisis ini sangat kompleks dan bertujuan untuk memproduksi bahan bakar yang menghasilkan pembakaran bersih tanpa asap, memperoleh energi dengan nilai kalor lebih tinggi dibandingkan dengan bahan baku aslinya, dan menciptakan daya yang lebih reaktif (Pitoyo *et al.*, 2022). Proses pirolisis yang digunakan dalam skala laboratorium memiliki beberapa komponen seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Alat pirolisis skala laboratorium (Pratama dan Sa'diyah, 2023).

Pirolisis dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu pirolisis lambat (*slow pyrolysis*), pirolisis cepat (*fast pyrolysis*), dan pirolisis kilat (*flash pyrolysis*) (Adelawon *et al.*, 2022). Metode pirolisis lambat adalah proses pirolisis dengan laju pemanasan yang rendah, yaitu kurang dari 0,1-1,0°C per detik. Dalam metode ini biomassa dipanaskan secara perlahan tanpa kehadiran oksigen hingga suhu yang relatif rendah, sekitar di bawah 400°C, dengan durasi waktu yang relatif lama. Pirolisis lambat biasanya menghasilkan arang dengan kualitas tinggi karena suhu dan laju pemanasannya rendah. Zat volatil organik yang ada dalam fase uap bereaksi satu sama lain, menghasilkan arang dan sejumlah kecil fraksi air (Patra *et al.*, 2021).

Pada metode pirolisis cepat (*fast pyrolysis*), biomassa dipanaskan hingga suhu 500°C dengan laju pemanasan yang sangat tinggi yaitu 10-200°C per detik dan waktu reaksi yang singkat. Metode ini telah digunakan untuk menghasilkan *bio-oil* dari berbagai jenis biomassa, termasuk minyak kelapa sawit (Qiao *et al.*, 2019). Beberapa kondisi yang harus diperhatikan dalam pirolisis cepat meliputi laju perpindahan panas yang cepat pada partikel biomassa, mengingat biomassa memiliki konduktivitas panas yang buruk. Oleh karena itu, ukuran partikel biomassa harus kecil untuk memastikan distribusi panas yang merata. Selain itu, penting untuk mengontrol kondisi reaksi pirolisis dan memastikan waktu tinggal uap yang singkat untuk meminimalkan terjadinya *cracking* pada proses produk pirolisis (Dhyani and Bhaskar, 2019).

Pirolisis kilat (*flash pyrolysis*) adalah proses yang berlangsung dalam waktu sangat singkat, hanya beberapa detik saja dengan laju pemanasan yang sangat tinggi. Metode ini melibatkan devolatilisasi cepat di bawah atmosfer inert dengan laju pemanasan yang lebih tinggi dan suhu pirolisis berkisar antara 450-1000°C, serta waktu tinggal gas yang sangat singkat yaitu kurang dari 1 detik. Untuk penerapan metode pirolisis kilat ini diterapkan pada biomassa dengan pemanasan yang dibutuhkan sangat cepat dan ukuran partikel yang sangat kecil, sekitar 105-250 µm (Ridhuan dkk., 2019).

2.4 Zeolit-P

Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi proses pirolisis biomassa adalah adanya katalis yang dapat meningkatkan efisiensi dan kualitas produk. Pada proses pirolisis, katalis digunakan untuk menurunkan suhu reaksi yang diperlukan dan mempercepat laju dekomposisi biomassa atau bahan baku lainnya (Oyeleke *et al.*, 2021). Salah satu katalis yang umum digunakan dalam proses pirolisis biomassa adalah zeolit. Zeolit merupakan kristal aluminosilikat dengan struktur berpori tinggi yang memungkinkan difusi molekul-molekul, serta memiliki komposisi umum $M_2O \cdot mAl_2O_3 \cdot nSiO_2$, dimana M adalah logam alkali atau alkali tanah seperti Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} , dan Na^+ (Abdelrahman *et al.*, 2021).

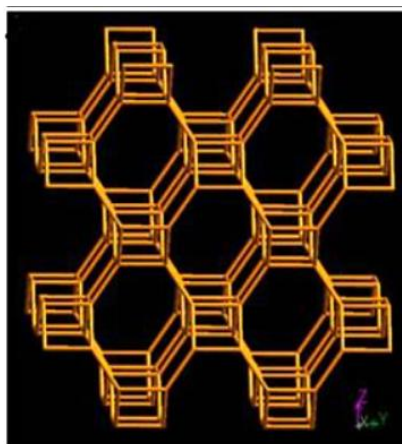
Struktur dasar zeolit terdiri dari kerangka aluminosilikat, dimana ion silikon (Si^{4+}) dan ion aluminium (Al^{3+}) berikatan dengan empat anion oksigen (O^{2-}). Setiap atom oksigen terhubung dengan dua kation, yang mengakibatkan pembentukan Si yang tetravalen secara elektronetral dalam $SiO_{4/2}$ dan Al yang trivalen bermuatan negatif dalam $AlO_{4/2}$. Muatan negatif dan rongga pada zeolit ini dapat ditempati oleh ion logam dari golongan IA atau IIA. Zeolit terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu zeolit alami dan sintesis. Zeolit alami adalah zeolit yang terbentuk dari batuan vulkanik dan sedimen seperti *chabazite*, *klinoptilolit*, dan *mordenit*. Sementara itu, zeolit sintesis adalah zeolit yang dibuat dari bahan baku seperti lempung, feldspar, abu soda, dan bahan lainnya. Beberapa jenis zeolit sintesis diantaranya zeolit-A, zeolit-X, zeolit-Y, dan zeolit-P (Derbe *et al.*, 2021).

Zeolit dapat ditemukan secara alami atau disintesis dari berbagai bahan baku kimia. Zeolit sintesis lebih banyak digunakan dibandingkan dengan zeolit alam karena kemurniannya yang dapat dikontrol serta sifat-sifatnya yang seragam, seperti ukuran pori dan morfologi permukaan. Komponen utama zeolit sintesis adalah silika dan alumina. Oleh karena itu, berbagai jenis zeolit sintesis telah diproduksi menggunakan bahan baku yang seragam, seperti larutan natrium aluminat dan natrium silikat, silika, aluminium oksida, natrium oksida, heksametilamin, dan tetraetilamonium hidroksida (TEAOH), larutan natrium

silikat dan natrium aluminat, abu sekam padi, serta abu sekam padi dengan larutan natrium aluminat (Pandiangan *et al.*, 2017).

Zeolit merupakan katalis heterogen yang memiliki keunggulan dibandingkan dengan katalis homogen. Katalis heterogen seperti zeolit memiliki beberapa keunggulan diantaranya dapat dipisahkan dengan mudah dari produk reaksi, tidak bersifat korosif, dan dapat digunakan kembali, sehingga lebih ekonomis dan ramah lingkungan dibandingkan katalis homogen. Katalis homogen meskipun efektif, memiliki kelemahan yaitu larut dalam campuran reaksi yang menyebabkan proses pemisahan katalis dari produk akhir menjadi sulit dan seringkali membutuhkan langkah tambahan seperti menyebabkan korosi pada peralatan (Pandiangan *et al.*, 2019).

Zeolit-P merupakan katalis yang berperan penting dalam meningkatkan kualitas dan kuantitas bahan bakar nabati. Zeolit-P memiliki ukuran nano dengan ukuran luas permukaan yang besar serta strukturnya berpori. Hal tersebut memungkinkan katalis ini efektif dalam menstabilkan radikal bebas dan mengurangi kandungan oksigen dalam senyawa organik (Rahman and Hayat, 2019). Zeolit-P bermanfaat untuk pemisahan gas, penghilangan limbah beracun dan radioaktif, penghilangan logam berat serta amonium dari limbah, juga bermanfaat dalam pembuatan deterjen yang ramah lingkungan. Menurut *International Zeolite Association* (IZA), struktur zeolit-P memiliki topologi kerangka yang serupa dengan keluarga *gismondine* (Latosińska, 2019) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur zeolit-P (Khaleque *et al.*, 2020).

Zeolit-P dapat disintesis dengan beberapa metode sama halnya dengan zeolit sintesis lainnya. Beberapa metode yang biasa digunakan yaitu metode hidrotermal, solvothermal, ionothermal, fusi alkali, alkali *leaching*, sol-gel, *microwave*, dan ultrasonikasi. Umumnya zeolit dapat disintesis dari bahan baku seperti abu sekam padi, limbah dan material kaca, limbah kertas, kaolin atau metakaolin, abu batubara, dan lainnya (Khaleque *et al.*, 2020). Selain itu, mineral bentonit yang mengandung sumber Si/Al dapat digunakan untuk alternatif sintesis zeolit (Srilai *et al.*, 2020).

2.5 Bentonit

Bentonit merupakan lempung golongan smektit dioktahedral yang mengandung 80% montmorillonit dan sisanya antara lain kaolin, illit, feldspar, gypsum, abu vulkanik, kalsium karbonat, pasir kuarsa dan mineral lainnya. Bentonit memiliki kemampuan mengembang dan sifat penukar ion yang tinggi, dengan ukuran partikel koloid yang sangat kecil. Terdapat dua jenis bentonit yaitu *swelling bentonite* yang dapat mengembang hingga delapan kali saat direndam dalam air dan memiliki pH basa (8,5-9,8) dan *non-swelling bentonite* yang tidak mengembang dan memiliki pH asam (4-7). Bentonit mempunyai sifat mengadsorpsi karena ukuran partikel koloidnya sangat kecil dan memiliki kapasitas permukaan ion yang tinggi. Pengembangan bentonit disebabkan oleh adanya penggantian isomorphorus pada lapisan oktahedral (Atikah, 2018).

2.5.1 Pemanfaatan bentonit

Bentonit adalah koloid alami yang terdiri dari silikat aluminium terhidrasi. Bentonit memiliki kemampuan untuk *expand*, sifat penukar ion, luas permukaan yang besar, dan daya serap yang tinggi. Bentonit adalah salah satu mineral yang memiliki banyak manfaat dalam kehidupan sehari-hari bentonit dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengikat dalam pasir cetak untuk pengecoran, bahan

baku pembuatan semen, keramik, kosmetik, krayon, serta sebagai adsorben, dalam bidang farmasi, dan masih banyak lagi. Bentonit dibagi menjadi dua jenis, yaitu sodium bentonit yaitu bentonit yang dapat mengembang dan kalsium bentonit yaitu bentonit yang tidak dapat mengembang. Sodium bentonit memiliki kandungan ion Na^+ . Jenis bentonit ini dapat mengembang hingga 8-15 kali lipat ketika direndam dalam air dan tetap terdispersi selama beberapa waktu. Posisi pertukaran ion di bentonit ini umumnya diisi oleh ion natrium. Penggunaan utama sodium bentonit adalah lumpur pengeboran, pembuatan pelet bijih besi, penyumbatan kebocoran bendungan dan kolam, serta dalam industri minyak sawit dan farmasi. Selain itu, sifat keasaman pada permukaan bentonit menjadikannya material yang sesuai untuk digunakan sebagai katalis (Ruskandi dkk., 2020).

Bentonit memiliki sifat struktur yang menguntungkan seperti luas permukaan yang spesifik, volume pori yang signifikan, struktur berlapis yang sangat terorganisir, kapasitas pertukaran kation yang tinggi, serta stabilitas kimia dan mekanik yang baik. Hal tersebut menjadikan bentonit sangat cocok untuk digunakan sebagai katalis dalam berbagai proses industri kimia. Sebagai bahan baku yang ramah lingkungan, tidak beracun, dan ekonomis, bentonit dapat dimodifikasi dan menambah sifat struktur yang diperlukan sehingga menjadikannya bahan yang berguna untuk aplikasi katalitik. Transformasi struktural dan modifikasi sifat bentonit dapat dilakukan dengan berbagai metode seperti aktivasi kimia, aktivasi mekano-kimia, aktivasi termokimia, dan lainnya. perlakuan asam pada bentonit menghasilkan lebih banyak sisi asam dengan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan bentonit murni untuk diaplikasikan sebagai katalis (Gandhi *et al.*, 2022).

2.5.2 Modifikasi bentonit menjadi zeolit-P

Zeolit-P dapat disintesis menggunakan beberapa metode salah satunya adalah metode hidrotermal (Miao *et al.*, 2022). Metode hidrotermal adalah teknik untuk sintesis zeolit yang melibatkan penggunaan air sebagai pelarut dan basa sebagai mineralizer pada suhu dan tekanan tertentu dalam bejana tertutup yang biasanya

terbuat dari polipropilena dan autoklaf baja berlapis teflon. Proses ini umumnya dilakukan pada suhu relatif rendah yang menjadikannya lebih mudah dan murah jika dibandingkan dengan metode lain. Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi sintesis menggunakan metode hidrotermal ini yaitu suhu, tekanan, rasio silika-aluminium, komposisi bahan baku, dan waktu reaksi dapat mempengaruhi hasil akhir reaksi, termasuk ukuran dan kristalinitas zeolit yang dihasilkan (Khaleque *et al.*, 2020).

Teknik hidrotermal dikenal sebagai metode utama untuk mensintesis zeolit. Dalam teknik hidrotermal ini, air digunakan sebagai pelarut dan basa digunakan sebagai mineralizer, dengan variasi suhu dan tekanan. Zeolit sering disintesis melalui metode hidrotermal karena berbagai kelebihanannya, seperti penggunaan energi yang rendah, reaktivitas reaktan yang tinggi, penyimpanan larutan yang mudah, minimnya polusi udara, serta kemampuan untuk membentuk fase metastabil dan fase terkondensasi yang khas. Selama proses hidrotermal, jumlah aluminat dan silikat biasanya disesuaikan untuk memperoleh jenis zeolit yang dibutuhkan. Berbagai jenis zeolit sintesis seperti zeolit-X, zeolit-P, zeolit-A, dan hidroksi sodalit dapat diproduksi dengan memodifikasi kondisi reaksi, termasuk suhu (80-200°C), durasi reaksi (2-48 jam), rasio Si/Al (1-15), konsentrasi larutan basa, dan pH (Shin and Kim, 2024).

Bentonit memiliki kemampuan mengembang saat dilarutkan dalam air, yang menyebabkan porositasnya tidak permanen serta rendahnya stabilitas termal dan hidrotermal. Akibatnya, kinerja bentonit kurang optimal. Oleh karena itu, sebelum digunakan secara efektif dalam industri, beberapa karakteristik bentonit perlu ditingkatkan melalui proses perlakuan khusus, biasanya dilakukan menggunakan asam organik, seperti H_2SO_4 atau HCl , untuk menggantikan ion-ion yang dapat ditukar dari bentonit selama proses kimia tersebut (Muslimah *et al.*, 2023). Proses purifikasi atau aktivasi bentonit berfungsi untuk menggantikan kation dalam pori-pori bentonit dengan ion H^+ . Proses ini menyebabkan terjadinya delaminasi, yaitu pelepasan Al^{3+} , Fe^{3+} , dan Mg^{2+} dari struktur bentonit yang pada akhirnya meningkatkan rasio Si/Al. Peningkatan rasio Si/Al ini memperkuat situs asam pada bentonit, yang berfungsi sebagai titik aktif. Semakin banyak situs asam,

semakin tinggi pula aktivasi bentonit. Selain itu, penambahan HCl juga berperan dalam membersihkan pori-pori bentonit, menghilangkan senyawa pengotor, dan mengatur ulang posisi ion yang dapat dipertukarkan (Naswir *et al.*, 2019).

Konsentrasi HCl yang digunakan dalam proses purifikasi bentonit berpengaruh terhadap pertukaran kation, dimana peningkatan konsentrasi HCl menyebabkan pelepasan lebih banyak mineral dari struktur bentonit. Akibatnya, massa bentonit berkurang karena sebagian mineral yang dilepas merupakan bagian dari massa awal bentonit, seperti yang dilaporkan oleh Suhendi *et al.* (2024) yang melakukan purifikasi bentonit dengan variasi konsentrasi HCl sebesar 0,25; 0,50; 0,75 M. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa terjadi penurunan massa bentonit setelah proses purifikasi, dimana berat awal bentonit masing-masing 171,5 g berkurang menjadi 154,35; 151,06; 149,55 g masing-masing pada konsentrasi 0,25; 0,50; 0,75 M. Penurunan massa ini menandakan peningkatan aktivasi katalitik. Hal ini terjadi karena penghilangan mineral dan pengotor membuat pori-pori bentonit lebih terbuka dan memperbesar luas permukaan permukaan, sehingga bentonit lebih efektif sebagai katalis.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Nugraha dkk. (2017), juga dilakukan purifikasi bentonit dengan HCl 1 M yang menunjukkan bahwa luas permukaan pada bentonit mengalami peningkatan dimana luas bentonit sebelum purifikasi adalah 73,35 m²/g sementara setelah purifikasi menjadi 100,73 m²/g. Sebelum dipurifikasi, bentonit memiliki warna merah bata, namun setelah purifikasi warna tersebut menjadi lebih pudar. Hal ini disebabkan oleh reaksi antara bentonit dengan HCl yang melarutkan Fe₂O₃ dalam bentonit, sehingga warna merah bata menjadi lebih pudar.

2.5.3 Karakterisasi bentonit

Karakterisasi bentonit dilakukan menggunakan tiga metode yaitu dengan *X-Ray Diffraction Fluorescence* (XRF), *X-Ray Diffraction* (XRD), dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). XRF adalah teknik yang digunakan untuk mengukur

radiasi yang dipancarkan oleh sampel setelah dipaparkan oleh sinar-X. Prinsip dasar XRF didasarkan pada struktur atom, dimana setiap unsur memiliki nomor atom (Z) yang unik, yang menentukan jumlah proton dalam nukleus. Atom terdiri dari proton bermuatan positif dan neutron netral di inti, serta elektron bermuatan negatif yang mengorbit di kulit elektron. Elektron di kulit terdalam, seperti kulit K, terikat lebih kuat ke inti, sedangkan elektron di kulit yang lebih jauh seperti kulit L dan M yang memiliki ikatan yang lebih lemah. Ketika sinar-X mengenai atom, energi yang diberikan menyebabkan perpindahan elektron antara kulit-kulit tersebut, sehingga menghasilkan emisi radiasi dengan pola energi unik yang dapat diukur dan diidentifikasi (Donais and George, 2018).

Penelitian mengenai analisis bentonit dengan XRF ini dilakukan oleh Jaramillo *et al.* (2024), hasil yang diperoleh yaitu kandungan SiO_2 dalam bentonit sebanyak 62,09 %, kandungan Al_2O_3 sebanyak 17,73 % dan Fe_2O_3 sebanyak 9,57 %.

Komposisi kimia dari oksida utama dalam sampel yang dianalisis sesuai dengan kisaran yang telah ditetapkan untuk montmorillonit, kecuali untuk Fe_2O_3 . Salah satu ciri khas dari bentonit adalah warnanya kemerahan yang disebabkan oleh tingginya kandungan Fe_2O_3 . Adanya kandungan seperti Fe_2O_3 dapat menjadi pengganggu proses modifikasi bentonit. Oleh karena itu, dilakukan purifikasi untuk mendapatkan bentonit dengan kandungan Si/Al yang tinggi tanpa adanya zat pengganggu. Penelitian sebelumnya yang dilaporkan oleh Kolo dkk. (2024) melakukan purifikasi bentonit menggunakan HCl. Analisis dilakukan terhadap sampel sebelum dan sesudah purifikasi, dihasilkan bahwa oksida utama yang teridentifikasi adalah silika (SiO_2) dengan persentase 57,158% pada sampel sebelum purifikasi dan mengalami peningkatan menjadi 73,161% setelah purifikasi. Perbandingan data XRF bentonit sebelum dan sesudah purifikasi dapat dilihat pada Tabel 3.

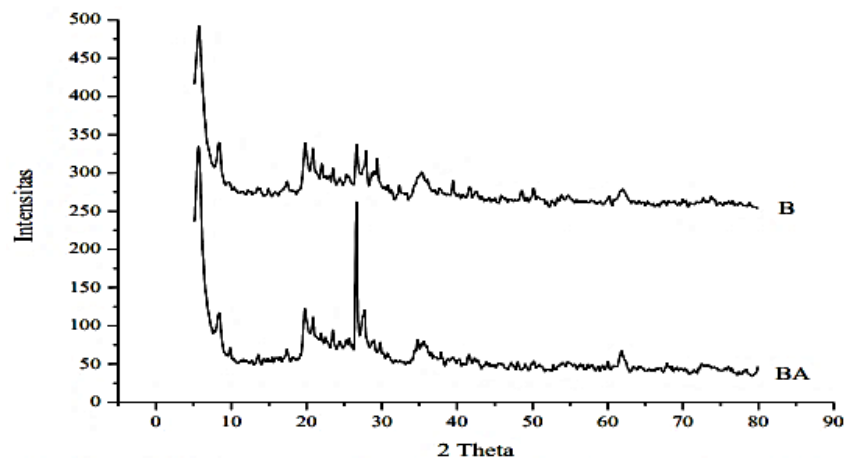
Tabel 3. Karakterisasi bentonit menggunakan XRF

No.	Oksida	Komposisi (%)		Unsur	Komposisi (%)	
		Sebelum purifikasi	Sesudah purifikasi		Sebelum purifikasi	Sesudah purifikasi
1	SiO_2	57,158	73,161	Si	44,882	63,883
2	Al_2O_3	16,767	17,897	Al	13,443	14,999
3	CaO	13,402	14,503	Ca	20,382	20,483

No.	Oksida	Komposisi (%)		Unsur	Komposisi (%)	
		Sebelum purifikasi	Sesudah purifikasi		Sebelum purifikasi	Sesudah purifikasi
4	Fe ₂ O ₃	8,613	9,715	Fe	14,712	8,270
5	TiO ₂	1,008	2,029	Ti	1,409	2,549
6	MnO	0,125	0,025	Mn	0,235	0,035
7	SO ₃	0,043	0,053	S	0,038	0,039

Sumber: Kolo dkk., (2024).

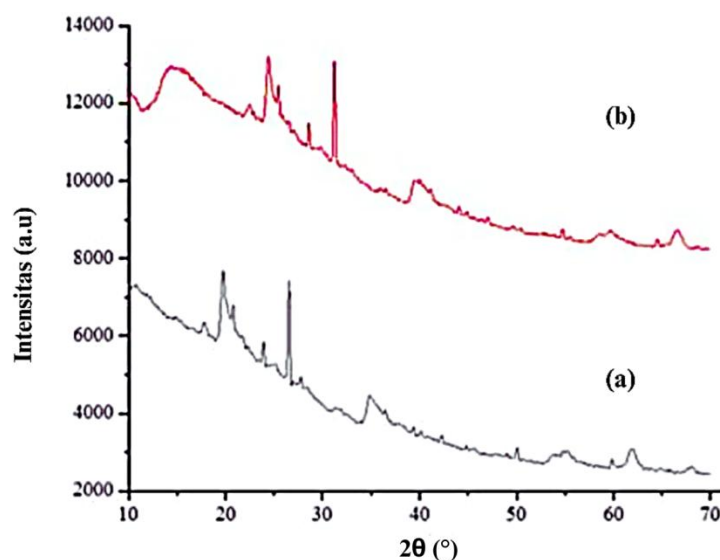
Analisis bentonit juga dilakukan menggunakan XRD, tujuannya adalah untuk mengidentifikasi struktur kristal suatu bentonit. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Darmadinata dkk. (2019), pola XRD bentonit memiliki puncak-puncak tajam pada $2\theta = 5,74^\circ$ yang merupakan puncak karakteristik bidang (001) lempung golongan smektit, puncak difraksi pada $2\theta = 19,80^\circ$ dengan bidang (020), menandakan bahwa lempung smektit merupakan jenis montmorillonit, sedangkan pada $2\theta = 26,6^\circ$ merupakan kuarsa. Difraktogram dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Difraktogram bentonit (B) dan bentonit purifikasi (BA) (Darmadinata dkk., 2019).

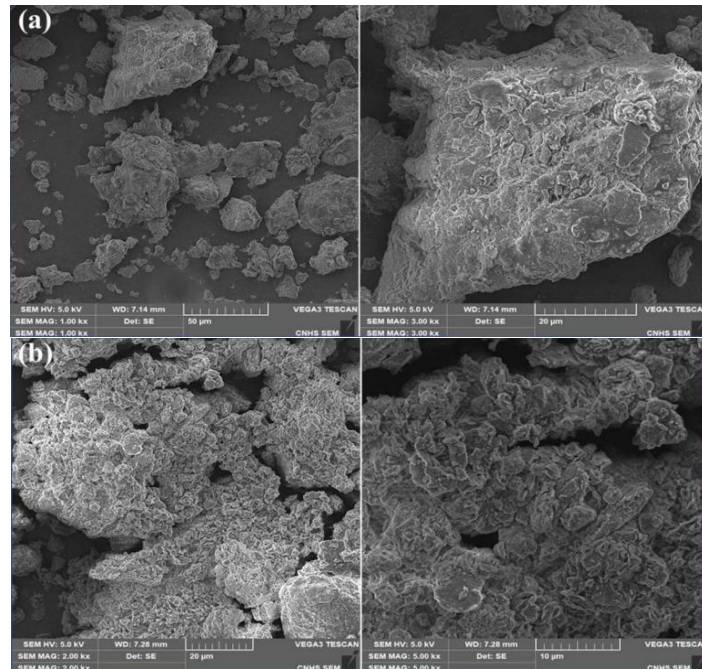
Analisis XRD terhadap bentonit yang dipurifikasi dengan asam juga dilakukan oleh Muslimah dkk. (2023), hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 4. Pola difraksi bentonit alam menunjukkan puncak pada $2\theta = 19,7; 26,5; 34,91; 54,34; \text{ dan } 61,80^\circ$ yang mengonfirmasikan bahwa struktur mineral tersebut tergolong montmorillonit. Purifikasi menggunakan larutan HCl tidak menyebabkan perubahan signifikan pada jarak antar bidang kristal, namun

difraktogram bentonit setelah purifikasi menunjukkan adanya pergeseran puncak difraksi ke arah sudut yang lebih besar (kanan) yang menandakan adanya perubahan pada jarak antar bidang. Proses purifikasi ini menyebabkan permukaan bentonit menjadi lebih berpori akibat terlepasnya kation dan pengotor selama perlakuan dengan asam.



Gambar 4. Difraktogram bentonit; (a) bentonit alam dan (b) bentonit terpurifikasi HCl (Muslimah dkk., 2023).

Karakterisasi bentonit menggunakan SEM dilakukan untuk melihat morfologi permukaan bentonit, seperti yang dilakukan oleh Maged *et al.* (2020) yang menjelaskan bahwa purifikasi bentonit dapat mempengaruhi morfologi permukaan bentonit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Morfologi permukaan bentonit alam (a) menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan bentonit yang dipurifikasi dengan asam klorida. Permukaan bentonit alam terlihat padat dan tidak teratur, dengan partikel yang menyatu rapat. Sebaliknya, pada sampel bentonit purifikasi (b) terlihat pori-pori yang lebih besar diantara partikel, serta permukaan yang tersusun dari partikel-partikel bersisik yang bergabung membentuk struktur seperti aglomerat. Morfologi pada bentonit terpurifikasi juga menunjukkan terjadinya penguraian partikel dan pengecilan ukuran partikel bentonit sebagai akibat dari perlakuan asam.



Gambar 5. Morfologi bentonit; (a) bentonit alam dan (b) bentonit terpurifikasi (Maged *et al.*, 2020).

2.6 Karakterisasi Zeolit-P Hasil Modifikasi Bentonit

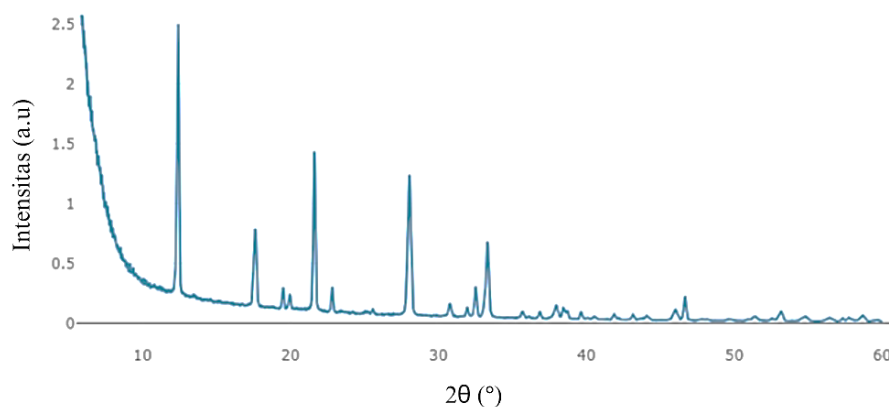
Karakterisasi zeolit dilakukan dengan menggunakan XRD dan SEM, sedangkan untuk analisis produk hasil pirolisis menggunakan GC-MS.

2.6.1 X-Ray Diffraction (XRD)

Material yang umumnya dianalisis menggunakan XRD adalah padatan kristalin seperti oksida logam, zeolit, dan logam. XRD telah lama dianggap sebagai teknik kristalografi yang sangat penting dalam mempelajari struktur zeolit. Penggunaan paling dasar dari XRD adalah untuk mengidentifikasi fase sidik jari (difraktogram) dari zeolit. Selain struktur kristal, informasi kristalografi lainnya juga dapat diperoleh melalui penghalusan data, seperti topologi, ukuran kristal, regangan atau tekanan, tingkat substitusi heteroatom, serta informasi kekristalan lainnya, termasuk ketidaksempurnaan kisi seperti cacat tumpukan, dislokasi, dan spesies atom yang tidak teratur (Lo *et al.*, 2018).

Prinsip dasar XRD adalah memanfaatkan difraksi cahaya melalui kisi kristal. Difraksi ini terjadi ketika cahaya yang memiliki panjang gelombang sebanding dengan jarak antar atom, sekitar 1 Å, melewati kisi kristal. Radiasi yang digunakan bisa berupa sinar-X, elektron, atau neutron. Sinar-X, yang merupakan foton berenergi tinggi dengan panjang gelombang antara 0,5-2,5 Å, digunakan untuk menganalisis material. Ketika berkas sinar-X mengenai material, sebagian diserap, ditransmisikan, dan sebagian lagi dihamburkan. Hamburan yang terdifraksi ini dideteksi oleh XRD. Ada hamburan yang saling melemahkan karena perbedaan fase (interferensi destruktif), dan ada yang saling memperkuat karena fasenya sama (interferensi konstruktif). Hamburan yang saling menguatkan ini disebut sebagai berkas difraksi (Alderton, 2020).

Karakterisasi menggunakan XRD sering digunakan untuk padatan kristalin karena atom-atom dalam padatan kristal tersusun secara teratur, membentuk bidang-bidang dengan jarak tertentu, dan setiap atom dapat memantulkan sinar-X. Hasil karakterisasi XRD digambarkan dalam bentuk difraktogram yang menunjukkan plot sudut 2θ terhadap intensitas. Data XRD ini kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak Match! untuk membandingkan difraktogram zeolit dengan standar zeolit-P dari *International Zeolite Association* (IZA). Gambar 6 di bawah ini menunjukkan difraktogram standar zeolit-P.



Gambar 6. Difraktogram standar zeolit-P (*International Zeolite Association* (IZA)).

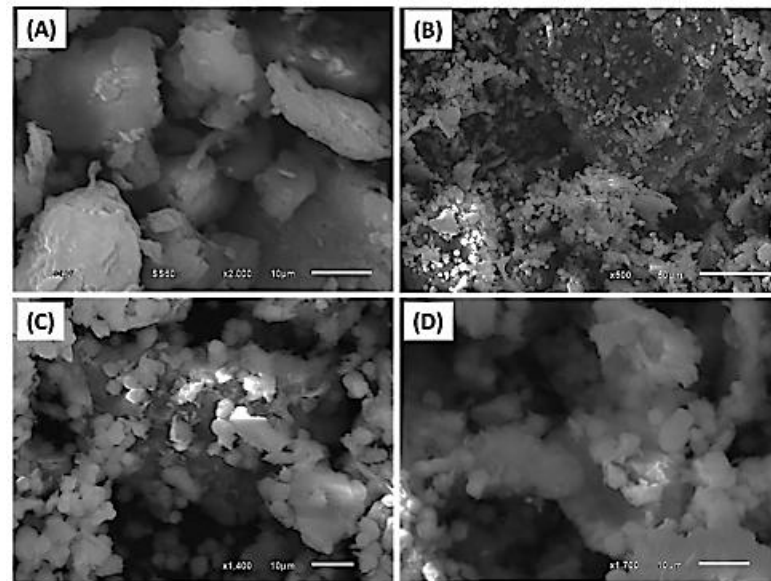
2.6.2 Scanning Electron Microscopy (SEM)

SEM merupakan metode analisis yang sangat efektif untuk mempelajari morfologi material, baik organik maupun anorganik, pada skala nanometer (nm) hingga mikrometer (μm). Alat ini mampu memperbesar objek hingga 300.000 kali. Prinsip kerja SEM melibatkan pancaran berkas elektron yang dihasilkan dari filamen tungsten atau elemen pemanas, yang kemudian berinteraksi dengan spesimen dan menghasilkan elektron sekunder dan sinar-X. Proses pemindaian permukaan bahan dilakukan dengan mengatur generator dan koil pemandaian. Elektron sekunder yang dihasilkan dari interaksi tersebut ditangkap oleh detektor elektron sekunder (SE) kemudian diproses dan diperkuat oleh amplifier sebelum divisualisasikan pada monitor sinar katoda (Mohammed and Abdullah, 2019).

Prinsip kerja SEM melibatkan berkas elektron terfokus yang dihasilkan dari sumber elektron. Energi berkas elektron (E_0) biasanya berada dalam kisaran 0,1 hingga 30 keV. Setelah elektron dipancarkan dan dipercepat ke energi tinggi, berkas tersebut diarahkan melalui lensa magnetik atau elektrostatik dan kumparan elektromagnetik yang memperkecil diameter berkas dan memindainya secara bertahap (pola x-y) pada spesimen. Pada setiap titik pemindaian, interaksi antara berkas elektron dan spesimen menghasilkan dua jenis elektron yang keluar yaitu elektron hamburan balik (BSE) yang mempertahankan sebagian besar energi asalnya, serta elektron sekunder (SE) yang dihasilkan ketika elektron dari berkas utama mengeluarkan elektron dari atom spesimen. Elektron sekunder ini memiliki energi rendah yaitu sekitar 0-5 eV, sebagian besar di bawah 5 eV. Sinyal BSE dan SE ini dideteksi oleh detektor dan dikumpulkan, lalu diproses secara digital dan ditampilkan sebagai tingkat abu-abu dalam gambar dan komputer membentuk elemen gambar (piksel). SEM tradisional beroperasi dalam kondisi vakum tinggi ($<10^{-4}$ Pa) untuk mencegah hamburan elektron yang tidak diinginkan akibat interaksi dengan molekul gas (Goldstein *et al.*, 2018).

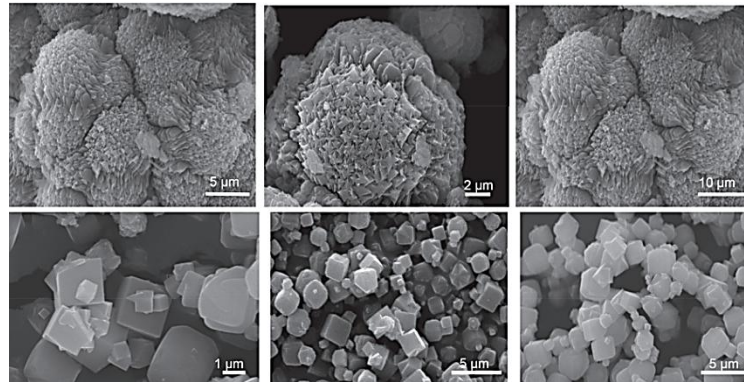
Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Abukhadra *et al.* (2020), hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa bentonit terlihat lapisan-lapisan yang bertumpuk dan terkumpul dalam kelompok besar, tampak menyatu dengan

beberapa pengotor yang terlihat pada permukaannya. Untuk modifikasi bentonit menjadi zeolit (Zeolit Na-P), kristal zeolit terbentuk prisma segi empat tersebar di atas permukaan. Proses ini tidak merusak mineral utama bentonit yaitu montmorillonit. Luas permukaan meningkat menjadi $512 \text{ m}^2/\text{g}$ jauh lebih tinggi dibandingkan dengan bentonit dengan luas $91 \text{ m}^2/\text{g}$, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Bentonit (A) dan (B-D) menunjukkan distribusi prisma segi empat zeolit-P pada permukaan partikel bentonit (Abukhadra *et al.*, 2020).

Penelitian lain yang dilakukan oleh Ferrarini *et al.* (2018) menunjukkan bahwa morfologi zeolit Na-P1 yang disintesis dari *fly ash* memiliki ciri khas pada permukaannya. Bentuknya seperti gumpalan kembang kol berukuran 10 mikrometer. Gumpalan besar ini tersusun dari gumpalan-gumpalan kecil yang terdiri dari kristal-kristal berbentuk prisma segi empat dengan tepi yang tajam. Kristal – kristal ini tumbuh secara tidak merata dan struktur ini mencerminkan sifat khas dari kerangka aluminosilikat tipe gismondin. Morfologi zeolit Na-P1 ditunjukkan pada Gambar 8.



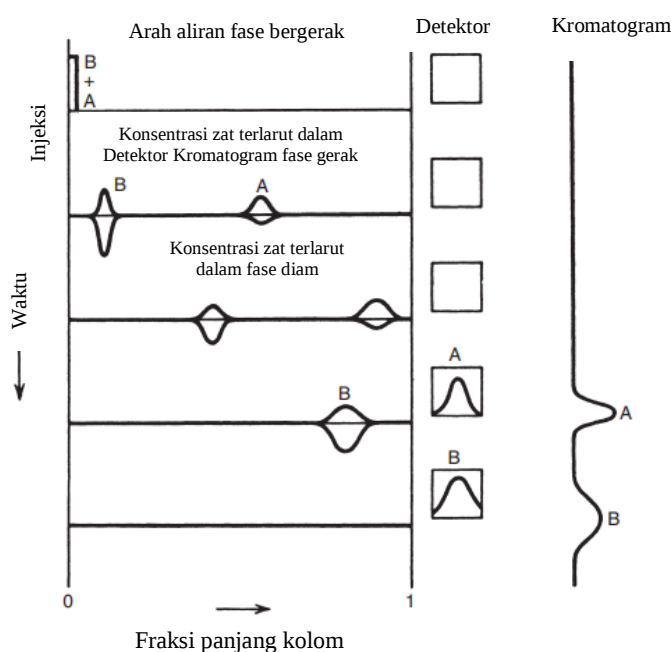
Gambar 8. Morfologi zeolit-P (Ferrarini *et al.*, 2018).

2.7 Analisis Bio Crude Oil (BCO) Hasil Pirolisis dengan Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

Gas Chromatography -Mass Spectrometry (GC-MS) adalah teknik yang menggabungkan proses kromatografi gas dengan spektrometri massa secara bersamaan. Kromatografi gas berfungsi untuk mendeteksi senyawa-senyawa yang mudah menguap (*volatile*) dalam kondisi vakum tinggi dan tekanan rendah ketika dipanaskan. Sementara itu, spektrometri massa digunakan untuk menentukan rumus molekul, massa molekul, serta menghasilkan ion bermuatan. Teknik GC-MS memungkinkan pemisahan sampel melalui kromatografi gas yang kemudian dianalisis menggunakan spektrometri massa. Teknik ini memiliki sensitivitas tinggi, sehingga dapat memisahkan campuran senyawa dan menganalisisnya pada konsentrasi rendah. Prinsip kerjanya adalah dengan mendeteksi molekul gas yang bermuatan, kemudian memilihnya berdasarkan massa dan muatan. Spektrum diperoleh dari proses ionisasi sampel, yang kemudian dipisahkan berdasarkan rasio massa terhadap muatan (Nuriah *et al.*, 2023).

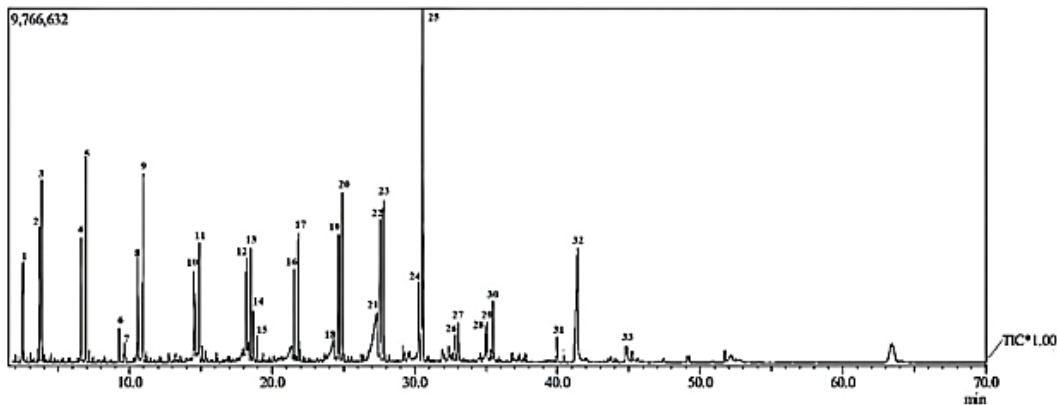
Proses kromatografi digambarkan secara skematis pada Gambar 9. Garis horizontal mewakili kolom kromatografi, dengan garis-garis berurutan menunjukkan berbagai tahap waktu saat sampel bergerak melalui kolom. Pada awalnya, campuran sampel terdiri dari komponen A dan B, dimasukkan ke dalam kolom dalam bentuk zona sempit. Fase gerak kemudian membawa sampel melalui kolom dari kiri ke kanan. Selama proses, setiap komponen terdistribusi antara fase

gerak dan fase diam. Puncak di atas garis menggambarkan jumlah komponen dalam fase gerak, sementara puncak di bawah garis menunjukkan jumlahnya dalam fase diam. Karena komponen A memiliki afinitas lebih tinggi terhadap fase gerak, ia bergerak lebih cepat dibandingkan komponen B yang cenderung lebih tertarik ke fase diam. Akibatnya, komponen A dan B terpisah saat bergerak melalui kolom. Setelah melewati kolom, kedua komponen mencapai detektor yang menghasilkan sinyal dalam bentuk kromatogram. Kromatogram menunjukkan puncak yang melambangkan keberadaan masing-masing komponen, dengan pelebaran puncak yang terjadi akibat proses kinetik yang bekerja selama kromatografi (McNair and Miller, 2009).



Gambar 9. Skema proses kromatografi (McNair and Miller, 2009).

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Simanjuntak *et al.* (2024), kromatogram GC pada Gambar 10 menunjukkan bahwa BCO terdiri dari banyak senyawa. Komponen BCO yang berhasil diidentifikasi dengan jumlah komponen terbanyak yaitu heksana sebanyak 2,39%. Beberapa senyawa tidak teridentifikasi karena jumlahnya yang sangat kecil, di bawah batas deteksi instrumen. Analisis GC-MS juga memiliki keterbatasan dalam menentukan persentase relatif senyawa, karena perhitungan didasarkan pada luas puncak dan tidak memperhitungkan variasi karakteristik puncak untuk senyawa dengan kuantitas yang sama.



Gambar 10. Kromatogram GC-MS dari BCO (Simanjuntak *et al.*, 2024).

Hasil BCO dari pirolisis pada Tabel 4 menunjukkan bahwa komponen utama BCO adalah hidrokarbon yang menghasilkan 80,23% dari total komposisi, diikuti oleh asam sebesar 18,93%, dan keton sebanyak 0,84%. Fraksi hidrokarbon ini terdiri dari alkana dan alkena, terlihat dari puncak pada setiap nomor karbon pada kromatogram.

Tabel 4. Komposisi kimiawi dari BCO

No. Puncak	Waktu Retensi (menit)	SI	Nama Senyawa	Rumus Molekul	Kategori	Persentase Relatif (%)
1	2,475	94	1-Heksana	C ₆ H ₁₂	Hidrokarbon	2,39
2	3,694	97	1-Heptana	C ₇ H ₁₄	Hidrokarbon	2,17
3	3,861	96	Heptana	C ₇ H ₁₆	Hidrokarbon	3,01
4	6,605	96	1-Oktana	C ₈ H ₁₆	Hidrokarbon	2,89
5	6,941	95	Oktana	C ₈ H ₁	Hidrokarbon	4,69
6	9,279	96	Etilbenzena	C ₈ H ₁₀	Hidrokarbon	0,90
7	9,645	94	Benzena	C ₈ H ₁₀	Hidrokarbon	0,91
8	10,598	96	1-Nonena	C ₉ H ₁₈	Hidrokarbon	0,03
9	10,967	96	Nonana	C ₉ H ₂₀	Hidrokarbon	5,11
10	14,552	98	1-Dekena	C ₁₀ H ₂₀	Hidrokarbon	2,75
11	14,890	96	Dekana	C ₁₀ H ₂₂	Hidrokarbon	3,26
12	18,202	96	1-Undekena	C ₁₁ H ₂₂	Hidrokarbon	3,04
13	18,505	96	Undekana	C ₁₁ H ₂₄	Hidrokarbon	2,62
14	18,660	95	2-Undekena	C ₁₁ H ₂₂	Hidrokarbon	1,21
15	21,351	85	Asam Undekanoat	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	Asam	0,92
16	21,551	95	1-Dodekena	C ₁₂ H ₂₄	Hidrokarbon	2,25
17	21,828	97	Dodekana	C ₁₂ H ₂₆	Hidrokarbon	3,11
18	24,292	86	Asam Dodekanoat	C ₁₂ H ₂₄ O	Asam	1,15
19	24,666	96	1-Tridekena	C ₁₃ H ₂₆	Hidrokarbon	3,41
20	24,921	97	Tridekana	C ₁₃ H ₂₈	Hidrokarbon	4,43
21	27,331	91	Asam Tetradekanoat	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	Asam	7,35
22	27,573	98	1-Tetradekena	C ₁₄ H ₂₈	Hidrokarbon	3,94
23	27,803	97	Tetradekana	C ₁₄ H ₃₀	Hidrokarbon	4,17

No. Puncak	Waktu Retensi (menit)	SI	Nama Senyawa	Rumus Molekul	Kategori	Persentase Relatif (%)
24	30,293	97	1-Pentadekena	C ₁₅ H ₃₀	Hidrokarbon	2,25
25	30,293	97	Pentadekana	C ₁₅ H ₃₂	Hidrokarbon	12,25
26	32,856	98	1-Heksadekena	C ₁₆ H ₃₂	Hidrokarbon	0,80
27	33,043	96	Heksadekana	C ₁₆ H ₃₄	Hidrokarbon	1,21
28	34,935	93	1-Heptadekena	C ₁₇ H ₃₄	Hidrokarbon	1,31
29	35,075	97	1-Heptadekena	C ₁₇ H ₃₄	Hidrokarbon	1,33
30	35,475	96	Heptadekana	C ₁₇ H ₃₆	Hidrokarbon	1,79
31	39,979	94	2-Heptadekanon	C ₁₇ H ₃₄ O	Keton	0,84
32	41,405	92	Asam Oktadekanoat	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	Asam	8,19
33	44,788	93	Asam Oleat	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	Asam	1,32

Sumber: Simanjuntak *et al.*, 2024.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2024-Maret 2025 di Laboratorium Kimia Anorganik-Fisik Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. 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 (LTSIT) Universitas Lampung, serta analisis hasil pirolisis menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) dilakukan di Laboratorium Universitas Gadjah Mada (UGM).

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat-alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah autoklaf, reaktor pirolisis, *furnace*, neraca analitik, oven, magnetik stirer, ayakan 300 mesh, corong pisah, corong kaca, cawan porselin, kondensor, klem dan statif, mortar dan alu, peralatan gelas yang umum digunakan di laboratorium, wadah plastik, batang pengaduk, spatula, dan botol sampel. Karakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) PANalytical Epsilon 3, *X-Ray Diffraction* (XRD) XPERT PRO PANalytical

PW3040/60, *Scanning Electron Microscope* (SEM) ZEISS EVO MA 10, dan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) QP2010S SHIMADZU.

3.2.2 Bahan-bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah bentonit, HCl 1 M, , NaOH (p.a), *Food Grade Aluminium Foil* (FGAF), minyak kelapa sawit (curah), akuades, kertas saring, indikator universal, dan kertas TBA 0,8 mm.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Analisis bentonit sebelum purifikasi

Pada penelitian ini, sintesis zeolit-P dilakukan menggunakan bentonit sebagai bahan utama. Bentonit yang digunakan diperoleh dari toko komersial melalui situs *online*. Selanjutnya bentonit dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk menentukan komposisi unsur-unsur yang terkandung dalam bentonit yang dioperasikan dengan tegangan 30 kV, dan arus 300 mA, sehingga dapat memberikan informasi mengenai kandungan oksida logam atau unsur lain. Selain itu, bentonit juga dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi fase kristalin bentonit, serta dilakukan analisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengidentifikasi morfologi permukaan bentonit.

3.3.2 Purifikasi bentonit

Bentonit yang telah dikarakterisasi dengan XRF selanjutnya dilakukan purifikasi atau pemurnian terlebih dahulu, untuk menurunkan kandungan zat lain seperti logam berat salah satunya besi. Purifikasi dilakukan dengan mencampurkan

bentonit dengan HCl 1 M dengan perbandingan 1:5, lalu mengaduk campuran tersebut menggunakan *stirrer* untuk melarutkan logam secara perlahan selama 24 jam. Proses selanjutnya yaitu menyaring campuran dengan kertas saring, lalu mencucinya dengan akuades hingga mencapai pH netral untuk menghilangkan sisa-sisa asam dalam campuran. Langkah selanjutnya mengeringkan bentonit pada suhu 100°C selama 8 jam, kemudian mengkaraktisasinya menggunakan XRF, XRD dan SEM.

3.3.3 Modifikasi bentonit menjadi zeolit-P

Sintesis zeolit-P dari bentonit dilakukan dengan melarutkan NaOH (p.a) ke dalam 100 mL akuades untuk menyiapkan larutan NaOH. Melarutkan 4,36 g FGAF dalam larutan NaOH tersebut sambil mengaduknya menggunakan *magnetic stirrer* hingga homogen. Selanjutnya menambahkan 50 g bentonit ke dalam larutan NaOH dan FGAF tersebut. Campuran dimasukkan ke dalam botol polipropilen dan memasukkannya ke dalam autoklaf, lalu mendiamkannya pada suhu kamar selama 24 jam dalam keadaan tertutup untuk proses *aging*. Kemudian mengkristalkan campuran dengan metode hidrotermal pada suhu 100°C selama 72, 96, dan 120 jam. Menyaring campuran dan mengeringkannya dalam oven pada suhu 100°C selama 8 jam. Menggerus padatan yang diperoleh dengan mortar dan alu, kemudian mengayaknya menggunakan saringan mesh 300 nm untuk mendapatkan sampel dengan ukuran partikel yang relatif homogen dan mengkalsinasi sampel pada suhu 600°C selama 8 jam.

3.3.4 Karakterisasi zeolit-P hasil modifikasi bentonit

Karakterisasi zeolit-P dilakukan untuk memastikan keberhasilan modifikasi bentonit, dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk memberikan informasi mengenai struktur kristalografi sampel zeolit-P dan analisis *Scanning*

Electron Microscopy (SEM) digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan sampel zeolit-P.

Karakterisasi dengan XRD dilakukan untuk menganalisis struktur kristalografi zeolit-P, semakin tinggi puncak difraksi maka semakin tinggi tingkat kristalinitas sampel. Data difraktogram memberikan informasi tentang struktur ataupun fase berdasarkan letak sudut 2θ . Karakterisasi XRD pada penelitian ini, dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Negeri Padang (UNP) dengan tipe XRD yang digunakan yaitu X'PERT PRO PANalytical PW 3040/60 Tahun 2013 produksi Belanda. Pola XRD akan dihasilkan pada $\lambda = 0,154 \text{ \AA}$, dengan sumber radiasi anoda tembaga (Cu), tegangan 40 kV dan arus 30 Ma. Pengukuran dilakukan dengan langkah scan $0,02^\circ$ pada rentang sudut difraksi $10\text{-}100^\circ$.

Karakterisasi menggunakan SEM bertujuan untuk mengetahui morfologi permukaan sampel seperti bentuk, ukuran, dan distribusi partikel zeolit-P. Pada penelitian ini, karakterisasi sampel dengan SEM dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (LTSIT) Universitas Lampung dengan mengikuti prosedur yang ditetapkan oleh institusi tersebut. Adapun SEM yang digunakan yaitu ZEISS EVO MA 10, yang dioperasikan pada 8 kV dengan tegangan elektron 20 kV. Pemindaian sampel dilakukan pada perbesaran 15.000x guna mendapatkan tampilan permukaan sampel yang lebih baik.

3.3.5 Uji aktivitas katalitik zeolit-P hasil modifikasi pada proses pirolisis minyak kelapa sawit

Pada penelitian ini, pengujian aktivitas zeolit-P menggunakan perangkat pirolisis dalam skala laboratorium yang terdiri dari reaktor pemanas yang dihubungkan dengan kondensor dan wadah untuk menampung produk hasil pirolisis. Dalam uji pirolisis ini, diawali dengan memanaskan minyak kelapa sawit dengan tujuan untuk mengurangi kadar air dan memastikan minyak kelapa sawit dalam keadaan stabil sebelum proses pirolisis berlangsung. Sebelum dilakukan pemanasan, warna minyak kelapa sawit biasanya cenderung kuning tua dan ada endapan berwarna

putih. Setelah pemanasan, warna minyak kelapa sawit sedikit lebih terang atau stabil karena pengurangan kadar air dan pemisahan beberapa pengotor yang terlarut.

Proses pra-perlakuan minyak kelapa sawit dilakukan dengan memanaskan minyak kelapa sawit dalam gelas kimia sebanyak 200 mL di atas *hotplate* dan pengerjaannya dilakukan di dalam lemari asam. Minyak kelapa sawit dibiarkan hingga mendidih dan perhitungan waktu pemanasan dimulai ketika minyak kelapa sawit yang dipanaskan mulai mendidih. Pemanasan sebelum pirolisis menjadi fokus kajian pada penelitian ini dengan variasi waktu pemanasan minyak kelapa sawit yaitu 10, 20, 30, 40 menit, dan tanpa pemanasan. Tujuannya adalah untuk mengetahui waktu pemanasan optimal minyak kelapa sawit sehingga mendapatkan minyak kelapa sawit dengan komposisi terbaik melalui proses pirolisis.

Proses selanjutnya yaitu proses pirolisis dilakukan dengan mencampurkan sebanyak 200 mL minyak kelapa sawit dengan 10 g katalis zeolit-P lalu memasukkannya ke dalam reaktor, dan menambahkan *heat exchanger* sebanyak 10 gram ke dalam reaktor. Reaktor dipanaskan dan dibiarkan berlangsung selama 6-menit atau hingga tetesan terakhir. Uap yang terbentuk dialirkan dari reaktor kemudian didinginkan di kondensor untuk menghasilkan distilat berupa BCO. Produk cair yang dihasilkan dipindahkan ke dalam corong pemisah dan dibiarkan terpisah antara fase air dan organik (BCO).

3.3.6 Analisis produk hasil pirolisis dengan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS)

Karakterisasi menggunakan GC-MS bertujuan untuk mengidentifikasi senyawa kimia yang terdapat dalam hasil pirolisis, terutama pada lapisan organik yang mengandung hidrokarbon (biohidrokarbon). Pada penelitian ini, karakterisasi sampel menggunakan GC-MS dilakukan di Laboratorium Universitas Gajah Mada dengan tipe alat yaitu QP2010S SHIMADZU untuk mengidentifikasi tipe kolom

Rtx 5 (panjang 30 m; ID 0,25 mm; ketebalan film: 0,25 m; gas pembawa: Helium; EI 70 Ex). Suhu injektor 300°C dengan mode split, suhu detektor 250°C, suhu kolom oven 40°C, laju alir pada tekanan 12,9 kPa dan total aliran 34,5 mL/menit.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh simpulan sebagai berikut.

1. Purifikasi bentonit berhasil dilakukan menggunakan HCl 1 M, yang ditandai dengan penurunan kadar logam Fe.
2. Zeolit-P berhasil diperoleh dari modifikasi bentonit purifikasi melalui metode hidrotermal dengan variasi waktu kristalisasi, keberhasilannya dikonfirmasi melalui analisis XRD dengan acuan *database* standar IZA dan morfologi permukaannya dianalisis dengan SEM.
3. Karakterisasi XRD dan SEM menunjukkan bahwa zeolit-P hasil modifikasi bentonit dengan waktu kristalisasi 96 jam merupakan zeolit hasil modifikasi terbaik karena menunjukkan kemiripan pada posisi 2θ dengan perbandingan menggunakan standar IZA dan morfologi permukaannya berbentuk prisma segi empat.
4. Pra-perlakuan pemanasan minyak kelapa sawit selama 30 menit menjadi waktu yang optimal untuk proses pirolisis minyak kelapa sawit dibandingkan tanpa pra-perlakuan pemanasan.
5. Analisis BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan pra-perlakuan pemanasan selama 30 menit menghasilkan kandungan hidrokarbon sebesar 79,27% dengan asam sebanyak 18,70%, keton 1,38% dan alkohol 0,66%.

5.2 Saran

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

1. Mempelajari lebih lanjut proses purifikasi bentonit sebagai bahan baku sintesis zeolit-P dapat dilakukan menggunakan reagen lain yang lebih efektif untuk menurunkan komponen lainnya sehingga kemurnian bentonit dapat ditingkatkan.
2. Mengkaji lebih dalam proses modifikasi bentonit menjadi zeolit-P dan menggunakan variasi rasio lainnya pada rentang 2-5 agar mendapatkan komposisi terbaik dalam pembentukan zeolit-P.
3. Melakukan proses *upgrading* produk pirolisis dengan pemurnian lebih lanjut yang bertujuan untuk menghilangkan kandungan senyawa asam yang tinggi yang terdapat dalam BCO, sehingga mendapatkan produk dengan kemurnian yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelrahman, E. A., El-Reash, Y. G. A., Youssef, H. M., Kotp, Y. H., and Hegazey, R. M. 2021. Utilization of Rice Husk and Waste Aluminum Cans for the Synthesis of Some Nanosized Zeolite, Zeolite/Zeolite, and Geopolymer/Zeolite Products for the Efficient Removal of Co(II), Cu(II), and Zn(II) Ions from Aqueous Media. *Journal of Hazardous Materials*. 40(123813): 1-20.
- Abdullah, A. and Mohammed, A. 2019. Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review. *Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics* 14: 77-85.
- Abukhadra, M. R., Ali, S.M., Nasr, E. A., Mahmoud. H. A. A., and Awwad, E. M. 2020. Effective Sequestration of Phosphate and Ammonium Ions by the Bentonite/Zeolite Na-P Composite as a Simple Technique to Control the Eutrophication Phenomenon: Realistic Studies. *ACS Omega*. 5: 14656-14668.
- Adelawon, B. O., Latinwo, G. K., Eboibi, B. E., Agbede, O. O., and Agarry, S. E. 2022. Comparison of the Slow, Fast, and Flash Pyrolysis of Recycled Maize-Cob Biomass Waste, Box-Benhken Process Optimization and Characterization Studies for the Thermal Fast Pyrolysis Production of Bio-Energy. *Chemical Engineering Communications*. 209(9): 1246-76.
- Afriliana, A. N., Salasiah, S. dan Sanjaya, A. S. 2021. Pembuatan *Bio Oil* dari Cangkang Kelapa Sawit dengan Metode Pirolisis. *Jurnal Chemurgy*. 5(2): 53-60.
- Alderton, D. 2020. X-Ray Diffraction (XRD). *Encyclopedia of Geology: Second Edition*. 1: 520-31.
- Anwar, R. N., Sunarto, W., dan Kusumastuti, E. 2016. Pemanfaatan Bentonit Teraktivasi Asam Klorida Untuk Pengolahan Minyak Goreng Bekas. *Indonesian Journal Of Chemical Science*. 5(3): 1-6.
- Aprilia, E. 2020. Pemupukan pada Tanaman Kelapa Sawit (*Elaies Guinessis Jacq*) di PT. Bumi Palma Lestari, Bagan Jaya Kecamatan Enok Kabupaten

- Indragiri Hilir Riau. *Jurnal Agro Indragiri*. 6(2): 48-51.
- Arsita, S. A., Saputro, G. W., dan Susanto, S. 2021. Perkembangan Kebijakan Energi Nasional dan Energi Baru Terbarukan Indonesia. *Jurnal Syntax Transformation*. 2(12): 1779-1788.
- Atikah. 2018. Efektifitas Bentonit Sebagai Adsorben pada Proses Peningkatan Kadar Bioetanol. *Jurnal Distilasi*. 2(2): 23-32.
- Aziz, A., Rahmi, and Marlinda, L. 2025. The Effect of Crystallization and Aging Time in Zeolite Synthesis Using Coal Fly. *Jurnal Teknologi*. 87(3): 497-505.
- Aziz, I, Saridewi, N., Febriyani, F., dan Adhani, L. 2023. Deoksigenasi Katalitik Metil Ester Asam Lemak Menjadi Biohidrokarbon Menggunakan Katalis $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Zeolit}$. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*. 19(2): 170-176.
- Berhe, M. T., Berhe, G. G., Cheru, M. S., and Weldehans, M. G., 2024. Characterization of Acid Activation of Bentonite Clay of Hada, Afar, Ethiopia. *Advances in Materials Science and Engineering*. 6413786:1-8.
- Chen, G., Liang, L., Li, M., Lu, X., Yan, B., and Cheng, Z. 2021. Upgrading of Bio-Oil Model Compounds and Bio-Crude into Biofuel by Electrocatalysis: A Review. *ChemSusChem*. 14(4): 1037-1052.
- Dada, T. K., Sheehan, M., Murugavelh, S., and Antunes, E. 2023. A Review on Catalytic Pyrolysis for High-Quality Bio-Oil Production from Biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 13(4): 2595-2614.
- De Lima, R. C..F., Oliveira, D. D. S. O., and Pergher, S. B. C. 2021. Interzeolitic Transformation of Clinoptilolite into GIS and Lta Zeolite. *Minerals*. 11(12).
- Derbe, T., Temesgen, S., and Bitew, M. 2021. A Short Review on Synthesis, Characterization, and Applications of Zeolites. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021(1): 1-17.
- Deviani, S. S., Mahatmanti, F. W., dan Widiarti, N. 2018. Sintesis dan Karakterisasi Zeolit dari Abu Sekam Padi Menggunakan Metode Hidrotermal. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 7(1): 86–93.
- Dhyani, V., and Bhaskar, T. 2019. *Pyrolysis of Biomass. In Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*. Academic Press. Oxford.
- Donais, M. K., and George, D. B. 2018. *X-Ray Fluorescence Spectrometry and Its Applications to Archaeology*. Momentum Press. New York.
- Dongoran, J., Sulistiawati, P., Simangunsong, S. Y., Paksi, P. G. R., dan Pasaribu, M. H. 2021. Perkembangan Zeolit Sebagai Katalis Alam Potensial. *Jurnal*

Jejaring Matematika dan Sains. 3(2): 28-39.

Du, Y., Shi, S., dan Dai, H. 2011. Water-Bathing Synthesis of High-Surface-Area Zeolite-P from Diatomite. *Particuology*. 9(2): 174-78.

Eiad-Ua, A., Amnaphiang, P., Asawaworarit, P., Houngkamhang, N., Chollacoop, N., and Fuji, M. 2018. Zeolite P from Kaolin via Hydrothermal Method. *AIP Conference Proceedings*. 020021 (2018).

Evahelda, Astuti, R. P., Aini, S. N., dan Nurhadini. 2023. Pemanfaatan Limbah Tempurung Kelapa Untuk Pembuatan Asap Cair Menggunakan Metode Pirolisis. *AGROMIX*. 14(2): 175-181.

Eviva, N., Shofiyani, A., and Sayekti, E. 2023. Synthesis of NaP Zeolite Based on Bauxite Red Mud Using Hydrothermal Method on Mole Ratio of SiO₂/Al₂O₃ Variations. *Positron*. 13(1): 77-85.

Febriana, I., Ramadhini, T. K., dan Aulia, T. 2020. Pengaruh Temperatur dan Waktu Reaksi Minyak Jelantah Dengan Zeolit Alam pada Produksi Biofuel. *Journal of Physics: Conference Series*. 1751:1-9.

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 Jurnal Kinetika*. 11(03): 53-59.

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): 1-16.

Flores, C.G., Schneider, H., Dornelles, J.S., Gomes, L.B., Marcilio, N.R., and Melo, P.J. 2021. Synthesis of Potassium Zeolite from Rice Husk Ash as a Silicon Source. *Cleaner Engineering and Technology*. 4:100201.

Gandhi, D., Bandyopadhyay, R., and Soni, B. 2022. Naturally Occurring Bentonite Clay: Structural Augmentation, Characterization and Application as Catalyst. *Materials Today: Proceedings*. 57: 194-201.

Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W., Scott, J. H. J., and Joy, D. C.. 2018. *Microscopy and X-Ray Microanalysis Fourth Edition*. Springer Nature. New York.

Hai, L and Wang, J. 2024. Experimental Study on the Heat Treatment Reaction Process of Bentonite. *Scientific Reports*. 14(1): 1-10.

Husain, F., dan Marzuki, I. 2021. Pengaruh Temperatur Penyimpanan Terhadap Mutu dan Kualitas Minyak Goreng Kelapa Sawit. *Jurnal Serambi*

Engineering. 6(4): 2270-2278.

- Jayana, R., Fadlilah, I., dan Prasadi, O. 2024. Karakteristik Sintesis Zeolit dari Pemanfaatan Limbah Daun Nipah dan Alumunium Foil Bekas. *Metana*. 20(1): 1–13.
- Kaniapan, S., Hassan, S., Ya, H., Nesan, K. P., and Azeem, M. 2021. The Utilisation of Palm Oil and Oil Palm Residues and the Related Challenges as a Sustainable Alternative in Biofuel, Bioenergy, and Transportation Sector: A Review. *Sustainability*. 13(3110): 1-25.
- Khaleque, A., Alam, M. M., Hoque, M., Mondal, S., Haider, J. Bentuo, X., Johir, M.A.H., Karmakar, A.K., and Zhoud, J.L. 2020. Zeolite Synthesis from Low-Cost Materials and Environmental Applications : A Review. *Environmental Advances*. 8(2): 1-15.
- Kolo, M. M., Batu, M. S., Bani, M. R., Nana, G. Y., dan Kedang, Y. I. 2024. Kapasitas Adsorpsi Lempung Alam Teraktivasi HCl Dalam Mengadsorpsi Logam Berat (Pb) Penyebab Pencemaran Lingkungan. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 22(4): 981-86.
- Kuppusamy, S., Maddela, N. R., Megharaj, M., and Venkateswarlu, K. 2019. *Total Petroleum Hydrocarbons: Environmental Fate, Toxicity, and Remediation*. Springer Nature Switzerland AG. Switzerland.
- Kusniawati, E., Anggraini, I. F., dan Saputra, R. 2021. Analisis Karakteristik Katalis Pertamina Untuk Proses Hydrotreating Kerosin Menjadi Avtur. *Jurnal Teknik Patra Akademika*. 12(01): 4-12.
- Latosińska, J. 2019. Synthesis of Zeolite P from Sewage Sludge Ash. *E3S Web of Conferences*. 108:1-8.
- Liu, W., Aldahri, T., Xu, C., Li, C., and Rohani, S. 2021. Synthesis of Sole Gismondine-Type Zeolite from Blast Furnace Slag during CO₂ Mineralization Process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9(1): 1-33.
- 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. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 27(2): 341-48.
- Lo, B. T. W., Ye, L., and Tsang, S. C. E. 2018. The Contribution of Synchrotron X-Ray Powder Diffraction to Modern Zeolite Applications: A Mini-Review and Prospects. *Chem*. 4(8): 1778–1808.
- Ma, W., Yi, Y., Fang, M., Li, C., Li, J., and Liu, W. 2023. Study on the Synthesis Mechanism of Sodalite, Gismondine, and Zeolite-P1 Zeolite Materials from

- Ladle Furnace Slag and Fly Ash. *Scientific Reports*. 13(1): 1-12.
- Mahdi, K. A., Yusnimar, dan Helianty, S. 2016. Transesterifikasi Biodiesel dari CPO FFA Tinggi dengan Katalis ZnO Komersial (Pengaruh Variasi Jumlah Katalis dan Rasio Mol Minyak : Metanol). *Jom FTEKNIK*. 3(1): 1-11.
- Mardawati, E., Hidayat, M. S., Rahmah, D. M., and Rosalinda, S. 2019. Produksi Biodiesel dari Minyak Kelapa Sawit Kasar *Off Grade* dengan Variasi Pengaruh Asam Sulfat pada Proses Esterifikasi Terhadap Mutu Biodiesel yang Dihasilkan. *Jurnal Industri Pertanian*. 01(03): 46-60.
- Marliyati, S. A., Rimbawan, dan Harianti, R. 2021. Karakteristik Fisikokimia dan Fungsional Minyak Sawit Merah. *JGMI: The Journal of Indonesian Community Nutrition*. 10(1): 83-94.
- McNair, Harold M., and James M. Miller. 2009. *Basic Gas Chromatography Second Edition*. Wiley. New Jersey.
- Miao, J., Zhang, Y., Yue, L., Ran, X., Cheng, M., and Jing, Z. 2022. Hydrothermal Conversion of Model Polluted Soil into Zeolite P to In-Situ Immobilize Heavy Metals via Zeolitization and Its Microstructure Behavior. *Materials Research Express*. 9(11): 1-15.
- Mudrinić, T., Mojovic, Z., Milutinovic-Nikolic, A., Majovic, M., Zunic, M., Vukelic, N., and Jovanovic, D. 2015. Electrochemical Activity of Iron in Acid Treated Bentonite and Influence of Added Nickel. *Applied Surface Science*. 353: 1037-1045.
- Mulyati, T. A., Pujiono, F. E., dan Lukis, P. A. 2015. Pengaruh Lama Pemanasan Terhadap Kualitas Minyak Goreng Kemasan Kelapa Sawit. *Jurnal Wiyata*. 2(2): 162–168.
- Muslimah, Wahyuningsih, P., and Yusnawati. 2023. Effectiveness of Hydrochloric Acid Activated Bentonite in Local Salt Purification. *Elkawanie*. 9(1): 71-80.
- Nabil, B. and Malek, O. H. 2021. Characterization and Purification of Algerian Natural Bentonite for Pharmaceutical and Cosmetic Applications. *BMC Chemistry*. 15(1): 1-11.
- Naswir, M., Arita, S., Hartati, W., Septiarini, L., Desfaournatalia, D., & Wibowo, Y. G. 2019. Activated Bentonite: Low Cost Adsorbent to Reduce and Phosphor in Waste Palm Oil. *International Journal of Chemistry*. 11(2): 67-76.
- Novita, L., Asih, E. R., dan Arsil, Y. 2021. Efektivitas Abu Cangkang Sawit Dalam Meningkatkan Kualitas Minyak Goreng Curah dan Minyak Goreng

- Kemasan. *Jurnal Kimia Riset*. 6(2): 132-140.
- Nugraha, M. S., Mahatmanti, F. W., dan Sulistyaningsih, T. 2017. Pemanfaatan Bentonit Teraktivasi HCl Sebagai Adsorben Ion Logam Cd (II). *Indonesian Journal of Chemical Science*. 6(3): 2-7.
- Nurfiqih, D., Hakim, L., dan Muhammad, M. 2021. Pengaruh Suhu, Persentase Air, dan Lama Penyimpanan Terhadap Persentase Kenaikan Asam Lemak Bebas (ALB) pada *Crude Palm Oil* (CPO). *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*. 10(2): 1-14.
- 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.
- Oyeleke, O. O., Ohunakin, O. S., and Adelekan, D. S. 2021. Catalytic Pyrolysis in Waste to Energy Recovery Applications: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1107(1): 1-16.
- Pahrudin, G., Fadillah, S., dan Mutmainah, N. F. 2022. Analisis Permintaan dan Penyediaan Energi Fosil dari Berbagai Subsektor di Indonesia pada Masa Mendatang. *Journal of Engineering Environmental Energy and Science*. 1(1): 29-38.
- Pandiangan, K. D., Arief, S., Jamarun, N., and Simanjuntak, W. 2017. Synthesis of Zeolite-X from Rice Husk Silica and Aluminum Metal as a Catalyst for Transesterification of Palm Oil. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 8(5): 1797-1802.
- Pandiangan, K. D., Gom, F. G., Fajriyati, N., Sabil, M., Tasyadinia, Luthfia, H., Faranida, Q. H., Ilim, and Simanjuntak, W. 2024. Pyrolysis of Palm Oil Mill Effluent (POME) Using Modified Lampung Natural Zeolite With The Si/Al Ratio of 1 as Catalyst. *Analytical: Analytical and Environmental Chemistry*. 9(2): 25-44.
- Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Hadi, S., Ilim, I., Alista, D. I., and Sinaga, D. A. 2023. Study on the Reaction Parameters on Transesterification of Rubber Seed Oil Using MgO/Zeolite-A Catalyst. *Trends in Sciences*. 20(8): 35-44.
- Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Pratiwi, E., and Rilyanti, M. 2019. Characteristics and Catalytic Activity of Zeolite-a Synthesized from Rice Husk Silica and Aluminium Metal by Sol-Gel Method. *Journal of Physics: Conference Series*. 1338(1): 1-12.
- Parinduri, L., dan Parinduri, T. 2020. Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Journal of Electrical Technology*. 5(2): 88-92.

- Patra, B. R., Nanda, S., Dalai, A. K., and Meda, V. 2021. Slow Pyrolysis of Agro-Food Wastes and Physicochemical Characterization of Biofuel Products. *Chemosphere*. 285(131431): 1-10.
- Pitoyo, J., Eka, T., and Jamilatun, S. 2022. Bio-Oil from Oil Palm Shell Pyrolysis as Renewable Energy: A Review. *CHEMICA: Jurnal Teknik Kimia*. 9(2): 67-69.
- Pratama, A. S. C., dan Sa'diyah, K. 2023. Pengaruh Jenis Biomassa Terhadap Karakteristik Asap Cair Melalui Metode Pirolisis. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*. 8(1): 36-44.
- 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.
- Putra, D. R., Yoesgiantoro, D., dan Thamrin, S. 2020. Kebijakan Ketahanan Energi Berbasis Energi Listrik pada Bidang Transportasi Guna Mendukung Pertahanan Negara di Indonesia: Sebuah Kerangka Konseptual. *Nusantara: Jurnal Ilmu Pengetahuan Sosial*. 7(3): 658-672.
- Qiao, Y., Wang, B., Zong, P., Tian, Y., Xu, F., Li, D., and Tian, Y. 2019. Thermal Behavior, Kinetics and Fast Pyrolysis Characteristics of Palm Oil: Analytical TG-FTIR and Py-GC/MS Study. *Energy Conversion and Management*. 199(111964): 1-10 .
- Quintero-Jaramillo, J. A., Carrero, J. I., and Sanabria-González, N. R. 2024. Caffeine Adsorption on a Thermally Modified Bentonite: Adsorbent Characterization, Experimental Design, Equilibrium and Kinetics. *Colloids and Interfaces*. 8(2): 1-19.
- Rahman, M. U., 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.
- Ridhuan, K., Irawan, D., dan Inthifawzi, R. 2019. Proses Pembakaran Pirolisis Dengan Jenis Biomassa dan Karakteristik Asap Cair yang Dihasilkan. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*. 8(1): 69-78.
- Rodrigues, M., Souza, A. G., and Santos, I. M. G. 2016. Brazilian Kaolin Wastes: Synthesis of Zeolite P at Low-Temperature. *American Chemical Science Journal*. 12(4): 1-11.
- 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.
- Setyono, J. S., Mardiansjah, F. H., dan Astuti, M. F. K 2019. Potensi

Pengembangan Energi Baru dan Energi Terbarukan di Kota Semarang.
Jurnal Riptek. 13(2): 177-86.

Shin, S. and Kim, M. J. 2024. Hydrothermal Synthesis of Zeolites from Residual Waste Generated via Indirect Carbonation of Coal Fly Ash. *Sustainable Environment Research*. 34(1): 1-8.

Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Febriyanti, T. D., Islami, A. P., Hadi, S., and Ilim. 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.

Simanjuntak, A., Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., and Sembiring, Z. 2019. The Effect of Sugarcane Bagasse to Rubber Seed Oil Ratios on the Chemical Composition of Liquid Fuels Produced by Zeolite-y Catalyzed Pyrolysis. *Journal of Physics: Conference Series*. 1338(1): 1-8.

Simanjuntak, W., Sembiring, S., Pandiangan, K. D., dan Sembiring, Z. 2019. *Zeolit Sintetik Berbasis Silika Sekam Padi*. Graha Ilmu. Yogyakarta.

Siregar, Y. D. I., Riyadhhi, A., Damayanti, W. A., Rizkiansyah, R., and Murditya, M. B 2023. Production of Bio Hydrocarbons from Vegetable Oils and Animal Fats Using Magnesium Oxide as Catalyst. *Jurnal Kimia Valens.i* 9(2): 195-205.

Solikhah, M. D., Prismantoko, A., Prawitasari, A., Barus, B. R., dan Kismanto, A. 2022. Perancangan Reaktor Untuk Produksi Biodiesel Generasi 2 dari Biomasa Sawit. *Jurnal.Umj*.14(2): 197-212.

Sriatun, Putri, M. C. A., Urbach, H. Z., Widayat, A. D., and Susanto, H. 2022. Silica-rich Sodalite Synthesis: The Effect of Variations in Ultrasound Treatment and Hydrothermal Temperature. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 25(4): 137-145.

Sriatun, S., Susanto, H., Widayat, W., Darmawan, A., Sriyanti, S., Kurniasari, R., and Kurniawati, R. 2020. Synthesis of Silica-Rich Zeolite Using Quaternary Ammonium-Based Templates. *Journal of Physics: Conference Series*. 1524(1): 1-11.

Srilai, S., Tanwongwan, W., Onpecth, K., Wongkitikun, T., Panpiemrasda, K., Panomsuwan, G., and Eiad-Ua, A 2020. Synthesis of Zeolite A from Bentonite via Hydrothermal Method: The Case of Different Base Solution. *AIP Conference Proceedings*. 2279: 1-7.

- Suhendi, E., Heriyanto, H., Anam, M. K., Aulia, A., Putri, R. A., and Wardalia, W. 2024. The Effect of HCl Concentration on The Activation of Bentonite as A Catalyst in The Pyrolysis Process of Polypropylene (PP) Plastic Waste at The Integrated Waste Management Facility of Asari Cilegon. *World Chemical Engineering Journal*. 8(1): 19-25.
- Sulasminingsih, Sri, F. H., Sari, K., dan Yuninda, S. 2023. Penggunaan Biomassa Sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik Wilayah Pedesaan. *Journal of Optimization System and Ergonomy Implementation (JOSEON)*. 1(1): 42-51.
- Sulejmanovic, D., Keiser, J. R., Su, Y. F., Kass, M. D., Ferrel, J. R. Olarte, M. V., Wade, J. E., and Jun, J. 2022. Effect of Carboxylic Acids on Corrosion of Type 410 Stainless Steel in Pyrolysis Bio-Oil. *Sustainability (Switzerland)*. 14(18):1-11.
- Taufik, M. dan Seftiono, H. 2018. Karakteristik Fisik dan Kimia Minyak Goreng Sawit Hasil Proses Penggorengan dengan Metode Deep-Fat Frying. *Jurnal Teknologi*. 10(2): 123-130.
- Vajglová, Z., Kumar, N., Peurla, M., Peltonen, J., Heinmaa, I., and Murzin, D. Y. 2018. Synthesis and Physicochemical Characterization of Beta Zeolite-Bentonite Composite Materials for Shaped Catalysts. *Catalysis Science and Technology*. 8(23): 6150-62.
- Wang, Y., Zhang, Y., Yoshikawa, K., Li, H., and Liu, Z. 2021. Effect of Biomass Origins and Composition on Stability of Hydrothermal Biocrude Oil. *Fuel* 302(121138): 1-10.
- Wardhani, W. K., dan Titah, H. S. 2021. Studi Literatur Alternatif Penanganan Tumpahan Minyak Mentah Menggunakan Bacillus Subtilis dan Pseudomonas Putida (Studi Kasus: Tumpahan Minyak Mentah Sumur YYA-1). *Jurnal Teknik ITS*. 9(2): 97-102.
- Xiu, S., and Shahbazi, A. 2012. Bio-Oil Production and Upgrading Research: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16(7): 4406-4414.