

**MODIFIKASI BENTONIT MENJADI ZEOLIT-Y DAN UJI APLIKASINYA
SEBAGAI KATALIS PADA PROSES PIROLISIS MINYAK KELAPA
SAWIT MENJADI *BIO CRUDE OIL* (BCO)**

(Skripsi)

Oleh

**NURUL NATASHA BERLIANI
NPM 2117011096**



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

**MODIFIKASI BENTONIT MENJADI ZEOLIT-Y DAN UJI APLIKASINYA
SEBAGAI KATALIS PADA PROSES PIROLISIS MINYAK KELAPA
SAWIT MENJADI *BIO CRUDE OIL* (BCO)**

Oleh

NURUL NATASHA BERLIANI

Skripsi

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

Pada

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



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

ABSTRAK

MODIFIKASI BENTONIT MENJADI ZEOLIT-Y DAN UJI APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS PADA PROSES PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI *BIO CRUDE OIL* (BCO)

Oleh

NURUL NATASHA BERLIANI

Minyak kelapa sawit merupakan salah satu sumber biomassa terbarukan yang berpotensi menghasilkan hidrokarbon melalui metode pirolisis. Kualitas hidrokarbon dalam *bio crude oil* (BCO) sangat dipengaruhi oleh jenis katalis yang digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk memodifikasi bentonit menjadi zeolit-Y melalui metode hidrotermal dan mengkaji efektivitasnya sebagai katalis dalam proses pirolisis minyak kelapa sawit dengan variasi waktu pra-perlakuan pemanasan (0, 10, 20, 30, dan 40 menit).

Penelitian ini dilaksanakan pada Oktober 2024–Maret 2025 di Laboratorium Kimia Anorganik–Fisik FMIPA Universitas Lampung. Tahapan penelitian meliputi; (1) purifikasi bentonit menggunakan HCl 1M dan karakterisasinya, (2) sintesis zeolit-Y secara hidrotermal menggunakan bentonit hasil purifikasi dan aluminium foil *food grade* dengan variasi waktu kristalisasi 72, 96, dan 120 jam, (3) karakterisasi zeolit-Y menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM), (4) aplikasi zeolit-Y sebagai katalis dalam proses pirolisis minyak kelapa sawit, dan (5) analisis produk BCO menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa bentonit berhasil di purifikasi dengan HCl 1M. Karakterisasi XRD menunjukkan bahwa kristalisasi zeolit-Y terbaik diperoleh pada waktu 96 jam, meskipun fasa kristalnya belum murni zeolit-Y. Mikrograf SEM memperlihatkan bahwa kristal kubik oktahedral khas zeolit-Y mulai terbentuk, namun masih didominasi oleh fasa sodalit dan amorf. Hasil analisis GC-MS terhadap BCO menunjukkan bahwa pra-perlakuan pemanasan selama 30 menit menghasilkan kandungan hidrokarbon tertinggi sebesar 64,87%.

Kata kunci: bentonit, zeolit-Y, minyak kelapa sawit, pirolisis, BCO.

ABSTRACT

MODIFICATION OF BENTONITE INTO ZEOLITE-Y AND ITS APPLICATION TEST AS CATALYST IN THE PYROLYSIS PROCESS OF PALM OIL INTO BIO CRUDE OIL (BCO)

By

NURUL NATASHA BERLIANI

Palm oil is one of the renewable biomass sources that has the potential to produce hydrocarbons through pyrolysis method. The quality of hydrocarbons in bio crude oil (BCO) is strongly influenced by the type of catalyst used. This study aims to modify bentonite into zeolite-Y through hydrothermal method and assess its effectiveness as a catalyst in the pyrolysis process of palm oil with variation of heating pre-treatment time (0, 10, 20, 30, and 40 minutes). This research was conducted in October 2024-March 2025 at the Laboratory of Inorganic-Physical Chemistry FMIPA, University of Lampung. The research stages included; (1) bentonite purification using 1M HCl and its characterization, (2) hydrothermal synthesis of zeolite-Y using purified bentonite and food grade aluminium foil with crystallization time variation of 72, 96, and 120 hours, (3) characterization of zeolite-Y using X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscope (SEM), (4) application of zeolite-Y as catalyst in palm oil pyrolysis process, and (5) analysis of BCO products using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). The results showed that bentonite was successfully purified with 1M HCl. XRD characterization showed that the best zeolite-Y crystallization was obtained at 96 hours, although the crystal phase was not pure zeolite-Y. SEM micrographs showed that cubic octahedral crystals typical of zeolite-Y began to form, but were still dominated by sodalite and amorphous phases. GC-MS analysis of the BCO showed that the 30-minute heating pre-treatment resulted in the highest hydrocarbon content of 64.87%.

Keywords: bentonite, zeolite-Y, palm oil, pyrolysis, BCO.

Judul Penelitian

: **MODIFIKASI BENTONIT MENJADI
ZEOLIT-Y DAN UJI APLIKASINYA
SEBAGAI KATALIS PADA PROSES
PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT
MENJADI *BIO CRUDE OIL* (BCO)**

Nama Mahasiswa

: **Nurul Natasha Berliani**

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2117011096

Program Studi

: Kimia

Fakultas

: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



1. Komisi Pembimbing

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

Prof. Dr. Dra. Ilim, M.S.
NIP. 196505251990032002

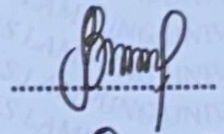
2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung

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

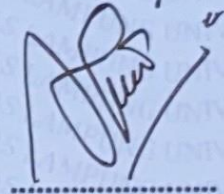
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

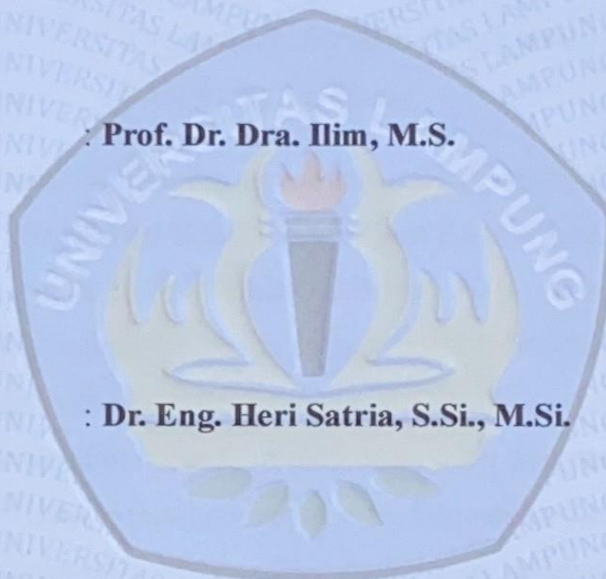
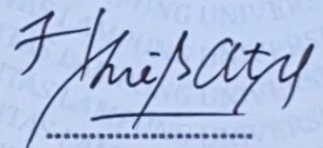
Ketua : Prof. Dr. Kamisah D. Pandiangan, S.Si., M.Si.



Sekretaris : Prof. Dr. Dra. Ilim, M.S.



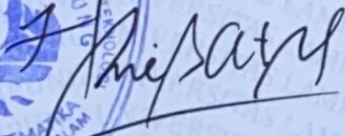
Anggota : Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 25 Juni 2025

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nurul Natasha Berliani
NPM : 2117011096
Jurusan : S1 Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya dan sesungguhnya, bahwa skripsi saya yang berjudul “**Modifikasi Bentonit Menjadi Zeolit-Y dan Uji Aplikasinya sebagai Katalis pada Proses Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Menjadi *Bio Crude Oil (BCO)***” adalah benar karya saya sendiri, baik gagasan, hasil, dan analisisnya. Selanjutnya saya juga tidak keberatan jika sebagian atau seluruh data di dalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi, sepanjang nama saya disebutkan dan terdapat kesepakatan sebelum dilakukan publikasi. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sadar dan sebenarnya untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 26 Juni 2025
Yang Menyatakan



Nurul Natasha Berliani
NPM 2117011096

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Nurul Natasha Berliani, lahir di Tangerang pada tanggal 29 Desember 2001 merupakan anak ke pertama dari dua bersaudara. Penulis lahir dari pasangan suami istri Bapak Tobari Eska Koswara dan Ibu Rini Sumarni. Penulis menyelesaikan pendidikan kanak-kanak di TK Islam Kenanga tahun 2007 dan dilanjutkan pendidikan dasar di SDN Cikupa II hingga tahun 2014. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Cikupa hingga lulus pada tahun 2017. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SMKN 1 Kabupaten Tangerang dan lulus tahun 2020. Pada tahun 2021, penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama masa perkuliahan, selain aktif di bidang akademik, penulis juga terlibat dalam berbagai kegiatan organisasi. Penulis pernah bergabung dalam Himpunan Mahasiswa Kimia (Himaki) FMIPA Unila, dimulai sebagai kader muda pada tahun 2021, kemudian menjadi anggota Biro Penerbitan (BP) pada tahun 2022, dan anggota Biro Usaha Mandiri (BUM) pada tahun 2023. Selama berorganisasi di Himaki, penulis berpartisipasi dalam berbagai kegiatan, baik sebagai peserta maupun panitia, salah satunya sebagai bendahara pelaksana dalam acara Pelatihan Jurnalistik Tingkat Dasar (PJTD) yang diselenggarakan oleh Himaki FMIPA Unila pada tahun 2022. Pada tahun yang sama, penulis juga berkesempatan menjadi *volunteer* yang dipercaya sebagai salah satu pemandu acara di depan mahasiswa baru FMIPA dan bertanggung jawab mendokumentasikan kegiatan dalam acara Karya Wisata Ilmiah (KWI) XXXIII yang diselenggarakan oleh Badan Eksekutif

Mahasiswa (BEM) FMIPA Unila. Pengalaman ini membentuk penulis menjadi pribadi yang memiliki kemampuan dalam manajemen waktu, kerja tim, dan komunikasi, yang sangat mendukung perjalanan akademik serta pengembangan diri. Pengalaman berharga lainnya yang penulis peroleh selama masa perkuliahan adalah kesempatan untuk menjadi salah satu mahasiswa yang lolos dan mengikuti Program Kompetisi Kampus Merdeka (PKKM) BKP Magang Industri di PT HAS Environmental pada tahun 2023. Selama enam bulan mengikuti program tersebut, penulis mendapatkan banyak ilmu praktis yang tidak diperoleh di bangku perkuliahan, serta dukungan dari rekan-rekan yang suportif. Pada tahun dan tempat yang sama, penulis juga menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan dengan judul “Pemantauan Kualitas Udara Ambien di PT X Menggunakan Sensor Berbiaya Rendah.”. Pengalaman ini tidak hanya memperluas wawasan penulis tentang dunia industri, tetapi juga melatih kemampuan adaptasi, komunikasi, dan tanggung jawab dalam lingkungan kerja profesional.

Pada tahun 2024, penulis diberi amanah untuk menjadi asisten praktikum mata kuliah Pengantar Kimia Analisis bagi mahasiswa Biologi Terapan angkatan 2024 dan Kimia Fisik I bagi mahasiswa Kimia angkatan 2023. Melalui kesempatan ini, penulis tidak hanya mengulas dan memperkuat kembali pemahaman materi yang telah dipelajari, tetapi juga mengembangkan *soft skill*, terutama dalam hal komunikasi dan *public speaking*, agar materi dapat disampaikan dengan baik, jelas, dan tepat sasaran kepada para mahasiswa.

MOTTO

*"Janganlah engkau bersedih,
sesungguhnya Allah bersama kita"
(QS. At-Taubah: 40)*

*" Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan."
(QS. Al-Insyirah: 6)*

*"Dan bahwasanya seorang manusia tiada memperoleh selain
apa yang telah diusahakannya"
(QS. An-Najm: 39)*

*"Working hard is important. But there is something that
matters even more: believing in yourself."
Harry Potter*

*"And it's fine to fake it until you make it.
Until you do, until it's true."
Taylor Swift*

*"Jika tak mampu bersinar seperti matahari, setidaknya
jangan padam seperti api kecil"
Tasha*

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

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

*Diri sendiri, Nurul Natasha Berliani yang sudah berjuang
keras untuk berproses hingga sejauh ini.*

*Kedua orang tuaku tercinta,
Ayahanda Tobari Eska Koswara dan Ibunda Rini Sumarni
yang tak pernah lelah menuntunku, mendukungku,
mendoakanku, dan mengusahakan segalanya untuk setiap
langkah kecil yang kupijak sejak diriku hadir hingga
menyelesaikan studi sarjana ini.*

*Adikku tersayang Alif Mahya Anandya yang selalu
menghiburku dan menyemangatkuku.*

*Pembimbing penelitianku, Ibu Prof. Dr. Kamisah Delilawati
Pandhangan, S.Si., M.Si., Ibu Prof. Dr. Dra. Ilim, M.S., dan
Bapak Dr. Eng. Heri Satria yang selalu sabar dalam
membimbingku.*

*Seluruh kerabat, sahabat, dan rekan Kimia 2021 yang selalu
berbagi kebahagiaan, serta*

*Almamaterku yang kubanggakan
Universitas Lampung.*

SANWACANA

Puji syukur penulis ucapkan atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, karunia dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Modifikasi Bentonit Menjadi Zeoli-Y dan Uji Aplikasinya sebagai Katalis pada Proses Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Menjadi *Bio Crude Oil* (BCO)”. *Sholawat* dan salam tak lupa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, suri teladan sepanjang masa, dari zaman kebodohan menuju ilmu pengetahuan.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung. Penulis menyadari bahwa dalam proses penyusunan skripsi ini tidak lepas dari rahmat dan *ridho* Allah SWT, serta bantuan, bimbingan, dukungan, saran dan kritik dari berbagai pihak. Maka pada kesempatan ini sebagai wujud rasa hormat, penulis mengucapkan rasa syukur dan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan FMIPA Unila.
2. Ibu Dr. Mita Rilyanti, M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Unila.
3. Ibu Prof. Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, S.Si., M.Si. selaku Pembimbing Pertama, yang telah dengan sabar membimbing, memberikan arahan, masukan, ilmu, waktu, dan segala kebaikannya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
4. Ibu Prof. Dr. Dra. Ilim, M.S. selaku Pembimbing Kedua, atas segala waktu, perhatian, bimbingan, dan motivasi yang sangat berarti dalam penyempurnaan isi dan penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Dr. Eng Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Pembahas/Penguji, yang telah memberikan kritik, saran, dan motivasi, untuk peningkatan kualitas penyusunan skripsi ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik.

6. Bapak Prof. Dr. Hardoko Insan Qudus, M.S. selaku Pembimbing Akademik, atas segala bantuan selama menjalani masa-masa perkuliahan hingga selesai.
7. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia FMIPA Unila, yang telah memberikan ilmu dan bimbingan selama perkuliahan.
8. Bapak Tobari Eska Koswara dan Ibu Rini Sumarni selaku orang tua, atas doa yang tiada henti, kasih sayang, dukungan moral maupun materi, dan semangat yang selalu diberikan selama proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini. Terima kasih untuk seluruh kepercayaan, kesabaran, dan pengorbanan yang luar biasa dari papah dan mamah. Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan dengan keberkahan, kesehatan, dan kebahagiaan yang tiada akhir. *Aamiin*.
9. Alif Mahya Anandya selaku adik, yang selalu menjadi penyemangat dan sumber keceriaan di tengah kesibukan karena kejahilan dan tingkah ajaibnya.
10. Ibu Siti Sulbah selaku nenek tercinta, atas kasih sayang, doa, dan segala dukungannya selama masa studi. Semoga kesehatan dan kebahagiaan selalu menyertainya. *Amiin*.
11. Om Ucok, Om Lan, Bi Iyah, Rori, Nana, dan Ari, yang telah merawat, mendukung, dan segala kebaikannya pada penulis selama masa perkuliahan.
12. *Bolby*: Ainun Fariyah, Fera Agistarika, Mayang Aprilian Suri, Nanda Putri Kusuma, Rachel Elisabeth Sihombing, dan Zuanita Maharani, selaku sahabat yang selalu hadir dan menemani penulis dalam setiap keluh kesah, tawa, tangis, semangat, dan lelah, selama proses perkuliahan, penelitian dan penyusunan skripsi ini, untuk saling membantu, mendukung, mendoakan, menghibur, memberikan masukan, dan motivasi yang tiada henti.
13. “Harry Potter” film fantasi terbaik sepanjang masa di hidup penulis, juga Taylor Swift, BTS, dan NCT Dream, yang telah menjadi teman pelarian terbaik, penghibur, penyemangat, dan motivasi penulis di sela-sela penatnya perkuliahan, penelitian, dan penulisan skripsi ini.
14. Teman-teman seperbimbingan penelitian, Adryan Daffa, Erwanda Lili, dan Hanna Lutfia, yang telah menjadi teman berdiskusi, berbagi ilmu, membantu, memberikan semangat dan masukan, serta saling mendukung selama proses penelitian dan penyusunan skripsi ini.

15. Teman-teman Laboratorium Polimer 2021, Adit, Azizah, Bella, Ayu, Desrita, Khairi, Tyas, dan Melisa, terima kasih atas segala bantuannya dalam menemani penulis selama melakukan penelitian dan penyusunan skripsi ini.
16. Para kakak tingkat, kak Aryani, kak Eky, kak Ulfa, kak Gom, kak Tasya, kak Nadia, dan kak Erik, yang senantiasa memberikan arahan dan pengalaman yang sangat membantu penulis dalam memahami proses penelitian dan penyusunan skripsi ini.
17. Seluruh teman-teman di Laboratorium Kimia Anorganik–Fisik FMIPA Universitas Lampung atas kerja sama dan bantuannya selama proses penelitian berlangsung.
18. Seluruh teman-teman Kimia Kelas A dan Kimia Angkatan 2021 atas kebersamaan, bantuan, dan semangat, yang senantiasa mengiringi selama masa perkuliahan.
19. Teman-teman *Rich Onty*; Alda, Bella, Rina, dan Siva atas kebersamaan, semangat, doa, dan dukungannya selama penulis jauh dari rumah dan menjalani proses perkuliahan ini.
20. Seluruh pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu yang telah mendukung dan memberikan bantuannya pada penulis.
21. *Last but not least, I wanna thank me, for believing in me, for doing all this hard work, for having no days off, for never quitting, for just being me at all times, until I can say: long story short, I survived.*

Semoga Allah SWT membalas segala amal kebaikan yang telah diberikan. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat, baik bagi penulis sendiri dan para pembacanya. Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis memohon maaf atas segala kekurangan dan berharap karya ini tetap dapat menjadi sumber informasi yang bermanfaat, khususnya bagi rekan-rekan mahasiswa Kimia.

Bandar Lampung, Juni 2025
Penulis,

Nurul Natasha Berliani

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR TABEL.....	xvii
--------------------------	-------------

DAFTAR GAMBAR	xix
----------------------------	------------

I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	4
1.3. Manfaat Penelitian.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Minyak Kelapa Sawit	6
2.2. Pirolisis Biomassa	7
2.3. <i>Bio Crude Oil</i> (BCO)	9
2.4. Katalis.....	11
2.5. Zeolit	12
2.5.1. Zeolit Alam.....	14
2.5.2. Zeolit Sintetis.....	15
2.5.3. Zeolit-Y	17
2.6. Bentonit	19
2.6.1. Pemanfaatan bentonit	20
2.6.2. Modifikasi bentonit	21
2.7. Karakterisasi Bentonit dan Zeolit-Y Hasil Modifikasi Bentonit.....	22
2.7.1. <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF)	23
2.7.2. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	24
2.7.3. <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	28
2.8. Analisis Biohidrokarbon dalam <i>Bio-Crude Oil</i> (BCO).....	30
III. METODE PENELITIAN	33
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	33
3.2. Alat dan Bahan	33
3.2.1. Alat-alat yang digunakan.....	33
3.2.2. Bahan-bahan yang digunakan.....	34
3.3. Prosedur Kerja.....	34
3.3.1. Karakterisasi bentonit	34
3.3.2. Purifikasi bentonit	36
3.3.3. Modifikasi bentonit menjadi zeolit-Y	36
3.3.4. Preparasi minyak kelapa sawit	37

3.3.5. Uji aktivitas katalitik zeolit-Y hasil modifikasi bentonit pada pirolisis minyak kelapa sawit	37
3.3.6. Analisis biohidrokarbon dalam <i>Bio Crude Oil (BCO)</i> hasil pirolisis	38
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1. Lingkup Penelitian	39
4.2. Purifikasi Bentonit.....	39
4.3. Modifikasi Bentonit Menjadi Zeolit-Y	45
4.4. Uji Aktivitas Katalitik Zeolit-Y Hasil Modifikasi Bentonit pada Pirolisis Minyak Kelapa Sawit	53
4.5. Analisis Biohidrokarbon dalam <i>Bio Crude Oil (BCO)</i> Hasil Pirolisis.....	55
V. SIMPULAN DAN SARAN	62
5.1. Simpulan.....	62
5.2. Saran.....	63
DAFTAR PUSTAKA.....	64
LAMPIRAN.....	72

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Parameter penentu dan presentase produk akhir dari masing-masing metode pirolisis.....	8
2. Jenis zeolit alam yang umum ditemukan	14
3. Jenis-jenis zeolit yang diketahui berhasil disintesis.....	16
4. Komposisi kimia bentonit mentah hasil analisis XRF	24
5. Berbagai penelitian yang telah dilakukan untuk menghasilkan BCO beserta komposisinya.	32
6. Data hasil analisis XRF bentonit alam.....	39
7. Data hasil analisis XRF bentonit hasil purifikasi.....	40
8. Perbandingan data XRD zeolit-Y hasil modifikasi pada berbagai waktu kristalisasi dengan standar IZA zeolit-Y.	47
9. Perbandingan data XRD sodalit hasil modifikasi pada berbagai waktu kristalisasi dengan standar IZA sodalit.	48
10. Perbandingan data XRD nephelin hasil modifikasi pada berbagai waktu kristalisasi dengan standar IZA nephelin.	49
11. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit tanpa pemanasan.	56
12. Komposisi relatif BCO dengan pra-perlakuan pemanasan yang berbeda pada minyak kelapa sawit.....	59
13. Nilai kristalinitas bentonit dan zeolit-Y hasil modifikasi pada variasi waktu kristalisasi.	78

14. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan pra-perlakuan pemanasan selama 10 menit.....	80
15. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan pra-perlakuan pemanasan selama 20 menit.....	81
16. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan pra-perlakuan pemanasan selama 30 menit.....	82
17. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan pra-perlakuan pemanasan selama 40 menit.....	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Komponen reaktor yang digunakan	9
2. Struktur tetrahedral zeolit	13
3. Skema pembentukan unit zeolit faujasit, sodalit, dan zeolit-A.....	17
4. Struktur faujasit zeolit-Y.....	18
5. Spektrum XRF dari campuran bentonit dan ampas tebu	24
6. Difraktogram XRD zeolit-Y	26
7. Difraktogram XRD (a) bentonit alam dan (b) bentonit hasil aktivasi asam ..	27
8. Difraktogram XRD standar IZA zeolit-Y dan zeolit-Y hasil sintesis (a) 24, (b) 48, (c) 72, (d) 96, dan (e) 120 jam	28
9. Mikrograf SEM (a) bentonit alam dan (b) bentonit hasil aktivasi HCl pada perbesaran 30.000×	29
10. Mikrograf SEM terhadap morfologi zeolit-Y pada perbesaran (a) 1.000× dan (b) 5.000×.....	30
11. Kromatogram GC BCO dari hasil pirolisis minyak kelapa sawit menggunakan zeolit-Y	31
12. Perbandingan difraktogram bentonit alam dan bentonit purifikasi.....	41
13. Hasil analisis difraktogram XRD dengan Match! 3.16 <i>Build</i> 288 bentonit (a) alam dan (b) purifikasi.	42
14. Mikrograf bentonit sebelum purifikasi pada perbesaran (a) 1.000× dan (b) 10.000×; dan bentonit setelah purifikasi pada perbesaran (c) 1.000×, dan (d) 10.000×	44
15. Perbedaan warna antara (a) bentonit alam dan (b) bentonit purifikasi.	45
16. Zeolit-Y hasil modifikasi bentonit purifikasi.....	46

17. Perbandingan difraktogram XRD standar IZA (a) sodalit, (b) nephelin, dan (c) zeolit-Y dengan zeolit-Y hasil modifikasi pada waktu kristalisasi (d) 72, (e) 96, dan (f) 120 jam.....	47
18. Hasil analisis difraktogram XRD zeolit-Y hasil modifikasi menggunakan perangkat lunak Match! 3.16 <i>Build</i> 288 pada waktu kristalisasi (a) 72, (b) 96, dan (c) 120 jam	50
19. Mikrograf (a) bentonit alam, (b) bentonit purifikasi, dan (c) zeolit-Y hasil modifikasi pada perbesaran 15.000×.	52
20. Rangkaian alat pirolisis yang digunakan.	53
21. BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan katalis zeolit-Y hasil modifikasi pada variasi pra-perlakuan minyak kelapa sawit	54
22. Kromatogram GC BCO minyak kelapa sawit tanpa pra-perlakuan pemanasan dengan katalis zeolit-Y.	55
23. Komposisi relatif BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit tanpa pra-perlakuan pemanasan	57
24. Kromatogram GC BCO dan komposisi relatif BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan pra-perlakuan pemanasan selama (a) 10, (b) 20, (c) 30, dan (d) 40 menit	58
25. Perbandingan komposisi relatif senyawa hidrokarbon dalam BCO yang dihasilkan berdasarkan variasi waktu pra-perlakuan	60
26. Data analisis dan spektrum XRF bentonit alam.....	74
27. Data analisis XRF bentonit purifikasi.....	75

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pasokan energi dunia saat ini masih didominasi oleh energi konvensional berbahan bakar fosil, seperti batu bara, gas alam, dan minyak bumi. Indonesia sebagai salah satu negara yang menggunakan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utamanya. Energi menjadi penggerak utama dari seluruh aktivitas masyarakat di berbagai bidang, seperti transportasi, industri, rumah tangga, serta aktivitas lainnya membutuhkan energi untuk menghasilkan kerja. Penggunaan energi fosil, khususnya minyak mentah, sebagai bahan bakar utama masih belum dapat digantikan. Kondisi ini menyebabkan cadangan minyak mentah ketersediaannya semakin terbatas. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) tahun 2023, total cadangan minyak bumi pada tahun 2023 mencapai 4,7 miliar barel, namun terbukti hanya sekitar 2,4 miliar barel yang merupakan cadangan, sedangkan sisanya merupakan cadangan potensial.

Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil menimbulkan kekhawatiran serius mengenai keberlanjutan pasokan energi dan dampaknya terhadap lingkungan, di sisi lain, naiknya harga minyak akibat menipisnya cadangan minyak mentah, telah menyebabkan pergeseran ke arah sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan dengan biaya operasional relatif rendah (Foroutan *et al.*, 2020). Perihal tersebut sesuai dengan Undang-undang Nomor 30 tahun 2007 tentang Energi, menegaskan bahwa penyediaan Energi Baru Terbarukan (EBT) perlu dikembangkan oleh pemerintah pusat dan pemerintah daerah sesuai dengan kewenangannya.

Penggunaan energi baru terbarukan untuk mengurangi dominasi energi fosil akan memberikan dampak signifikan terhadap berbagai aspek kehidupan, seperti kesejahteraan lingkungan, sosial, dan ekonomi (Yang *et al.*, 2021). Salah satu pengembangan energi baru terbarukan yang diharapkan dapat menggantikan penggunaan bahan bakar minyak fosil yaitu pengembangan minyak nabati untuk di proses menghasilkan biohidrokarbon.

Biohidrokarbon merupakan hidrokarbon yang diproduksi dari bahan baku biologis, seperti gula, mikroorganisme, dan minyak nabati menghasilkan biohidrokarbon sebagai pengganti bahan bakar hidrokarbon fosil (Rahman *et al.*, 2018 ; Ringsmuth *et al.*, 2016). Minyak nabati diketahui memiliki potensi besar untuk dijadikan sebagai bahan bakar terbarukan dengan mengubahnya menjadi biohidrokarbon, yang memiliki karakteristik serupa dengan bahan bakar fosil (Neonufa *et al.*, 2020). Pada penelitian ini minyak kelapa sawit dipilih sebagai bahan baku minyak nabati karena produksinya di Indonesia relatif tinggi, hingga mencapai 46,99 juta ton di tahun 2023 (Kementerian Pertanian, 2024).

Salah satu metode yang memungkinkan untuk mengubah minyak kelapa sawit menjadi biohidrokarbon adalah pirolisis, di mana reaktan diproses lebih lanjut menghasilkan produk akhir berupa gas volatil, cairan *bio-oil*, dan padatan *biochar* dengan pemanasan pada suhu 300-600°C tanpa atau dengan sedikit oksigen (Simanjuntak *et al.*, 2024 ; Rezapoor and Rahimpour, 2024). Pirolisis telah muncul sebagai metode yang paling hemat biaya, terukur, dan paling sederhana yang dapat mengubah biomassa menjadi energi dengan produk samping yang juga bermanfaat (Al-Rumaihi *et al.*, 2022). *Bio-oil* atau *Bio Crude Oil* (BCO) yang dihasilkan mengandung kompleks aromatik dan hidrokarbon yang tinggi, serta sejumlah senyawa organik teroksigenasi seperti aldehid, keton, alkohol, dan asam karboksilat (Beims *et al.*, 2020). Dalam berbagai penelitian, optimasi BCO pada hasil pirolisis terus dilakukan untuk meningkatkan kinerja bahan bakar minyak yang dihasilkan, seperti penambahan katalis dan pra-pengolahan bahan baku (Machado *et al.*, 2022 ; Simanjuntak *et al.*, 2019). Penambahan katalis dibuktikan dapat meningkatkan laju reaksi serta selektivitas produk akhir yang diharapkan.

Telah diketahui saat ini, katalis yang umum digunakan untuk meningkatkan kualitas hidrokarbon dalam produksi BCO dengan pirolisis yaitu zeolit.

Zeolit diketahui sebagai salah satu jenis katalis sintetis yang banyak digunakan secara komersial dengan komposisi Si/Al yang terkontrol dan kemampuan deoksigenasi melalui mekanisme dekarbonilasi, dekarboksilasi, dan dehidrogenasi menghasilkan BCO dengan karakteristik seperti bahan bakar fosil (Simanjuntak *et al.*, 2019 ; Mishra *et al.*, 2022). Dibandingkan dengan zeolit alam, zeolit sintetis lebih sering digunakan secara komersial karena memiliki kemampuan pertukaran ion yang lebih baik, keseragaman morfologi pori, dan kemurnian yang tinggi (Khaleque *et al.*, 2020). Zeolit sintetis dapat diproduksi dengan berbagai teknik, seperti hidrotermal (Simanjuntak *et al.*, 2019), fusi alkali (Koshlak, 2023), sol-gel (Pandiangan *et al.*, 2019), pencucian alkali (Tang *et al.*, 2024), ionotermal (Han *et al.*, 2021), dan metode gelombang mikro (Ginting *et al.*, 2024). Jenis zeolit yang umum digunakan dalam penelitian sebagai katalis adalah zeolit sintetis seperti zeolit-A (Pandiangan *et al.*, 2019), zeolit-X (Pandiangan *et al.*, 2017), zeolit-Y (Pangesti *et al.*, 2021), zeolit-P (Eiad-ua *et al.*, 2018), zeolit ZSM-5 (Krisnandi *et al.*, 2018), zeolit- β (Chen *et al.*, 2022), dan HZSM-5 (Zhang *et al.*, 2023).

Pada penelitian ini zeolit-Y dipilih sebagai hasil modifikasi dari lempung bentonit. Zeolit-Y memiliki rumus umum $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4,8\text{SiO}_2 \cdot 8,9\text{H}_2\text{O}$ dengan struktur kerangka faujasit (Andarini *et al.*, 2022). Adanya berbagai mineral non-lempung seperti oksida logam dapat mempengaruhi kualitas bentonit, sehingga untuk meningkatkan kinerjanya pemurnian perlu dilakukan sebelum bentonit dimodifikasi menjadi zeolit-Y. Aktivasi atau pemurnian bentonit dapat dilakukan secara kimiawi dengan perlakuan asam, seperti HCl, H_2SO_4 , H_3PO_4 (Yuliansyah *et al.*, 2024), atau HNO_3 (Rahman *et al.*, 2024). Selain berperan sebagai katalis, zeolit-Y juga dapat digunakan sebagai adsorben polutan logam berat seperti Pb(II) dan Cu(II) dalam air (Shah *et al.*, 2023). Hal tersebut dikarenakan zeolit-Y memiliki luas permukaan dan porositas yang tinggi, tingkat keasaman yang kuat, kemampuan adsorpsi, dan stabilitas hidrotermal (Dabbawala *et al.*, 2020).

Modifikasi zeolit-Y pada penelitian ini mengadopsi penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh Faghihian and Godazandeha (2009) dan Hamidi *et al.*

(2021), dengan teknik hidrotermal dari lempung bentonit dan aluminium foil *food grade* sebagai alumina tambahan karena kandungan aluminium pada bentonit tidak mencukupi untuk dilakukan sintesis. Pemilihan bahan baku didasarkan pada kandungan silika (Si) pada bentonit mencapai 58,1% dan alumina (Al) pada aluminium foil mencapai 98,35-99,2%, serta ketersediaannya di pasaran dengan harga yang relatif murah dan kemampuannya larut dalam larutan alkali dan asam (Zulfiqar *et al.*, 2016 ; Pangesti *et al.*, 2021).

Sebelum modifikasi zeolit-Y dilakukan, bentonit dianalisis dengan teknik *X-Ray Fluorescence* (XRF), *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hasil modifikasi yang diperoleh yaitu zeolit-Y kemudian dikarakterisasi kembali dengan teknik XRD dan SEM. Uji aktivitas katalitik zeolit-Y kemudian dilakukan pada proses pirolisis minyak kelapa sawit. Pada penelitian ini juga dikaji pengaruh pra-perlakuan pemanasan minyak kelapa sawit dengan variasi waktu pemanasan 0, 10, 20, 30, dan 40 menit terhadap BCO yang diperoleh. BCO selanjutnya di analisis menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrophotometry* (GC-MS).

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan pada penelitian ini yaitu:

1. Mempurifikasi bentonit menggunakan pelarut asam.
2. Memperoleh hasil sintesis zeolit-Y hasil modifikasi bentonit dengan metode hidrotermal.
3. Mendapatkan data karakteristik zeolit-Y menggunakan teknik XRD dan SEM.
4. Mengkaji pengaruh pra-perlakuan pemanasan sampel minyak kelapa sawit yang di pirolisis menggunakan katalis zeolit-Y terhadap karakteristik.
5. Menganalisis BCO yang terbentuk dari proses pirolisis menggunakan GC-MS.

1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu:

1. Meningkatkan nilai ekonomis bentonit sebagai bahan baku pembuatan katalis.
2. Memberikan informasi tentang teknik pirolisis minyak kelapa sawit menjadi BCO.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Minyak Kelapa Sawit

Minyak kelapa sawit adalah salah satu jenis biomassa minyak nabati yang diperoleh dari ekstraksi atau kompresi mesokarp buah kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) yang telah dilakukan pemurnian. Setelah kelapa sawit disortir, tandan buah dirontokkan, kemudian bagian mesokarp buah kelapa sawit dipisahkan antara fraksi cair dan padat secara mekanik dan fisik. Proses produksi minyak kelapa sawit melibatkan ekstraksi minyak dari mesokarp buah sawit melalui beberapa tahapan, termasuk sterilisasi, kempa, dan serangkaian tahap pemurnian, meliputi *degumming*, netralisasi, *bleaching*, dan deodorisasi, yang bertujuan untuk menghilangkan komponen-komponen yang tidak diinginkan dan menghasilkan minyak kelapa sawit murni yang jernih, stabil, dan layak untuk aplikasi selanjutnya (Afrizal dkk., 2022 ; Saragih dkk., 2018).

Komposisi utama minyak kelapa sawit terdiri atas 50% asam lemak jenuh yang mencapai dan 49% asam lemak tak jenuh, sedangkan sisanya merupakan senyawa anorganik dan komponen minor lainnya. Komponen asam lemak jenuh sebagian besar berupa triasilgliserida (94%) dan diasilgliserida (6%), yang didominasi oleh asam palmitat (44%), asam stearat (5%), asam miristat (1%), dan asam laurat (<1%), menyebabkan minyak kelapa sawit bersifat semi padat pada suhu kamar. Sedangkan komponen asam lemak tak jenuh terdiri dari asam oleat (39%), asam linoleat (10%), dan asam α -linoleat (<1%). Minyak kelapa sawit juga memiliki karakteristik warna kuning alami yang berasal dari kandungan karotenoid. Selain itu, minyak kelapa sawit juga mengandung komponen minor penting seperti skualen, vitamin E, sterol, polifenol, fosfolipid, dan glikolipid (Goon *et al.*, 2019 ; Husain dan Marzuki, 2021).

Minyak kelapa sawit termasuk salah satu jenis biomassa terbarukan yang banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam konversi bioenergi, karena ketersediannya yang melimpah di Indonesia. Minyak kelapa sawit dapat digunakan sebagai bahan bakar cair karena kandungan trigliserida yang tinggi, dapat dipecah menjadi komponen hidrokarbon yang mirip dengan komponen bahan bakar fosil, sehingga minyak kelapa sawit memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif. Minyak kelapa sawit dapat dikonversi menjadi bahan bakar cair terbarukan melalui berbagai reaksi seperti transesterifikasi (Pandiangan *et al.*, 2017), perengkahan, isomerisasi, aromatisasi (Gunawan *et al.*, 2023) dan pirolisis (Febriyanti *et al.*, 2021).

2.2. Pirolisis Biomassa

Pirolisis merupakan proses dekomposisi eksotermal bahan organik dalam kondisi tanpa atau dengan sedikit oksigen pada suhu 300-700 ° C, dengan hasil yang bervariasi tergantung pada pra-pengolahan bahan baku, suhu, kadar air, dan laju pemanasan. Produk utama hasil pirolisis diketahui berupa biogas, *bio-oil*, dan *biochar*. Pada prinsipnya, pirolisis biomassa bertujuan untuk mendegradasi rantai hidrokarbon panjang yang ada terkandung di dalam material tersebut menjadi rantai hidrokarbon yang lebih pendek (Simanjuntak *et al.*, 2024 ; Rezapoor and Rahimpour, 2024).

Selama proses pirolisis berlangsung, sejumlah reaksi terjadi di seluruh mekanisme pirolisis, yang berkontribusi pada pemecahan termal biomassa menjadi produk antara dan produk akhir. Reaksi-reaksi tersebut dikategorikan menjadi reaksi primer dan reaksi sekunder. Reaksi primer berlangsung pada rentang suhu 300-500 °C, melibatkan proses fragmentasi, depolimerisasi, dan pembentukan arang. Pada suhu tinggi, biomassa akan mengalami pelepasan molekul air. Selanjutnya, makromolekul dalam biomassa mengalami depolimerisasi, di mana ikatan antar monomer terputus, menghasilkan produk akhir berupa gas. Monomer dan polimer dengan ikatan kovalen akan terpecah, menghasilkan komponen dengan rantai pendek dan beberapa gas yang tidak dapat terkondensasi. Hasil akhir dari tahap

ini meliputi *bio-oil*, arang, dan gas. Sementara reaksi sekunder berlangsung pada suhu $>500^{\circ}\text{C}$. Senyawa volatil yang dihasilkan selama reaksi primer berlangsung bersifat tidak stabil, sehingga akan terurai lebih lanjut untuk menghasilkan jumlah fraksi cair yang berkurang. Ketika suhu mencapai $>800^{\circ}\text{C}$, produk akan mengalami reaksi tersier, dengan hasil akhir berupa gas, uap air, dan jelaga (Hu and Gholizadeh, 2019).

Pirolisis biomassa dapat diklasifikasikan berdasarkan pada metode yang berbeda, yaitu pirolisis lambat, cepat, dan kilat, bergantung dengan perbedaan suhu, waktu tinggal padatan, laju pemanasan, ukuran partikel biomassa, dan hasil produk, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

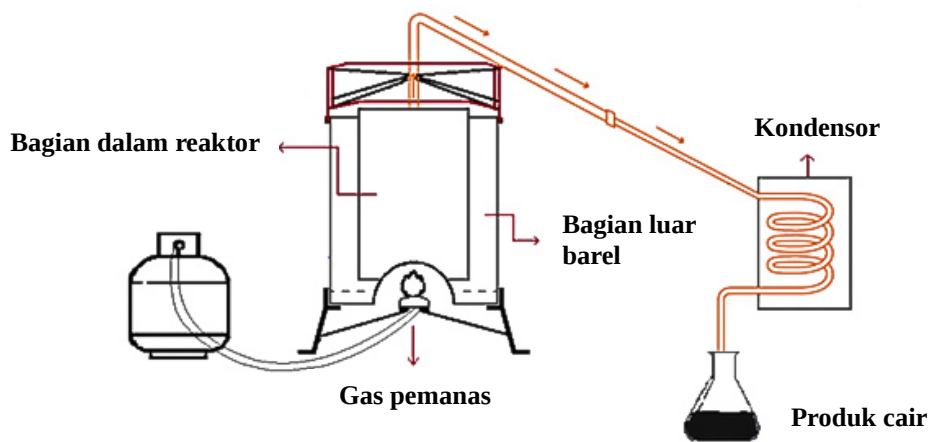
Tabel 1. Parameter penentu dan presentase produk akhir dari masing-masing metode pirolisis (Aboelela *et al.*, 2023).

Parameter	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Laju pemanasan (s^{-1})	Waktu tinggal (s)	Ukuran partikel (nm)	Produk yield (%)
Pirolisis lambat	550-950	0,1-1	300-550	5-50	• Minyak: 40-50 • Arang: 15-25 • Gas: 25-30
Pirolisis cepat	850-1250	10-200	0,5-10	<1	• Minyak: 55-70 • Arang: 15-20 • Gas: 5-15
Pirolisis kilat	900-1200	>1000	<1	$<0,5$	• Minyak: 60-75 • Arang: 15-30 • Gas: 5-15

Menurut Hu and Gholizadeh (2019), pirolisis biomassa terjadi dalam beberapa fase; tahap pertama ($122\text{-}202^{\circ}\text{C}$), terjadi penataan ulang yang melibatkan dehidrasi air, pemutusan ikatan, munculnya radikal bebas, dan produksi gugus karboksil, hidroperoksida, dan karbonil. Pada tahap kedua ($200\text{-}600^{\circ}\text{C}$), terbentuk arang, BCO, dan gas. Pada tahap ketiga ($>600^{\circ}\text{C}$), residu padat yang kaya akan karbon terbentuk. Reaksi dehidrasi dan dekarboksilasi menyebabkan peningkatan jumlah molekul polar, alifatik, dan aromatik. Pada suhu sekitar 360°C , produksi air meningkat dan berkurang pada suhu 580°C . Laju pemanasan juga mempengaruhi komposisi dan karakteristik arang, gas, dan BCO. Laju pemanasan tinggi menyebabkan dehidrasi volatil terhambat, yang menurunkan kandungan air pada BCO. Waktu tinggal padatan yang lebih pendek lebih disukai untuk

menghasilkan BCO yang unggul. Reaksi sekunder selama pirolisis meningkatkan hasil produk cair dari waktu ke waktu. Meskipun konversi penuh dapat membutuhkan lebih banyak waktu di dalam reaktor, hasil terbaik dari cairan dapat dicapai dalam waktu singkat.

Selain suhu, laju pemanasan, rasio pencampuran komposisi, kuantitas dan kualitas produk pirolisis sangat dipengaruhi jenis desain reaktor. Banyak desain reaktor pirolisis yang telah dikembangkan sebelumnya, diantaranya *bubbling fluidised beds*, *circulating fluidised beds* dan *transported beds*, kerucut berputar, pirolisis ablatif, pirolisis gerinda, reaktor Auger, dan reaktor *fixed-bed*. Pada skala laboratorium, proses pirolisis sering dilakukan dalam reaktor *fixed-bed* karena sifatnya yang mudah, kapasitas sampel yang besar, dan hasil produk yang tinggi. Namun, sulitnya mengganti katalis selama pirolisis menjadi kelemahan dari reaktor *fixed-bed* (Fadillah *et al.*, 2021). Model reaktor yang akan digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Komponen reaktor yang digunakan (Simanjuntak *et al.*, 2024).

2.3. Bio Crude Oil (BCO)

Bio crude oil (BCO) atau *bio-oil* merupakan cairan berwarna gelap dengan bau seperti asap yang dihasilkan dari pirolisis biomassa. BCO memiliki karakteristik yang mirip dengan minyak mentah fosil, namun berasal dari sumber yang terbarukan, menjadikannya salah satu alternatif yang menjanjikan untuk

menggantikan bahan bakar fosil. Komposisi BCO sangat dipengaruhi oleh jenis biomassa yang digunakan dan variabel proses pirolisis. BCO tersusun dari kompleks campuran berbagai senyawa kimia yang dikategorikan berdasarkan gugus fungsionalnya, seperti aromatik, aldehida, keton, alkohol, asam karboksilat, serta hidrokarbon. Hidrokarbon menjadi komponen utama untuk dapat memanfaatkan BCO menjadi sumber energi (Yanti, 2021). Menurut Aboelela *et al.* (2023), BCO memiliki beberapa karakteristik fisik lainnya, diantaranya; memiliki densitas pada rentang 1,2 kg/L (lebih tinggi dari bahan bakar cair fosil 0,85 kg/L), menunjukkan tingkat kelembaban tinggi ; viskositas 40-100 cP ; nilai kalor sekitar 26,7 J/kg, menunjukkan kadar oksigen yang tinggi ; bersifat polar, karena tidak dapat larut sama sekali dengan pelarut non-polar.

Hidrokarbon merupakan senyawa kimia rantai pendek penyusun bahan bakar minyak. Hidrokarbon yang diproduksi dari bahan baku biologis seperti gula, mikroorganisme, dan minyak nabati dengan tujuan untuk dapat menggantikan penggunaan bahan bakar hidrokarbon fosil disebut sebagai biohidrokarbon (Rahman *et al.*, 2018 ; Ringsmuth *et al.*, 2016). Biohidrokarbon terdiri atas berbagai jenis hidrokarbon yang dibedakan berdasarkan jumlah atom karbonnya. Biohidrokarbon dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu; biogasolin (C5-C12) yang mirip dengan bensin, merupakan campuran hidrokarbon dengan rantai pendek, *kerosene* atau bioavtur (C13-C17), dan biodiesel (C18-C28), yang terdiri atas hidrokarbon rantai panjang (Simanjuntak *et al.*, 2024).

Berdasarkan pada Beims *et al.* (2020), BCO memiliki beberapa kelemahan seperti nilai kalor yang rendah jika dibandingkan dengan minyak bumi, viskositas yang tinggi, bersifat korosif, kandungan padatan yang tinggi, serta ketidakstabilan termal. Stabilitas termal yang rendah menyebabkan selama penyimpanan, BCO mengalami “penuaan”, yaitu kondisi di mana terjadi penurunan kualitas BCO yang ditandai dengan perubahan sifat fisik dan kimia seiring berjalannya waktu. Penuaan pada BCO terjadi karena kadar hidrokarbon beroksigen tinggi yang cukup besar, sehingga perlu diatasi untuk dapat menghasilkan bahan bakar yang lebih efisien dan layak digunakan secara luas. Berdasarkan hal tersebut, diperlukan proses pemurnian dan peningkatan kualitas pada BCO untuk

menghilangkan komponen-komponen yang tidak diinginkan atau diubah menjadi komponen lain yang bermanfaat, seperti dengan pengolahan secara fisika menggunakan penyaringan uap panas maupun secara kimia dengan penambahan katalis pada proses pirolisis (Lozano *et al.*, 2024).

2.4. Katalis

Konversi BCO menjadi bioenergi telah banyak dilakukan dengan penambahan katalis untuk meningkatkan kemampuannya saat direpolimerisasi serta kompatibilitas produknya dengan karakteristik yang mirip seperti minyak bumi. Katalis adalah zat atau senyawa kimia yang ditambahkan dalam suatu reaksi kimia untuk meningkatkan laju reaksi tanpa ikut terlibat secara kimiawi pada hasil akhir reaksi yang terbentuk. Katalis bekerja dengan cara menurunkan energi yang diperlukan untuk mencapai tahap transisi reaksi lebih cepat jika dibandingkan dengan reaksi kimia tanpa katalisasi (Ramadhanti, 2023). Hal ini membuat proses konversi biomassa menjadi produk yang diinginkan menjadi lebih cepat dan efektif. Penggunaan katalis dapat membantu memaksimalkan hasil BCO. Katalis bekerja dengan mempercepat reaksi pirolisis, memecah molekul organik besar menjadi hidrokarbon dengan rantai pendek (Aboelela *et al.*, 2023).

Katalis tidak hanya menghasilkan dan meningkatkan kualitas BCO secara signifikan, tetapi juga meningkatkan produksi berbagai hidrokarbon aromatik, toluena, benzena, etilena, propilena, dan xilena. Aplikasi katalis dapat disesuaikan dengan tetap mempertimbangkan karakteristiknya, seperti distribusi situs asam dan basa, porositas, dan penambahan logam, untuk meningkatkan hasil hidrokarbon aromatik. Selain itu, ukuran dan sebaran pori katalis, luas permukaan, fasa, struktur, serta biomassa yang digunakan sangat mempengaruhi aktivitas, selektivitas, dan produk yang diinginkan (Rangel *et al.*, 2023). Penggunaan katalis yang tidak disesuaikan dapat mengakibatkan terjadinya pembentukan kokas yang menyebabkan penurunan aktivitas dan selektivitas katalis karena terjadi deaktivasi katalis. Deaktivasi katalis diakibatkan karena adanya suatu pengotor yaitu

molekul karbon yang mengendap menyebabkan penyumbatan pori-pori pada katalis, sehingga proses difusi produk akhir pirolisis menjadi sulit (Liu *et al.*, 2020).

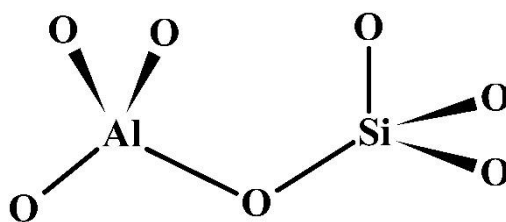
Katalis pada proses pirolisis biomassa ditempatkan dalam konfigurasi *in-situ* atau *ex-situ*. Pada *in-situ*, katalis dan biomassa direaksikan langsung di dalam satu unit reaktor. Sedangkan pada *ex-situ*, katalis dan biomassa terpisah dalam dua unit reaktor yang berbeda, katalis di bagian hilir piroliser. Konfigurasi *in-situ* menghasilkan biaya operasional yang lebih rendah dibandingkan dengan pirolisis *ex-situ*. Namun, selektivitas produk lebih menguntungkan untuk mengoptimalkan sifat katalitik, karena dilakukan secara terpisah. Pada prosesnya, baik pirolisis *in-situ* maupun *ex-situ* tetap mampu menurunkan oksigenat BCO menjadi produk yang lebih stabil (Shafaghat *et al.*, 2019). Katalis berbasis zeolit paling sering digunakan pada pirolisis biomassa daripada oksida logam, karbonat anorganik, dan senyawa organosilikat lainnya. Zeolit membantu dalam transformasi molekul teroksigenasi menjadi hidrokarbon aromatik selama proses pirolisis (Cai *et al.*, 2020).

2.5. Zeolit

Penyebutan “zeolit” berasal dari bahasa Yunani, yaitu "*Zeo*" dan "*Lithos*" yang berarti "batu mendidih". Penyebutan ini diciptakan oleh Axel Fredrik Constedt melalui penemuannya pada pemanasan mineral stilbit yang menyerap air dan melepaskan uap. Hal ini menggambarkan sifat zeolit yang mampu menyerap air dan melepaskan gas ketika dipanaskan (Moshoeshoe *et al.*, 2017). Zeolit adalah jenis mineral mikropori (< 2 nm) terhidrasi tetrahedron $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$ yang dihubungkan oleh atom oksigen membentuk struktur tiga dimensi berongga. Rongga pada zeolit diisi oleh kation-kation logam alkali atau alkali tanah seperti Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , dan Mg^{2+} dan molekul air yang bergerak bebas diperlukan untuk menyeimbangkan muatan pada struktur zeolit sesuai dengan rumus umum zeolit yaitu:

$$\text{M}_{x/n} (\text{Al}_2\text{O})_x (\text{SiO}_2)_y \cdot z\text{H}_2\text{O} \quad (1)$$

Di mana M adalah kation alkali atau alkali tanah, n adalah valensi kation, z adalah jumlah molekul air per unit sel, x dan y adalah jumlah total tetrahedral per unit sel (Li *et al.*, 2022). Struktur dasar kerangka aluminosilikat, yang membentuk semua zeolit, terbuat dari empat anion oksigen (O^{2-}) yang melingkari susunan tetrahedral kation silikon (Si^{4+}) dan kation aluminium (Al^{3+}). Ikatan Si-O dan Al-O membentuk kerangka tiga dimensi makromolekul blok bangunan tetrahedral SiO_2 dan AlO_2 karena setiap ion oksigen dalam ikatan tersebut bergabung dengan dua kation dan dibagi oleh dua tetrahedron. Konfigurasi atom ini menghasilkan struktur tiga dimensi tetrahedra silikat dengan rasio Si:O dengan perbandingan komposisi adalah 1:2. Setiap tetrahedron terdiri dari empat atom O yang melingkari kation Si atau Al (Moshoeshoe *et al.*, 2017). Struktur tetrahedron zeolit dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur tetrahedral zeolit (Moshoeshoe *et al.*, 2017).

Zeolit banyak digunakan dalam berbagai bidang seperti adsorpsi, pertukaran ion, membran, dan katalisis, karena karakteristik fisikokimianya, seperti luas permukaan, susunan mikropori, kemampuan pertukaran ion, selektivitas bentuk, kemampuan adsorpsi, dan kemampuan dalam menyediakan situs asam. Berdasarkan struktur, komposisi Si/Al, dan karakteristik fisikokimia dari zeolit, sangat mempengaruhi kemampuannya sebagai katalis (Maghfirah *et al.*, 2020). Menurut Pandiangan *et al.* (2021), umumnya zeolit dibagi menjadi dua jenis, yaitu zeolit alam dan zeolit sintetis. Saat ini, jenis zeolit sintetis lebih sering digunakan karena komposisinya terutama rasio Si/Al dapat dibuat agar sesuai. Pada pirolisis biomassa, zeolit yang berperan sebagai katalis berfungsi untuk membantu dalam proses penguapan molekul oksigen selama reaksi berlangsung (Simanjuntak *et al.*, 2019).

2.5.1. Zeolit Alam

Zeolit alam merupakan jenis zeolit yang terbentuk secara alami dari proses geologis, melalui interaksi antara lava vulkanik yang mendingin dengan air tanah yang kaya akan mineral. Ketika magma keluar melalui retakan di kerak bumi dalam bentuk lava saat peristiwa gunung berapi meletus, lava vulkanik yang mendingin dalam waktu yang lama dan terpapar oleh air tanah yang kaya akan mineral, akan membentuk suatu kristal padatan zeolit (Moshoeshoe *et al.*, 2017). Komposisi zeolit alam dipengaruhi oleh kondisi hidrotermal lingkungan, seperti suhu, tekanan, dan kandungan uap air dari air tanah di tempat terbentuknya. Akibatnya, zeolit dari lokasi yang berbeda bisa memiliki komposisi yang bervariasi, meskipun tampak serupa dalam hal warna dan tekstur (Ismawati, 2018). Beberapa jenis zeolit alam yang umum ditemui ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Jenis zeolit alam yang umum ditemukan (Moshoeshoe *et al.*, 2017).

Nama zeolit	Rumus kimia
Analsim	$\text{Na}_{16}(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}) \cdot 16\text{H}_2\text{O}$
Kabazit	$\text{Ca}_2(\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}) \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Klippnotilit	$(\text{Na},\text{K})_6(\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}) \cdot 20\text{H}_2\text{O}$
Heulandit	$\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}) \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
Mordenit	$\text{Na}_2\text{KCa}_2(\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}) \cdot 28\text{H}_2\text{O}$
Filipsit	$\text{K}_2(\text{Ca}_{0.5}\text{Na})_4(\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}) \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Laumonit	$\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48}) \cdot 16\text{H}_2\text{O}$
Natrolit	$\text{Na}_{16}(\text{Al}_6\text{Si}_{24}\text{O}_{80}) \cdot 16\text{H}_2\text{O}$
Erionit	$(\text{Na}_2\text{K}_2\text{Ca})_2(\text{Al}_4\text{Si}_{14}\text{O}_{36}) \cdot 15\text{H}_2\text{O}$
Faujasit	$(\text{Na}_2,\text{Ca},\text{Mg})_{3.5}(\text{Al}_7\text{Si}_{17}\text{O}_{48}) \cdot 32(\text{H}_2\text{O})$
Ferrierit	$(\text{Na},\text{K})_2\text{Mg}(\text{Si},\text{Al})_{18}\text{O}_{36} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$

Pada aplikasinya, zeolit alam memiliki beberapa keterbatasan, seperti kemurnian yang rendah akibat adanya pengotor alami (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , dan Ca^{2+}), komposisi yang beragam, dan homogenitas yang kurang, baik dalam ukuran partikel maupun pori (Aulia *et al.*, 2024 ; Moshoeshoe *et al.*, 2017). Meskipun zeolit alam

memiliki stabilitas termal yang baik, kristalinitasnya rendah, yang menyebabkan aktivitas katalitiknya juga relatif rendah (Pandiangan *et al.*, 2021).

2.5.2. Zeolit Sintetis

Zeolit merupakan biomassa tidak terbarukan namun penggunaannya terus meningkat, sehingga dengan seiring berjalannya waktu akan habis. Zeolit sintetis dikembangkan untuk mengatasi kelemahan dari zeolit alam. Zeolit sintetis adalah aluminosilikat yang dibuat melalui proses kimiawi di laboratorium, untuk menghasilkan struktur yang terkontrol dan seragam dengan karakteristik yang diinginkan. Dibandingkan dengan zeolit alam, zeolit sintetis dibuat dengan kemampuan pertukaran ion yang lebih baik, keseragaman morfologi pori, dengan kemurnian yang tinggi membuat zeolit sintetis lebih sering digunakan dalam jumlah besar secara komersial (Khaleque *et al.*, 2020). Ukuran pori yang dapat disesuaikan membuat zeolit sintetis dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang. Pori yang lebih besar memungkinkan adsorpsi molekul yang lebih besar. Sementara zeolit sintetis dengan pori kecil lebih dipilih penggunaannya sebagai katalis (Król, 2020). Menurut Li *et al.* (2023), karakteristik zeolit sintetis sangat bergantung pada rasio Si/Al, sehingga zeolit sintetis dikategorikan dalam tiga kelompok:

1. Zeolit sintetis dengan kadar Si rendah (1,0-1,5)
Zeolit jenis ini memiliki kandungan Al yang tinggi, bersifat berpori, dan bernilai ekonomi tinggi karena sangat efektif untuk pemisahan dengan kapasitas besar. Volume porinya bisa mencapai 0,5 cm³ per cm³ zeolit. Contoh zeolit sintetis jenis ini adalah zeolit-A.
2. Zeolit sintetis dengan kadar Si menengah (2-5)
Zeolit jenis menunjukkan peningkatan stabilitas. Contoh dari zeolit sintetis jenis ini adalah zeolit modernit, zeolit-X, zeolit-Y, dan zeolit-Ω.
3. Zeolit sintetis dengan kadar Si tinggi (>10)
Zeolit jenis ini sangat higroskopis dan mampu mengadsorpsi molekul non-polar, sehingga cocok digunakan sebagai katalis asam dalam produksi

hidrokarbon. Contoh zeolit jenis ini meliputi zeolit- β , ZSM-5, ZSM-11, ZSM-21, dan ZSM-24.

Semakin berkembangnya penelitian zeolit, dilaporkan zeolit yang berhasil disintesis diketahui ditunjukkan pada Tabel 3.

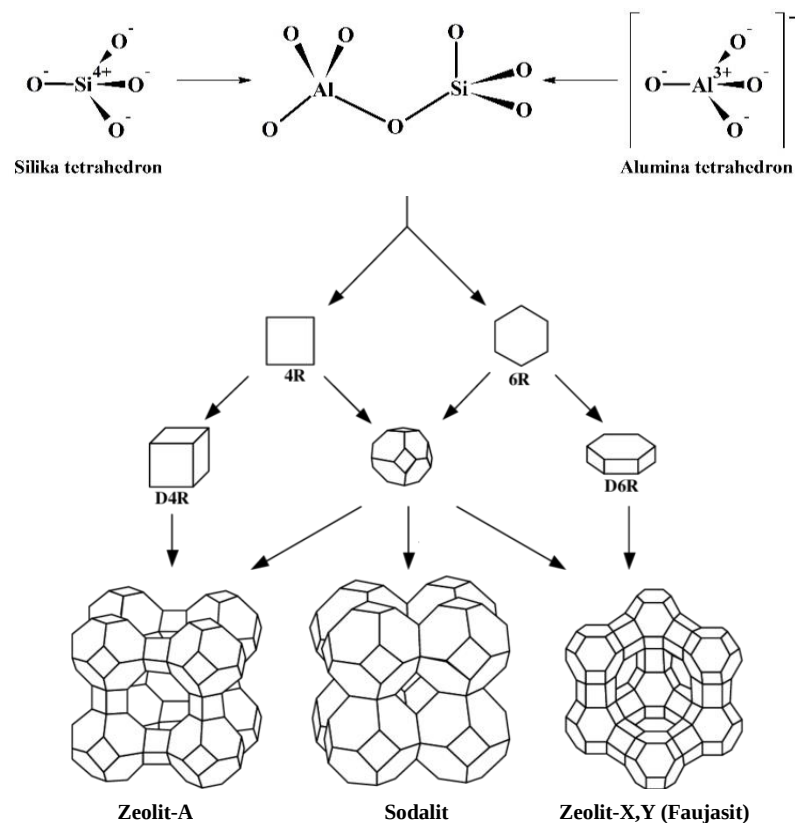
Tabel 3. Jenis-jenis zeolit yang diketahui berhasil disintesis (Kumar *et al.*, 2019).

Nama zeolit	Rumus kimia
Zeolit A	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4,5\text{H}_2\text{O}$
Zeolit N-A	$(\text{Na}, \text{TMA})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4,8\text{SiO}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ TMA – $(\text{CH}_3)^{4\text{N}+}$
Zeolit H	$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Zeolit L	$(\text{K}_2\text{Na}_2)\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Zeolit X	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2,5\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Zeolit Y	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4,8\text{SiO}_2 \cdot 8,9\text{H}_2\text{O}$
Zeolit P	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2-5\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Zeolit O	$(\text{Na}, \text{TMA})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{SiO}_2 \cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$ TMA – $(\text{CH}_3)^{4\text{N}+}$
Zeolit Ω	$(\text{Na}, \text{TMA})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ TMA – $(\text{CH}_3)^{4\text{N}+}$
Zeolit ZK-4	$0,85\text{Na}_2\text{O} \cdot 0,15(\text{TMA})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3,3\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Zeolit ZK-5	$(\text{R}, \text{Na}_2)\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4-6\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

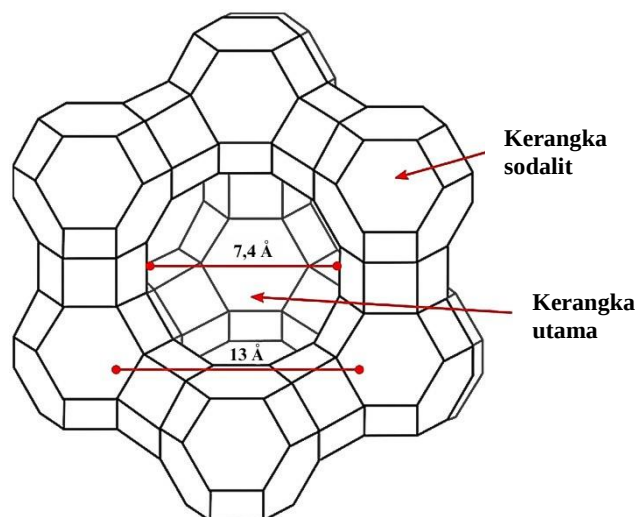
Zeolit dapat diproduksi dari berbagai bahan baku alami atau buatan, tergantung pada karakteristik sumber bahan, diantaranya terjangkau, mudah diakses, biaya produksi rendah, selektif, hasil produksi tinggi, dan mengandung lebih sedikit pengotor. Zeolit sintetis sejauh ini telah diproduksi dengan berbagai teknik pengembangan fisikokimia dan solvothermal, seperti metode hidrotermal (Simanjuntak *et al.*, 2019), metode fusi alkali (Koshlak, 2023), metode sol-gel (Pandiangnan *et al.*, 2019), metode pencucian alkali (Tang *et al.*, 2024), metode ionothermal (Han *et al.*, 2021), dan metode gelombang mikro (Ginting *et al.*, 2024). Jenis zeolit yang ingin dihasilkan menentukan metode sintesis mana yang dipilih (Khaleque *et al.*, 2020).

2.5.3. Zeolit-Y

Zeolit-Y adalah salah satu jenis zeolit sintetis yang termasuk dalam kelompok aluminosilikat dengan kerangka struktur faujasit (FAU). Zeolit-Y memiliki rumus kimia dasarnya adalah $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Na}_2)_{29}(\text{H}_2\text{O})_{240}[\text{Al}_{58}\text{Si}_{134}\text{O}_{384}]\text{-FAU}$. Zeolit-Y tersusun atas muatan-muatan negatif dari SiO_4 dan AlO_4 , yang tergabung membentuk kerangka struktur tiga dimensi sodalit. Rangkaian struktur sodalit membentuk rantai yang dihubungkan dengan 6-cincin ganda (D6R) dari oksigen sebagai penghubung, menghasilkan struktur faujasit seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Kumpulan 10 unit sodalit yang saling terhubung ini akan membentuk *supercages* berdiameter pori rata-rata 7,4 Å, dengan diameter rongga dalam 12 Å menghasilkan sistem pori-pori besar pada zeolit-Y, seperti ditunjukkan pada Gambar 4 (Andarini *et al.*, 2022).



Gambar 3. Skema pembentukan unit zeolit faujasit, sodalit, dan zeolit-A (Masoudian *et al.*, 2013).



Gambar 4. Struktur faujasit zeolit-Y (Calabrese and Proverbio, 2019).

Meningkatnya kandungan silika pada zeolit-Y menghasilkan stabilitas termal yang tinggi dan selektivitas adsorpsi yang kuat terhadap senyawa polar dan air, menyebabkan zeolit-Y dapat diaplikasikan sebagai katalis pada perengkahan katalitik minyak kelapa sawit (Haliza dkk., 2023). Zeolit-Y dapat disintesis dengan perpaduan antara silika dan alumina. Berbagai bahan baku dengan biaya yang murah telah dilaporkan untuk sintesis zeolit-Y diantaranya kaolin (Agbendeh *et al.*, 2021), sekam jagung (Bello *et al.*, 2024), lumpur (Andarini *et al.*, 2022), silika sekam padi (Pangesti *et al.*, 2021), lempung bentonit (Hamidi *et al.*, 2021), abu terbang batubara (Koshlak, 2023), dan ampas tebu (Arnelli *et al.*, 2018).

Zeolit-Y umumnya dibuat melalui sintesis bahan baku yang dilakukan secara konvensional dengan metode hidrotermal. Metode hidrotermal merupakan teknik sintesis yang banyak di aplikasikan dalam sintesis zeolit sebagai katalis heterogen, di mana proses pembuatan kristal dari suatu mineral yang dapat larut dalam larutan zat, pada tekanan lebih dari 1 bar dengan suhu $>100^{\circ}\text{C}$, dalam sistem tertutup. Dengan memodifikasi suhu reaksi, tekanan, sifat pelarut, waktu pembentukan, zat aditif, dan komposisi larutan ; ukuran, komposisi, morfologi, dan fasa kristal nanopartikel dapat dikontrol (Nawaz *et al.*, 2022). Prinsip dasar metode hidrotermal adalah membentuk kristal melalui berbagai reaksi dalam larutan dengan tekanan tinggi, yang digunakan untuk melarutkan mineral

pengotor dan mengkristalisasi kembali zat yang tidak larut. Sistem tertutup yang digunakan adalah autoklaf, yaitu sebuah bejana yang terbuat dari baja dan dirancang untuk menahan suhu dan tekanan tinggi (Andarini *et al.*, 2022). Pada penelitian ini, bahan baku yang digunakan untuk membuat zeolit-Y adalah lempung bentonit yang dimodifikasi dengan teknik hidrotermal.

2.6. Bentonit

Bentonit merupakan suatu lempung mineral berwarna abu tersusun atas montmorillonit yang termasuk dalam kelompok smektit dan memiliki struktur yang terdiri dari dua lapisan silika tetrahedral serta satu lapisan alumina oktahedral yang tersusun berulang. Lapisan-lapisan ini memiliki muatan negatif karena adanya substitusi ion dengan valensi berbeda atau kekosongan ion di posisi oktahedral. Untuk menyeimbangkan muatan negatif, ion positif seperti natrium dan kalsium, akan terikat dengan molekul air menyebabkan perubahan ukuran mineral. Bentonit pertama kali ditemukan pada tahun 1980 di Fort Benton, Amerika Serikat, menjadi dasar dalam penamaan (Perez *et al.*, 2022).

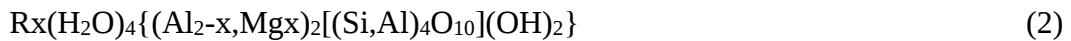
Bentonit adalah batuan atau lempung yang terbentuk dari tanah akibat peristiwa vulkanik (tanah vulkanik) (Rana and Kim, 2024). Indonesia merupakan negara yang memiliki wilayah geologis terletak di sepanjang *ring of fire*, membuat bentonit banyak terbentuk secara alami di daerah-daerah yang merupakan bagian dari zona vulkanik. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2024), total dari sumber daya bentonit mencapai angka 396 juta Ton dengan total cadangan sebesar 26 juta Ton. Angka tersebut tentunya cukup tinggi, mengingat pemanfaatan dari bentonit belum banyak dilakukan. Natural bentonit mengandung silika (SiO_2) 58,32%, alumina (Al_2O_3) 15,32%, magnesium oksida (MgO) 3,21%, besi oksida (Fe_2O_3) 2,23%, natrium oksida (Na_2O) 1,89%, kalium oksida (K_2O) 1,19%, kalsium oksida (CaO) 0,95%, titanium oksida (TiO_2) 0,15%, tiosulfat (S_2O_3) 0,1%, fosfor pentoksida (P_2O_5) 0,11%, dan mangan dioksida (MnO_2) 0,09% (Sanavada *et al.*, 2023).

Bentonit cukup diminati karena harganya yang terjangkau dengan kemampuan adsorpsi zat yang efisien. Pada dasarnya ada dua jenis bentonit, yaitu kalsium bentonit yang tidak mengalami pembengkakan (*non-swelling*) dan natrium bentonit yang mengalami pembengkakan (*swelling*). Natrium bentonit mengandung lebih banyak ion Na^+ dibandingkan ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} . Ketika natrium bentonit direaksikan dengan air akan terjadi pembengkakan hingga 8-15 kali lipat dari ukuran awalnya dan tetap tersebar di dalam air untuk sementara waktu. Sebagian besar ion yang ada pada natrium bentonit adalah ion natrium. Sebaliknya, kalsium bentonit memiliki lebih banyak ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} daripada ion Na^+ . Meskipun kalsium bentonit tidak memiliki kemampuan adsorpsi sebesar natrium bentonit, ia tetap memiliki kemampuan menyerap yang kuat dan dapat terdistribusi di air dengan baik setelah diaktifkan. Ion magnesium dan kalsium mendominasi daerah pertukaran ion pada bentonit (Ruskandi *et al.*, 2020).

2.6.1. Pemanfaatan bentonit

Tanah lempung biasanya memiliki morfologi warna agak kecoklatan, mudah dibentuk ketika basah, dan ketika dibakar akan mengeras dengan warna kemerahan. Dalam kehidupan sehari-hari, tanah lempung dimanfaatkan untuk membuat genteng, tembikar, dan batu bata. Pada skala industri, bentonit banyak digunakan dalam ekstraksi minyak dan gas, konstruksi, pertanian, limbah, kecantikan, dan medis, karena sifat fisik dan kimianya, seperti struktur kristal, komposisi mineral, ukuran partikel kecil, luas permukaan besar, kemampuan pertukaran ion tinggi, *swelling index*, sifat koloid, daya adsorpsi tinggi, dan mudah bereaksi dengan reagen organik serta anorganik. Pada skala laboratorium, bentonit dapat digunakan sebagai salah satu biomassa katalis heterogen dalam reaksi pirolisis (Rana *and* Kim, 2024).

Lempung merupakan salah satu biomassa yang sering dimanfaatkan sebagai katalis karena stabilitasnya yang tinggi, variasi struktur dan komposisi kimia, serta ketersediannya dengan harga yang murah. Salah satu jenis lempung yang dapat digunakan untuk membuat katalis adalah bentonit dengan rumus kimia:



di mana R merujuk pada kation yang dapat dipertukarkan, seperti ion alkali dan alkali tanah (Koohestani *et al.*, 2021). Pemanfaatan bentonit sebagai katalis dalam reaksi pirolisis telah dilakukan oleh (Rahman *et al.*, 2024) terhadap pirolisis ban bekas, di mana bentonit diberi perlakuan dengan asam yaitu HNO_3 3M menghasilkan *bio-oil* dengan presentase sebesar 35,34%, kemudian terjadi peningkatan menjadi 39% saat menggunakan HNO_3 5M, jika dibandingkan dengan katalis bentonit tanpa penambahan asam yang hanya menghasilkan 31,62% *bio-oil*. Pada umumnya, lempung alami belum berfungsi dengan baik. Untuk meningkatkan kinerjanya, lempung biasanya dilakukan aktivasi terlebih dahulu sebelum dimodifikasi.

2.6.2. Modifikasi bentonit

Bentonit merupakan material alami yang masih dapat diubah untuk meningkatkan kinerja aplikasinya. Namun, adanya berbagai pengotor non-lempung seperti oksida logam berat dapat mempengaruhi kualitas dan mengurangi penggunaan bentonit secara luas. Pada umumnya, pemurnian bentonit melalui perlakuan mekanis, termal, dan kimiawi. Di antara proses-proses tersebut, perlakuan kimiawi melalui aktivasi asam memiliki efek yang signifikan. Proses aktivasi asam merupakan teknik modifikasi yang digunakan untuk meningkatkan karakteristik adsorptif, kristalinitas permukaan, fungsionalitas, luas permukaan spesifik, dan selektivitas untuk berbagai adsorbat dengan pelarutan seluruh komponen non-lempung yang tidak diinginkan serta untuk menghasilkan fasa kaya Si yang lebih asam pada lapisan oktahedral. Aktivasi bentonit adalah proses yang rumit karena mencakup substitusi kation yang dapat dipertukarkan, seperti Al^{3+} , Mg^{2+} , dan Fe^{2+} , terhadap proton dari lapisan oktahedral. Proses ini meningkatkan efektivitas pemutihan, hidrofobisitas dan struktur porositas, memprotonasi permukaan mineral lempung dengan kuat, dan meningkatkan luas permukaan spesifik dari 20-130 m^2/g menjadi lebih dari 200 m^2/g (Shattar *et al.*, 2020).

Salah satu aplikasi penting dari aktivasi bentonit dengan perlakuan asam adalah dalam pembuatan katalis zeolit-Y. Dalam Hamidi *et al.* (2021), Ruiz *et al.* berhasil menyelidiki zeolitisasi bentonit menggunakan perlakuan alkali dalam sistem refluks dan autoklaf yang menunjukkan bahwa produk akhir memiliki unit-unit berbentuk bola, bukan struktur laminar bentonit. Dalam penelitian yang berbeda, Faghihian *et al.* menggunakan metode hidrotermal untuk mensintesis zeolit-Y dari bentonit dan meneliti dampak dari berbagai parameter sintesis terhadap sifat akhir zeolit. Dalam penelitiannya, mereka menunjukkan pentingnya suhu kristalisasi, durasi *aging*, dan konsentrasi NaOH dalam sintesis zeolit. Penggunaan bentonit yang diaktivasi secara kimiawi dengan asam seperti HCL, H₂SO₄, dan H₃PO₄ terhadap produksi hidrokarbon selama proses pirolisis. Ketika bentonit digunakan sebagai katalis dalam proses pirolisis, larutan HCL meningkatkan konsentrasi BTX (*Benzene Toluene Xylene*), sedangkan larutan asam H₂SO₄ meningkatkan konsentrasi hidrokarbon mono aromatik (Yuliansyah *et al.*, 2024). Pada penelitian ini modifikasi bentonit menjadi zeolit-Y dilakukan melalui teknik hidrotermal dengan prosedur mengadopsi dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh Faghihian and Godazandeha (2009) dan Hamidi *et al.* (2021).

2.7. Karakterisasi Bentonit dan Zeolit-Y Hasil Modifikasi Bentonit

Bentonit dan zeolit-Y yang berhasil di sintesis kemudian di analisis menggunakan XRF, XRD, dan SEM. Analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF) digunakan untuk mengidentifikasi komponen penyusun utama dari bentonit. Karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) dan untuk mengidentifikasi struktur kristalografi serta fasa kristalin dan amorf dari sampel. Kemudian karakteristik topografi dan morfologi ukuran serta bentuk dari sampel dilihat melalui analisis menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

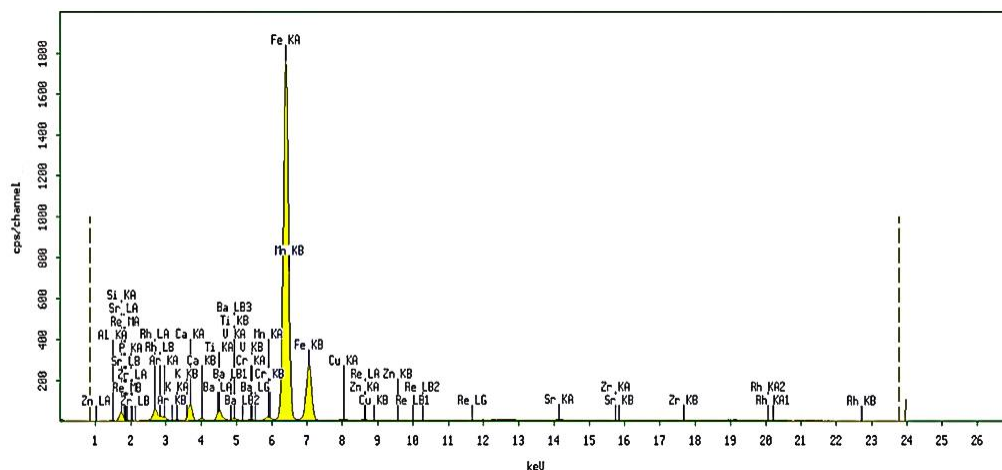
2.7.1. *X-Ray Fluorescence (XRF)*

Bentonit yang digunakan untuk dimodifikasi menjadi zeolit-Y dianalisis menggunakan *X-Ray Fluorescence (XRF)* dengan tujuan mengidentifikasi komponen kimia serta jumlah konsentrasinya yang terdapat dalam bentonit. Spektroskopi fluoresensi sinar-X (XRF) adalah salah satu metode analisis material pada sampel seperti batuan, sedimen, serta material geologi lainnya untuk mengidentifikasi komposisi serta menentukan kadar unsur geokimia hingga skala bagian per juta (ppm) (Oyedotun, 2018).

XRF merupakan teknik analisis non-destruktif yang dilakukan secara kualitatif maupun kuantitatif untuk mengidentifikasi dan menentukan konsentrasi elemen yang ada dalam sampel padat, bubuk, atau cair. Analisis XRF didasarkan pada prinsip pengukuran dispersi panjang gelombang yang dihasilkan setiap komponen ketika radiasi sinar-X yang ditembakkan mengenai sampel (Malik, 2023). Saat sampel diradiasi dengan sinar-X atau sinar gamma berenergi tinggi, elektron pada kulit terdalam atom menjadi tereksitasi, membuat atom berada dalam keadaan tidak stabil. Elektron dari kulit luar kemudian akan mengisi kekosongan tersebut sambil melepaskan energi yang spesifik untuk setiap unsur, disebut sebagai proses deeksitasi. Selama proses deeksitasi, energi yang dilepaskan lebih rendah dari energi saat eksitasi elektron. Energi yang dilepaskan disebut radiasi fluoresensi. Perbedaan energi antara dua kulit atom ini menghasilkan foton sinar-X yang dipancarkan oleh atom. Hasil analisis XRF akan membentuk spektrum yang menyatakan hubungan energi eksitasi dan intensitas sinar-X. Energi eksitasi menggambarkan jenis komponen yang terkandung dalam sampel. Sedangkan intensitas radiasi menunjukkan konsentrasi dari elemen yang terdeteksi dalam sampel (Simon, 2018).

Spektrum hasil analisis XRF dari bentonit dan ampas tebu disajikan pada Gambar 5, yang menunjukkan keberadaan beberapa unsur dalam sampel berdasarkan posisi puncak energi karakteristik masing-masing. Puncak dengan intensitas tertinggi tampak pada Fe $K\alpha$, yang mengindikasikan dominasi unsur Fe dalam

sampel. Selain itu, teridentifikasi juga unsur lain seperti Si, Al, Mn, dan Ti, yang masing-masing ditandai dengan puncak-puncak pada posisi energi karakteristiknya.



Gambar 5. Spektrum XRF dari campuran bentonit dan ampas tebu (Kuncoro *et al.*, 2018).

Namun, data hasil analisis XRF umumnya disajikan dalam bentuk tabel komposisi unsur atau oksida, yang menunjukkan jenis dan kadar elemen penyusun sampel secara kuantitatif. Penyajian dalam bentuk tabel memudahkan dalam perbandingan proporsi masing-masing unsur atau oksida, serta memberikan gambaran mengenai komponen kimia dalam bentonit, seperti yang disajikan pada Tabel 4 yang menunjukkan komposisi kimia dari bentonit alam didominasi oleh SiO_2 dan Al_2O_3 .

Tabel 4. Komposisi kimia bentonit alam hasil analisis XRF (Rahman *et al.*, 2024).

Bentonit	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Fe_2O_3	MgO	TiO_2	Na_2O	CaO	Si/Al
Bentonit mentah (%)	53,64	13,61	1,60	3,33	2,54	3,19	4,26	1,18	6,94

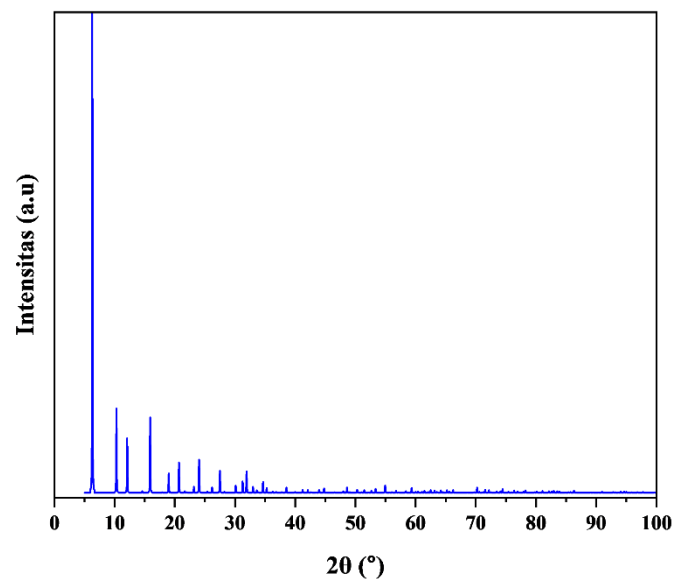
2.7.2. X-Ray Diffraction (XRD)

Spektroskopi difraksi sinar-X (XRD) merupakan teknik karakterisasi non-destruktif yang paling sering digunakan untuk identifikasi kiralinitas suatu material non-organik padat atau serbuk secara kualitatif, berdasarkan pada jenis fasa, ukuran kristalit, dan orientasi kristal, serta secara kuantitatif berdasarkan

pada sudut 2θ , intensitas puncak, dan jumlah konstanta kisi kristal, dalam bentuk polikristalin dan amorf menggunakan radiasi gelombang elektromagnetik sinar-X menghasilkan suatu pola interfensi. Penentuan struktur kristal menggunakan difraksi sinar-X didasarkan pada Hukum Bragg (Fatimah *et al.*, 2021).

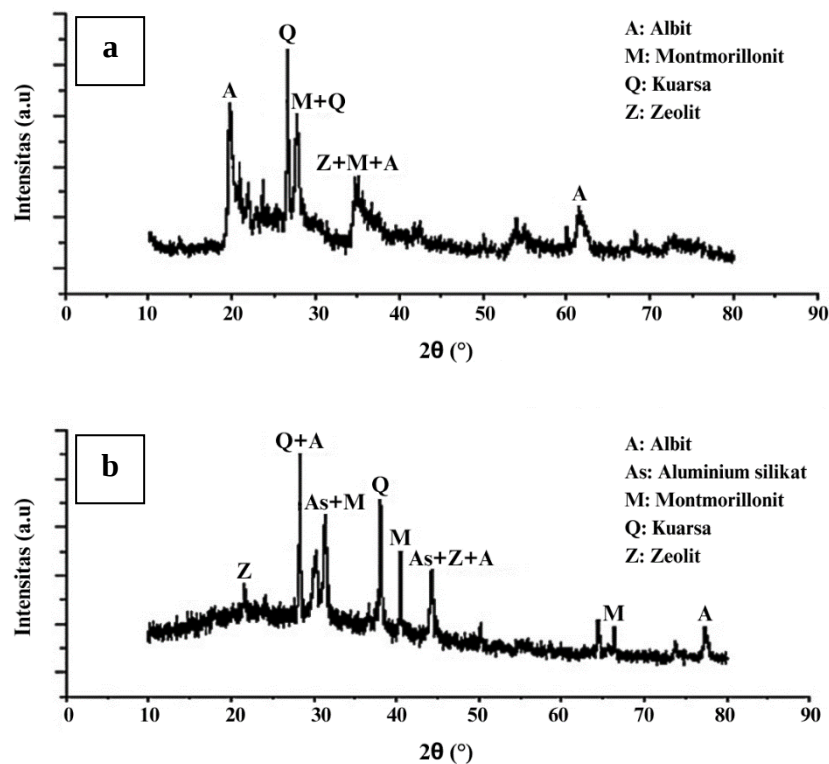
Prinsip dasar difraksi sinar-X adalah difraktivitas cahaya melalui celah kristal. Ketika sinar-X ditembakkan ke sampel kristal padat, sinar yang melewati kristal dihamburkan ke segala arah, dan cahaya yang terdifraksi oleh sampel ini ditangkap oleh detektor, yang bergerak pada sudut tetap. Difraksi cahaya oleh kisi atau kristal dapat terjadi ketika panjang gelombang sinar-X sebanding dengan jarak antar atom dalam kristal, sekitar $1 \text{ \AA}$. Sinar-X merupakan foton berenergi tinggi dengan panjang gelombang antara $0,5\text{--}2,5 \text{ \AA}$, dapat diserap, ditransmisikan, atau difraksi saat berinteraksi dengan suatu zat. XRD akan menangkap pola difraksi yang dihasilkan. Karena fase-fase sinar X-ray yang tersebar berbeda satu sama lain, beberapa di antaranya saling meniadakan, sementara yang lain saling menguatkan karena fasa yang sama. Hamburan monokromatis sinar-X dalam fasa tersebut memberikan pola interferensi yang konstruktif. Puncak-puncak difraksi muncul dalam pola difraktogram karena intensitas reaksi berubah-ubah pada sudut 2θ tertentu. Kekuatan atau intensitas dari puncak-puncak ini bergantung pada jumlah dan penyebaran atom serta ion di dalam unit sel material (Ali *et al.*, 2022; Fatimah *et al.*, 2021).

Puncak 2θ yang muncul dari zeolit hasil sintesis dilakukan analisis menggunakan standar zeolit yang telah ditetapkan oleh IZA (*International Zeolite Association*) dan program Match dengan landasan yaitu adanya minimal tiga puncak difraktogram sampel yang tumpang tindih dengan puncak referensi. Pada Gambar 6 ditunjukkan difraktogram XRD standar zeolit-Y berdasarkan pada IZA *database*.



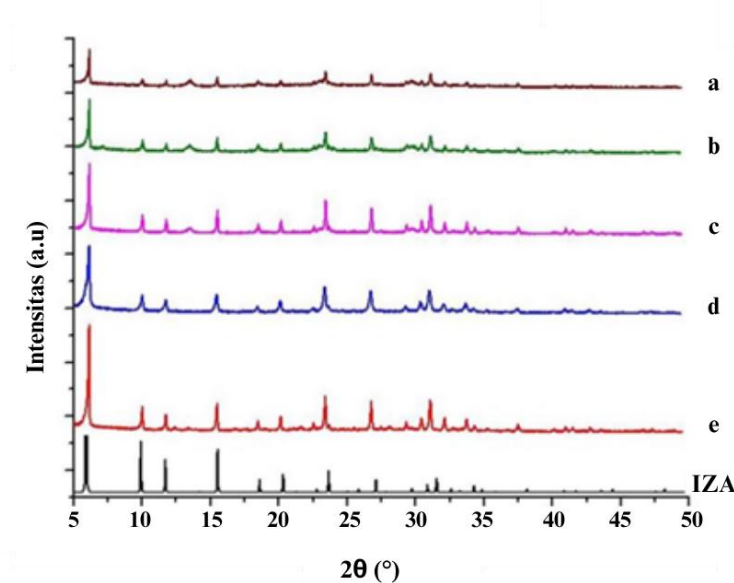
Gambar 6. Difraktogram XRD zeolit-Y (*International Zeolite Association*, 2017).

Pada penelitian ini, karakterisasi XRD dilakukan untuk mengidentifikasi puncak difraksi dari sampel bentonit dan zeolit-Y hasil modifikasi bentonit. Menurut Berhe *et al.* (2024), hasil analisis XRD menunjukkan bentonit sebelum dan setelah di aktivasi oleh HCl mengandung mineral yang sama, yaitu; montmorillonit, albit, kuarsa, zeolit, dan aluminium silikat, yang membuktikan bahwa bentonit adalah mineral aluminosilikat. Aktivasi bentonit oleh asam menyebabkan penurunan intensitas puncak dan perubahan posisi 2θ pada puncak-puncak yang ada, mengindikasikan perubahan kristalinitas akibat pelarutan sebagian kisi kristal oleh asam yang berpotensi membentuk material amorf. Hasil analisis XRD pada Gambar 7 menunjukkan bahwa setelah proses aktivasi puncak difraksi dari mineral albit menurun, sedangkan puncak-puncak dari kuarsa, montmorillonit, dan mineral lainnya masih tetap ada, namun terjadi sedikit pergeseran pada puncak difraksi.



Gambar 7. Difraktogram XRD (a) bentonit alam dan (b) bentonit hasil aktivasi asam (Berhe *et al.*, 2024).

Hasil analisis XRD zeolit-Y yang telah dilaporkan oleh Pangesti *et al.* (2021), dengan variasi waktu kristalisasi 24, 48, 72, 96, dan 120 jam ditunjukkan pada Gambar 8, memberikan informasi bahwa semua sampel didominasi oleh fasa kristal faujasit yang ditandai oleh puncak tajam pada 2θ . Pada waktu kristalisasi 24, 48, dan 72 jam, zeolit-Y yang dihasilkan juga mengandung sedikit zeolit-E, namun dengan intensitas yang sangat rendah sehingga zeolit-Y tetap memenuhi standar IZA. Pada waktu kristalisasi 96 dan 120 jam, fasa zeolit-E tidak ditemukan, menunjukkan bahwa pada kristalisasi 96 jam, zeolit-E telah sepenuhnya berubah menjadi zeolit-Y. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu kristalisasi yang dimulai setelah 96 jam, zeolit-Y yang terbentuk adalah fasa tunggal.



Gambar 8. Difraktogram XRD standar IZA zeolit-Y dan zeolit-Y hasil sintesis (a) 24, (b) 48, (c) 72, (d) 96, dan (e) 120 jam (Pangesti *et al.*, 2021).

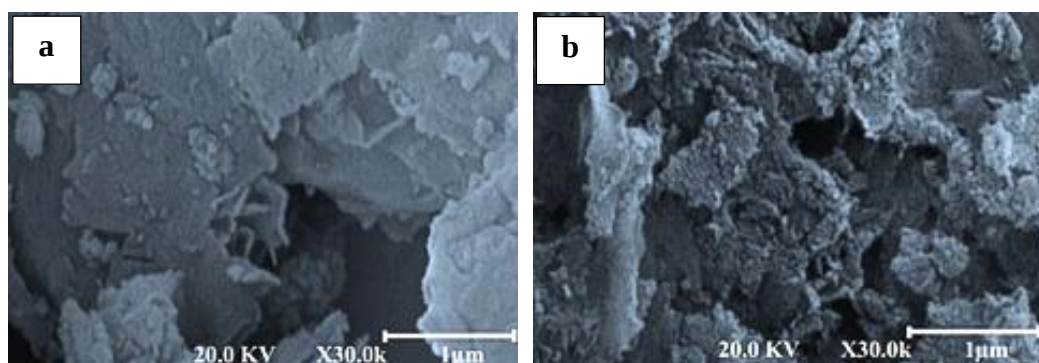
2.7.3. Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) merupakan metode analisis kualitatif yang memberikan informasi terkait dengan karakteristik topografi sampel, komposisi kimia penyusun sampel, morfologi ukuran dan bentuk partikel, serta struktur kristalografi dari suatu material organik maupun anorganik pada skala nanometer hingga mikrometer (μm). SEM merupakan jenis mikroskop elektron yang dapat menghasilkan gambar permukaan sampel beresolusi tinggi secara tiga dimensi melalui teknologi pemindaian elektron hingga pada perbesaran $300.000\times$ (Sayid *et al.*, 2020).

SEM memiliki prinsip kerja yang berfokus pada penggunaan berkas elektron berenergi tinggi (*electron beam*) untuk memindai permukaan sampel dan menghasilkan citra atau gambar dengan resolusi tinggi. Sampel yang telah dilapisi dengan lapisan konduktif ditempatkan di dalam ruang vakum, kemudian terkena berkas elektron yang dipancarkan oleh sumber elektron dari filamen yang terbuat dari tungsten. Berkas elektron selanjutnya dipindai secara raster pada permukaan spesimen oleh sistem pemindai yang terdiri dari lensa elektromagnetik. Ketika berkas elektron mengenai permukaan sampel, terjadi interaksi antara *beam* dengan

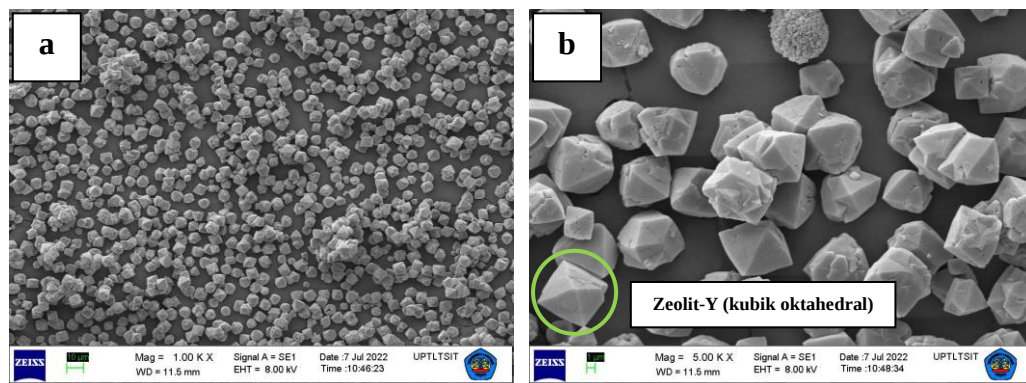
spesimen menghasilkan berbagai sinyal yang terdeteksi oleh detektor, diantaranya elektron hamburan balik (BSE) dan elektron sekunder (SE), diubah menjadi sinyal listrik. Sinyal listrik ini kemudian diproses dan ditampilkan sebagai gambar yang menunjukkan detail topografi dan morfologi permukaan sampel. Selain itu, sinar-X yang dipancarkan selama interaksi elektron dengan sampel dianalisis dengan spektrometri sinar-X dispersif energi (EDS) untuk memberikan informasi tentang komposisi elemen dari sampel. Dengan mengumpulkan dan menganalisis semua sinyal, SEM dapat menghasilkan gambar yang sangat detail dan informasi komposisi dari sampel (Rianto, 2022).

Hamidi *et al.* (2021) dan Yaghmaeiyan *et al.* (2022) melaporkan bahwa bentonit merupakan suatu lempung mineral filosilikat yang digambarkan sebagai agregat padat yang tersusun atas kristal berstruktur lembaran kasar tidak beraturan. Adanya komponen lain yang ditemukan pada permukaan bentonit seperti logam berat, material non-lempung, dan senyawa organik lain dapat memberikan morfologi permukaan yang kasar pada bentonit. Setelah bentonit diberi perlakuan asam, morfologi sampel mengalami perubahan yang signifikan, ditandai oleh berkembangnya pori-pori yang lebih kecil pada permukaan sampel dan terbentuknya kontur permukaan yang tidak terlalu bersudut tajam. Hal ini terjadi karena adanya penghilangan kontaminan seperti ion logam pada lapisan struktural bentonit. Gambar 9 menunjukkan mikrograf SEM dari bentonit alam dan bentonit yang diberikan perlakuan asam.



Gambar 9. Mikrograf SEM (a) bentonit alam dan (b) bentonit hasil aktivasi HCl pada perbesaran 30.000× (Hamidi *et al.*, 2021).

Morfologi permukaan zeolit-Y hasil sintesis berhasil dilaporkan oleh Simanjuntak *et al.* (2024), di mana zeolit-Y yang disintesis dari silika sekam padi dan aluminium foil *food grade* menunjukkan bentuk kubik oktahedral setelah di analisis menggunakan SEM pada perbesaran $1.000\times$ dan $5.000\times$. Mikrograf SEM zeolit-Y hasil sintesis dapat dilihat pada Gambar 10.



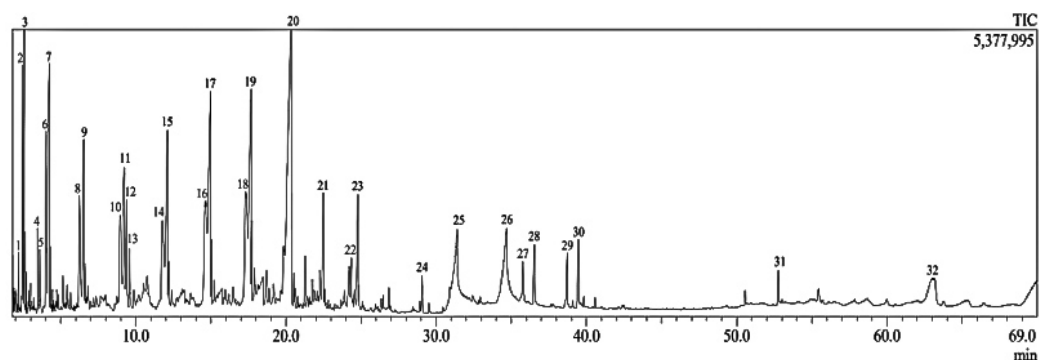
Gambar 10. Mikrograf SEM terhadap morfologi zeolit-Y pada perbesaran (a) $1.000\times$ dan (b) $5.000\times$ (Simanjuntak *et al.*, 2024).

2.8. Analisis Biohidrokarbon dalam *Bio-Crude Oil* (BCO)

Bio-crude oil (BCO) yang dihasilkan dari proses pirolisis biomassa dianalisis lebih lanjut untuk mengidentifikasi komponen yang terdapat dalam BCO menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS). GC-MS merupakan teknik analisis yang menggabungkan dua metode analisis senyawa yaitu kromatografi gas (GC) dan spektrometri massa (MS) untuk mengidentifikasi komponen senyawa dalam suatu sampel volatil secara kuantitatif dan kualitatif yang di interpretasikan dalam bentuk kromatogram. Kromatografi gas digunakan untuk mendeteksi senyawa yang mudah menguap dalam kondisi vakum tinggi dan tekanan rendah saat dipanaskan. Sementara, spektrometri massa berguna untuk menentukan rumus molekul, berat molekul, dan menghasilkan molekul bermuatan. GC-MS memiliki sensitivitas yang tinggi sehingga dapat memisahkan campuran bahan kimia dan menganalisisnya pada konsentrasi atau tingkat yang berbeda. Hasil analisis GC-MS memberikan informasi penting mengenai

komponen senyawa yang bersifat volatil, non-ionik dan stabil termalnya selain itu juga berat molekul yang relatif rendah (Indriani dkk., 2023).

Prinsip kerja GC-MS yaitu ketika sampel dalam bentuk cairan yang di injeksikan kemudian diuapkan di dalam injektor dan dibawa masuk ke kolom dengan gas pembawa. Senyawa volatil dipisahkan berdasarkan tekanan uapnya, interaksinya dengan fasa diam dalam kolom, dan suhu kolom. Analit yang terpisah terdeteksi serta diukur menggunakan detektor. Detektor yang umum digunakan adalah detektor ionisasi nyala atau spektrometri massa (MS). Detektor MS bekerja dengan mengubah molekul menjadi ion, memecahnya menjadi fragmen, dan mengukur ion berdasarkan rasio massa terhadap muatan (m/z). Hasil pengukuran yang berupa nilai m/z , waktu retensi, dan intensitas puncak yang menunjukkan komponen senyawa berbeda kemudian dibandingkan dengan basis data spektra massa, indeks retensi standar, dan dapat menggunakan platform atau perangkat lunak tambahan untuk mengidentifikasi senyawa secara akurat dan keseragaman seluruh set data (Ljujić *et al.*, 2024). Berikut merupakan salah satu contoh hasil analisis GC-MS dari pirolisis minyak kelapa sawit menggunakan zeolit-Y sebagai katalis yang disajikan dalam kromatogram pada Gambar 11.



Gambar 11. Kromatogram GC BCO dari hasil pirolisis minyak kelapa sawit menggunakan zeolit-Y (Simanjuntak *et al.*, 2024).

Berdasarkan pada data yang ditampilkan dari kromatogram terdapat 32 senyawa yang teridentifikasi terkandung dalam BCO, dengan komposisi hidrokarbon yang diperoleh merupakan yang tertinggi yaitu sebanyak 90,46%. Adapun dalam beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk menghasilkan BCO dari berbagai bahan baku dan katalis ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Berbagai penelitian yang telah dilakukan untuk menghasilkan BCO beserta komposisinya.

No.	Bahan Baku	Katalis	Komposisi BCO	Referensi
1.	Minyak kelapa sawit	Zeolit-Y	• Hidrokarbon 90,46% • Keton 0,60% • Ester 8,33% • Eter 0,61%	Simanjuntak <i>et al.</i> , 2024
2.	Minyak biji karet dan ampas tebu	Zeolit-Y	• Hidrokarbon 87,9% • Alkohol 2,30% • Keton 7,71% • Ester 1,27% • Asam 1,34%	Simanjuntak <i>et al.</i> , 2019)

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

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 institusi diantaranya karakterisasi XRF bentonit dilakukan di Universitas Negeri Padang (UNP), karakterisasi SEM bentonit dan zeolit-Y dilakukan di Unit Pelayanan Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (UPT LTSIT) Universitas Lampung, karakterisasi XRD bentonit dan zeolit-Y dilakukan di Laboratorium Kimia Instrumen Universitas Negeri Padang (UNP), dan analisis GC-MS BCO dilakukan di Laboratorium Kimia Organik Universitas Gajah Mada (UGM).

3.2. Alat dan Bahan

3.2.1. Alat-alat yang digunakan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya; wadah plastik, spatula, batang pengaduk, *spin bar*, gelas ukur 25 dan 50 mL, gelas kimia 500 mL, corong kaca 100 mL, corong pisah 250 mL, botol vial 10 mL, botol kaca 140 mL, mortar dan alu, cawan porselen 100 mL, gunting, ayakan mesh 300 nm, neraca analitik, *hot plate stirrer* tipe Thermo Scientific Cimarec⁺, autoklaf hidrotermal PTFE 100 mL, oven, *furnace* tipe Nabertherm Pre-heating Furnace C550, dan peralatan pirolisis. Karakterisasi dilakukan menggunakan instrumen *Scanning Electron*

Microscope (SEM) tipe ZEISS EVO MA 10, *X-Ray Diffraction* (XRD) tipe PANalytical XPert MPD, *X-Ray Fluorescence* (XRF) tipe PANalytical Epsilon 3, dan *Gas Chromatography-Mass Spectrophotometry* (GC-MS) tipe QP2010S SHIMADZU.

3.2.2. Bahan-bahan yang digunakan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya; NaOH_(p.a) Merck, HCl 1M, aluminium foil *food grade* (FGAF), akuades, minyak kelapa sawit curah, bentonit, pH indikator universal, kertas saring, lem *sealant*, dan kertas TBA.

3.3. Prosedur Kerja

Pada penelitian ini terdiri dari enam tahap utama, diantaranya; preparasi bentonit, modifikasi bentonit menjadi zeolit-Y, karakterisasi bentonit dan zeolit-Y hasil modifikasi, preparasi minyak kelapa sawit, uji aktivitas katalitik zeolit-Y hasil modifikasi pada pirolisis minyak kelapa sawit, dan analisis biohidrokarbon dalam BCO hasil pirolisis.

3.3.1. Karakterisasi bentonit

Karakterisasi bentonit dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari bentonit yang digunakan. Analisis XRF digunakan untuk mengidentifikasi unsur dan oksida utama di dalam sampel. Karakterisasi XRD digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristal dan amorf, serta persen kristalinitas. Analisis SEM digunakan untuk melihat morfologi permukaan sampel.

3.3.1.1. *X-Ray Fluorescence (XRF)*

Bentonit yang digunakan diperoleh dari toko komersial *online*. Sebelum digunakan, bentonit dianalisis menggunakan XRF. Alat XRF yang digunakan yaitu PANalytical Epsilon 3 yang dioperasikan dengan tegangan 30 kV dan arus 300 μ A, digunakan untuk mengidentifikasi unsur dan oksida utama serta persentase kadarnya di dalam sampel yang umumnya berupa elemen mineral. Karakterisasi XRF pada penelitian ini dilakukan di Universitas Negeri Padang (UNP).

3.3.1.2. *X-Ray Diffraction (XRD)*

Karakterisasi dengan XRD digunakan untuk menganalisis fasa kristal dan amorf terhadap struktur kristalografi bentonit. Data hasil XRD disajikan dalam bentuk difraktogram memberikan informasi mengenai struktur dan fasa sampel berdasarkan letak sudut 2θ . Pola difraktogram yang diperoleh selanjutnya dianalisis secara kualitatif menggunakan aplikasi Match! untuk mengidentifikasi fasa kristalin sampel berdasarkan data referensi. Karakterisasi XRD pada penelitian ini dilakukan di Universitas Negeri Padang (UNP) menggunakan alat XRD tipe PANalytical XPert MPD produksi Belanda, dengan tetap mengikuti prosedur yang berlaku di institusi tersebut. Pola XRD dihasilkan setelah pemindaian radiasi Cu-K α ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$) dengan energi 40 kV dan arus 30 mA. Pola direkam pada sudut 2θ dengan rentang 10-100°. Kondisi pengukuran menggunakan XRD secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 4.

3.3.1.3. *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Karakterisasi menggunakan SEM bertujuan untuk mengetahui morfologi permukaan sampel, bentuk, struktur, serta distribusi pori pada permukaan bahan dengan resolusi tinggi pada bentonit. Pada penelitian ini karakterisasi SEM dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (LTSIT)

Universitas Lampung, dengan tetap mengikuti prosedur yang berlaku di institusi tersebut. Alat SEM yang digunakan yaitu ZEISS EVO MA 10 produksi Jerman, yang dioperasikan pada 8 kV dengan tegangan percepatan elektron 20 kV. Sampel bentonit dipindai pada perbesaran 1.000x, 5.000x, 10.000x, 15.000x dan 25.000x untuk mendapatkan tampilan permukaan yang lebih baik.

3.3.2. Purifikasi bentonit

Bentonit yang telah dikarakterisasi menggunakan XRF, XRD, dan SEM kemudian dipurifikasi untuk melarutkan komponen yang dapat mengganggu proses pembentukan kerangka zeolit, seperti logam besi, sehingga dihasilkan bentonit yang lebih murni. Proses purifikasi bentonit dilakukan dengan merendam bentonit dalam larutan HCl 1M dengan perbandingan 1:5 antara bentonit dan larutan HCl, selama 24 jam sambil diaduk, guna melarutkan komponen yang tidak diinginkan. Setelah proses perendaman, bentonit dibilas dengan akuades hingga pH netral, lalu dikeringkan dalam oven selama 8 jam. Bentonit hasil purifikasi tersebut kemudian dikarakterisasi ulang menggunakan XRF, XRD, dan SEM.

3.3.3. Modifikasi bentonit menjadi zeolit-Y

Modifikasi bentonit menjadi zeolit-Y dilakukan secara hidrotermal, dengan melarutkan sebanyak 35,84 gram NaOH_(p.a) dalam 100 mL akuades. Kemudian FGAF yang telah dipotong kecil-kecil sebanyak 9,696 gram, dilarutkan dalam larutan NaOH sedikit demi sedikit sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer* hingga larut menghasilkan larutan koloid berwarna abu-abu. Selanjutnya, bentonit sebanyak 100 gram ditambahkan sedikit demi sedikit ke dalam larutan NaOH dan FGAF hingga semua komponen larut menghasilkan campuran homogen berwarna coklat. Campuran yang telah homogen, dimasukkan ke dalam autoklaf dan di *aging* selama 24 jam pada suhu ruang. Tahap ini berperan penting dalam menentukan kualitas kristal zeolit yang dihasilkan. Setelah proses *aging*, sampel dimasukkan ke dalam oven pada suhu 100°C selama 72, 96, dan 120 jam untuk

proses kristalisasi. Tahap kristalisasi ini bertujuan untuk membentuk partikel kristal yang stabil dalam kerangka zeolit. Sampel hasil kristalisasi kemudian dikeluarkan dari oven dan disaring hingga tidak tersisa cairan. Selanjutnya, sampel dikeringkan kembali dalam oven pada suhu 100°C selama 8 jam. Sampel yang telah kering digerus dan diayak dengan saringan mesh ukuran 300 nm. Diperoleh sampel dalam bentuk bubuk untuk kemudian dikalsinasi pada suhu 600°C selama 8 jam. Proses kalsinasi ini bertujuan untuk menghilangkan sisa pelarut dalam sampel dan mengoptimalkan pembentukan fasa kristalin. Hasil kalsinasi berupa sampel bubuk merupakan zeolit-Y yang selanjutnya dikarakterisasi menggunakan XRD dan SEM, serta dilakukan perbandingan dengan standar yang telah ditetapkan oleh *International Zeolite Association* (IZA).

3.3.4. Preparasi minyak kelapa sawit

Minyak kelapa sawit yang digunakan dalam penelitian ini merupakan minyak curah yang diperoleh dari toko kelontong di daerah Tanjung Karang, Bandar Lampung. Sebelum digunakan dalam proses pirolisis, minyak dibuat dalam beberapa variasi pra-perlakuan, yaitu tanpa pemanasan dan dengan pemanasan selama 10, 20, 30, dan 40 menit, terhitung saat minyak mulai mendidih. Proses pemanasan dibantu dengan penambahan tiga keping batu didih. Setelah dipanaskan, minyak didinginkan pada suhu ruang. Minyak kelapa sawit siap digunakan untuk tahap selanjutnya.

3.3.5. Uji aktivitas katalitik zeolit-Y hasil modifikasi bentonit pada pirolisis minyak kelapa sawit

Proses pirolisis berlangsung dalam reaktor yang telah dilengkapi dengan kondensor, pemanas, dan botol vial. Percobaan dilakukan dengan menggunakan volume minyak yang konstan yakni 200 mL minyak kelapa sawit curah, 10 gram katalis zeolit-Y hasil sintesis, dan 10 gram *heat exchanger*, yang dimasukkan ke dalam reaktor. Penambahan *heat exchanger* bertujuan untuk memastikan

penyebaran panas berlangsung merata, sehingga proses termal selama pirolisis dapat berjalan secara optimal. Proses pirolisis dilakukan selama 1 jam atau hingga tidak ada lagi tetesan. Produk hasil pirolisis yaitu BCO ditampung dalam botol kaca dan selanjutnya dilakukan pemisahan menggunakan corong pisah untuk memisahkan dua fasa yang terbentuk, yaitu fasa air pada lapisan bawah dan fasa organik pada lapisan atas. Fasa organik pada BCO selanjutnya dianalisis lebih lanjut.

3.3.6. Analisis biohidrokarbon dalam *Bio Crude Oil (BCO)* hasil pirolisis

BCO hasil pirolisis dianalisis untuk mengidentifikasi komponen kimia yang terkandung didalam sampel. Analisis biohidrokarbon dilakukan menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) tipe QP2010S SHIMADZU produksi Jepang, pada tekanan 12,9 kPa dengan laju aliran total 34,5 mL/menit. Suhu injektor yang digunakan adalah 300°C dengan mode split, suhu detektor 250°C, dan suhu kolom oven 40°C. Kondisi pengukuran menggunakan GC-MS secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 6.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Purifikasi bentonit berhasil dilakukan menggunakan HCl 1M, yang ditandai dengan penurunan kadar Fe_2O_3 pada hasil analisis XRF.
2. Zeolit-Y berhasil disintesis dari bentonit purifikasi dengan metode hidrotermal pada variasi waktu kristalisasi 72, 96, dan 120 jam.
3. Hasil karakterisasi menggunakan XRD menunjukkan bahwa waktu kristalisasi 96 jam menghasilkan fasa kristal zeolit-Y, sodalit, nephelin, dan fasa amorf, yang dikonfirmasi dengan hasil analisis SEM yang menunjukkan bentuk kristal kubik oktahedral khas zeolit-Y mulai terbentuk, namun masih didominasi oleh fasa sodalit dan amorf.
4. Pra-perlakuan pemanasan minyak kelapa sawit memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kualitas BCO yang dihasilkan.
5. Analisis menggunakan GC-MS menunjukkan bahwa BCO hasil pirolisis mengandung senyawa hidrokarbon, asam, keton, dan alkohol. Pada pra-perlakuan pemanasan selama 30 menit, BCO yang dihasilkan memiliki kandungan hidrokarbon tertinggi sebesar 68,76%.

5.2. Saran

Berdasarkan pada hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa hal yang dapat disarankan untuk penelitian selanjutnya yaitu:

1. Mengkaji lebih lanjut proses modifikasi zeolit-Y dari bentonit dengan menggunakan variasi rasio Si/Al lain dalam rentang 2-5.
2. Penerapan pra-perlakuan lain pada minyak kelapa sawit sebelum pirolisis perlu dipertimbangkan untuk meningkatkan kandungan hidrokarbon pada BCO.
3. BCO yang dihasilkan masih mengandung asam yang relatif tinggi, sehingga disarankan untuk melakukan distilasi bertingkat atau proses *upgrading* lanjutan untuk menghasilkan BCO dengan kualitas hidrokarbon yang lebih mendominasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aboelela, D., Saleh, H., Attia, A. M., Elhenawy, Y., Majozi, T., and Bassyouni, M. 2023. Recent Advances in Biomass Pyrolysis Processes for Bioenergy Production: Optimization of Operating Conditions. *Sustainability*. 15(14): 1–30.
- Afrizal, Y., Dewi, E., Mustain, D., Teknik, J., Program, K., Teknologi, S., Industri, K., Sriwijaya, N., Srijaya, J., Bukit, N., dan Palembang, B. 2022. Pengolahan *Crude Palm Oil* (CPO) Menjadi Minyak Sawit Merah (MSM) Menggunakan Filter Batuan Zeolit, Membran Keramik dan *Cartridge Filter*. *Jurnal Kinetika*. 13(03): 11–19.
- Agbendeh, Z. M., Gimba, C. E., Ande, S., and Ekanem, S. F. 2021. Synthesis and Characterization of Zeolite Y from Kankara Clay Using Alkaline Fusion Method. *Journal of Chemical Society of Nigeria*. 46(6): 1016 – 1031.
- Ali, A., Chiang, Y. W., and Santos, R. M. 2022. X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of The Fundamentals, Applications, and Research Directions. *Minerals*. 12(2): 1–25.
- Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., Mckay, G., Mackey, H., and Al-Ansari, T. 2022. A Review of Pyrolysis Technologies and Feedstock: A Blending Approach for Plastic and Biomass Towards Optimum Biochar Yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 167: 1–16.
- Andarini, N., Haryati, T., Suwardiyanto, S., and Sulistiyo, Y. A. 2022. Synthesis of Zeolite Y from Lapindo Mud with The Comparative Variation of The Weight of NaOH/Mud and Molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. *Indonesian Chimica Letters*. 1(1): 8–12.
- Arnelli, A., Fathoni, B. Y., Prastyo, T. I., Suseno, A., and Astuti, Y. 2018. Synthesis of Zeolite from Bagasse and Rice Husk Ashes as Surfactant Builder on Detergency Process: Variation of NaOH Concentration for Silica Isolation. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 21(3): 139–143.
- Aulia, S., Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., and Rilyanti, M. 2024. Transformation of Lampung Natural Zeolite into Zeolite-A by Aluminium Addition and Application as Catalyst for Biomass Pyrolysis. *Indonesian Journal of Energy*. 7(2): 124–140.
- Beims, R. F., Hu, Y., Shui, H., and Xu, C. 2020. Hydrothermal Liquefaction of Biomass to Fuels and Value-Added Chemicals: Products Applications and

- Challenges to Develop Large-scale Operations. *Biomass and Bioenergy*. 135: 1–14.
- Bello, M. O., Abdus-Salam, N., Adekola, F. A., Oyewumi-Musa, R. T., and Pal, U. 2024. Synthesis and Characterization of Zeolite Y From Agricultural and Municipal Wastes: A Waste Management Approach. *Waste Management Bulletin*. 2(2): 122–129.
- Berhe, M. T., Berhe, G. G., Cheru, M. S., and Weldehans, M. G. 2024. Characterization of Acid Activation of Bentonite Clay of Hadar, Afar, Ethiopia. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2024(1): 1–8.
- Cai, R., Pei, X., Pan, H., Wan, K., Chen, H., Zhang, Z., and Zhang, Y. 2020. Biomass Catalytic Pyrolysis over Zeolite Catalysts with an Emphasis on Porosity and Acidity: A State-of-the-art Review. *Energy and Fuels*. 34(10): 11771–11790.
- Calabrese, L., and Proverbio, E. 2019. A Brief Overview on The Anticorrosion Performances of Sol-gel Zeolite Coatings. *Coatings*. 9(6): 1–25.
- Chen, T., Gu, C., Ouyang, Y., Zhuang, L., Yao, Z., Zou, K., Wang, Y., Luo, Y., and Shu, X. 2022. Synthesis of High Hydrothermal Stability Beta Zeolite with Crosslinked Starch and Catalytic Performance in Catalytic Cracking Reaction. *Fuel*. 318: 1–41.
- Dabbawala, A. A., Vaithilingam, B. V., Mittal, H., Wahedi, Y. Al, Khan, S., Joseph, T., Singaravel, G., Morin, S., Berthod, M., and Alhassan, S. M. 2020. Synthesis and Catalytic Performance of Zeolite-Y Supported on Silicon Carbide In N-Heptane Cracking. *Applied Catalysis A: General*. 608: 1–38.
- Hums, E. 2017. Synthesis of Phase-Pure Zeolite Sodalite from Clear Solution Extracted from Coal Fly Ash. *Journal of Thermodynamics & Catalysis*. 08(02): 1–6.
- Eiad-ua, A., Amnaphiang, P., Asawaworarit, P., Houngkamhang, N., Chollacoop, N., and Fuji, M. 2018. *Zeolite P from Kaolin Via Hydrothermal Method*. 2010: 1–6.
- Evahelda, E. 2023. Pemanfaatan Limbah Tempurung Kelapa untuk Pembuatan Asap Cair Menggunakan Metode Pirolisis. *AGROMIX*. 14(2): 175–181.
- Fadillah, G., Fatimah, I., Sahroni, I., Musawwa, M. M., Mahlia, T. M. I., and Muraza, O. 2021. Recent Progress in Low-Cost Catalysts for Pyrolysis of Plastic Waste to Fuels. *Catalysts*. 11(7): 837.
- Faghihian, H., and Godazandeha, N. 2009. Synthesis of Nano Crystalline Zeolite Y from Bentonite. *Journal of Porous Materials*. 16(3): 331–335.
- Fatimah, S., Ragadhita, R., Husaeni, D. F. Al, and Nandiyanto, A. B. D. 2021. How to Calculate Crystallite Size from X-Ray Diffraction (XRD) using Scherrer Method. *ASEAN Journal of Science and Engineering*. 2(1): 65–76.
- Febriyanti, T. D., Simanjuntak, W., and Pandiangan, K. D. 2021. Pyrolytic Conversion of Palm Oil Into Liquid Fuel Using Protonated Zeolite-X Prepared from Rice

- Husk Silica and Aluminum Foil as Catalyst. *Journal of Physics: Conference Series*. 1751: 1–10.
- Foroutan, R., Mohammadi, R., Esmaeili, H., Mirzaee Bektashi, F., and Tamjidi, S. 2020. Transesterification of Waste Edible Oils to Biodiesel Using Calcium Oxide@Magnesium Oxide Nanocatalyst. *Waste Management*. 105: 373–383.
- Ginting, S. B., Putri, E., Miranda, T., Darni, Y., Utami, H., Wardono, H., Darmansyah, D., and Rustamaji, H. 2024. Synthesis of ZSM-5 from Natural Zeolite Lampung (ZAL) and Rice Husk by Seeding Method Using Microwaves. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*. 13(1): 10–20.
- Goon, D. E., Sheikh Abdul Kadir, S. H., Latip, N. A., Rahim, S. Ab., and Mazlan, M. 2019. Palm Oil in Lipid-based Formulations and Drug Delivery Systems. *Biomolecules*. 9(2): 64.
- Gunawan, M. L., Novita, T. H., Aprialdi, F., Aulia, D., Nanda, A. S. F., Rasrendra, C. B., Addarajah, Z., Mujahidin, D., and Kadja, G. T. M. 2023. Palm-oil Transformation Into Green and Clean Biofuels: Recent Advances in The Zeolite-based Catalytic Technologies. *Bioresource Technology Reports*. 23: 101546.
- Haliza, F. N., Sabrina, S. O., dan Fitriyah, S. N. L. 2023. Sintesis Zeolit Y dengan Menggunakan Metode Sol-gel. *Jurnal MIPA dan Pembelajarannya*. 3(7): 330–338.
- Hamidi, R., Khoshbin, R., and Karimzadeh, R. 2021. A New Approach for Synthesis of Well-crystallized Y Zeolite from Bentonite and Rice Husk Ash Used in Ni-Mo/Al₂O₃-Y Hybrid Nanocatalyst for Hydrocracking of Heavy Oil. *Advanced Powder Technology*. 32(2): 524–534.
- Han, L., Yan, X., Guo, L., Duan, Y., Wang, Z., Lu, T., Xu, J., Zhan, Y., and Wang, J. 2021. Ionothermal Synthesis of Triclinic SAPO-34 Zeolites. *Catalysts*. 11(5): 1–13.
- Hu, X., and Gholizadeh, M. 2019. Biomass Pyrolysis: A Review of The Process Development and Challenges from Initial Researches Up to The Commercialisation Stage. *Journal of Energy Chemistry*. 39: 109–143.
- Husain, F., dan Marzuki, I. 2021. Pengaruh Temperatur Penyimpanan Terhadap Mutu dan Kualitas Minyak Goreng Kelapa Sawit. *Serambi Engineering*. 6(4): 2270–2278.
- Indriani, S., Isdaryanti, I., Agustia, M., Poleuleng, A. B., Syahra, N. J., dan Prastiyo, Y. B. 2023. Analisis GC-MS (*Gas Chromatography-Mass Spectrometry*) Terhadap Batang Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jaq.). *Agroplatae: Jurnal Ilmiah Terapan Budidaya dan Pengelolaan Tanaman Pertanian dan Perkebunan*. 12(2): 147–155.
- Ismawati, R. 2018. Zeolite: Structure and Potential in Agriculture. *Jurnal Pena Sains*. 5(1): 1–8.
- IZA. 2017. Framework Type FAU. International Zeolite Association.

- Khaleque, A., Alam, M. M., Hoque, M., Mondal, S., Haider, J. Bin, Xu, B., Johir, M. A. H., Karmakar, A. K., Zhou, J. L., Ahmed, M. B., and Moni, M. A. 2020. Zeolite Synthesis from Low-cost Materials and Environmental Applications: A Review. *Environmental Advances*. 2: 1–24.
- Koohestani, F., Sadjadi, S., and Heravi, M. 2021. Composite of Bentonite and Cyclodextrin as An Efficient Catalyst for Promoting Chemical Transformations in Aqueous Media. *Scientific Reports*. 11(1): 1–10.
- Koshlak, H. 2023. Synthesis of Zeolites from Coal Fly Ash Using Alkaline Fusion and Its Applications in Removing Heavy Metals. *Materials*. 16(13): 1–20.
- Krisnandi, Y. K., Mahmuda, I., Rahayu, D. U. C., & Sihombing, R. 2018. Synthesis and Characterization of ZSM-5 Zeolite from Dealuminated and Fragmentated Bayat-Klaten Natural Zeolite. *Journal of Physics: Conference Series*. 1095: 1–6.
- Król, M. 2020. Natural vs. Synthetic Zeolites. *Crystals*. 10(7): 1–8.
- Kuncoro, E. P., Mitha Isnadina, D. R., Darmokoesoemo, H., Dzembarahmatiny, F., and Kusuma, H. S. 2018. Characterization and Isotherm Data for Adsorption of Cd^{2+} from Aqueous Solution by Adsorbent from Mixture of Bagasse-Bentonite. *Data in Brief*. 16: 354–360.
- Li, J., Gao, M., Yan, W., and Yu, J. 2023. Regulation of The Si/Al Ratios and Al Distributions of Zeolites and Their Impact on Properties. *Chemical Science*. 14(8): 1935–1959.
- Li, X., Curnow, O. J., Choi, J., and Yip, A. C. K. 2022. Recent Advances in The Imidazolium-based Ionic Liquid-templated Synthesis of Microporous Zeolites. *Materials Today Chemistry*. 26: 101133.
- Liu, J., Hou, Q., Ju, M., Ji, P., Sun, Q., and Li, W. 2020. Biomass Pyrolysis Technology by Catalytic Fast Pyrolysis, Catalytic Co-pyrolysis and Microwave-assisted Pyrolysis: A Review. *Catalysts*. 10(7): 1–26.
- Ljujić, J., Vujisić, L., Tešević, V., Sofrenić, I., Ivanović, S., Simić, K., and Anđelković, B. 2024. Critical Review of Selected Analytical Platforms for GC-MS Metabolomics Profiling-case Study: HS-SPME/GC-MS Analysis of Blackberry's Aroma. *Foods*. 13(8): 1–11.
- Machado, H., Cristino, A. F., Orišková, S., and Galhano dos Santos, R. 2022. Bio-oil: The Next-generation Source of Chemicals. *Reactions*. 3(1): 118–137.
- Maghfirah, A., Ilmi, M. M., Fajar, A. T. N., and Kadja, G. T. M. 2020. A Review on The Green Synthesis of Hierarchically Porous Zeolite. *Materials Today Chemistry*. 17: 1–21.
- Malik, Y. 2023. Akurasi dan Presisi Analisis Kadar Nikel (Ni) pada Sampel Nikel Laterit Menggunakan X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF). *Sains: Jurnal Kimia Dan Pendidikan Kimia*. 12(2): 87–94.

- Masoudian, S. K., Sadighi, S., and Abbasi, A. 2013. Synthesis and Characterization of High Aluminum Zeolite X from Technical Grade Materials. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*. 8(1): 54–60.
- Mishra, R. K., Chistie, S. M., Naika, S. U., and Mohanty, K. 2022. Catalytic Pyrolysis of Biomass Over Zeolites for Bio-oil and Chemical Production: A Review on Their Structure, Porosity and Acidity Co-relation. *Bioresource Technology*. 366: 128189.
- Moshoeshoe, M., Tabbiruka, M. S. N., and Obuseng, V. 2017. A Review of The Chemistry, Structure, Properties and Applications of Zeolites. *American Journal of Materials Science*. 7(5): 196–221.
- 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, M., Wahyuningsih, P., and Yusnawati, Y. 2023. Effectiveness of Hydrochloric Acid Activated Bentonite in Local Salt Purification. *Elkawnie*, 9(1): 71–80.
- Nawaz, S., Ahmad, M., Asif, S., Klemeš, J. J., Mubashir, M., Munir, M., Zafar, M., Bokhari, A., Mukhtar, A., Saqib, S., Khoo, K. S., and Show, P. L. 2022. Phyllosilicate Derived Catalysts for Efficient Conversion of Lignocellulosic Derived Biomass to Biodiesel: A Review. *Bioresource Technology*. 343: 126068.
- Ndé, H. S., Tamfuh, P. A., Clet, G., Vieillard, J., Mbognou, M. T., and Woumfo, E. D. 2019. Comparison of HCl and H₂SO₄ for The Acid Activation of A Cameroonian Smectite Soil Clay: Palm Oil Discolouration and Landfill Leachate Treatment. *Heliyon*. 5(12): 1–10.
- Neonufa, G. F., Pratiwi, M., Puspawiningtiyas, E., Purwadi, R., and Elizabeth, L. 2020. Biohydrocarbon Production for Jet Fuel from Palm Oil Derivative Products. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 823(1): 1–9.
- Oyedotun, T. D. T. 2018. X-Ray Fluorescence (XRF) in The Investigation of The Composition of Earth Materials: A Review and An Overview. *Geology, Ecology, and Landscapes*. 2(2): 148–154.
- Palacio Lozano, D. C., Lester, D. W., Town, J. S., McKenna, A. M., and Wills, M. 2024. Assessment of Accelerated Aging Effect of Bio-oil Fractions Utilizing Ultrahigh-resolution Mass Spectrometry and k-Means Clustering of van Krevelen Compositional Space. *Energy and Fuels*. 38(17): 16473–16489.
- 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 (JMES)*. 8(5): 1979–1802.
- Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Hadi, S., Ilim, I., and Amrulloh, H. 2021. Physical Characteristics and Utilization Of ZSM-5 Prepared from Rice Husk

- Silica and Aluminum Hydroxide as Catalyst for Transesterification of Ricinus Communis Oil. *Materials Research Express*. 8(6): 1–12.
- 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): 1–13.
- Pangesti, G. G., Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Sascori, S., and Rilyanti, M. 2021. Synthesis of Zeolite-Y from Rice Husk Silica and Food Grade Aluminum Foil Using Modified Hydrothermal Method. *Journal of Physics: Conference Series*. 1751: 1–9.
- Perez, F. M., Santori, G. F., Pompeo, F., and Nichio, N. N. 2022. Silica-resin-bentonite Nanocomposite and Its Application in Catalysis. *Minerals*. 12(12): 1–13.
- Pluangklang, C., and Rangsiwatananon, K. 2021. Facile Method by Bentonite Treated with Heat and Acid to Enhance Pesticide Adsorption. *Applied Sciences*. 11(11): 1–22.
- Rahman, M., Faruk, M. O., Islam, M. W., Akter, M., Saha, J. K., Ahmed, N., Sharmin, A., Hoque, Md. A., Afroze, M., Khan, M., Akhtar, U. S., and Hossain, M. M. 2024. Comparison of The Effect of Kaolin and Bentonite Clay (Raw, Acid-treated, and Metal-impregnated) on The Pyrolysis of Waste Tire. *ACS Omega*. 9(1): 474–485.
- Rahman, Z., Nawab, J., Sung, B. H., and Kim, S. C. 2018. A Critical Analysis of Bio-hydrocarbon Production in Bacteria: Current Challenges and Future Directions. *Energies*. 11(10): 1–14.
- Ramadhanti, Y. 2023. Peran Katalis Dalam Reaksi Kimia: Mekanisme dan Aplikasi. *Hexatech: Jurnal Ilmiah Teknik*. 2(2): 74–78.
- Rana, M. S., and Kim, S. 2024. Bentonite in Korea: A Resource and Research Focus for Biomedical and Cosmetic Industries. *Materials*. 17(9): 1–13.
- Rangel, M. do C., Mayer, F. M., Carvalho, M. da S., Saboia, G., and de Andrade, A. M. 2023. Selecting Catalysts for Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass. *Biomass*. 3(1): 31–63.
- Rezapoor, P., and Rahimpour, M. R. 2024. *Encyclopedia of Renewable Energy, Sustainability and the Environment*. Elsevier.
- Rianto, D. 2022. Scanning Electron Microscopy for Nanostructure Analysis of Hybrid Multilayer Coating. *Pillar of Physics*. 15(2): 119–128.
- Ringsmuth, A. K., Landsberg, M. J., and Hankamer, B. 2016. Can Photosynthesis Enable A Global Transition from Fossil Fuels to Solar Fuels, to Mitigate Climate Change and Fuel-supply Limitations?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 62: 134–163.

- Ruskandi, C., Siswanto, A., dan Widodo, R. 2020. Karakterisasi Fisik dan Kimiawi Bentonit untuk Membedakan Natural Sodium Bentonit dengan Sodium Bentonit Hasil Aktivasi. *Jurnal Polimesin*. 18(1): 53–60.
- Ruswanto, A., Dharmawati, N. D., Ngatirah, Widyasaputra, R., and Partha, I. B. B. 2024. The Quality of Palm Oil on Variations in Temperature and Duration of The Separation Process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1377(1): 1–6.
- Sanavada, K., Shah, M., Gandhi, D., Unnarkat, A., and Vaghasiya, P. 2023. A Systematic and Comprehensive Study of Eco-friendly Bentonite Clay Application in Esterification and Wastewater Treatment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*. 20: 100784.
- Santos, D. H., Rosa, L. P., Alves, C. R., Simão, L., Zaccaron, A., Arcaro, S., Montedo, O. R. K., and Raupp-Pereira, F. 2025. Using Brazilian Nepheline Syenite Waste as an Alternative Mineral Resource for Various Applications. *Minerals*. 15(6): 1-16.
- Saragih, V., Melaca, K. M., Darmawan, R., dan Hendrianie, N. 2018. Pra Desain Pabrik CPO (*Crude Palm Oil*) dan PKO (*Palm Kernel Oil*) dari Buah Kelapa Sawit. *Jurnal Teknik ITS*. 7(1): 2337–3520.
- Sayid, S. A., Dadan-Garba, A., Enenche, D. E., and Ikkyo, B. A. 2020. Scanning Electron Microscopy (SEM) of the Bug Eye and Sand Coral. *Microscopy Research*. 8(1): 1–7.
- Shafaghat, H., Lee, H. W., Tsang, Y. F., Oh, D., Jae, J., Jung, S.-C., Ko, C. H., Lam, S. S., and Park, Y.-K. 2019. In-situ and Ex-situ Catalytic Pyrolysis/Co-pyrolysis of Empty Fruit Bunches Using Mesostructured Aluminosilicate Catalysts. *Chemical Engineering Journal*. 366: 330–338.
- Shah, K. J., Yu, J., Zhang, T., and You, Z. 2023. Y-Type Zeolite Synthesized from an Illite Applied for Removal of Pb(II) and Cu(II) Ions from Aqueous Solution: Box-behnen Design and Kinetics. *Water*. 15(6): 1–18.
- Shattar, S. F. A., Zakaria, N. A., and Foo, K. Y. 2020. One Step Acid Activation of Bentonite Derived Adsorbent for The Effective Remediation of The New Generation of Industrial Pesticides. *Scientific Reports*. 10(1): 1–13.
- 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): 1–9.
- Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Sembiring, Z., and Simanjuntak, A. 2019. Liquid Fuel Production by Zeolite-A Catalyzed Pyrolysis of Mixed Cassava Solid Waste and Rubber Seed Oil. *Oriental Journal of Chemistry*. 35(1): 71–76.
- Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Febriyanti, T. D., Islami, A. P., Hadi, S., and Ilim, I. 2024. Catalytic Upgrading of Palm Oil Derived Bio-crude Oil for Bio-

- hydrocarbon Enrichment Using Protonated Zeolite-Y as Catalyst. *AIMS Energy*. 12(3): 600–616.
- Simon, A. H. 2018. *Handbook of Thin Film Deposition*. Elsevier.
- Tang, B., Sun, Z., Men, X., Dong, K., Wang, J., Kong, L., Bai, Y., and Guo, F. 2024. Synthesis of Porous Carbon/Zeolite Composites by Low-temperature Acid-alkaline Leaching from Coal Gasification Fine Slag for Adsorption of Dye Wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 12(3): 112819.
- Yaghmaeiyan, N., Mirzaei, M., and Delghavi, R. 2022. Montmorillonite Clay: Introduction and Evaluation of Its Applications in Different Organic Syntheses as Catalyst: A Review. *Results in Chemistry*. 4: 1–15.
- Yang, D., Liu, D., Huang, A., Lin, J., and Xu, L. 2021. Critical Transformation Pathways and Socio-environmental Benefits of Energy Substitution Using A LEAP Scenario Modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 135: 1–12.
- Yanti, R. N. 2021. Kandungan Kimia *Bio Crude Oil* Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Bahan Baku Bioenergi. *SENKIM: Seminar Nasional Karya Ilmiah Multidisiplin*. 1(1): 177–182.
- Yuliansyah, F., Hamidi, N., and Sasongko, M. N. 2024. Pyrolysis of Corn Cob Biomass Toward Gaseous Products on Small Capacity Reactor. *International Journal of Mechanical Engineering Technologies and Applications*. 5(1): 87–95.
- Zhang, D., Jin, T., Peng, J., Ma, J., Zhang, J., Tian, X., and Ding, M. 2023. In-situ Synthesis of Micro/Mesoporous HZSM-5 Zeolite for Catalytic Pyrolysis of Lignin to Produce Monocyclic Aromatics. *Fuel*. 334: 126588.
- Zulfiqar, U., Subhani, T., and Husain, S. W. 2016. Synthesis and Characterization of Silica Nanoparticles from Clay. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 4(1): 91–96.