

**KONVERSI BENTONIT MENJADI ZEOLIT-Y DAN APLIKASINYA
SEBAGAI KATALIS UNTUK PENGOLAHAN MINYAK KELAPA SAWIT
MENJADI BIOHIDROKARBON DENGAN METODE PIROLISIS**

(Skripsi)

Oleh

**ADITYA ANUGRAH SAHYANI
2117011094**



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

ABSTRAK

KONVERSI BENTONIT MENJADI ZEOLIT-Y DAN APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS UNTUK PENGOLAHAN MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI BIOHIDROKARBON DENGAN METODE PIROLISIS

Oleh

ADITYA ANUGRAH SAHYANI

Minyak kelapa sawit merupakan salah satu jenis biomassa yang berpotensi menghasilkan senyawa hidrokarbon melalui proses pirolisis. Namun, efisiensi dan selektivitas terhadap fraksi hidrokarbon masih perlu ditingkatkan. Salah satu metode untuk mengoptimalkan produksi hidrokarbon adalah melalui penggunaan katalis yang sesuai. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis zeolit-Y dari bentonit menggunakan metode hidrotermal, serta mengaplikasikannya sebagai katalis dalam proses pirolisis minyak kelapa sawit.

Bentonit yang digunakan dipurifikasi dengan HCl 1M sebelum disintesis menjadi zeolit-Y menggunakan metode hidrotermal dengan variasi waktu kristalisasi selama 3, 4, dan 5 hari kalsinasi suhu 600 °C. Karakterisasi awal dilakukan terhadap bentonit alam dan purifikasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk melihat komposisi, *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk identifikasi struktur kristalin, dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk melihat morfologi. Hasil sintesis zeolit-Y dari masing-masing variasi waktu kristalisasi selanjutnya dikarakterisasi kembali dengan XRD dan SEM. Sampel kristalisasi terbaik dikalsinasi pada suhu 500 °C, 700 °C, dan 800 °C, kemudian dikarakterisasi kembali menggunakan XRD. Sampel zeolit-Y diuji sebagai katalis dalam proses pirolisis *Bio Crude Oil* (BCO) dari minyak kelapa sawit. Produk pirolisis dianalisis menggunakan *Gas Chromatography – Mass Spectrometry* (GC-MS).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa (1) purifikasi bentonit berhasil menurunkan kadar Fe (2) zeolit-Y dengan kristalisasi selama 96 jam memiliki kristalinitas terbaik meskipun belum sepenuhnya murni, (3) suhu kalsinasi 700°C menghasilkan struktur kristal zeolit-Y paling tinggi, (4) penggunaan zeolit-Y sebagai katalis pada pirolisis BCO meningkatkan kandungan hidrokarbon hingga 78,22%, dengan kandungan asam 19,61% dan keton 2,17%.

Kata kunci: minyak kelapa sawit, bentonit, hidrotermal, zeolit-Y, kalsinasi, pirolisis, BCO, hidrokarbon,

ABSTRACT

CONVERSION OF BENTONITE INTO ZEOLITE-Y AND ITS APPLICATION AS A CATALYST FOR PYROLYSIS OF PALM OIL TO PROCEDURE BIOHYDROCARBONS

By

ADITYA ANUGRAH SAHYANI

Palm oil is a potential raw material for production of hydrocarbon through pyrolysis process. However, the efficiency and selectivity toward hydrocarbon fractions still need to be improved. One method to optimize hydrocarbon production is through the use of suitable catalysts. This study aims to synthesize zeolite-Y from bentonite using a hydrothermal method and to apply it as a catalyst in the pyrolysis of palm oil.

The bentonite used in this study was purified using 1M HCl before being synthesized into zeolite-Y through a hydrothermal method with variations in crystallization time of 3, 4, and 5 days, followed by calcination at 600 °C. Initial characterization of the raw and purified bentonite was conducted using X-Ray Fluorescence (XRF) to determine the composition, X-Ray Diffraction (XRD) for crystalline structure identification, and Scanning Electron Microscopy (SEM) to observe morphology. The synthesized zeolite-Y from each crystallization time variation was subsequently characterized again using XRD and SEM. The best crystallized sample was calcined at 500 °C, 700 °C, and 800 °C and re-characterized using XRD. The zeolite-Y samples were then tested as catalysts in the pyrolysis of Bio Crude Oil (BCO) derived from palm oil. The pyrolysis products were analyzed using Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS).

The results showed that (1) the bentonite purification process successfully reduced the Fe content, (2) zeolite-Y synthesized with 96 hours of crystallization exhibited the best crystallinity, although it was not yet fully pure, (3) a calcination temperature of 700 °C produced the highest zeolite-Y crystal structure, and (4) the use of zeolite-Y as a catalyst in BCO pyrolysis increased the hydrocarbon content to 78.22%, with acid content at 19.61% and ketone content at 2.17%.

Keywords: palm oil, bentonite, hydrothermal, zeolite-Y, calcination, pyrolysis, BCO, hydrocarbons

**KONVERSI BENTONIT MENJADI ZEOLIT-Y DAN APLIKASINYA
SEBAGAI KATALIS UNTUK PENGOLAHAN MINYAK KELAPA SAWIT
MENJADI BIOHIDROKARBON DENGAN METODE PIROLISIS**

(Skripsi)

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

Pada

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



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

Judul : KONVERSI BENTONIT MENJADI ZEOLIT-Y DAN
APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS UNTUK
PENGOLAHAN MINYAK KELAPA SAWIT
MENJADI BIOHIDROKARBON DENGAN METODE
PIROLISIS

Nama : Aditya Anugrah Sahyani

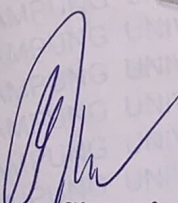
NPM : 2117011094

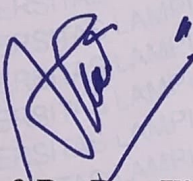
Program Studi : Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

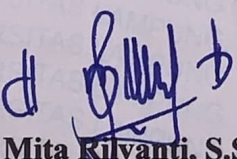


1. Komisi Pembimbing


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


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

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung


Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si
NIP. 19720530200003200

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Wasinton Simanjuntak, M.Sc., Ph.D.

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

Penguji

Bukan Pembimbing : Prof. Dr. Sutopo Hadi, S.Si, M.Sc.

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Penegttahuan Alam

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

NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 26 Juni 2025

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan dibawah ini,

Nama : Aditya Anugrah Sahyani
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117011094
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

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

Bandar Lampung, 26 Juni 2025
g menyatakan,



Aditya Anugrah Sahyani
NPM. 2117011094

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Penulis yang bernama lengkap Aditya Anugrah Sahyani lahir di Tanjung Karang, pada tanggal 26 Juni 2002. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Mulyani dan Ibu Sri Handayani.

Penulis memulai pendidikan di PAUD Raudhatul Jinan pada tahun 2006, kemudian dilanjutkan ke Sekolah Dasar Negeri 1 Langkapura pada tahun 2007 dan lulus pada tahun 2013. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Pertama Negeri 26 Bandar Lampung pada tahun 2013 dan lulus pada tahun 2016. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Kejuruan - Sekolah Menengah Teknologi Industri dan lulus pada tahun 2020.

Pada tahun 2021, penulis diterima sebagai mahasiswa baru Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam organisasi, sebagai kader muda dan anggota inti Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) pada tahun 2021 dan 2022. Pada tahun 2022-2023, penulis menjabat sebagai anggota Sosial Masyarakat (SOSMAS) HIMAKI.

Penulis dikenal aktif dan bertanggung jawab dalam setiap kegiatan organisasi yang diikuti, serta tetap menunjukkan komitmen tinggi dalam bidang akademik. Penulis melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Cv Wira Bhumi Segara dari bulan Januari hingga Februari 2024.

Setelah melaksanakan PKL, penulis mengikuti program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) riset dengan judul “Konversi Bentonit Menjadi Zeolit-X dan Aplikasinya Sebagai Katalis untuk Pengolahan *Crude Palm Oil* (CPO) Menjadi Biohidrokarbon dengan Metode Pirolisis” pada tahun 2024. Selain itu, penulis juga pernah menjadi Asisten Praktikum Kimia Fisik I dan Kimia Fisik II untuk mahasiswa angkatan 2023 di Jurusan Kimia.

Penulis menyelesaikan penelitian di Laboratorium Polimer dan Anorganik/Fisik dengan judul " *Konversi Bentonit Menjadi Zeolit-Y dan Aplikasinya sebagai Katalis untuk Pengolahan Minyak Kelapa Sawit Menjadi Biohidrokarbon dengan Metode Pirolisis* " pada tahun 2025.

MOTTO

“ Tidak ada kesulitan yang tidak ada ujungnya. Sesudah sulit pasti akan ada kebahagiaan. 'Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan ”
(QS. Al Insyirah: 5-6)

" Pantang dalam menyerah, pantang dalam berpatah arang. Tidak ada kata gagal untuk orang yang enggan berhasil. Dan janganlah kamu berputus asa dari rahmat Allah. Sesungguhnya tiada berputus dari rahmat Allah melainkan orang orang yang kufur "
(QS. Yusuf: 87)

“ Kamu tidak bisa mengulang bagian atau kembali dan mengubah jalanmu. Hidupmu ditentukan oleh karaktermu dan keputusan yang kamu ambil saat ini “
(Jackie Chan)

“ Hidup gak perlu dibuat ribet jalanin sesuai hati nurani dan tidak melebihi batas diri ”
(Aditya Anugrah Sahyani)



Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, karunia, hidayah, serta petunjuk-Nya. Kupersembahkan karya ini sebagai bentuk cinta dan tanggung jawabku kepada:

Kedua Orang Tua Tercinta,
Ayahanda Drs. Mulyani dan Ibunda Sri Handayani yang telah membimbing dari kecil hingga menyelesaikan studi sarjana ini, yang telah memberikan semangat, dukungan, dan selalu mendoakanku tanpa henti.

Keluarga Tersayang,
Krisna Indrawan Sahyani dan Rajiev Arie Sahyani yang selalu mendoakan dan memberiku semangat.

Almarhum dan Almarhumah
Kakek dan Nenek tercinta yang telah lebih dahulu berpulang ke rahmatullah, yang doa dan cintanya tetap hidup dalam ingatan dan langkahku. Meski raganya telah tiada, nilai-nilai, kasih sayang, dan teladan hidup mereka senantiasa menjadi bagian dari perjalanan ini. Semoga Allah SWT melapangkan alam kuburnya, mengampuni segala khilafnya, serta menempatkan mereka di tempat terbaik di sisi-Nya. Aamiin Ya Rabbal 'Alamiin.

Pembimbing Penelitianku, Prof. Wasinton Simanjuntak, M.Sc., Ph.D. dan Prof. Dr. Dra. Ilim, M.S. yang selalu sabar dalam membimbing.

Bapak/Ibu Dosen Jurusan Kimia, yang telah membimbing, memberi ilmu, dan motivasi kepada penulis selama menjalankan studi ini.

Para teman dan sahabat-sahabat, yang telah memberikan motivasi dan semangat.

**Almamater Tercinta
Universitas Lampung**

SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Konversi Bentonit Menjadi Zeolit-Y dan Aplikasinya sebagai Katalis untuk Pengolahan Minyak Kelapa Sawit Menjadi Biohidrokarbon dengan Metode Pirolisis**”. Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada baginda Rasulullah Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga dan para sahabat serta umatnya di akhir zaman. Semoga di yaumil akhir kelak mendapatkan syafa’atnya. Aamiin.

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

1. Prof. Wasinton Simanjuntak, M.Sc., Ph.D. selaku dosen Pembimbing Pertama penelitian atas segala bimbingan, bantuan, nasehat, kesabaran, saran, dan segala kebaikan yang telah diberikan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
2. Prof. Dr. Dra. Ilim, M.S. selaku Pembimbing Kedua penelitian atas segala bimbingan, masukan, dan saran sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
3. Prof. Dr. Sutopo Hadi, S.Si, M.Sc. selaku Pembahas/Penguji penelitian atas segala saran, kritik, inspirasi, dan memberikan masukan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
4. Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Pembimbing Akademik dan selaku Dekan FMIPA Unila beserta jajaran FMIPA lainnya. atas segala saran dan bantuan selama menjalani masa-masa perkuliahan hingga selesai

5. Ibu Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
6. Bapak dan Ibu dosen jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung atas seluruh dedikasi dan ilmu yang diberikan kepada penulis selama perkuliahan.
7. Bapakku, Drs. Mulyani, adalah sosok ayah yang penuh tanggung jawab dan ketulusan. Dalam kesederhanaannya, beliau menjadi panutan hidup dengan kerja keras dan keteguhan hati. Setiap langkahku tak lepas dari doa dan dukungan beliau yang diam-diam namun nyata terasa. Terima kasih, Ayah, atas kasih sayang dan pengorbanan yang tak pernah terucap namun selalu kurasakan. Semoga Allah senantiasa menjaga dan memberkahi Ayah dalam setiap langkah. Aamiin.
8. Ibunda Sri Handayani, sosok perempuan tangguh dengan jiwa penuh kasih dan kesabaran yang meneduhkan. Sejak dulu, beliau tak pernah lelah berjuang demi masa depanku. Peluhnya adalah bukti cinta yang tak pernah meminta balas, dan setiap nasihatnya adalah pelita saat langkahku mulai goyah. Di balik kelembutannya, tersimpan kekuatan luar biasa yang selalu menguatkan dalam diam. Terima kasih, Ibu, atas segalanya. Doaku tiada henti agar Allah membalas semua ketulusanmu dengan rahmat dan surganya. *Aamiin Ya Rabb*.
9. Kakakku tercinta Khrisna Indrawan Sahyani dan adikku Rajiev Arie Sahyani. Terima kasih atas semangat yang telah diberikan, perhatian yang tak pernah lelah, serta dukungan yang selalu hadir bahkan tanpa diminta.
10. Almarhum Kakek Djamsari, Kakek Prawoto, Almarhumah nenek yang menjadikan penulis menjadi sosok yang kuat hingga mencapai titik ini.
11. Saudaraku, terimakasih untuk segala nasihat dan semangat yang telah diberikan.
12. *Pyrolisis Group* 21, Desrita Pratiwi, Khairi Hayad Febriana, dan Tyas Nurfitria, penulis ucapkan terima kasih atas kebersamaan, kerja sama, serta dukungan yang diberikan selama proses penelitian hingga penyelesaian skripsi ini. Terima kasih atas kerja keras yang telah terjalin dalam tim, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan lancar.

13. KIW 21 Adryan Daffa Dzulfikar , Ayu Fortune Lisa Hutabarat, Azizah Rosihana Putri, Bella Agustin, Erwanda Lili Utari, Hanna Lutfia Maghfiroh, Melissaputri dan Nurul Natasha Berliani selaku teman penelitian penulis yang telah membantu dan memberikan hiburan dengan tingkah lucu yang ditunjukkan.
14. Alif Zidane Nugraha, Misbakhul Anam, Harry Firmada, Sayyid Amanullah Gani selaku teman laki-laki seperjuangan kebersamaan dan solidaritas kalian menjadi bagian penting dalam perjalanan ini.
15. Kak Qori, Kak Gege, dan Kak Rekia Enrik yang dengan kesabaran dan kesediaannya telah memberi arahan, pengalaman, serta ilmu kepada penulis dalam memahami penelitian ini hingga dapat diselesaikan dengan baik.
16. Adik-adik MBKM Maula Rayyanie, Pinkan Aling, Ester Wanitri, Giovani Ramadhan, Garneta Heppy, dan Muthiara Wamiga serta adik-adik Polimer 22 lainnya telah bekerja sama mengerjakan penelitian MBKM, sukses, dan semangat selalu.
17. Teman-teman seperjuangan Kimia angkatan 2021, khususnya kelas A. Terimakasih atas kebersamaan dan kesempatan yang telah diberikan kepada penulis selama masa studi ini.
18. Teman-teman Himaki 2022 dan 2023 khususnya SOSMAS yang telah memberikan penulis pengalaman serta pembelajaran berharga yang telah penulis peroleh selama menjalani kepengurusan bersama.
19. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih telah memberikan bantuan, dukungan, dan pengalaman kepada penulis.

Demikian yang dapat penulis sampaikan, penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini belum sempurna dan masih terdapat kekurangan serta kesalahan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dari pembaca agar karya ini dapat diperbaiki dan dikembangkan lebih baik. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis maupun bagi pembaca.

Bandar Lampung, 19 Juni 2025

Penulis

Aditya Anugrah Sahyani

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR TABEL	iii
--------------------	-----

DAFTAR GAMBAR	v
---------------------	---

I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	4
1.3. Manfaat Penelitian	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Biohidrokarbon	6
2.2. Pirolisis.....	7
2.2.1. Pengertian pirolisis.....	7
2.2.2. Jenis-jenis pirolisis	8
2.2.3. Jenis jenis reaktor pirolisis	9
2.3. Katalis	18
2.4. Zeolit-Y	20
2.5. Bentonit.....	22
2.5.1. Purifikasi bentonit	23
2.6. Metode Hidrotermal Untuk Sintesis Zeolit	24
2.7. Karakterisasi Bentonit, Zeolit dan Analisis BCO	25
2.7.1. <i>X-Ray Fluoresence</i> (XRF)	25
2.7.2. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	26
2.7.3. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	29
2.7.4. <i>Gas Chromatography – Mass Spectrometry</i> (GC-MS).....	31
III. METODE PERCOBAAN.....	34
3.1. Waktu dan Tempat.....	34
3.2. Alat dan Bahan	34
3.3. Prosedur Penelitian.....	35
3.2.1. Analisis bentonit sebelum purifikasi.....	35
3.2.2. Purifikasi bentonit	35
3.2.3. Sintesis katalis zeolit-Y	36
3.2.4. Pembuatan biohidrokarbon dengan metode pirolisis	37
3.2.5. Karakterisasi biohidrokarbon	37

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1. Pengantar.....	39
4.2. Karakterisasi Bentonit Alam	39
4.3. Purifikasi Bentonit dan Karakterisasi Bentonit.....	43
4.4. Sintesis dan Karakterisasi Zeolit-Y.....	47
4.5. Uji Aktivitas Zeolit-Y sebagai Katalis dan Karakterisasi Produk Pirolisis.....	56
V. KESIMPULAN DAN SARAN	63
5.1. Kesimpulan	63
5.2. Saran.....	64
DAFTAR PUSTAKA.....	65
LAMPIRAN.....	73

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi dari bentonit.	26
2. Komposisi kimia dari BCO yang diperoleh dari pirolisis minyak kelapa sawit tanpa penggunaan katalis.....	32
3. Data hasil analisis bentonit dengan XRF.	40
4. Data hasil analisis XRF bentonit purifikasi.	44
5. Data fasa kristalin sampel yang disintesis dengan waktu kristalisasi yang berbeda.	48
6. Data fasa kristalin sampel tanpa kalsinasi dan dikalsinasi dengan suhu yang berbeda.	51
7. Perbandingan data XRD standar IZA zeolit-Y dan zeolit-Y hasil sintesis variasi suhu kalsinasi tanpa, 500, 600, 700, dan 800 °C	54
8. Perbandingan data XRD standar IZA sodalit dan zeolit-Y hasil sintesis variasi suhu kalsinasi tanpa, 500, 600, 700, dan 800 °C	55
9. Perbandingan data XRD standar IZA nefelin dan zeolit-Y hasil sintesis variasi suhu kalsinasi tanpa, 500, 600, 700, dan 800 °C	55
10. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan sampel katalis zeolit-Y tanpa kalsinasi	57
11. Komposisi relatif hasil pirolisis BCO dari minyak kelapa sawit dengan berbagai sampel katalis.	62
12. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan katalis sampel zeolit-Y 500 °C.....	78
13. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan katalis zeolit-Y 600 °C.....	79

14. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan katalis zeolit-Y 700 °C.....	80
15. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan katalis zeolit-Y 800 °C.....	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Skema <i>bubbling fluidized bed reactor</i>	10
2. Skema <i>Circulating Fluidized Bed reactor</i>	12
3. Skema <i>dual fluidized bed reactor</i>	13
4. Skema <i>rotating cone pyrolyzer</i>	15
5. Skema <i>ablative pyrolysis</i>	16
6. Skema <i>twin-screw reactor</i>	17
7. Skema <i>fixed bed pyrolysis</i>	18
8. Struktur zeolit-Y/X.....	21
9. Difraktogram XRD untuk bentonit alam, dan perendaman dengan HCl (M= montmorillonit, I= illite, Q=kuarsa, O= opal).	27
10. Pola XRD dari zeolit-Y	28
11. Difraktogram zeolit-Y/X standar	28
12. Mikrograf bentonit (a) alam, (b) perendaman HCl dan (c) aglomerasi setelah perendaman HCl	30
13. Mikrograf zeolit-Y yang disintesis dengan perbesaran: (a) 1000x dan (b) 5000x	30
14. Kromatogram GC BCO yang diperoleh dari hasil pirolisis minyak kelapa sawit tanpa penggunaan katalis	32
15. Skema metode pirolisis	37

16. Mikrograf SEM bentonit alam dengan perbesaran yang berbeda (a) 1.000 x, (b) 5.000, (c) 10.000, dan (d) 15.000 x.	41
17. Difraktogram XRD bentonit alam.....	42
18. Komposisi fasa bentonit alam.	42
19. Mikrograf SEM bentonit hasil purifikasi dengan perbesaran yang berbeda (a) 1.000 x, (b) 5.000, (c) 10.000, dan (d) 15.000 x.	45
20. Difraktogram XRD bentonit purifikasi.	46
21. Komposisi fasa bentonit purifikasi.	46
22. Komposisi fasa zeolit-Y kristalisasi (a) 3 hari, (b) 4 hari, dan (c) 5 hari.	48
23. Perbandingan difraktogram zeolit-Y (a) zeolit-Y standar IZA, (b) sodalit standar IZA, (c) nefelin standar IZA, (d) Zeolit-Y sintesis kristalisasi 3 hari, (e) 4 hari, dan (f) 5 hari.....	49
24. Mikrograf SEM sampel kristalisasi 4 hari kalsinasi suhu 600 °C dengan perbesaran yang berbeda (a) 1.000, (b) 5.000, (c) 10.000, dan (d) 15.000 x... ..	50
25. Komposisi fasa zeolit-Y kristalisasi 4 hari tanpa kalsinasi	51
26. Komposisi fasa sampel kristalisasi 4 hari dengan kalsinasi suhu (a) 500, (b) 600, (c) 700, dan (d) 800 °C.	52
27. Perbandingan difraktogram zeolit-Y (a) zeolit-Y standar IZA, (b) sodalit standar IZA, (c) nefelin standar IZA, (d) Zeolit-Y sintesis kristalisasi 4 hari tanpa kalsinasi, (e) 500, (f) 600, (g) 700, dan (h) 800 °C.....	53
28. Kromatogram BCO minyak kelapa sawit dengan sampel katalis zeolit-Y tanpa kalsinasi.	56
29. Komposisi relatif BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan penambahan sampel katalis zeolit-Y tanpa kalsinasi	58
30. Kromatogram GC BCO hasil pirolisis dengan sampel katalis zeolit-Y kalsinasi suhu (a) 500, (b) 600, (c) 700, dan (d) 800 °C.	60
31. Komposisi relatif BCO hasil pirolisis dengan sampel katalis zeolit-Y kalsinasi suhu (a) 500, (b) 600, (c) 700, dan (d) 800 °C.	61
32. Purifikasi bentonit (a) bentonit alam (b) perendaman bentonit dengan HCl 1M, dan (c) bentonit hasil purifikasi.....	76

33. Hasil sintesis zeolit-Y (a) larutan natrium aluminat, (b) prekursor zeolit-Y, (c) kristalisasi prekursor zeolit-Y, dan (d) sampel katalis zeolit-Y. 76
34. Sampel Katalis zeolit-Y (a) tanpa kalsinasi, (b) kalsinasi suhu 500, (c) 600, (c) 700, dan (c) 800°C..... 77
35. Hasil pirolisis BCO hasil menggunakan katalis zeolit-Y kristalisasi 4 hari (a) tanpa kalsinasi, (b) kalsinasi suhu 500, (c) 600, (d) 700, dan (e) 800 °C..... 77

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Bahan bakar fosil merupakan sumber energi yang paling banyak digunakan diseluruh penjuru dunia dalam kegiatan sehari-hari hingga sekarang. Sumber energi ini dapat habis sewaktu-waktu karena tidak dapat diperbarui, dalam arti membutuhkan waktu ribuan bahkan jutaan tahun untuk terbentuk di alam. Untuk mengatasi masalah tersebut, upaya yang terus dilakukan adalah mengurangi penggunaan bahan bakar fosil tersebut dengan mengembangkan Energi Baru Terbarukan (EBT) sebagai bahan pengganti (alternatif). Berbagai jenis EBT terus dikembangkan dan salah satunya adalah biohidrokarbon.

Biohidrokarbon menjadi salah satu bahan bakar terbarukan yang dapat diproduksi melalui deoksigenasi katalitik asam lemak, menghasilkan komposisi seperti bensin, minyak tanah, dan fraksi diesel yang berasal dari minyak bumi (Siregar *et al.*, 2023). Biohidrokarbon dapat dibuat menggunakan teknik pirolisis. Pirolisis memanfaatkan teknik berupa proses dekomposisi termal senyawa organik menjadi senyawa yang lebih sederhana pada kondisi tanpa udara atau adanya udara dalam jumlah yang terbatas. Produk yang dihasilkan dari proses ini meliputi padat (arang), gas dan cair (*bio-oil*) (Norouzi *et al.*, 2021). Dalam konversi biomassa menggunakan metode pirolisis produk cair yang dihasilkan secara umum dikenal sebagai *Bio Crude Oil* (BCO) yang mengandung campuran beragam senyawa organik, seperti senyawa hidrokarbon (biohidrokarbon) dengan panjang rantai karbon yang beragam yang terdiri dari hidrokarbon C_5 - C_{12} , dimana karakteristiknya yang mirip dengan bensin yang berasal dari fosil. Tidak hanya biohidrokarbon senyawa organik yang muncul dari proses pirolisis antara lain

alkana, alkena, alkuna. ester, fenol ataupun alkohol. (Simanjuntak *et al.*, 2021). Pirolisis menawarkan solusi menjanjikan dalam mengatasi masalah limbah, terutama biomassa, dengan mengubahnya menjadi produk bernilai seperti gas, *bio-oil*, dan arang. Proses ini efektif mengurangi volume limbah, mengurangi potensi emisi gas rumah kaca, dapat diterapkan untuk mengolah semua jenis biomassa, prosesnya cepat, peralatan yang sederhana, dan tidak membutuhkan reaktan lain (Jamri *et al.*, 2020). Namun, pirolisis juga memiliki beberapa tantangan seperti biaya investasi yang tinggi, kompleksitas teknologi, dan kualitas produk yang bervariasi. Selain itu, efisiensi energi dan potensi dampak lingkungan dari senyawa organik volatil yang dihasilkan perlu terus ditingkatkan (Chen *et al.*, 2021). Meskipun demikian, dengan pengembangan teknologi yang berkelanjutan, pirolisis berpotensi menjadi kunci dalam mencapai pengelolaan limbah yang lebih berkelanjutan dan produksi energi alternatif. Minyak kelapa sawit menjadi salah satu biomassa yang dapat diolah dengan pirolisis. Namun pada proses pirolisis ini tidak dapat hanya menggunakan bahan baku saja dalam pembuatan biohidrokarbon, namun membutuhkan katalis yang sesuai dimana tidak hanya berperan menurunkan suhu ataupun mempercepat laju reaksi pirolisis tetapi juga mampu memacu reaksi pelepasan oksigen (deokisgenasi) sehingga meningkatkan kandungan biohidrokarbon (Setyaningsih *et al.*, 2022).

Meningkatnya kesadaran akan pentingnya lingkungan mendorong pengembangan teknologi pengolahan limbah yang lebih ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi pirolisis sebagai salah satu solusi pengelolaan biomassa minyak kelapa sawit dengan menggunakan zeolit-Y sebagai katalis. Minyak kelapa sawit dipilih dikarenakan dari data Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia (GAPKI) 2024 mencatat produksi minyak kepala sawit pada tahun 2023 mencapai 50,07 juta ton pada tahun 2023 atau naik dari tahun 2022 sebesar 46,73 juta ton, sedangkan untuk konsumsi dalam negeri menunjukkan penggunaan minyak kepala sawit masih dalam 23,13 juta ton. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan minyak kepala sawit di Indonesia sangat melimpah, namun pemanfaatannya masih sangat jarang dilakukan modifikasi dan penggunaan kepala sawit hanya sebatas sebagai minyak goreng saja ataupun

hanya sebagai bahan ekspor ke luar negeri, sehingga sangat disayangkan jika kelebihan dari konsumsi minyak kepala sawit dalam negeri hanya diekspor diluar negeri yang seharusnya dapat menjadi nilai tambah. Pemilihan zeolit-Y sebagai katalis dalam proses pirolisis minyak kelapa sawit didasarkan pada beberapa keunggulannya, yaitu; struktur kristal yang teratur dengan luas permukaan yang besar, sifat asam yang kuat untuk memecah ikatan kimia, serta stabilitas termal yang tinggi. Selain itu, zeolit-Y juga bersifat fleksibel sehingga dapat dimodifikasi untuk meningkatkan selektivitas terhadap produk yang diinginkan (Wang *et al.*, 2020). Zeolit-Y dapat disintesis dengan berbagai bahan baku menggunakan metode hidrotermal, antara lain *coal fly ash* (Ren *et al.*, 2020), kaolin (Gandhi *et al.*, 2021), sekam padi dan alumunium foil *food grade* (Pangesti *et al.*, 2021), bentonite (Hamidi *et al.*, 2021) dan diatomite (Liu *et al.*, 2024).

Bentonit merupakan pilihan yang ideal sebagai bahan baku utama dalam sintesis zeolit-Y karena kandungan silika dan alumina yang tinggi, struktur lapisannya yang fleksibel, dan ketersediaannya yang melimpah serta biaya yang relatif murah. Struktur lapisannya yang unik memungkinkan terjadinya substitusi ion dan pembentukan struktur kristal zeolit yang baru. Selain itu, sifat kation tukar yang tinggi pada bentonit memudahkan dalam mengontrol sifat-sifat zeolit yang dihasilkan. Dengan demikian, bentonit menjadi bahan dasar yang sangat baik untuk menghasilkan zeolit-Y dengan kualitas tinggi dan sesuai dengan berbagai aplikasi (Abukhadra *et al.*, 2020).

Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Faghihian and Godazandeha, 2009) katalis zeolit-Y berhasil disintesis dari bentonit melalui perlakuan aktivasi dengan natrium hidroksida dan proses kristalisasi hidrotermal dengan waktu penuaan 20 jam, namun dalam sintesis tersebut terjadi persaingan yang signifikan antara pembentukan zeolit-P dan Y. Hal ini juga dikonfirmasi oleh (Hamidi *et al.*, 2021) yang telah mensintesis zeolit-Y dari bentonit dan abu sekam padi sebagai sumber silika menggunakan metode hidrotermal menggunakan waktu penuaan 24 jam dengan hasil yang masih banyak terbentuk zeolit-P. Dari kedua penelitian tersebut menyatakan bahwa waktu penuaan memegang peranan penting dalam

pembentukan zeolit-Y yang dihasilkan dari bentonit sehingga diperlukan untuk mencari kondisi sintesis yang tepat. Berdasarkan penelitian sebelumnya, pada penelitian ini digunakan waktu penuaan yang bervariasi yaitu; 72, 96, dan 120 jam yang diharapkan mampu menghasilkan zeolit-Y dengan optimal. Penggunaan rentang waktu penuaan yang lebih panjang ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas zeolit-Y yang dihasilkan. Dengan demikian zeolit-Y diharapkan dapat meningkatkan efisiensi proses pirolisis, kualitas biohidrokarbon yang dihasilkan, dan membuka peluang untuk pengembangan teknologi pengolahan kepala sawit yang lebih berkelanjutan.

Terkait dengan pirolisis sebagai teknologi untuk pengolahan biomassa menjadi biohidrokarbon, penelitian ini didasarkan pada dua latar belakang utama. Latar belakang pertama mengenai keunggulan zeolit sintetis dibanding katalis lainnya untuk menghasilkan biohidrokarbon yang lebih banyak dan latar belakang kedua mengenai ketersediaan minyak kelapa sawit yang kesediaannya cukup melimpah dalam industri kelapa sawit.

Berdasarkan paparan di atas, maka dalam penelitian ini dilakukan sintesis zeolit-Y konversi bentonit yang telah dipurifikasi dan dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF), *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM). kemudian zeolit-Y yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Zeolit-Y yang terbentuk digunakan sebagai katalis dalam proses pirolisis minyak kelapa sawit menjadi biohidrokarbon. Produk cair hasil pirolisis dikarakterisasi menggunakan *Gas Chromatography Mass Spectrometry* (GC-MS).

1.2. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang telah dirumuskan tujuan pada penelitian ini antara lain:

1. Mendapatkan informasi karakteristik bentonit alam dan bentonit purifikasi menggunakan HCl 1M meliputi komposisi dari XRF, struktur dari XRD dan morfologi dari SEM.
2. Menghasilkan katalis zeolit-Y dari bentonit purifikasi.
3. Memperoleh informasi tentang karakteristik zeolit-Y meliputi struktur dari XRD dan morfologi dari SEM.
4. Mendapatkan informasi tentang komposisi kimia BCO yang dihasilkan dari pirolisis minyak kelapa sawit menggunakan zeolit-Y yang dihasilkan sebagai katalis menggunakan GC-MS.

1.3. Manfaat Penelitian

Adapun Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Inovasi pengolahan bentonit menjadi produk yang lebih bernilai.
2. Meningkatkan ketersediaan katalis untuk pirolisis.
3. Membuka peluang untuk meningkatkan ketersediaan EBT.
4. Membuka peluang hirilisasi dari minyak kelapa sawit.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Biohidrokarbon

Biohidrokarbon adalah hidrokarbon yang diproduksi oleh organisme hidup atau dari bahan baku biologis yang dapat memiliki kemiripan dengan bahan bakar hidrokarbon fosil. Pada prinsipnya, campuran bahan bakar biohidrokarbon dapat diproduksi dengan persis meniru bensin, solar, dan bahan bakar penerbangan yang berasal dari minyak bumi. Biohidrokarbon dapat diproduksi dengan memproses secara kimiawi biologis termasuk biomassa selulosa, minyak nabati dan gula. Biohidrokarbon telah menarik minat dan pendanaan yang meningkat dalam beberapa tahun terakhir, terutama karena kompatibel dengan permasalahan Energi Baru Terbarukan saat ini (Ringsmuth *et al.*, 2016). Biohidrokarbon terdiri dari hidrokarbon dengan jumlah atom karbon yang berbeda, dan dari sudut pandang bahan bakar, mereka dapat dibedakan menjadi biogasolin, yang merupakan campuran hidrokarbon dengan rantai karbon C₅-C₁₂, bahan bakar minyak tanah atau *bioavtur*, yang merupakan campuran hidrokarbon dengan rantai karbon C₁₃-C₁₇, dan *biodiesel*, yang merupakan campuran hidrokarbon dengan rantai karbon C₁₈-C₂₈ (Simanjuntak *et al.*, 2024).

Biohidrokarbon dapat diproduksi melalui dekomposisi biomassa polimerik menggunakan metode pirolisis atau likuifikasi pada suhu tinggi. Untuk memperoleh biohidrokarbon yang stabil dan bekerja dalam rentang suhu yang diinginkan dengan nilai kalor yang cukup tinggi, atom oksigen dalam molekul harus dihilangkan, yang umumnya dilakukan melalui hidrideoksigenasi katalitik untuk menurunkan energi yang dibutuhkan seperti pengubahan minyak kelapa sawit menjadi *Bio Crude Oil* (BCO) (Liu *et al.*, 2020).

Bio Crude Oil merupakan minyak yang berwarna gelap dan lengket yang dihasilkan dari proses hidrolisis termal atau dikenal juga dengan nama *Hydrothermal Liquefaction* (HTL) terhadap biomassa. *Bio Crude Oil* terdiri dari berbagai senyawa kimia seperti aromatik, aldehida, keton, alkohol, asam karboksilat, serta hidrokarbon linier dan siklik. Kandungan oksigen yang tinggi pada *Bio Crude Oil* menyebabkan nilai kalorinya lebih rendah dibandingkan minyak bumi, sehingga diperlukan tahapan peningkatan untuk menurunkan kandungan oksigen serta meningkatkan nilai kalori agar dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar. *Bio Crude Oil* juga dapat diaplikasikan sebagai bahan baku kimia *green chemistry* seperti perekat, poliol, dan fenol yang ramah lingkungan (Beims *et al.*, 2020).

2.2. Pirolisis

2.2.1. Pengertian pirolisis

Pirolisis adalah teknik yang menjanjikan untuk mengubah biomassa menjadi *biofuel* pada suhu tinggi (250–600 °C) dalam kondisi inert. Penerapan teknologi pirolisis untuk produksi bahan bakar dan bahan kimia berbasis bio dari biomassa adalah pendekatan yang sedang berkembang. Produk pirolisis biomassa dibagi menjadi *bio-oil*, *biochar*, dan *syngas*, yang dapat digunakan sebagai sumber pembangkit energi atau aplikasi lain dengan atribut unggul seperti ramah lingkungan, biaya rendah, dan dapat terurai secara hayati. Pirolisis terdiri dari reaksi endotermik di mana dekomposisi bahan organik terjadi pada suhu tinggi tanpa kehadiran oksigen (Hoang *et al.*, 2021).

Pirolisis menjadi salah satu metode konversi termokimia yang telah banyak digunakan dalam pengolahan biomassa untuk produksi *bio-oil* atau produk bernilai tinggi lainnya. Pemanasan gelombang mikro diterapkan pada pirolisis biomassa karena metode pemanasannya yang unik. Efek termal dan non-termal dari radiasi gelombang mikro memiliki keunggulan khusus dalam meningkatkan hasil dan kualitas *bio-oil* selama pirolisis biomassa. Namun, komposisi yang

kompleks dan sifat kimia yang tidak stabil dari *bio-oil* sangat membatasi penggunaannya sebagai pengganti bahan bakar konvensional. Berbagai metode untuk meningkatkan kualitas *bio-oil*, termasuk pretreatment pengoptimalan parameter proses, dan reformasi katalitik, telah dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir. Reformasi katalitik terutama meliputi reformasi katalitik uap pirolisis dan hidrodoksigenasi (HDO) *bio-oil* (Wu *et al.*, 2020). Hidrokarbon yang biasanya berasal dari minyak bumi kini dapat dibuat menggunakan proses pirolisis biomassa. Peningkatan popularitasnya terutama disebabkan oleh dua masalah utama yaitu; penipisan minyak bumi di seluruh dunia dan polusi lingkungan akibat pembuangan limbah minyak bumi yang sembarangan. Namun, kelemahan utama dari pirolisis termal biomassa adalah bahwa *bio-oil* yang dihasilkan mengandung campuran kompleks dari gugus fungsional oksigen yang menyebabkan sifatnya yang sangat korosif dan nilai kalor yang rendah. Ini menjadi alasan utama yang membatasi produksi *bio-oil* biomassa dalam skala industri (Norouzi *et al.*, 2021).

2.2.2. Jenis-jenis pirolisis

Berdasarkan tingkat pemanasannya, pirolisis dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Pirolisis Lambat (*Slow Pyrolysis*)

Slow pirolisis yang menggunakan suhu yang rendah dari 400 °C, dengan waktu yang lama untuk menghasilkan jumlah maksimal *biochar*. Proses ini digunakan terutama untuk produksi arang dan dipecah menjadi dua jenis yaitu; karbonisasi dan konvensional. Produk hasil dari slow pirolisis adalah *biochar* 35 %, *bio-oil* 30 % dan gas 35 %.

2. Pirolisis Cepat (*Fast pyrolysis*)

Jenis pirolisis ini digunakan terutama untuk produksi *bio-oil* dan gas, adalah dua jenis utama yaitu; *flash* dan ultra-cepat. Fast pirolisis yang dilakukan pada sekam padi menggunakan suhu 400-600 °C, dengan menggunakan pirolisis kontiniu dengan reaktor berbentuk kerucut dan pembuangan arang

secara langsung. Rendemen *bio-oil* yang paling tinggi adalah pada suhu 450 °C yaitu; 70 % karena kapasitas bahan dan perpindahan panas yang terjadi didalam alat.

3. *Flash Pyrolysis*

Flash pyrolysis dapat dipertimbangkan sebagai fast pyrolysis yang ditingkatkan dan dimodifikasi. Suhu flash pirolisis adalah 900 - 1200 °C, dengan kecepatan laju pemanasan sangat cepat berkisar 0.1 – 1 detik. Biasanya proses ini menghasilkan lebih banyak gas daripada cairan dan padatan.

4. Terofaksi

Terofaksi merupakan proses pirolisis pada temperatur 200-300 °C dengan laju pemanasan yang lambat (5-7 °C/menit) dimana produk utama yang dihasilkan adalah padatan yang kaya akan karbon (Fahmy *et al.*, 2020).

2.2.3. Jenis jenis reaktor pirolisis

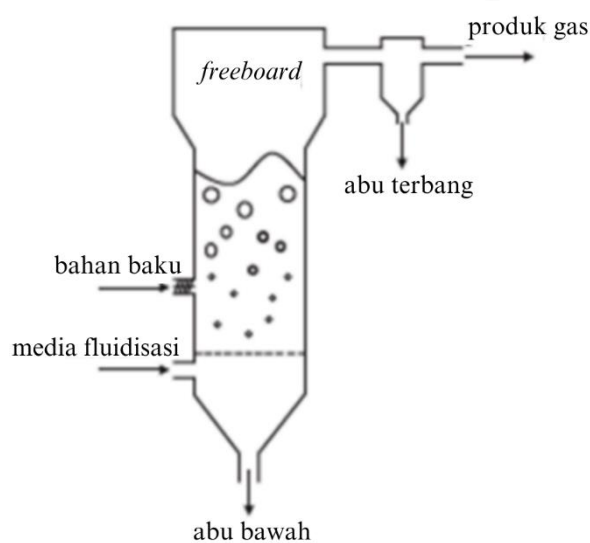
Beberapa jenis reaktor pirolisis yang dapat digunakan untuk mengurai senyawa organik dalam biomassa, antara lain:

1. *Fluidized Bed Reactors*

Fluidized Bed Reactors (FBR) telah terbukti sangat efektif dalam konversi termokimia berkat kemampuannya menciptakan kondisi reaksi yang sangat seragam. Dengan pencampuran yang optimal dan suhu yang stabil, FBR mampu memproses berbagai jenis bahan baku heterogen seperti biomassa dan limbah secara efisien yang memiliki prinsip kerja yang unik, di mana partikel bahan bakar tercampur dengan media fluidisasi (misalnya, pasir), sehingga memungkinkan perpindahan massa dan panas yang merata. Namun, proses ini juga menghasilkan partikel abu yang perlu dikelola secara berkala. (Iannello *et al.*, 2020). Adapun jenis jenis dari FBR terbagi menjadi tiga yaitu:

1.1. Bubbling fluidised bed reactor

Bubble Fluidized Bed (BFB) merupakan sebuah reaktor yang memanfaatkan prinsip fluidisasi untuk menciptakan kondisi di mana partikel padat terangkat dan bergerak seperti cairan akibat aliran gas ke atas. Dalam kondisi ini, terbentuk gelembung-gelembung gas yang bergerak naik melalui bed partikel. Reaktor jenis ini sangat cocok digunakan untuk proses pirolisis karena memungkinkan distribusi panas yang merata, kontak yang baik antara bahan baku dan gas, serta pengadukan yang efektif. Dalam eksperimen yang dilakukan, BFB digunakan untuk mempelajari pengaruh suhu, laju alir gas, dan ukuran partikel terhadap hasil pirolisis bahan baku tertentu (Tran *et al.*, 2021). Suhu yang digunakan untuk pirolisis ini adalah antara 500-550 °C dengan waktu tinggal uap selama 0,5 detik dan produk pirolisis yang dihasilkan umumnya mengandung sekitar 70-75 % cairan (Verdugo *et al.*, 2020). Skema dari BFB dapat terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema *bubbling fluidized bed reactor* (Iannello *et al.*, 2020).

Salah satu penggunaan dari BFB menggunakan biomassa adalah penelitian yang dilakukan oleh (Chen *et al.*, 2020) dimana mengevaluasi pirolisis serpih minyak dan kayu dalam reaktor BFB. Hasil menunjukkan bahwa interaksi

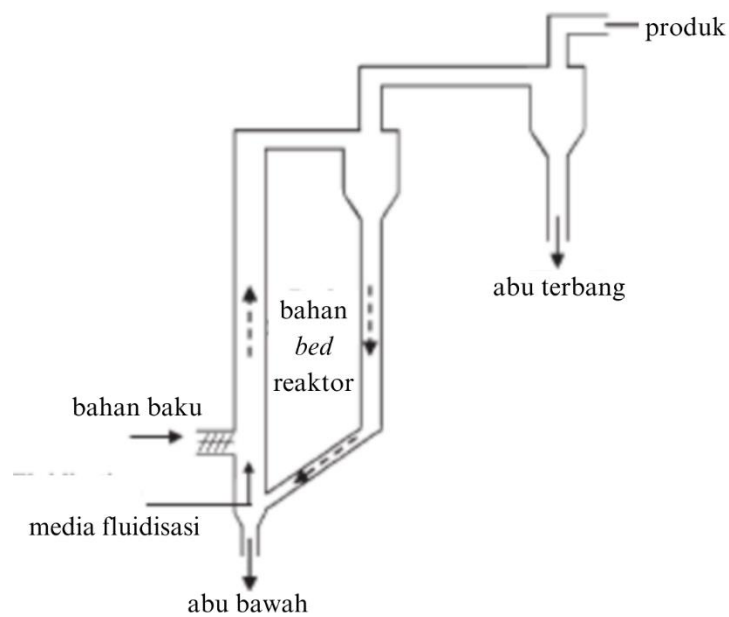
radikal bebas antara kedua bahan baku ini secara signifikan mempengaruhi distribusi produk. Radikal bebas dari kayu mempercepat dekomposisi kerogen, menghasilkan lebih banyak produk volatil dan mengurangi residu semikok. Selain itu, radikal bebas juga memodifikasi jalur reaksi, menghasilkan produk dengan karakteristik kimia yang berbeda. Suhu optimal 520 °C ditemukan untuk memaksimalkan produksi minyak dengan kualitas baik. Proses pirolisis bersama ini menawarkan potensi besar dalam pemanfaatan energi biomassa dan serpih minyak.

1.2. Circulating fluidised bed reactor

Circulating Fluidized Bed (CFB) adalah jenis reaktor yang digunakan untuk proses pirolisis biomassa. Dalam reaktor ini, partikel padat (seperti pasir) dibuat melayang atau "terfluidisasi" oleh aliran gas sehingga menyerupai cairan yang mendidih. Hal ini memungkinkan kontak yang sangat baik antara partikel padat, gas, dan biomassa, sehingga proses pemanasan dan reaksi kimia berlangsung sangat cepat dan merata (Mendes *et al.*, 2023). CFB memiliki sistem dimana biomassa dan pasir panas dicampur dengan gas pembawa lalu disuntikkan ke dalam pipa vertikal. Di dalam pipa, partikel biomassa mengalami pemanasan cepat pada suhu 500 °C yang akan menghasilkan gas, uap, dan residu padat (*char*). Campuran hasil reaksi kemudian dipisahkan dalam siklon, di mana fasa gas dan uap dikondensasi menjadi *bio-oil*. Padatan yang kaya akan *char* kembali ke *fluidized bed* kedua untuk dibakar bersama udara guna menghasilkan panas yang dibutuhkan untuk proses pirolisis. Transfer panas dalam pirolisis biomassa akan menjadi lebih kompleks karena melibatkan perpindahan panas melalui fasa gas sebelum mencapai partikel biomassa. Skema dari CFB dapat terlihat pada Gambar 2.

Salah satu penggunaan dari CFB menggunakan biomassa adalah penelitian yang dilakukan oleh (Mufandi *et al.*, 2020) dalam penelitian yang dilakukan efisiensi produksi *bio-oil* dari rumput gajah (*Napier*) dianalisis dengan menggunakan *scrubber bio-oil* dan tanpa menggunakan *scrubber*. Eksperimen dilakukan pada suhu antara 440 - 520 °C, dengan laju umpan 45 - 75 kg/jam

dan kecepatan superfisial 7 m/s. Sistem yang menggunakan *scrubber bio-oil* berhasil mengatasi masalah pada blower sirkulasi serta menghasilkan minyak pirolisis yang lebih tinggi dibandingkan sistem tanpa *scrubber*. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa produksi maksimum minyak pirolisis pada sistem dengan dan tanpa *scrubber* masing-masing adalah 44,60 wt % dan 43,73 wt %.

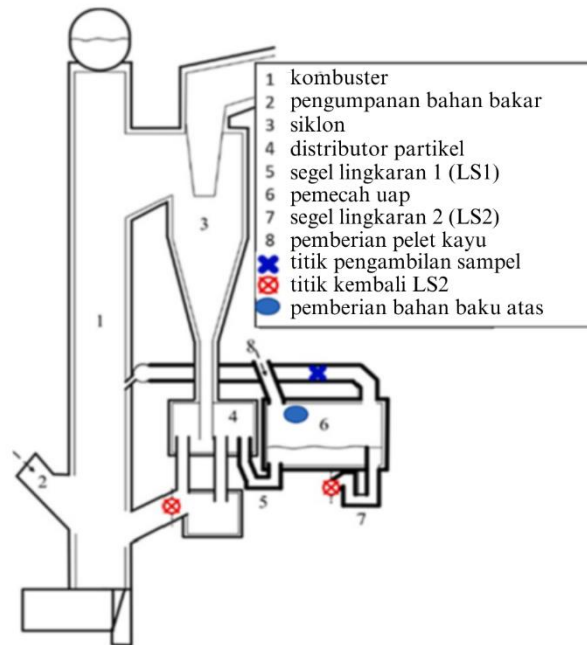


Gambar 2. Skema *Circulating Fluidized Bed reactor* (Iannello et al., 2020).

1.3. Dual fluidised bed reactor

Dual Fluidised Bed (DFB) terdiri dari dua reaktor bed fluida yang saling terhubung, di mana material bed bersirkulasi di antara keduanya, memungkinkan transfer massa dan panas yang efisien. Bahan bakar padat dimasukkan ke dalam reaktor bahan bakar dimana tempat proses gasifikasi atau pirolisis berlangsung. Arang yang terbentuk dan bahan bakar yang belum bereaksi kemudian dipindahkan ke reaktor arang untuk gasifikasi atau pembakaran penuh. Dengan cara ini, proses konversi dipisahkan untuk memastikan independensi penuh dari fasa gas di kedua reaktor yang menghasilkan gas produk yang lebih murni dan berkualitas lebih tinggi

dibandingkan dengan reaktor tunggal. Dalam sistem gasifikasi, reaktor bahan bakar merupakan gasifier bed fluida yang berbuih dan beroperasi pada suhu 800 - 850 °C menggunakan uap yang bersifat endotermik (Fuchs *et al.*, 2019). Skema dari DFB dapat terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema *dual fluidized bed reactor* (Vela *et al.*, 2023).

Salah satu penggunaan dari DFB menggunakan biomassa adalah penelitian yang dilakukan oleh (Vela *et al.*, 2023) dalam penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa *steam cracking minyak tall pitch* (TOP) merupakan metode yang menjanjikan untuk mengubah limbah industri pulp menjadi produk kimia bernilai tambah, dengan memanaskan TOP pada suhu 775-825 °C, sekitar 35 % karbon dalam TOP dapat dikonversi menjadi olefin (C₂-C₃) dan aromatik, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari pelet kayu (hanya 8 %). Selain itu, peningkatan suhu reaksi berkorelasi positif dengan peningkatan produksi gas, terutama hidrokarbon ringan. Hasil ini menunjukkan bahwa TOP merupakan sumber karbon yang sangat potensial untuk industri kimia, menawarkan alternatif yang lebih berkelanjutan dibandingkan dengan bahan baku fosil.

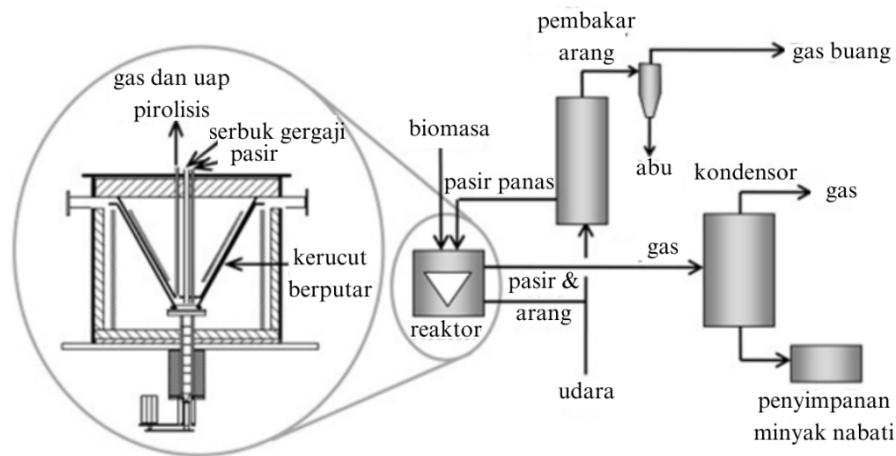
2. *Rotating cone reactors*

Rotating cone reactors adalah jenis baru dari reaktor pirolisis cepat biomassa yang dirancang untuk memaksimalkan produksi *bio-oil*. Biomassa bergerak dalam pola spiral di sepanjang dinding kerucut yang dipanaskan, bersama dengan pembawa panas inert yang sebelumnya telah dipanaskan. Saat bergerak naik, panas dari pasir yang dipanaskan ditransfer ke biomassa, menyebabkan dekomposisi pada suhu tinggi (Li *et al.*, 2020). Dalam reaktor ini, biomassa dimasukkan di dekat bagian bawah kerucut berputar, dan digerakkan oleh gaya sentrifugal sambil dihancurkan. Pemanasan dalam reaktor ini terjadi melalui transfer panas dari dinding atau pasir yang dipanaskan. Uap pirolisis yang dihasilkan keluar dari bagian atas reaktor, sedangkan arang panas dikeluarkan melalui bagian luar kerucut yang stasioner. Reaktor ini tidak memerlukan gas pembawa, yang menyederhanakan instalasi perangkat tambahan dan menurunkan biaya operasional. Hasil minyak dari piroliser ini mencapai hingga 70 % (Slezak *et al.*, 2023).

Keunggulan reaktor ini adalah tidak memerlukan gas tambahan, berbeda dengan reaktor bed fluida, sehingga mengurangi konsumsi energi dan mencegah pengenceran gas yang mudah terbakar. Namun, reaktor ini memiliki komponen bergerak (seperti kerucut berputar) yang harus bertahan pada suhu tinggi dan paparan debu berat, sehingga memerlukan material dan bantalan dengan ketahanan panas, ketahanan arus, serta kinerja penyegelan yang tinggi (Song and Wang, 2018). Skema dari *rotating cone reactors* dapat terlihat pada Gambar 4.

Salah satu penggunaan dari *rotating cone reactors* menggunakan biomassa adalah penelitian yang dilakukan oleh (Junsheng, 2010) dengan dilakukan evaluasi pengaruh variasi kecepatan dan ukuran pasir kuarsa sebagai media pemanas terhadap efisiensi proses pirolisis jerami jagung menggunakan reaktor pirolisis kerucut yang berputar sendiri dengan tujuh faktor kunci, termasuk suhu pirolisis, tingkat vakum, kecepatan rotasi cakram kerucut, dan

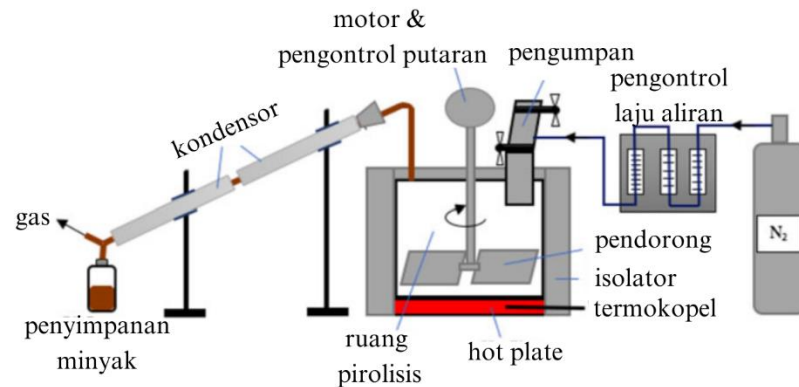
diameter partikel biomassa, dipelajari secara sistematis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimal tercapai pada suhu 500 °C, tingkat vakum 0,08 MPa, kecepatan rotasi 110 rpm, dan diameter partikel 30 mm. Di bawah kondisi ini, tingkat konversi biomassa mencapai 48,30 %, menunjukkan efisiensi proses yang cukup tinggi.



Gambar 4. Skema *rotating cone pyrolyzer* (Perkins *et al.*, 2018).

3. Ablative Pyrolysis Reactors

Reaktor ablatif didesain khusus untuk proses pirolisis cepat. Prinsip kerjanya adalah pemanasan partikel biomassa secara langsung dan cepat. Proses ini sangat bergantung pada kontak erat dan gesekan antara biomassa dengan permukaan pemanas. Syarat utama pirolisis ablatif adalah kontak yang kuat dan gerakan relatif yang tinggi. Kombinasi keduanya dapat menghasilkan pembakaran biomassa yang sangat cepat. Dibandingkan metode konvensional, reaktor ablatif memiliki banyak keunggulan diantaranya ukurannya jauh lebih kecil, biaya produksinya lebih murah, dan tidak memerlukan banyak gas tambahan. Bahkan, biomassa berukuran besar dapat langsung diproses. Selain itu, reaktor ini fleksibel, efisien, dan biaya operasionalnya rendah (Raza *et al.*, 2021). Skema dari reaktor ablatif dapat terlihat pada Gambar 5.



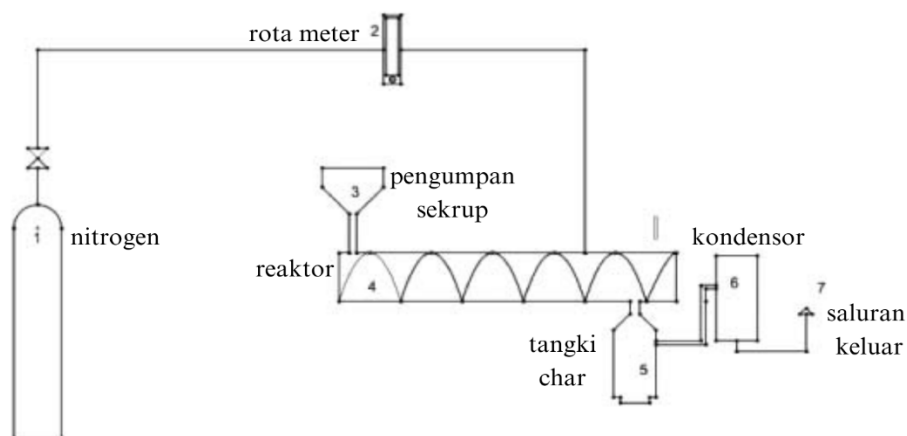
Gambar 5. Skema *ablative pyrolysis* (Khuenkao and Tippayawong, 2020).

Salah satu penggunaan dari reaktor ablatif menggunakan biomassa adalah penelitian yang dilakukan oleh (Dimitriadis *et al.*, 2023) penelitian yang dilakukan telah berhasil mengubah jerami kaya abu menjadi bahan bakar berkualitas tinggi melalui proses pirolisis cepat ablatif dengan mengubah jerami menjadi minyak mentah yang kaya senyawa organik. Melalui kondensasi fraksional, senyawa-senyawa berharga dalam minyak mentah ini berhasil dipisahkan dan diperkaya, menghasilkan produk yang disebut *Fast Pyrolysis Bio-Oil* (FPBO). Secara keseluruhan, dari proses konversi jerami menjadi *bio-oil*, dihasilkan sekitar 20 % produk dan 32 % karbon.

4. *Twin Screw Reactors*

Reaktor *twin-screw* digunakan untuk pirolisis umpan biomassa melalui reaksi eksotermis untuk menghasilkan *biofuel*. Proses yang digunakan adalah pirolisis cepat, yaitu proses suhu tinggi tanpa kehadiran oksigen, di mana biomassa dipanaskan dengan cepat. Reaktor *twin-screw* memiliki desain yang kompak dengan keunggulan dapat beroperasi pada suhu yang lebih rendah. Namun, kelemahannya adalah adanya bagian-bagian yang bergerak di zona panas, yang bisa menyebabkan masalah teknis dan pemeliharaan. Reaktor ini secara efektif mencampur biomassa dengan media pemanas yang telah dipanaskan sebelumnya seperti bola baja atau pasir, sehingga menghasilkan laju transfer panas yang tinggi. Selain itu, sistem ini menggunakan prinsip

kondensasi fraksional untuk memisahkan *bio-oil* yang dihasilkan menjadi dua aliran: kondensat kaya organik dan kondensat berair (Ajikashile *et al.*, 2023). Skema dari reaktor *twin-screw* dapat terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Skema *twin-screw reactor* (Kapoor *et al.*, 2020).

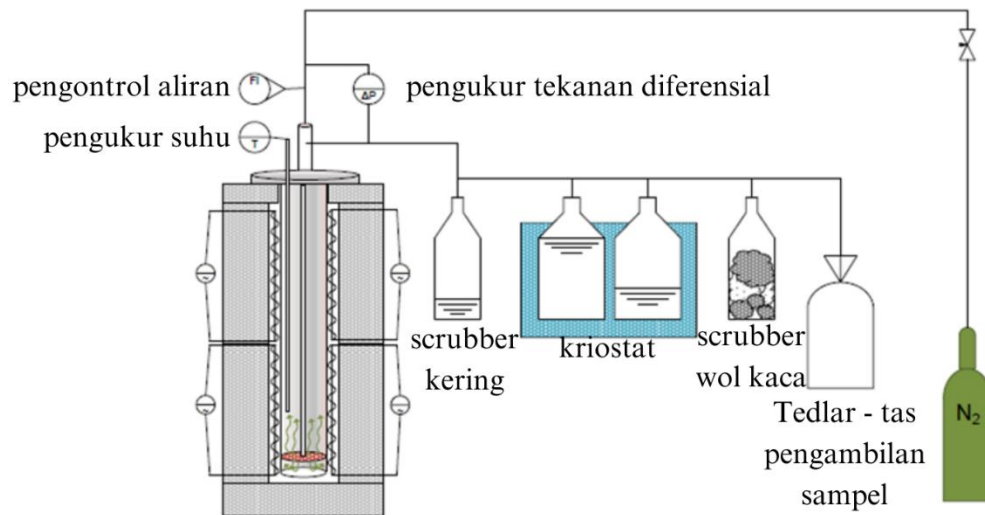
Salah satu penggunaan dari reaktor *twin-screw* menggunakan biomassa adalah penelitian yang dilakukan oleh (Kapoor *et al.*, 2022) dimana eksperimen pirolisis biomassa dilakukan dalam dua jenis reaktor yang berbeda, yaitu; reaktor *fixed bed* dan *twin-screw*, yang beroperasi pada kondisi suhu serupa yaitu 500 °C dalam atmosfer nitrogen yang inert. Pirolisis cepat biomassa dalam reaktor *twin-screw* menghasilkan *bio-oil* maksimum sebesar 52 % dengan menggunakan kayu pinus, biochar sebesar 33 % dari bambu, dan gas sebesar 32 % dari bagas. Bambu menghasilkan *bio-oil* dengan nilai kalori yang lebih tinggi (24,45 MJ/kg), sebanding dengan bagas (24 MJ/kg). Kayu pinus dan serbuk gergaji menghasilkan biochar dengan nilai kalori yang lebih tinggi (masing-masing 27 dan 28 MJ/kg).

5. Fixed Bed Pyrolysis

Pirolisis *fixed bed* adalah suatu proses termal yang melibatkan pemecahan bahan organik menjadi produk-produk bernilai tambah seperti *bio-oil*, *char*, dan *syngas*. Proses ini dilakukan dalam sebuah reaktor *fixed bed*, di mana bahan baku diletakkan secara statis dan dipanaskan pada suhu tinggi. Suhu

yang digunakan pada reaktor ini umumnya adalah antara 400-600 °C dengan maximum *liquid* yang didapatkan adalah 50 wt % (Inayat *et al.*, 2022).

Skema dari reaktor *fixed bed* dapat terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Skema *fixed bed* pyrolysis (Muzyka *et al.*, 2023).

Salah satu penggunaan dari reaktor *twin-screw* menggunakan biomassa adalah penelitian yang dilakukan oleh (Khan *et al.*, 2020) dalam studi yang dilakukan, pirolisis batang kapas mentah (R-CS) dan batang kapas yang dicuci asam (W-CS) menggunakan pirolisis bersasama (*co-pyrolysis*) dengan limbah ban (WT) di dalam *reaktor fixed bed* dengan minyak yang diperoleh dari *co-pyrolysis* W-CS/WT hanya terdiri dari fasa organik (dengan 65 % hidrokarbon dibandingkan 55 % untuk R-CS/WT) dengan HHV sebesar 41,5 MJ/kg, yang setara dengan WT sendiri.

2.3. Katalis

Suatu senyawa yang ketika ditambahkan ke dalam suatu reaksi dapat mengurangi energi aktivasi dan meningkatkan laju reaksi disebut Katalis. Dalam pembuatan biohidrokarbon, katalis memiliki fungsi utama untuk menyediakan reaksi

hidrogenasi guna menghasilkan hasil hidrokarbon cair yang tinggi dan selama reaksi jumlah katalis tidak berkurang karena tidak ikut bereaksi (Trisunaryanti *et al.*, 2022).

Berdasarkan jenisnya katalis dibedakan menjadi tiga, yaitu; katalis heterogen, homogen dan enzim

1. Katalis homogen adalah katalis yang mempunyai fasa sama dengan fasa reaktan dan fasa produk reaksi. Katalis homogen mempunyai aktivitas dan selektivitas tinggi, tidak mudah teracuni oleh keberadaan pengotor, mudah dioperasikan, mudah dimodifikasi, dan mudah untuk dipelajari. Kelemahan dari katalis homogen diantaranya sulit dipisahkan dari campuran reaksi dan membutuhkan biaya yang mahal, kurang stabil pada suhu tinggi, limbah yang dihasilkan berbahaya bagi lingkungan, dan bersifat korosif (Mukundan *et al.*, 2023)
2. Katalis heterogen adalah katalis yang memiliki fasa berbeda dengan fasa reaktannya. Katalis heterogen biasanya menggunakan katalis padatan dimana interaksi terjadi dipermukaan padatan/gas atau cairan/padatan. Aktivitas katalis ada di permukaan pori padatan katalis. Mekanisme yang terjadi pada katalis heterogen melibatkan proses adsorpsi dan desorpsi. Reaksi katalisis heterogen memiliki tahapan-tahapan yang lebih kompleks dibandingkan dengan reaksi katalisis homogen. Hal ini terjadi karena pada reaksi katalisis heterogen katalis tidak terdistribusi merata ke dalam media reaksi. Sifat-sifat katalis heterogen yaitu; tahan dan stabil pada suhu yang relatif tinggi, mudah dipisahkan, konstruksinya sederhana, umur katalis yang panjang, dan mudah teracuni (Tabandeh *et al.*, 2022).
3. Katalis enzim molekul biologis, umumnya protein, yang mempercepat reaksi kimia atau mengkatalisis berbagai reaksi seperti reduksi, kondensasi, dan dekarboksilasi. Enzim bekerja dengan menurunkan energi aktivasi yang dibutuhkan untuk reaksi, sehingga reaksi dapat terjadi lebih cepat (Jaroensuk *et al.*, 2020).

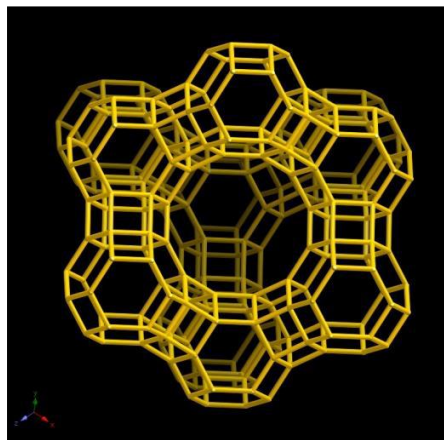
2.4. Zeolit-Y

Zeolit adalah mineral (padatan) aluminosilikat terhidrasi yang terbuat dari silika (SiO_4^{4-}) dan tetrahedral alumina (AlO_4^{5-}) yang saling terikat sehingga membentuk struktur kristal yang berpori/berrongga dan bermuatan negatif. Struktur kristal berrongga tersebut terbentuk dari elemen, silikon, oksigen dan aluminium, dengan logam alkali atau alkali tanah seperti magnesium (Mg), natrium (Na) dan kalium (K), biasanya rongga ini berisi dengan molekul air yang terperangkap di celah-celah pori. Zeolit berdasarkan sumbernya dapat dibedakan menjadi dua, yaitu; zeolit alam dan zeolit sintetis. Kedua zeolit ini memiliki perbedaan yaitu: (1) Zeolit Alam, biasanya mengandung kation-kation K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , dan Mg^{2+} . Zeolit alam mengandung bahan yang berbeda yang memiliki ukuran kristal tidak seragam, dan membutuhkan beberapa hari hingga beberapa dekade untuk dibuat. Beberapa sumber zeolit yaitu; dari abu vulkanik, pasir dan batuan, sekam padi, hingga limbah organik industri dan (2) Zeolit Sintetis, zeolit ini sangat murni dengan ukuran kristal seragam dan berguna untuk aplikasi industri tertentu. Zeolit sintetis biasanya hanya mengandung kation-kation seperti K^+ dan Na^+ . Salah satu jenis dari zeolit sintetis adalah zeolit silikalit. Zeolit sintetis dapat dibuat di laboratorium dalam rentang waktu beberapa jam hingga beberapa hari dengan ukuran pori yang dapat dikontrol, karakteristik permukaan adsorben, dan stabilitas termal yang sangat baik (Simanjuntak *et al.*, 2024).

Saat ini zeolit dapat disintesis dari bahan yang mengandung silika dan alumina dari bauksit dan kuarsa atau dari abu sisa pembakaran kayu, sekam padi, dan sumber-sumber lainnya melalui suatu tahapan proses yang kompleks. Sintesis zeolit dari bahan alam yang mengandung aluminosilikat memberikan alternatif proses untuk meningkatkan kualitas zeolit alam. Sifat katalitik dan struktur pori zeolit yang sedemikian rupa dapat digunakan untuk konversi atau pemurnian minyak mentah menjadi bahan bakar yang memenuhi persyaratan teknik dan lingkungan (Supriyanto *et al.*, 2018).

Zeolit-Y memiliki rasio atomik Si/Al yang lebih tinggi daripada zeolit-X. Kandungan silika yang lebih tinggi pada zeolit-Y menjadikan zeolit ini memiliki

stabilitas termal yang lebih tinggi dari pada zeolit X dengan rumus $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4,8\text{SiO}_2 \cdot 8,9\text{H}_2\text{O}$. Oleh karena itu, zeolit-Y banyak digunakan secara luas sebagai katalis, pertukaran ion dan adsorben (*Julbe*). Zeolit-Y juga digunakan sebagai *Fluid Cracking Catalyst* (FCC) destilasi minyak bumi untuk meningkatkan produksi bensin dan solar. Berbagai macam aplikasi lain telah dilaporkan untuk zeolit-Y termasuk alkoholisasi, penghilangan pengawet yang beracun pada bidang farmasi dan sebagai *drug delivery system* (Pangesti *et al.*, 2021). Struktur zeolit-Y dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Struktur zeolit-Y/X (*International Zeolit Association*, 2017).

Sintesis zeolit-Y dapat dilakukan melalui beberapa tahap. Tahap pertama, yaitu; dihitung antara rasio Si/Al untuk mengetahui berapa jumlah Al yang ditambahkan. Kemudian, melakukan sintesis zeolit-Y dengan metode hidrotermal yang merupakan proses kristalisasi. SiO_2 hasil ekstraksi direaksikan dengan NaOH disertai pengadukan dan pemanasan. Reaksi ini membentuk natrium silikat. Kemudian, direaksikan dengan natrium silikat untuk melalui proses hidrotermal untuk sintesis zeolit-Y. Metode hidrotermal dilakukan pada temperatur dan tekanan yang tinggi ($>100\text{ }^\circ\text{C}$, $> 1\text{ atm}$), sehingga reaksinya lebih cepat. Selain itu, kristal yang dihasilkan akan memiliki kemurnian yang tinggi dan peningkatan suhu kalsinasi hingga titik optimal dapat meningkatkan pembentukan zeolit-Y. Zeolit-Y yang telah disintesis dapat dimanfaatkan, salah satunya sebagai katalis

berbagi dalam berbagai macam reaksi kimia dan katalis tersebut dapat diregenerasi kembali (*reusable*) (Simanjuntak *et al.*, 2019).

2.5. Bentonit

Indonesia memiliki berbagai jenis mineral lempung yang dapat dimanfaatkan dalam berbagai bidang kajian penelitian. Terdapat berbagai mineral lempung yaitu; mineral lempung seperti zeolit, montmorillonit, dan bentonit (Moersilah *et al.*, 2021). Bentonit adalah jenis lempung alami yang merupakan anggota dari keluarga montmorillonit (Bojaddayni *et al.*, 2023). Bentonit memiliki sifat tekstur positif seperti luas permukaan spesifik yang tinggi, volume pori yang besar, struktur berlapis yang sangat terorganisir, kapasitas pertukaran kation yang sangat baik, serta stabilitas kimia dan mekanis, menjadikan bentonit cocok untuk diaplikasikan sebagai katalis maupun adsorben dalam berbagai industri proses kimia. Sebagai bahan baku yang ramah lingkungan, tidak beracun, dan berbiaya rendah, bentonit mentah dapat diproses lebih lanjut untuk memodifikasi strukturnya dan meningkatkan sifat teksturnya yang diperlukan, menjadikannya material berharga untuk aplikasi katalis dan adsorben (Gandhi *et al.*, 2022). Pada penelitian yang dilakukan oleh Nabil and Malek (2021) bentonit alam memiliki fasa kristalin montmorillonite sebanyak 85%, kalsit 5% dan kuarsa 10%.

Bentonit telah berhasil dimodifikasi menjadi zeolit-Y dari beberapa peneliti terdahulu seperti yang dilakukan oleh (Hamidi *et al.*, 2021) yang telah mencoba membuat zeolit-Y dari bentonit dan abu sekam padi sebagai sumber silika menggunakan dua metode dengan hasil metode satu tahap yang masih banyak terbentuk zeolit-P dan metode dua tahap lebih efektif dalam menghasilkan zeolit-Y murni, dengan kinerja katalitik yang lebih baik dalam hidrokraking dan hidrodiesulfurisasi. Pengaturan kondisi sintesis seperti waktu aging, suhu kristalisasi, dan komposisi reagen yang optimal sangat penting untuk memastikan pembentukan zeolit-Y dengan kristalinitas tinggi.

Pada penelitian ini bentonit dipilih dalam pembuatan zeolit-Y karena beberapa alasan penting. Pertama, bentonit merupakan bahan yang melimpah dan mudah didapat, sehingga menjadikannya pilihan yang ekonomis dan berkelanjutan. Bentonit juga berfungsi sebagai sumber tambahan silika dan alumina, yang merupakan komponen utama dalam struktur zeolit-Y. Selain itu, meskipun ketersediaannya tinggi, bentonit masih relatif jarang digunakan secara optimal dalam sintesis zeolit-Y, sehingga terdapat peluang untuk mengeksplorasi potensi penggunaannya lebih lanjut. Bentonit juga menawarkan fleksibilitas yang tinggi untuk dimodifikasi, namun sejauh ini modifikasi terhadapnya masih sedikit dilakukan. Oleh karena itu, penelitian dan pengembangan lebih lanjut dapat membuka peluang baru untuk meningkatkan kinerja zeolit Y dengan bantuan bentonit

2.5.1. Purifikasi bentonit

Pada penelitian ini digunakan bahan baku bentonit yang memerlukan purifikasi untuk mengurangi kadar logam pada bentonit. Salah satu metode yang digunakan untuk purifikasi bentonit adalah dengan perlakuan asam kuat (HCl) yang mengadopsi prinsip *leaching*. Atigh *et al.* (2021) melakukan purifikasi bentonit melalui serangkaian proses yang meliputi pemanasan, pencucian dengan HCl, dan sentrifugasi. Proses ini berhasil mengurangi zat pengotor, meningkatkan kadar montmorillonite dan menghasilkan nanoclay dengan struktur lembaran serta ukuran pori rata-rata 1,29 nm. Selain itu, penelitian lain yang dilakukan oleh Alamery and Ahmed (2021) juga menunjukkan pentingnya purifikasi bentonit menggunakan asam HCl dengan konsentrasi 4N dan 6N pada suhu 70–80°C untuk menghasilkan bentonit yang lebih berkualitas. Purifikasi ini berhasil menghilangkan fasa kalsit, menurunkan kadar Fe_2O_3 dari 5,02% menjadi 2,42%, serta meningkatkan luas permukaan spesifik dari 58,93 m^2/g menjadi 206,62 m^2/g . Penurunan kadar Fe_2O_3 sangat penting, karena besi dalam bentuk oksida dapat mengganggu pembentukan struktur zeolit-Y yang diinginkan, merusak porositas, dan menurunkan aktivitas katalitik. Hasil ini menunjukkan bahwa bentonit yang

telah dipurifikasi dan diaktivasi memiliki potensi sebagai sumber silika berkualitas tinggi untuk menghasilkan zeolit-Y yang optimal. Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Yener *et al.* (2020) proses perendaman atau purifikasi bentonit menggunakan asam kuat seperti HCl menunjukkan bahwa fasa montmorillonit dan kuarsa tetap stabil dan tidak mengalami pelarutan selama perlakuan. Bahkan, secara relatif, keberadaan kedua fasa tersebut tampak meningkat setelah proses purifikasi. Peningkatan ini bukan disebabkan oleh penambahan jumlah montmorillonit dan kuarsa, melainkan karena mineral-mineral lain mengalami pelarutan dan penurunan intensitas, sehingga komposisi relatif montmorillonit dan kuarsa menjadi lebih dominan dalam struktur bentonit. Hal ini mengindikasikan bahwa montmorillonit dan kuarsa memiliki ketahanan kimia yang lebih tinggi terhadap pelarutan oleh HCl dibandingkan dengan mineral lainnya.

2.6. Metode Hidrotermal Untuk Sintesis Zeolit

Sintesis hidrotermal adalah salah satu metode yang paling umum digunakan untuk pembuatan nanomaterial. Pada dasarnya, ini merupakan pendekatan berbasis reaksi dalam larutan. Dalam sintesis hidrotermal, pembentukan nanomaterial dapat terjadi dalam rentang suhu yang luas, mulai dari suhu ruang hingga suhu yang sangat tinggi. Untuk mengontrol morfologi material yang akan disintesis, kondisi tekanan rendah atau tekanan tinggi dapat digunakan tergantung pada tekanan uap dari komposisi utama dalam reaksi tersebut (Gan *et al.*, 2020). Sintesis hidrotermal sangat sensitif terhadap variasi parameter pertumbuhan lingkungan. Perubahan dan pengendalian parameter-parameter ini dapat digunakan secara efektif untuk mengontrol bentuk dan tampilan nanostruktur yang dihasilkan (Gerbreders *et al.*, 2020).

Selama 20 tahun terakhir, para peneliti telah mencoba menyelidiki pengaruh aging (penuaan) dan perlakuan hidrotermal terhadap kristalisasi pentasil silika tinggi. Proses hidrotermal sangat penting untuk memahami lebih lanjut tentang pertumbuhan kristal. Selain itu, studi lain menunjukkan bahwa tahap aging dapat

mengubah inti dan kecepatan kristalisasi, yang menyebabkan perubahan ukuran kristal dan hasil sintesis. Oleh karena itu, penuaan dan perlakuan hidrotermal memiliki pengaruh signifikan terhadap pembentukan dan pertumbuhan kristal (Nguyen *et al.*, 2023). Selama perlakuan hidrotermal, kristalisasi umumnya terjadi melalui beberapa langkah berturut-turut: (i) nukleasi dari larutan untuk membentuk inti primer atau sekunder, (ii) polimerisasi inti untuk membentuk fasa gel amorf, dan (iii) pertumbuhan kristal melalui mekanisme sol–gel *reversibel*. Selama proses ini, berbagai parameter sintesis dapat sangat memengaruhi tidak hanya keberhasilan pembentukan, tetapi juga tipe kerangka, ukuran, bentuk, dan keseragaman kristal yang dihasilkan (Yu *et al.*, 2021).

2.7.Karakterisasi Bentonit, Zeolit dan Analisis BCO

2.7.1. X-Ray Fluorescence (XRF)

Analisis XRF merupakan teknik analisis yang menggunakan sinar-X untuk menentukan komposisi unsur dalam suatu sampel (Maged *et al.*, 2020). Prinsip kerjanya adalah sinar-X berenergi tinggi yang berasal dari tabung sinar-X akan mengenai sampel. Ketika sinar-X mengenai atom dalam sampel, elektron dalam kulit elektron atom akan ditendang keluar. Atom yang kehilangan elektron akan dalam keadaan tereksitasi dan ketika atom tersebut kembali ke kondisi dasarnya, sinar-X akan dipancarkan. Sinar-X yang dipancarkan memiliki energi khas untuk setiap unsur yang terkandung dalam sampel.

Sinar-X yang dipancarkan kemudian akan dideteksi dengan detektor. Detektor yang umum digunakan antara lain detektor semikonduktor seperti detektor silikon atau germanium. Sinyal dari detektor kemudian diolah untuk menghasilkan spektrum intensitas sinar-X berdasarkan energinya. Pada spektrum akan terlihat berbagai garis emisi sinar-X yang merupakan ciri khas unsur yang terkandung dalam sampel. Komposisi kuantitatif unsur dalam sampel dapat ditentukan dengan melakukan kalibrasi menggunakan sampel standar yang komposisinya telah diketahui (Beckhoff *et al.*, 2006).

Pada penelitian ini XRF digunakan untuk mengetahui komposisi dari bentonit alam dan bentunit hasil purifikasi yang akan digunakan untuk mensintesis zeolit-Y. Contoh data analisis XRF dari bentonit berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh (Gandhi *et al.*, 2022) dapat terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi dari bentonit.

Bahan	Komponen kimia (wt %)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MnO
Bentonit	51,379	22,771	2,302	2,106	0,173	1,581	17,464	1,577	0,1820

2.7.2. X-Ray Diffraction (XRD)

XRD adalah teknik yang digunakan untuk menentukan struktur kristal dari suatu bahan. Dasar dari XRD adalah interaksi antara sinar-X monokromatik dengan atom-atom dalam kisi kristal yang menghasilkan pola difraksi, yang dapat dianalisis untuk memberikan informasi tentang struktur atomik material. Dalam eksperimen XRD, radiasi Cu K α 1 biasanya dihasilkan oleh anoda Cu di dalam tabung sinar-X tertutup. Sinar-X yang dipancarkan kemudian difokuskan menggunakan monokromator untuk hanya melewati radiasi K α 1. Dengan celah Soller, sinar-X ini terkolimasi menjadi berkas sempit dengan panjang gelombang tertentu (λ). Saat sinar-X ini diarahkan ke sampel, mereka didifraksikan pada sudut-sudut tertentu sesuai dengan Hukum Bragg, yang merupakan persamaan utama dalam XRD, yaitu:

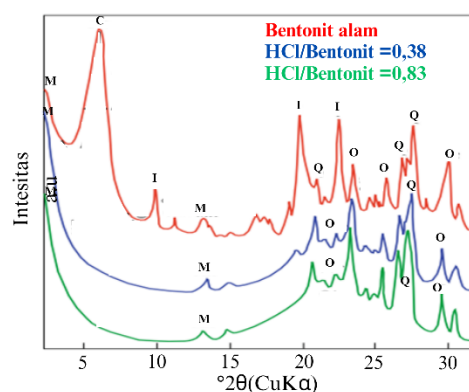
$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

Dimana n adalah bilangan bulat (1, 2, 3, 4, ...), d_{hkl} adalah jarak antar bidang kristal yang menghasilkan difraksi, θ adalah sudut datang sinar-X dan λ adalah panjang gelombang sinar-X (Khan *et al.*, 2020).

Prinsip kerja dari XRD adalah ketika sinar-X menumbuk material padat, sinar tersebut tersebar oleh elektron yang berputar di sekitar inti atom. Gelombang yang tersebar ini, yang dipancarkan dalam berbagai arah, saling berinterferensi.

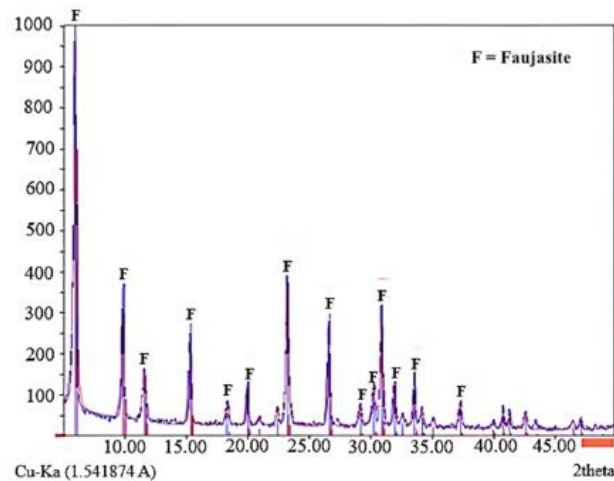
Interferensi ini dapat bersifat konstruktif atau destruktif, tergantung pada arah dan jenis interaksi gelombang. Difraksi adalah interferensi konstruktif dari sinar-X yang tersebar. Perlu diketahui bahwa keteraturan susunan atom (periodisitas) dalam padatan dapat menyebabkan terjadinya interferensi konstruktif. Oleh karena itu, penting untuk menginterpretasikan grafik XRD dari bahan kristalin dengan jelas. Terdapat hubungan yang erat antara periodisitas dan pola difraksi, di mana sudut difraksi yang lebih tinggi terjadi pada periodisitas yang lebih pendek, dan begitu sebaliknya (Ali *et al.*, 2022).

Pada penelitian ini XRD digunakan untuk mengetahui puncak difraktogram bentonit alam, bentonit purifikasi dan zeolit-Y sintesis dari bentonit. Seperti pada penelitian oleh Yener *et al.* (2020) menunjukkan bahwa proses leaching bentonit menggunakan HCl menyebabkan degradasi bertahap pada struktur lempung dan pelarutan selektif terhadap kation struktural dari mineral tertentu. Dari hasil analisis XRD, diketahui bahwa fasa montmorillonit menjadi lebih dominan setelah perlakuan, seiring dengan peningkatan intensitas puncak difraksi yang mengindikasikan stabilitas atau bahkan kristalisasi ulang parsial dari fasa ini. Sementara itu, fasa-fasa seperti albite dan kristobalit mengalami penurunan signifikan atau bahkan menghilang, akibat pelarutan komponennya oleh larutan HCl. Di sisi lain, kuarsa tetap bertahan karena ketahanannya terhadap larutan asam, yang menyebabkan peningkatan relatif dalam intensitas fasanya yang dapat terlihat pada Gambar 9.



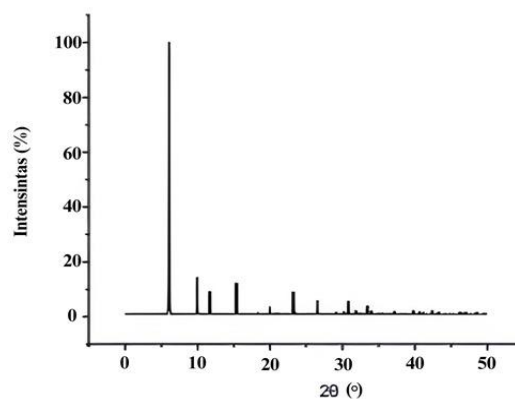
Gambar 9. Difraktogram XRD untuk bentonit alam, dan perendaman dengan HCl (M= montmorillonit, I= illite, Q=kuarsa, O= opal) (Yener *et al.*, 2020).

Pada penelitian zeolit-Y sintesis seperti yang dilakukan oleh Simanjuntak *et al.*, (2024) menunjukkan bahwa puncak difraktogram yang dihasilkan pada karakterisasi zeolit-Y sintetis dari RHS dan alumunium dapat di lihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Pola XRD dari zeolit-Y (Simanjuntak *et al.*, 2024).

Puncak difraktogram zeolit-Y hasil sintesis akan dibandingkan dengan standar IZA untuk menentukan apakah zeolit yang disintesis dari bentonit memiliki kesamaan dengan puncak difraktogram IZA, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Difraktogram zeolit-Y/X standar (*International Zeolite Association*, 2017).

2.7.3. *Scanning Electron Microscopy (SEM)*

SEM telah menjadi alat ilmiah yang sangat penting untuk mempelajari morfologi bahan anorganik dan biologis pada pembesaran tinggi, mulai dari 1.000 hingga lebih dari 500.000 kali, dengan resolusi yang lebih baik dari 1 nm.

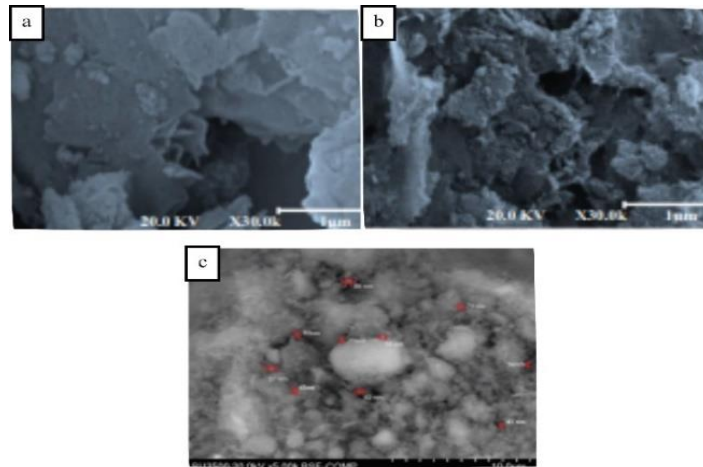
(Davies *et al.*, 2021). Teknologi SEM menggunakan berkas elektron yang difokuskan untuk memindai permukaan sampel sehingga dapat menghasilkan berbagai sinyal yang digabungkan dan dikonversi menjadi sinyal visual dengan bantuan tabung sinar katoda. Ada dua kategori interaksi elektron-sampel yang dibedakan dalam SEM:

1. Interaksi Elastis, terjadi ketika elektron yang datang mengalami pembelokan oleh inti atom atau elektron pada kulit terluar dengan energi serupa, tanpa kehilangan energi yang signifikan. Interaksi ini menghasilkan *Back-Scattered Electrons (BSE)*, yang dapat memberikan informasi tentang komposisi unsur dan densitas atom.
2. Interaksi Inelastis, terjadi ketika elektron yang datang berinteraksi dengan elektron-elektron atau atom-atom sampel, menyebabkan transfer energi yang signifikan ke atom tersebut. Interaksi ini menghasilkan *Secondary Electrons (SE)*, yang memberikan informasi tentang topografi permukaan sampel. Hasil dari kedua interaksi ini digunakan untuk membuat gambar resolusi tinggi dari morfologi permukaan sampel (Rosa *et al.*, 2021).

Pada penelitian ini SEM digunakan untuk mengetahui bentuk morfologi dari bentonit alam, bentonit hasil purifikasi dan zeolit-Y sintesis. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Hamidi *et al.* (2021) telah melakukan analisis SEM pada bentonit alam yang menunjukkan bahwa bentonit alam memiliki morfologi berupa lempengan halus dan tidak beraturan, namun setelah aktivasi asam terjadi perubahan signifikan menjadi struktur yang lebih berpori dan kasar akibat penggantian ion antar-lapis dengan H^+ serta pelarutan kation Al^{3+} .

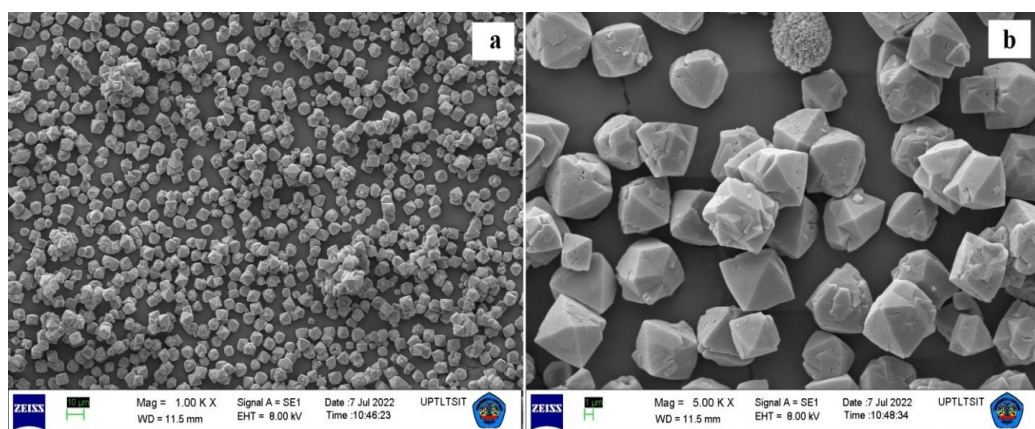
Perubahan ini meningkatkan luas permukaan dan ukuran pori, menjadikan bentonit lebih reaktif untuk sintesis zeolit namun berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Sirait *et al.* (2017) dimana bentuk morfologi dari bentonit setelah perendaman dengan asam mengalami aglomerasi atau penggumpalan akibat

interaksi dengan oksigen setelah proses purifikasi yang membantu meningkatkan luas permukaan bentonit yang dapat terlihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Mikrograf bentonit (a) alam, (b) perendaman HCl (Hamidi *et al.*, 2021), dan (c) aglomerasi setelah perendaman HCl (Sirait *et al.*, 2017).

Pada penelitian untuk zeolit-Y sintesis seperti yang dilakukan oleh Simanjuntak *et al.* (2024) melakukan analisis SEM pada struktur zeolit-Y, hasil analisis menunjukkan bahwa mikrograf dari zeolit-Y berbentuk oktahedral yang menandakan adanya fasa kristalin pada permukaan zeolit. Mikrograf zeolit-Y menggunakan analisis SEM dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Mikrograf zeolit-Y yang disintesis dengan perbesaran: (a) 1000 x dan (b) 5000 x (Simanjuntak *et al.*, 2024).

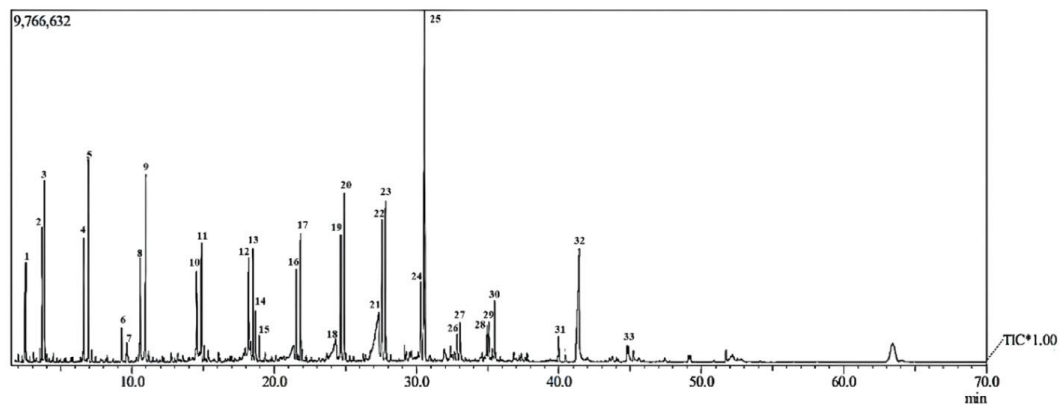
2.7.4. *Gas Chromatography – Mass Spectrometry (GC-MS)*

GC-MS adalah sebuah teknik analitik yang digunakan untuk mendeteksi dan mengidentifikasi senyawa kimia dalam sebuah sampel. Sistem GC-MS konvensional yang digunakan biasanya dilengkapi dengan *single quadrupole* yang bekerja dalam mode *Selected Ion Monitoring (SIM)*, atau *Triple Quadrupole* yang bekerja dalam mode multiple *Selected Reaction Monitoring (SRM)*. Penggunaan *Triple Quadrupole* lebih umum saat ini karena meningkatkan sensitivitas pengukuran.

GC-MS bekerja dengan memisahkan senyawa-senyawa yang terdapat dalam sampel melalui proses kromatografi gas (GC), kemudian mengidentifikasi komponen-komponen tersebut menggunakan spektrometri massa (MS). Proses injeksi dilakukan melalui sistem *Programmed Vaporized Temperature (PVT)* dalam mode *splitless*. Pemisahan senyawa dilakukan pada kolom dengan lapisan 5 % *phenyl methyl siloxane*, yang memiliki panjang 30 meter, diameter internal 0,25 mm, dan ketebalan film 0,25 μm . Waktu analisis bervariasi antara 30 - 60 menit, tergantung pada kompleksitas sampel. Pada antarmuka GC-MS, metode ionisasi yang digunakan biasanya adalah *Electron Ionization (EI)*. Metode ini menghasilkan fragmentasi luas dari molekul kecil, seperti pestisida. Salah satu keuntungan utama dari metode ini adalah bahwa spektrum massa yang dihasilkan sangat dapat direproduksi, terlepas dari desain instrumen dan kondisi MS yang digunakan, dengan energi ionisasi standar sebesar 70 eV. Identifikasi senyawa dapat dilakukan dengan membandingkan spektrum massa hasil analisis dengan lebih dari 240.000 spektrum yang tersedia dalam perpustakaan data standar (Pico *et al.*, 2020).

Pada penelitian ini GC-MS digunakan untuk menganalisis suatu senyawa yang terdapat dalam BCO, proses identifikasi senyawa dapat menggunakan metode sistem perpustakaan GC-MS, komposisi setiap senyawa dianalisis berdasarkan luas puncak yang diukur dalam satuan persentase relatif, data ini kemudian dibandingkan dengan pustaka spektrum untuk mengidentifikasi senyawa yang ada dalam sampel. Persentase relatif luas puncak menunjukkan kontribusi masing-

masing senyawa terhadap total komposisi sampel, memungkinkan penilaian kuantitatif yang lebih akurat dalam analisis kimia. Adapun contoh dari kromatogram GC dari hasil pirolisis minyak kelapa sawit tanpa penggunaan katalis yang telah dilakukan oleh Simanjuntak *et al.* (2024) dapat terlihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Kromatogram GC BCO yang diperoleh dari hasil pirolisis minyak kelapa sawit tanpa penggunaan katalis (Simanjuntak *et al.*, 2024)

Gambar 14 menunjukkan bahwa kromatogram produk hasil pirolisis minyak kelapa sawit tanpa penggunaan katalis terdapat 33 puncak yang mengindikasikan bahwa produk hasil pirolisis minyak kelapa sawit tanpa penggunaan katalis memiliki 33 komponen senyawa dalam BCO. Adapun komponen yang teridentifikasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi kimia dari BCO yang diperoleh dari pirolisis minyak kelapa sawit tanpa penggunaan katalis.

Peak No.	Waktu Retensi (min)	SI (%)	Nama senyawa	Rumus Kimia	Kategori	Persentase relative (%)
1	2,475	94	1-Heksena	C ₆ H ₁₂	Hidrokarbon	2,39
2	3,694	97	1-Heksena	C ₇ H ₁₄	Hidrokarbon	2,17
3	3,861	96	Heptana	C ₇ H ₁₆	Hidrokarbon	3,01
4	6,605	96	1-Oktena	C ₈ H ₁₆	Hidrokarbon	2,89
5	6,941	95	Oktena	C ₈ H ₁₈	Hidrokarbon	4,69
6	9,279	96	Etilbenzena	C ₈ H ₁₀	Hidrokarbon	0,9
7	9,645	94	Benzena	C ₈ H ₁₀	Hidrokarbon	0,91
8	10,598	96	1-Nonena	C ₉ H ₁₈	Hidrokarbon	3,03

9	10,967	96	Nonana	C_9H_{20}	Hidrokarbon	5,11
10	14,552	98	1-Dekena	$C_{10}H_{20}$	Hidrokarbon	2,75
11	14,890	96	Dekena	$C_{10}H_{22}$	Hidrokarbon	3,26
12	18,202	96	1-Undekana	$C_{11}H_{22}$	Hidrokarbon	3,04
13	18,505	96	Undekana	$C_{11}H_{24}$	Hidrokarbon	2,62
14	18,660	95	2-Undekana	$C_{11}H_{22}$	Hidrokarbon	1,21
15	21,351	85	Asam undesilat	$C_{11}H_{22}O_2$	Asam	0,92
16	21,551	95	1-Dodekena	$C_{12}H_{24}$	Hidrokarbon	2,25
17	21,828	97	Dodekena	$C_{12}H_{26}$	Hidrokarbon	3,11
18	24,292	86	Asam Dodekanoat	$C_{12}H_{24}O_2$	Asam	1,15
19	24,666	96	1-Tridesen	$C_{13}H_{26}$	Hidrokarbon	3,41
20	24,921	97	Tridekana	$C_{13}H_{28}$	Hidrokarbon	4,43
21	27,331	91	Asam Tetradekanoat	$C_{14}H_{28}O_2$	Asam	7,35
22	27,573	98	1-Tetradesena	$C_{14}H_{28}$	Hidrokarbon	3,94
23	27,803	97	Tetradesena	$C_{14}H_{30}$	Hidrokarbon	4,17
24	30,293	97	1-Pentadesen	$C_{15}H_{30}$	Hidrokarbon	2,25
25	30,553	97	Pentadesen	$C_{15}H_{32}$	Hidrokarbon	12,25
26	32,856	98	1-Heksadesena	$C_{16}H_{32}$	Hidrokarbon	0,8
27	33,043	96	Heksadesena	$C_{16}H_{34}$	Hidrokarbon	1,21
28	34,935	93	1-Heptadekena	$C_{17}H_{34}$	Hidrokarbon	1,31
29	35,075	97	8- Heptadekena	$C_{17}H_{34}$	Hidrokarbon	1,33
30	35,475	96	Heptadekena	$C_{17}H_{36}$	Hidrokarbon	1,79
31	39,979	94	2-Heptadecanone	$C_{17}H_{34}O$	Ketone	0,84
32	41,405	92	Asam Oktadekanoat	$C_{18}H_{36}O_2$	Asam	8,19
33	44,788	93	Asam Oleat	$C_{18}H_{34}O_2$	Asam	1,32

III. METODE PERCOBAAN

3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan pada bulan Oktober 2024 hingga Maret 2025 di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Analisis komposisi bentonit alam dan bentonit purifikasi menggunakan XRF, serta karakterisasi bentonit alam, bentonit purifikasi dan zeolit-Y sintesis menggunakan XRD dilaksanakan di Laboratorium Instrumen Kimia, Universitas Negeri Padang (UNP). Analisis morfologi permukaan bentonit alam, bentonit purifikasi dan zeolit-Y sintesis menggunakan SEM dilaksanakan di Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (LTSIT) FMIPA Universitas Lampung. Karakterisasi untuk mengidentifikasi senyawa kimia menggunakan GC-MS produk dilaksanakan di Laboratorium Instrumentasi FMIPA Terpadu Universitas Gajah Mada (UGM).

3.2. Alat dan Bahan

Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah; autoklaf, reaktor pirolisis, furnace, neraca analitik, oven, magnetik stirrer, ayakan 300 mesh, corong pisah, corong kaca, cawan porselin, klem dan statif, mortar dan alu, peralatan gelas yang umum digunakan di laboratorium, wadah plastik, batang pengaduk, spatula, dan botol sampel. Analisis karakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) PANalytical Epsilon 3, *X-Ray Diffraction* (XRD) XPERT PRO PANalytical PW3040/60, *Scanning Electron Microscope* (SEM) ZEISS

EVO MA 10, dan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) QP2010S SHIMADZU.

Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah; bentonit, HCl 1M, NaOH (p.a), aluminium foil food grade (FGAF), minyak kelapa sawit curah, aluminium heat exchanger, kertas TBA 0,8 mm, akuades, kertas saring, dan indikator pH universal,

3.3. Prosedur Penelitian

3.2.1. Analisis bentonit sebelum purifikasi

Bentonit yang digunakan berupa serbuk halus berwarna kecoklat kuningan terlebih dahulu digerus agar tidak ada komponen yang menggumpal kemudian disaring bentonit menggunakan mesh 300 nm. Selanjutnya dikarakterisasi menggunakan XRF yang dioperasikan dengan tegangan 30 kV, dan arus 300 μ A, kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan XRD dengan difraktometer PANalytical tipe X'Pert Pro 3040/60 Tahun 2013 produksi Belanda, pemindaian radiasi Cu-K α ($\lambda = 0,154 \text{ \AA}$) dengan energi 40 kV dan arus 30 mA. Pola direkam pada sudut (2θ) dengan rentang 10-100°. dan karakterisasi menggunakan SEM dengan alat ZEISS EVO® MA 10, yang dioperasikan pada 8 kV dengan tegangan percepatan elektron 20 kV dipindai pada perbesaran 1.000; 5.000; 10.000x, dan 15.000x.

3.2.2. Purifikasi bentonit

Bentonit yang telah dikarakterisasi dengan XRF, XRD dan SEM dimurnikan (purifikasi) untuk mengurangi zat pengotor, terutama logam berat yang dapat mengganggu proses pembentukan zeolit seperti besi dan magnesium, sehingga didapatkan bentonit yang lebih murni. Purifikasi dilakukan dengan cara merendam bentonit dalam HCl 1M dengan perbandingan bentonit HCl

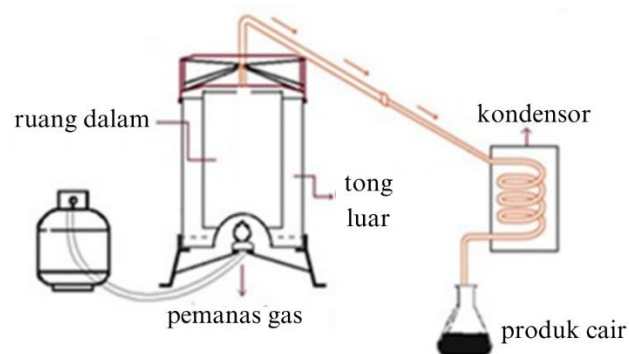
(1:5, mg/mL) sambil diaduk menggunakan *magnetik stirer* secara perlahan selama 24 jam untuk melarutkan logam yang terkandung didalamnya. Setelah itu bentonit dicuci menggunakan akuades hingga pH larutan netral untuk menghilangkan sisa asam, kemudian dikeringkan menggunakan oven dengan suhu 100 °C selama 8 jam. Bentonit hasil purifikasi dikarakterisasi kembali menggunakan XRF, XRD dan SEM.

3.2.3. Sintesis katalis zeolit-Y

Zeolit-Y disintesis dengan cara menimbang NaOH seberat 35,84 g lalu dilarutkan dalam 100 mL akuades pada gelas kimia sambil dipanaskan dan diaduk menggunakan *hot plate stirer*. Alumunium foil yang telah digunting dengan ukuran kecil sebanyak 9,696 g dimasukkan ke dalam larutan NaOH dan diaduk hingga larut, kemudian ditambah 100 g bentonit dan diaduk hingga larutan homogen. Selanjutnya larutan yang terbentuk dimasukkan ke dalam autoklaf dan diamkan selama 24 jam dengan suhu ruang. Setelah itu autoklaf dimasukkan ke dalam oven pada suhu 100 °C selama 72, 96, dan 120 jam. Sampel dari autoklaf dikeluarkan dan dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C selama 24 jam. Sampel padatan digerus dan diayak dengan ayakan 300 mesh untuk mendapatkan sampel dengan ukuran partikel yang realtif homogen. Sampel kemudian dikalsinasi suhu 600 °C selama 8 jam. Sampel hasil kalsinasi kemudian dilakukan karakterisasi XRD untuk menentukan variasi waktu kristal terbaik yang terbentuk. Sampel dengan hasil kristal terbaik kemudian dilakukan karakterisasi SEM untuk melihat morfologi permukaan. Sampel hasil kristal terbaik dilakukan perbanyak kembali dengan metode yang sama dengan menambah variasi kalsinasi suhu tanpa kalsinasi, 500, 600, 700 dan 800 °C untuk melihat perbandingan hasil dari pengaruh kalsinasi, yang kemudian dilakukan karakterisasi kembali dengan menggunakan XRD. Sampel kemudian dilakukan uji aktifitas katalitiknya dengan menggunakan metode pirolisis untuk menghasilkan biohidrokarbon.

3.2.4. Pembuatan biohidrokarbon dengan metode pirolisis

Penelitian ini dilakukan menggunakan alat pirolisis dengan reaktor bagian dalam berbahan *stainless steel* dan bagian luar berbahan besi. Reaktor ini dilengkapi dengan pemanas yang menggunakan gas untuk membuat biohidrokarbon. Reaktor ini dihubungkan dengan kondensor untuk mendinginkan asap yang akan menghasilkan asap cair. Minyak kelapa sawit sebanyak 200 mL dicampur dengan 10 g katalis dan 10 gr *heat exchanger* dimasukkan ke dalam reaktor, lalu dipanaskan selama 1 jam dan cairan hasil pirolisis ditampung dalam wadah. Cairan hasil pirolisis kemudian dimasukkan ke dalam corong pisah dan dibiarkan selama 24 jam hingga lapisan air dan lapisan organik terpisah. Fasa organik selanjutnya dikarakterisasi menggunakan GC-MS. Berikut adalah skema alat dari metode pirolisis yang ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Skema metode pirolisis (Simanjuntak *et al.*, 2024).

3.2.5. Karakterisasi biohidrokarbon

Biohidrokarbon yang didapat dianalisis dengan GC-MS menggunakan alat tipe QP2010S Shimadzu untuk mengidentifikasi komponen dalam sampel dengan kolom tipe Rtx 5 (panjang 30 m; ID 0,25 mm; ketebalan film: 0,25 m; gas pembawa: Helium; EI 70 Ev). Suhu injektor adalah 300 °C dengan mode split, suhu detektor adalah 250 °C, suhu kolom oven adalah 40 °C, laju alir pada tekanan 12,9 kPa dan aliran total 34,5 mL.min⁻¹. Standar yang digunakan untuk

karakterisasi bahan bakar cair adalah dengan menggunakan standar pustaka GC-MS, untuk mengidentifikasi senyawa organik volatil hidrokarbon yang terkandung pada produk BCO.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

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

1. Bentonit telah berhasil dipurifikasi menggunakan HCl 1 M, yang telah dibuktikan dengan analisis XRF dengan melihat hasil pengurangan jumlah logam Fe yang berkurang secara signifikan.
2. Sintesis zeolit-Y yang bersumber dari bentonit alam yang telah dipurifikasi dan aluminium foil dengan menggunakan metode hidotremal telah berhasil disintesis namun masih dalam keadaan belum murni (multifasik) yang telah dibuktikan dengan analisis XRD yang dibandingkan dengan standar IZA.
3. Hasil karakterisasi dengan menggunakan XRD menunjukkan bahwa pada variasi waktu kristalisasi yang terbaik adalah dengan waktu 96 jam kalsinasi 600 °C dengan hasil SEM menunjukkan permukaan yang kasar dengan pori-pori dan tekstur padat yang saling menempel erat mengarah pada dominasi fasa amorf.
4. Variasi suhu kalsinasi terbaik adalah 700 °C dimana hasil XRD menunjukkan terbentuk fasa kristalin yang mengandung zeolit-Y sebesar 20,8%, sodalit 3,8% dan nefelin 75,4%.
5. Hasil pirolisis dari BCO minyak kelapa sawit didapatkan hasil hidrokarbon yang mendominasi walaupun masih terdapat asam, keton ataupun alkohol dan sampel zeolit-Y yang terbaik didapatkan pada suhu kalsinasi 700 °C dengan komposisi hidrokarbon 78,22%, asam 19,61% dan keton 2,17%.

5.2. Saran

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

1. Berdasarkan hasil penelitian, proses perendaman bentonit dalam larutan HCl 1 M masih menyisakan kandungan Fe. Oleh karena itu, disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan dengan memvariasikan konsentrasi larutan HCl guna mengoptimalkan proses purifikasi dan mempelajari lebih lanjut seperti penambahan HNO_3 untuk mengurangi kadar Ca.
2. Mempelajari proses mensintesis zeolit-Y menggunakan metode pisah dan menjaga kestabilan suhu agar kristalinitas yang terbentuk menjadi lebih baik.
3. Kristalinitas yang dihasilkan terbentuk nefelin yang tinggi dan kemungkinan berasal dari bahan baku yang digunakan ataupun suhu yang terlalu tinggi saat kalsinasi, sehingga disarankan menggunakan bahan baku lain dan menggunakan suhu kalsinasi yang cukup agar terbentuk hasil yang diinginkan.
4. Dikarenakan BCO yang dihasilkan masih memiliki kandungan asam yang cukup tinggi, maka disarankan untuk dilakukan perlakuan lanjutan (upgrading) guna menurunkan kadar asam dan meningkatkan kualitas BCO.

DAFTAR PUSTAKA

- Abukhadra, M. R., Ali, S. M., Nasr, E. A., Mahmoud, H. A. A., and Awwad, E. M. (2020). Effective Sequestration of Phosphate And Ammonium Ions by The Bentonite/Zeolite Na–P composite as A Simple Technique to Control The Eutrophication Phenomenon: Realistic Studies. *ACS omega*, 5(24), 14656-14668.
- Ajikashile, J. O., Alhnidi, M. J., Parku, G. K., Funke, A., and Kruse, A. 2023. A Study on The Fast Pyrolysis Of Millet and Sorghum Straws Sourced from Arid and Semi-Arid Regions Of Nigeria on A Twin-Screw Mixing Reactor. *Materials Science for Energy Technologies*, 6, 388–398.
- Alamery, H. R. D., and Ahmed, S. A. 2021. Purification and Activation of The Iraqi Bentonite for Edible Oil Production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1090(1), 1-8.
- 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.
- Atigh, Z. B. Q., Heidari, A., Karimi, A., Pezhman, M. A., Lajayer, B. A., and Lima, E. C. 2021. Purification and Economic Analysis of Nanoclay from Bentonite. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(11), 13690–13696.
- Beckhoff, B., Kanngießner, B., Langhoff, N., Wedell, R., and Wolff, H. 2007. *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*. Springer Science & Business Media.
- Beims, R. F., Hu, Y., Shui, H., and Xu, C. 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, 105510, 1-14.

- Bojaddayni, I., Emin, K. M., El Ouardi, Y., Jilal, I., El Barkany, S., Moradi, K., Repo, E., Laatikainen, K., and Ouammou, A. 2023. A Review on Synthesis of Zeolits From Natural Clay Resources and Waste Ash: Recent Approaches And Progress. *Minerals Engineering*, 198, 086-108.
- Chen, B., Han, X., Tong, J., Mu, M., Jiang, X., Wang, S., Shen, J., and Ye, X. 2020. Studies of Fast CO-Pyrolysis of Oil Shale and Wood in A Bubbling Fluidized Bed. *Energy Conversion and Management*, 205, 112356, 1-10.
- Chen, W. H., Farooq, W., Shahbaz, M., Naqvi, S. R., Ali, I., Al-Ansari, T., and Saidina Amin, N. A. 2021. Current Status of Biohydrogen Production from Lignocellulosic Biomass, Technical Challenges and Commercial Potential Through Pyrolysis Process. *Energy*, 226, 120433, 1-15.
- Davies, T. E., Li, H., Bessette, S., Gauvin, R., Patience, G. S., and Dummer, N. F. 2022. Experimental Methods In Chemical Engineering: Scanning Electron Microscopy and X-Ray Ultra-Microscopy—SEM and XuM The Canadian. *Journal of Chemical Engineering*, 100(11), 3145-3159.
- Dimitriadis, A., Bergvall, N., Johansson, A. C., Sandström, L., Bezergianni, S., Toulakidis, N., Meca, L., Kukula, P., and Raymakers, L. 2023. Biomass Conversion Via Ablative Fast Pyrolysis and Hydroprocessing Towards Refinery Integration: Industrially Relevant Scale Validation. *Fuel*, 332, 1-14.
- Faghihian, H., & Godazandeha, N. (2009). Synthesis of Nano Crystalline Zeolit-Y from Bentonite. *Journal of Porous Materials*, 16(3), 331–335.
- Fahmy, T. Y. A., Fahmy, Y., Mobarak, F., El-Sakhawy, M., and Abou-Zeid, R. E. 2020. Biomass Pyrolysis: Past, Present, and Future. *Environment, Development and Sustainability*, 22(1), 17–32.
- Fuchs, J., Schmid, J. C., Müller, S., and Hofbauer, H. 2019. Dual Fluidized Bed Gasification of Biomass with Selective Carbon Dioxide Removal and Limestone as Bed Material: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 212–231.
- Gan, Y. X., Jayatissa, A. H., Yu, Z., Chen, X., and Li, M. 2020. Hydrothermal Synthesis of Nanomaterials. *Journal of Nanomaterials*. 2020, 1-3.
- Gandhi, D., Bandyopadhyay, R., and Soni, B. 2021. Zeolit Y From Kaolin Clay of Kachchh, India: Synthesis, Characterization and Catalytic Application. *Journal of the Indian Chemical Society*, 98(12), 100-246.

- Gandhi, D., Bandyopadhyay, R., and Soni, B. 2022. Naturally Occurring Bentonite Clay: Structural Augmentation, Characterization and Application as Catalyst. *Materials Today: Proceedings*, 5, 194–201.
- Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia (GAPKI), G. P. K. S. I. 2024. Kinerja Industri Minyak Sawit Tahun 2023 and Prospek Tahun 2024. <https://gapki.id/news/2024/02/27/kinerja-industri-minyak-sawit-tahun-2023-prospek-tahun-2024>
- Gerbreders, V., Krasovska, M., Sledevskis, E., Gerbreders, A., Mihailova, I., Tamanis, E., and Ogurcovs, A. 2020. Hydrothermal Synthesis of ZnO Nanostructures with Controllable Morphology Change. *CrystEngComm*, 22(8), 1346–1358.
- Ginting, S. B., dan Nurfiqih, M. Y. (2018). Sintesis Zeolit A Dari Coal Bottom Ash dengan Metode Step Change of Synthesis Temperature dengan Variasi Suhu Kalsinasi Diaplikasikan untuk Dehidrasi Etanol. *Mechanical*. 9(1), 7-15.
- Hamidi, R., Khoshbin, R., and Karimzadeh, R. 2021. A New Approach for Synthesis of Well-Crystallized Y Zeolit 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.
- Hasanudin, H., Asri, W. R., Zulaikha, I. S., Ayu, C., Rachmat, A., Riyanti, F., Hadiyah, F., Zainul, R., and Maryana, R. 2022. Hydrocracking of Crude Palm Oil to a Biofuel Using Zirconium Nitride and Zirconium Phosphide-Modified Bentonite. *RSC Advances*, 12(34), 21916–21925.
- Hoang, A. T., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Chong, C. T., Cheng, C. K., Sakthivel, R., and Ok, Y. S. 2021. Progress On The Lignocellulosic Biomass Pyrolysis for Biofuel Production Toward Environmental Sustainability. *Fuel Processing Technology*, 106997, 1-27.
- Iannello, S., Morrin, S., and Materazzi, M. 2020. Fluidised Bed Reactors for The Thermochemical Conversion Of Biomass and Waste†. *KONA Powder and Particle Journal*, 37(37), 114–131.
- Inayat, A., Rocha-Meneses, L., Ghenai, C., Abdallah, M., Shanableh, A., Al-Ali, K., Alghfeli, A., and Alsuwaidi, R. 2022. CO-Pyrolysis for Bio-Oil Production Via Fixed Bed Reactor Using Date Seeds and Plastic Waste as Biomass. *Case Studies in Thermal Engineering*, 31, 101841, 1-6.
- IZA. 2017. Framework Type FAU. International Zeolit Association. <https://Asia.Iza-Structure.Org/IZA-SC/Framework.Php?STC=FAU>.

- Jamri, M., A., Li, J., and Smith, R. 2020. Molecular Characterisation Of Biomass Pyrolysis Oil and Petroleum Fraction Blends. *Computers and Chemical Engineering*, 140, 106906, 1-32.
- Jaroensuk, J., Intasian, P., Wattanasuepsin, W., Akeratchatapan, N., Kesornpun, C., Kittipanukul, N., and Chaiyen, P. 2020. Enzymatic Reactions and Pathway Engineering for The Production of Renewable Hydrocarbons. *Journal of Biotechnology*, 309, 1–19.
- Junsheng, L. 2010. Study On The Maize Straw Process of Fast Pyrolysis in The Rotating Cone Reactor and Process. *International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering, CESCE*, 1, 538–541.
- Kapoor, L., Bose, D., and Mekala, A. 2020. Biomass Pyrolysis in a Twin-Screw Reactor to Produce Green Fuels. *Biofuels*, 11(1), 101–107.
- Kapoor, L., Mohammad, A., Jha, J. M., Srivastava, N., Jana, S. K., Alshahrani, M. Y., Ahmad, I., Pal, D. B., and Gupta, V. K. 2022. Biofuel Production Using Fast Pyrolysis of Various Plant Waste Biomasses in Fixed Bed and Twin-Screw Reactors. *International Journal of Energy Research*, 46(13), 19278–19286.
- Khan, H., Yerramilli, A. S., D'Oliveira, A., Alford, T. L., Boffito, D. C., and Patience, G. S. 2020. Experimental Methods in Chemical Engineering: X-Ray Diffraction Spectroscopy—XRD. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98(6), 1255–1266.
- Khan, S. R., Zeeshan, M., and Masood, A. 2020. Enhancement of Hydrocarbons Production Through CO-Pyrolysis of Acid-Treated Biomass and Waste Tire in a Fixed Bed Reactor. *Waste Management*, 106, 21–31.
- Khuenkao, N., and Tippayawong, N. 2020. Production and Characterization Bio-Oil and Biochar from Ablative Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass Residues. *Chemical Engineering Communications*, 207(2), 153–160.
- Li, J., Li, N., Qiao, Y., Zong, P., Wang, C., Tian, Y., and Qin, S. 2020. Biomass Pyrolysis Liquefaction Technique: State of Research and Development Trends. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 558(2), 1-19.
- Liu, Y., Qiu, Y., Zhu, Q., and Tian, T. 2024. Synthesis and VOCs Adsorption Properties of Diatomite/FAU-Type Zeolit Composites. *Chemical Physics Letters*, 141654, 1-25.

- Liu, W., You, W., Sun, W., Yang, W., Korde, A., Gong, Y., and Deng, Y. 2020. Ambient-Pressure and Low-Temperature Upgrading of Lignin Bio-Oil to Hydrocarbons Using a Hydrogen Buffer Catalytic System. *Nature Energy*, 5(10), 759–767.
- Maged, A., Kharbish, S., Ismael, I. S., and Bhatnagar, A. 2020. Characterization of Activated Bentonite Clay Mineral and The Mechanisms Underlying its Sorption for Ciprofloxacin From Aqueous Solution. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(26), 32980–32997.
- Mendes, F. L., de Pinho, A. R., de Almeida, M. B. B., and Caramão, E. B. 2023. Biomass Pyrolysis in a Circulating Fluidized Bed Reactor: Evaluating Two Strategies for The Reduction of Oxygen Content in Bio-Oil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 175, 106-150.
- Moersilah, M., Rahman, A., Alanas, E., Yuliani, Y., and Rosmalia, R. 2021. Synthesis and Characterization of Composite Magnetite-Bentonite From Indonesian Local Minerals. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1098(6), 062045, 1-5.
- Mufandi, I., Treedet, W., Singbua, P., and Suntivarakorn, R. 2020. Efficiency of Bio - Oil Production from Napier Grass Using Circulating Fluidized Bed Reactor with Bio - Oil Scrubber. *KKU Research Journal*, 20, 94–107.
- Mukundan, S., Xuan, J., Dann, S. E., and Wagner, J. L. 2023. Highly Active and Magnetically Recoverable Heterogeneous Catalyst for Hydrothermal Liquefaction of Biomass Into High Quality Bio-Oil. *Bioresource Technology*, 369, 128479, 1-11.
- Muzyka, R., Sobek, S., Dudziak, M., Ouadi, M., and Sajdak, M. 2023. A Comparative Analysis of Waste Biomass Pyrolysis in Py-GC-MS and Fixed-Bed Reactors. *Energies*, 16(8), 1–15.
- Nabil, B., and Malek, O. H., 2021. Characterization and Purification of Algerian Natural Bentonite for Pharmaceutical and Cosmetic Applications. *BMC Chemistry*, 15(1), 1–11.
- Nguyen, D. K., Dinh, V. P., Dang, N. T., Khan, D. T., Hung, N. T., and Tran, N. H. 2023. Effects of Aging and Hydrothermal Treatment on The Crystallization of Zsm-5 Zeolit Synthesis from Bentonite. *RSC Advances*, 13(30), 20565–20574.

- Norouzi, O., Taghavi, S., Arku, P., Jafarian, S., Signoretto, M., and Dutta, A. 2021. What is The Best Catalyst for Biomass Pyrolysis? *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 158, 105-280.
- Padilla, I., López-Delgado, A., and Romero, M. (2022). Kinetic Study of the Transformation of Sodalite to Nepheline. *Journal of the American Ceramic Society*, 105(6), 4336–4347.
- Pangesti, G. G., Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Sascori, S., and Rilyanti, M. 2021. Synthesis of Zeolit-Y From Rice Husk Silica and Food Grade Aluminum Foil Using Modified Hydrothermal Method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1751(1), 1-8.
- Perkins, G., Bhaskar, T., and Konarova, M. 2018. Process Development Status Of Fast Pyrolysis Technologies For The Manufacture of Renewable Transport Fuels From Biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 292–315.
- Pico, Y., Alfarhan, A. H., and Barcelo, D. 2020. How Recent Innovations In Gas Chromatography-Mass Spectrometry Have Improved Pesticide Residue Determination: an Alternative Technique To Be in Your Radar. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 122, 115720, 1-47
- Raza, M., Inayat, A., Ahmed, A., Jamil, F., Ghenai, C., Naqvi, S. R., Shanableh, A., Ayoub, M., Waris, A., and Park, Y. K. 2021. Progress of The Pyrolyzer Reactors and Advanced Technologies For Biomass Pyrolysis Processing. *Sustainability (Switzerland)*, 13(19), 1–42.
- Ren, X., Liu, S., Qu, R., Xiao, L., Hu, P., Song, H., Wu, W., Zheng, C., Wu, X., & Gao, X. 2020. Synthesis and Characterization Single-Phase Submicron Zeolit-Y From Coal Fly Ash and its Potential Application for Acetone Adsorption. *Microporous and Mesoporous Materials*, 295, 109940, 1-53.
- 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.
- Rosa, F., Sánchez-Reolid, R., Gómez-Sirvent, J. L., Morales, R., and Fernández-Caballero, A. 2021. A Review on Machine and Deep Learning for Semiconductor Defect Classification in Scanning Electron Microscope Images. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(20), 1–21.

- Setyaningsih, D., Siagian, C. A., Muna, N., and Purwoko. 2022. Synthesis of Bio Hydrocarbon from Palm Olein through Pyrolysis at Various Temperature. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1034(1), 1-7.
- Sirait, M., Bukit, N., and Siregar, N. 2017. Preparation and Characterization of Natural Bentonite in to Nanoparticles by Co-Precipitation Method. In *AIP conference proceedings* 1801(1), 1-5.
- 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 Zeolit-Y Catalyzed Pyrolysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 1338(1), 1-8.
- 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 Zeolit-Y As Catalyst. *AIMS Energy*, 12(3), 600–616.
- Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Sembiring, Z., and Sihombing, I. P. 2021. Biogasoline Production by Zeolit-A Catalyzed Co-Pyrolysis of Torrefied Cassava Root and Palm Oil. *Journal of Physics: Conference Series*, 1751(1), 1-9.
- Siregar, Y. D. I., Riyadhi, A., Damayanti, W. A., Rizkiansyah, and Murditya, M. B. 2023. Production of Bio hydrocarbons from Vegetable Oils and Animal Fats Using Magnesium Oxide as Catalyst. *Jurnal Kimia Valensi*, 9(2), 195–205.
- Slezak, R., Unyay, H., Szufa, S., and Ledakowicz, S. 2023. An Extensive Review and Comparison of Modern Biomass Reactors Torrefaction vs. Biomass Pyrolizers—Part 2. *Energies*, 16(5), 1-25.
- Song, G., and Wang, X. 2018. Current Research and Prospect of Biomass Pyrolysis Reactor. *Thermal Science and Engineering*, 1(4), 51–53.
- Soria-Verdugo, A., Rubio-Rubio, M., Goos, E., and Riedel, U. 2020. On the Characteristic Heating and Pyrolysis Time of Thermally Small Biomass Particles in A Bubbling Fluidized Bed Reactor. *Renewable Energy*, 160, 312–322.
- Supriyanto, R., Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Situmeang, R. T. M., and Ahmadhani, M. Y. 2018. Chemical Composition of Liquid Fuel Produced by CO-Pyrolysis of Sugarcane Bagasse and Sludge Palm Oil Using Zeolit-Y as Catalyst. *Oriental Journal of Chemistry*, 34(3), 1533–1540.

- Tabandeh, M., Cheng, C. K., Centi, G., Show, P. L., Chen, W. H., Ling, T. C., Ong, H. C., Ng, E. P., Juan, J. C., and Lam, S. S. 2022. Recent Advancement in Deoxygenation of Fatty Acids Via Homogeneous Catalysis for Biofuel Production. *Molecular Catalysis*, 523, 111207, 1-12.
- Tran, Q. K., Le, M. L., Ly, H. V., Woo, H. C., Kim, J., and Kim, S. S. 2021. Fast Pyrolysis of Pitch Pine Biomass in A Bubbling Fluidized-Bed Reactor for Bio-Oil Production. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 98, 168–179.
- Trisunaryanti, W., Triyono, T., Fallah, I. I., Salsiah, S., and Alisha, G. D. 2022. Highly Selective Bio-Hydrocarbon Production using Sidoarjo Mud Based-Catalysts in the Hydrocracking of Waste Palm Cooking Oil. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, 17(4), 712–724.
- Vela, I., González-Arias, J., Berdugo Vilches, T., Seemann, M., and Thunman, H. 2023. Thermochemical Recycling of Tall Oil Pitch in A Dual Fluidized Bed. *Fuel*, 340, 1-8.
- Wang, J., Liu, P., Boronat, M., Ferri, P., Xu, Z., Liu, P., Shen, B., Wang, Z., and Yu, J. 2020. Organic-Free Synthesis of Zeolit-Y with High Si/Al Ratios: Combined Strategy of In Situ Hydroxyl Radical Assistance and Post-Synthesis Treatment. *Angewandte Chemie*, 132(39), 17378–17381.
- Wu, Q., Wang, Y., Peng, Y., Ke, L., Yang, Q., Jiang, L., Dai, L., Liu, Y., Ruan, R., Xia, D., and Jiang, L. 2020. Microwave-Assisted Pyrolysis of Waste Cooking Oil for Hydrocarbon Bio-Oil Over Metal Oxides and HZSM-5 Catalysts. *Energy Conversion and Management*, 220, 113-124.
- Yener, N., Biçer, C., Pekdemir, A. D., Sarıkaya, Y., and Önal, M. 2020. Preparation and Characterization of Nanoporous Powders from Bentonite by Hydrochloric Acid Leaching and using as Bleaching Earth. *SN Applied Sciences*, 2(4), 1–8.
- Yu, S., Kwon, S., and Na, K. 2021. Synthesis of Lta Zeolits With Controlled Crystal Sizes By Variation of Synthetic Parameters: Effect of Na⁺ Concentration, Aging Time, and Hydrothermal Conditions. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 98(2), 411–421.
- Zikri, A., Puspita, I., Erlinawati, Sutini PLAGus, M., Elbi Zalita, P., and Andre, K. 2021. Production of Green Diesel From Crude Palm Oil (CPO) Through Hydrotreating Process by Using Zeolit Catalyst. *Proceedings of the 4th Forum in Research, Science, and Technology*, 7, 67–74.