

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

(Skripsi)

Oleh

TYAS NURFITRIA

2117011032



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

ABSTRAK

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

Oleh

TYAS NURFITRIA

Pengembangan bioenergi dari biomassa merupakan langkah strategis untuk mengatasi keterbatasan energi fosil dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Salah satu potensi energi baru terbarukan (EBT) adalah konversi minyak kelapa sawit menjadi *Bio Crude Oil* (BCO) melalui proses pirolisis. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis zeolit-A dari bentonit dan *Food Grade Aluminium Foil* (FGAF) sebagai katalis dalam pirolisis minyak kelapa sawit untuk meningkatkan kandungan biohidrokarbon pada produk cair.

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2024-Maret 2025 di Laboratorium Anorganik/Fisika Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Karakterisasi *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan di Universitas Negeri Padang (UNP), karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan di UPT LTSIT Universitas Lampung. Analisis BCO menggunakan analisis GC-MS dilakukan di Universitas Gadjah Mada (UGM). Sintesis zeolit-A dilakukan dengan metode hidrotermal menggunakan bentonit yang telah dipurifikasi dengan HCl 1 M serta FGAF sebagai sumber alumina. Variasi waktu kristalisasi yang digunakan adalah 72, 96, dan 120 jam, dengan suhu kalsinasi 500, 600, 700, dan 800 °C selama 8 jam.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa zeolit-A dengan kristalisasi 96 jam dan kalsinasi 700 °C memiliki struktur kristal terbaik dan morfologi berbentuk kubus. Zeolit-A tersebut menunjukkan aktivitas katalitik yang baik dalam pirolisis minyak kelapa sawit dan mampu menghasilkan BCO dengan kandungan hidrokarbon tertinggi sebesar 81,92%.

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

ABSTRACT

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

By

TYAS NURFITRIA

The development of bioenergy from biomass is a strategic effort to address the limitations of fossil fuels and reduce environmental impact. One potential source of renewable energy is the conversion of palm oil into Bio Crude Oil (BCO) through pyrolysis. This study aims to synthesize zeolite-A from bentonite and *Food Grade Aluminium Foil* (FGAF) as a catalyst in the pyrolysis of palm oil to enhance the biohydrocarbon content in the resulting liquid product.

The research was conducted from October 2024 to March 2025 at the Inorganic/Physical Chemistry Laboratory, Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Lampung. Characterization using X-Ray Fluorescence (XRF) and X-Ray Diffraction (XRD) was carried out at Padang State University (UNP), while Scanning Electron Microscopy (SEM) was performed at the UPT LTSIT Laboratory of the University of Lampung. BCO analysis using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) was conducted at Gadjah Mada University (UGM). Zeolite-A was synthesized using a hydrothermal method with bentonite purified using 1 M HCl and FGAF as the alumina source. Crystallization times were varied at 72, 96, and 120 hours, and calcination was carried out at 500, 600, 700, and 800 °C for 8 hours.

The results showed that zeolite-A synthesized with a 96-hour crystallization time and calcined at 700 °C exhibited the best crystal structure and cubic morphology. This zeolite-A demonstrated effective catalytic activity in the pyrolysis of palm oil, producing BCO with the highest hydrocarbon content of 81.92%.

Key words: bentonite, zeolite-A, palm oil, pyrolysis, bio crude oil (BCO).

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

Oleh

Tyas Nurfitria

Skripsi

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

Pada

Jurusan Kimia

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



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

Judul Penelitian

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

Nama Mahasiswa

: **Tyas Nurfitria**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **2117011032**

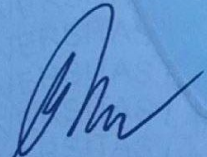
Program Studi

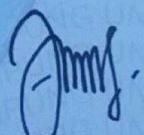
: **Kimia**

Fakultas

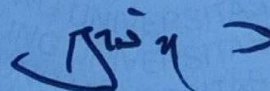
: **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**




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


Devi Nur Anisa, S.Pd., M.Sc.
NIP. 199209272019032000

2. Wakil Dekan Bidang Akademik dan Kerja Sama FMIPA

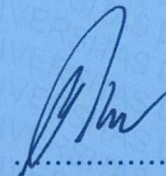

Mulyono, S.Si., M.Si., Ph.D.
NIP. 197406112000031002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

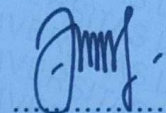
Ketua

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



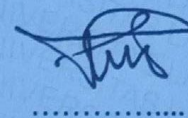
Sekretaris

: **Devi Nur Anisa, S.Pd., M.Sc.**

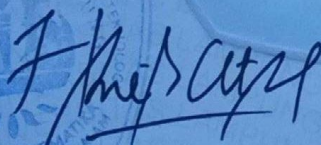
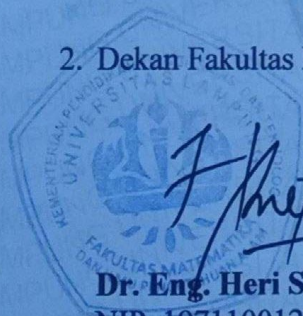


Anggota

: **Prof. Sutopo Hadi, Ph.D.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan 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	: Tyas Nurfitria
Nomor Pokok Mahasiswa	: 2117011032
Jurusan	: Kimia
Fakultas	: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi	: Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul
**“Sintesis Zeolit-A dari Bentonit sebagai Katalis untuk Pengolahan Minyak
Kelapa Sawit Menjadi Biohidrokarbon dengan Metode Pirolisis”** adalah benar
karya saya sendiri, baik gagasan, hasil, dan analisisnya. Selanjutnya saya juga
tidak keberatan jika sebagian atau seluruhnya data 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
Yang menyatakan,



Tyas Nurfitria
NPM. 2117011032

RIWAYAT HIDUP



Penulis yang bernama lengkap Tyas Nurfitriah lahir di Bandar Lampung, pada tanggal 26 Oktober 2003. Penulis merupakan anak ketiga dari pasangan Bapak M. Qodri (Almarhum) dan Ibu Paikem. Pendidikan dasar ditempuh di SDN 1 Sidosari dan lulus pada tahun 2015, kemudian melanjutkan pendidikan di MTs Darul Ma'arif dan lulus pada tahun 2018, serta menyelesaikan pendidikan menengah atas di SMAS Swadhipa pada tahun 2021. Pada

tahun yang sama, penulis diterima sebagai mahasiswa Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama menjadi mahasiswa penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan akademik dan non akademik. Dalam bidang akademik, penulis pernah menjadi anggota peneliti dalam program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) di bidang riset serta program MBKM Magang Industri di PT. HAS Environmental pada tahun 2023. Penulis juga terlibat sebagai peserta Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) Bidang Riset pada tahun 2023, mengikuti Lomba Karya Tulis Ilmiah Nasional (LKTIN) di Universitas Negeri Semarang tahun 2023, serta menjadi Asisten Praktikum Kimia Fisik I dan Kimia Fisik II pada tahun 2024. Dalam kegiatan nonakademik, penulis aktif sebagai Kader Muda sejak tahun 2021, serta menjadi anggota Biro Kesekretariatan Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) pada tahun 2023 dan anggota Biro Kemuslimahan Rohani Islam (ROIS) selama periode 2021-2023.

Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Rejomulyo pada tahun 2024. Penelitian tugas akhir diselesaikan pada bulan Maret 2025 yang dilakukan di Laboratorium Polimer dan Anorganik-Fisik yang berjudul “Sintesis Zeolit-A dari Bentonit sebagai Katalis untuk Pengolahan Minyak Kelapa Sawit Menjadi Biohidrokarbon dengan Metode Pirolisis”.

MOTTO

“Allah akan meninggikan orang-orang yang beriman di antara kamu dan orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat.”

(Q.S. Al-Mujadalah:11)

"Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya."

(Q.S. Al-Baqarah:286)

“Hidup dengan kejujuran adalah jalan lapang menuju kemenangan sejati.”



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

Kedua orang tuaku tercinta,

Bapak M. Qodri (Almarhum) dan Ibu Paikem. Ibu, lewat karya ini aku ingin berterimakasih atas segala cinta, pengorbanan, keringat yang selalu menjadi saksi akan perjuangannya hingga aku menjadi sarjana, kasih sayang serta ketulusan yang tak pernah lelah dalam setiap sujudnya mendo'akan hidupku.

Rasa hormat saya kepada,

Bapak Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D.

Ibu Devi Nur Anisa, S.Pd., M.Sc.

Bapak Prof. Sutopo Hadi, Ph.D.

Bapak Ibu Dosen Jurusan Kimia FMIPA Unila

Atas dedikasi dan ilmu yang telah diberikan selama menempuh pendidikan di
Universitas Lampung

Orang terkasih, Sahabat, Kerabat, dan Teman

Serta

**Almamater Tercinta
Universitas Lampung**

SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "**Sintesis Zeolit-A dari Bentonit sebagai Katalis untuk Pengolahan Minyak Kelapa Sawit Menjadi Biohidrokarbon dengan Metode Pirolisis**". Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga dan para sahabat serta umatnya di akhir zaman. Semoga di yaumul 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. Bapak Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D. selaku Dosen Pembimbing I, atas kebaikan, bimbingan, arahan, masukan, dan seluruh ilmu pengetahuan yang diberikan selama proses perkuliahan s.d. penyelesaian skripsi.
2. Ibu Devi Nur Anisa, S.Pd., M.Sc. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan masukan dan saran selama penulis mengerjakan penelitian ini.
3. Ibu Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si. selaku dosen pembahas I sekaligus Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan kritik dan saran.
4. Bapak Prof. Sutopo Hadi, Ph.D. selaku dosen pembahas II yang telah bersedia menggantikan dosen pembahas I untuk memberikan kritik dan saran kepada penulis.

5. Bapak Prof. Drs. John Hendri, M.S., Ph.D. selaku Pembimbing Akademik atas segala saran dan bantuan selama menjalani masa-masa perkuliahan hingga selesai.
6. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung atas seluruh dedikasi dan ilmu yang diberikan kepada penulis selama perkuliahan.
7. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan FMIPA Unila beserta jajaran FMIPA lainnya.
8. Ibuku tersayang, Ibu Paikem. Pengorbanan dan kasih sayangnya tak akan pernah bisa terbalas. Terima kasih atas kepercayaannya dan mendukung segala keputusan, selalu memberikan kasih sayang, nasehat, motivasi, semangat, dan segalanya
9. Ayahku tersayang, Ayah tercinta Dr. Drs. Hi. Eddy Sutrisno, M.Pd. Terima kasih telah menjadi sosok ayah yang penuh kasih, yang tutur kata dan tindakannya menjadi teladan dalam menjalani hidup. Semoga engkau senantiasa tenang dan mendapat tempat terbaik di sisi-Nya.
10. Bapak M. Qodri (Almarhum), Bapak Ngadiman, Kakakku tercinta Fathur Rohman, Intan Apriliani, Adikku tersayang Ridho Pratama. Terima kasih atas semangat yang telah diberikan, perhatian yang tak pernah lelah, serta dukungan yang selalu hadir bahkan tanpa diminta.
11. Ibu Nurpuri, S. yang selalu mendoakan, memberikan dukungan, semangat dan nasehat untuk penulis.
12. Keluarga besar penulis yang selalu mendoakan, memberikan dukungan, semangat dan nasehat untuk penulis.
13. Sahabat tercinta: Erliana Maharani, Hasmawati dan Tiara Zalfa Nur'alifah atas segala dukungan, bantuan, dan semangat selama masa perkuliahan.
14. Partner penelitian "Tim Pirolisis 21" Khairi Hayad Febriana, Desrita Pratiwi, dan Aditya Anugrah Sahyani yang selalu kebersamai penelitian penulis hingga akhir dan menjadi saksi perjalanan penelitian penulis.
15. Sahabat KIW 21 Azizah Rosihana Tiara Putri, Hanna Luthfia Maghfiroh, Erwanda Lili Utari, Bella Agustin, Melissaputri, Khairi Hayad Febriana, Desrita Pratiwi, Nurul Natasha Berliani, Ayu Fortune Lisa Hutabarat, Adryan Daffa Dzulfiqar, dan Aditya Anugrah Sahyani yang senantiasa kebersamai,

membantu, penulis dalam menyelesaikan tugasnya baik dalam suka maupun duka.

16. Asrama putri ayu “Kita Ramean”: Hasma, Hanna, Rika, Avi, Vanessa, Lili, Nadira, Ulma, Caca, dan Ayu. Teman seperjuangan yang merangkap menjadi satu keluarga. Menemani penulis dalam kondisi apapun, baik suka maupun duka. Memberikan pelajaran hidup arti kebersamaan, bersama dalam 4 tahun perkuliahan. Semoga Allah SWT. selalu memberikan kebaikan, kemudahan dan kesuksesan untuk kita semua.
17. Teman-teman Ok-jek: Kak Kim, Aprizal, Luthfi, Roma, Grace, Dul, Andi, Yuda, Christo, dan lainnya yang tidak dapat disebutkan namanya satu persatu terima kasih atas segala bantuannya.
18. Mba Gege, Kak Qori, Kak Nadia, Kak Risvania, Kak Franky Gom, Kak Sabil, dan Kak Maulana yang telah membantu penulis dalam mengerjakan penelitiannya baik dalam *sharing* ilmu dan pengalaman.
19. Teman-teman seperjuangan Kimia angkatan 2021 khususnya anggota kelas A atas segala kenangan selama kuliah.
20. Serta seluruh pihak lain yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu, terimakasih telah memberikan pengalaman yang baik terhadap penulis dalam masa studinya.
21. Kepada diri saya sendiri, Tyas Nurfitria, terima kasih karena telah berjuang dan bertahan hingga selesai.

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

Bandar Lampung, 26 Juni 2025

Penulis

Tyas Nurfitria

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR.....	iv
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	4
1.3 Manfaat Penelitian.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Bioenergi	5
2.2 Pirolisis	7
2.2.1 Mekanisme pirolisis.....	8
2.2.2 Jenis-jenis teknologi pirolisis	9
2.2.3 Faktor-faktor yang mempengaruhi pirolisis	11
2.3 Zeolit	18
2.3.1 Zeolit-A	19
2.4 Bentonit	20
2.5 Karakterisasi Zeolit dan Analisis BCO	21
2.5.1 <i>X-ray fluorescence</i> (XRF)	22
2.5.2 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	23
2.5.3 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	24
2.5.4 <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS).....	25
III. METODE PENELITIAN.....	28
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	28
3.2 Alat dan Bahan	28
3.3 Prosedur Penelitian.....	29

3.3.1 Analisis bentonit sebelum purifikasi	29
3.3.2 Purifikasi bentonit	29
3.3.3 Sintesis zeolit-A dengan metode hidrotermal.....	30
3.3.4 Karakterisasi katalis zeolit-A	30
3.3.5 Uji aktivitas zeolit-A	31
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Pengantar	33
4.2 Karakterisasi Bentonit	33
4.3 Purifikasi dan Karakterisasi Bentonit.....	37
4.4 Sintesis Zeolit-A dengan Metode Hidrotermal.....	41
4.5 Karakterisasi Katalis Zeolit-A.....	41
4.6 Uji Aktivitas Zeolit-A Sebagai Katalis	51
4.7 Karakterisasi Produk Pirolisis	53
V. KESIMPULAN DAN SARAN	59
5.1 Kesimpulan.....	59
5.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN.....	70

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi kimia BCO yang dihasilkan dari percobaan tanpa katalis.	27
2. Data hasil analisis bentonit dengan XRF	33
3. Data hasil analisis bentonit setelah purifikasi dengan XRF.....	37
4. Perbandingan data XRD standar IZA dan sampel hasil sintesis variasi kristalisasi 72 jam, 96 jam, dan 120 jam.....	44
5. Perbandingan data XRD standar IZA dan zeolit-A hasil sintesis variasi tanpa kalsinasi, kalsinasi suhu 500, 600, 700, dan 800 °C.	48
6. Perbandingan data XRD standar IZA sodalit dan zeolit-A hasil sintesis variasi suhu kalsinasi, tanpa kalsinasi, 500, 600, 700, dan 800 °C.....	49
7. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak curah kelapa sawit dengan katalis zeolit-A tanpa kalsinasi.....	54
8. Komposisi relatif BCO dengan berbagai katalis variasi kalsinasi.....	58
9. Komposisi BCO hasil pirolisis dengan katalis zeolit-A kalsinasi suhu 500 °C.	76
10. Komposisi BCO hasil pirolisis dengan katalis zeolit-A kalsinasi suhu 600 °C.	77
11. Komposisi BCO hasil pirolisis dengan katalis zeolit-A kalsinasi suhu 700 °C.	78
12. Komposisi BCO hasil pirolisis dengan katalis zeolit-A kalsinasi suhu 800 °C.	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Reaktor <i>fixed bed</i>	14
2. Reaktor <i>bubbling fluidized bed</i>	15
3. Reaktor <i>circulating fluidized bed</i>	16
4. Reaktor <i>spouted bed</i>	16
5. Reaktor <i>entrained flow</i>	17
6. Struktur kimia zeolit	19
7. Kerangka zeolit-A	20
8. Interaksi sinar-X dengan materi	22
9. Difraktogram XRD standar zeolit-A	24
10. Morfologi SEM zeolit-A	25
11. Kromatogram GC BCO yang diperoleh tanpa katalis	26
12. Difraktogram bentonit	34
13. Difraktogram bentonit dan komposisi fasa menggunakan Match!3.	35
14. Mikrograf SEM bentonit dengan perbesaran yang berbeda (a) 1.000x, (b) 5.000x, (c) 10.000x, dan (d) 15.000x	36
15. Difraktogram bentonit sesudah purifikasi	38

16. Difraktogram bentonit sesudah purifikasi dan komposisi fasa menggunakan Match!3.	39
17. Mikrograf SEM bentonit hasil purifikasi (a) 1.000x, (b) 5.000x, (c) 10.000x, dan (d) 15.000x.	40
18. Difraktogram Match! dan komposisi fasa sampel dengan variasi waktu kristalisasi (a) 72 jam, (b) 96 jam, dan (c) 120 jam.	42
19. Difraktogram sampel (a) standar IZA zeolit-A, (b) waktu kristalisasi 72 jam, (c) 96 jam, dan (d) 120 jam.	44
20. Difraktogram Match! zeolit-A variasi kalsinasi (a) zeolit-A tanpa kalsinasi, (b) 500 °C, (c) 600 °C, (d) 700 °C, dan (e) 800 °C.	46
21. Difraktogram zeolit-A (a) standar IZA zeolit-A, (b) standar IZA sodalit, (c) zeolit-A tanpa kalsinasi, (d) variasi kalsinasi dengan suhu 500 °C, (e) 600 °C, (f) 700 °C, dan (g) 800 °C.	48
22. Mikrograf SEM zeolit-A 600 °C (a) 1.000x, (b) 5.000x, (c) 10.000x, dan (d) 15.000x.	50
23. Rangkaian alat pirolisis.	51
24. Hasil pirolisis BCO (a) tanpa kalsinasi, (b) kalsinasi 500 °C, (c) 600 °C, (d) 700 °C, dan (e) 800 °C.	52
25. Kromatogram GC BCO minyak curah kelapa sawit dengan katalis.	53
26. Komposisi relatif BCO minyak curah kelapa sawit dengan katalis.	55
27. Kromatogram GC BCO hasil pirolisis dengan katalis zeolit-A kalsinasi (a) 500 °C, (b) 600 °C, (c) 700 °C, dan (d) 800 °C.	56
28. Komposisi relatif BCO dengan katalis zeolit-A kalsinasi (a) 500 °C, (b) 600 °C, (c) 700 °C, dan (d) 800 °C.	57
29. Hasil preparasi bentonit (a) bentonit sebelum purifikasi, dan (b) bentonit setelah purifikasi.	71
30. Katalis zeolit-A (a) tanpa kalsinasi, (b) kalsinasi suhu 500 °C, (c) 600 °C, (c) 700 °C, dan (d) 800 °C.	71

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permasalahan energi merupakan tantangan serius dan bersifat global karena cadangan sumber energi fosil yang tidak terbarukan semakin menipis, sementara permintaan energi terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dan industrialisasi. Masalah lain yang telah dihadapi terkait dengan bahan bakar fosil adalah pemanasan global akibat emisi gas CO₂ dari hasil pembakarannya. Untuk mengatasi krisis energi global dan masalah lingkungan, salah satu upaya yang terus dilakukan adalah pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT) yang hijau, berkelanjutan, dan ekonomis. Pengembangan EBT berbasis biomassa (bioenergi) memiliki potensi besar karena berbagai jenis biomassa terdapat dalam jumlah melimpah dan mudah diperbaharui, sehingga menjadi salah satu upaya yang terus digiatkan di berbagai negara termasuk Indonesia.

Selain didukung ketersediaan biomassa, pengembangan bioenergi juga didukung oleh ketersediaan teknologi pengolahan biomassa yang semakin mapan. Salah satunya adalah pirolisis. Pirolisis merupakan proses perengkahan molekul besar menjadi molekul yang lebih sederhana dengan pemanasan pada suhu yang relatif tinggi. Proses pirolisis umumnya dilakukan pada suhu 300-450 °C dan menghasilkan tiga jenis produk, yakni gas, padat, dan cairan. Dalam konteks energi baru terbarukan, target utama pirolisis biomassa adalah produk cair yang dikenal sebagai *Bio Crude Oil* (BCO). Komposisi BCO terdiri dari berbagai jenis senyawa organik, salah satunya adalah senyawa hidrokarbon (biohidrokarbon). Biohidrokarbon merupakan produk pirolisis yang paling diinginkan, karena

komponen penyusunnya dapat dibedakan menjadi biogasolin, bioavtur, dan biodiesel. Selain itu, senyawa lain dalam BCO terdiri dari keton, ester, asam, dan alkohol (Simanjuntak *et al.*, 2021).

Karena potensinya sebagai EBT, produksi BCO dari berbagai biomassa telah banyak dilakukan seperti akar singkong dan minyak kelapa sawit (Simanjuntak *et al.*, 2021), ampas tebu dan minyak biji karet (Simanjuntak *et al.*, 2019), *crude palm oil* (Ahmadhani, 2018), dan minyak jarak kaliki (Pratiwi, 2018). Hasil penelitian menunjukkan faktor utama penentu komposisi BCO secara umum adalah bahan baku dan katalis. Terkait dengan dua faktor tersebut, untuk mengolah bahan baku tertentu dibutuhkan katalis yang sesuai dalam arti bukan hanya berperan menurunkan suhu pirolisis tetapi juga mampu memacu reaksi pelepasan oksigen sehingga meningkatkan kandungan biohidrokarbon.

Salah satu bahan baku biomassa yang masih dikembangkan dalam proses pirolisis pembuatan bahan bakar cair saat ini adalah minyak kelapa sawit. Kelapa sawit merupakan salah satu komoditas hasil perkebunan yang melimpah, mengingat luasnya area perkebunan kelapa sawit di berbagai daerah di Indonesia. Saat ini terkait posisi strategis minyak sawit dunia, bahwa Indonesia masih akan mendominasi posisinya sebagai pemasok minyak sawit global. Berdasarkan data *Foreign Agricultural Service, United States Department of Agriculture (USDA)*, produksi minyak sawit Indonesia pada tahun 2024 diperkirakan mencapai 46,5 juta metrik ton atau sekitar 58% dari total produksi global. Pengembangan dan pemanfaatan bioenergi berbasis kelapa sawit merupakan salah satu solusi yang dapat diterapkan, karena selain ketersediaannya yang melimpah, minyak kelapa sawit berpeluang untuk dimanfaatkan sebagai salah satu sumber energi dalam pembuatan bahan bakar cair melalui proses pirolisis.

Dalam proses pirolisis, selain bahan baku diperlukan juga zeolit sintetis sebagai katalis untuk memaksimalkan produksi bahan bakar cair. Zeolit sintetis yang digunakan pada penelitian ini adalah zeolit-A. Zeolit-A merupakan zeolit dengan kandungan silika rendah memiliki perbandingan Si/Al yaitu 1:1 sehingga dapat dikatakan ekonomis karena bahan yang digunakan tersedia di alam. Zeolit-A

memiliki aplikasi yang bervariasi, dimana dua di antaranya adalah sebagai adsorben dan katalis. Karena memiliki aplikasi yang luas, produksi zeolit-A terus dikembangkan dari berbagai bahan baku yang berbeda dengan metode hidrotermal antara lain silika sekam padi dan FGAF (Simanjuntak *et al.*, 2021), silika batu apung dan FGAF (Luthfiyyah, 2023), dan bentonit (Srilai *et al.*, 2020).

Pada penelitian ini, zeolit-A disintesis menggunakan bahan baku bentonit dan FGAF dengan metode hidrotermal. Bentonit merupakan salah satu jenis lempung (*clay*) yang mengandung mineral montmorillonit. Secara teoritis, komposisi kimia bentonit terdiri dari 71,62% SiO₂, 15,22% Al₂O₃, dan 13,17% air (Srilai *et al.*, 2020). Mineral ini memiliki kandungan Si dan Al sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan dalam pembuatan zeolit. Selain itu pemilihan bentonit sebagai bahan baku didukung oleh ketersediaannya yang melimpah di alam, namun belum dimanfaatkan secara optimal. Meskipun demikian, nisbah molar Si/Al yang terdapat pada bentonit belum sesuai dengan zeolit-A, sehingga dilakukan transformasi bentonit menjadi zeolit-A dengan merubah nisbah molar Si/Al dengan penambahan sumber alumina. *Food Grade Aluminium Foil* (FGAF) merupakan bahan yang berpotensi sebagai sumber alumina dalam sintesis zeolit-A. Berdasarkan informasi industri (Oster, 2015) diketahui bahwa FGAF memiliki kadar aluminium sebesar 99,99%, sehingga dapat dianggap sebagai aluminium murni. Kelebihan lain menggunakan FGAF, yakni lebih mudah larut dibandingkan logam aluminium dalam bentuk batangan atau butiran. Zeolit-A yang terbentuk dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan selanjutnya digunakan sebagai katalis pada proses pirolisis minyak kelapa sawit untuk menghasilkan biohidrokarbon. Produk cair hasil pirolisis dikarakterisasi menggunakan *Gas Chromatography Mass Spectrometry* (GC-MS).

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mempurifikasi bentonit menggunakan pelarut asam.
2. Menghasilkan zeolit-A dari bentonit dengan proses transformasi.
3. Memperoleh informasi tentang karakteristik zeolit-A meliputi struktur dari XRD dan morfologi dari SEM.
4. Mendapatkan informasi tentang komposisi kimia BCO yang dihasilkan dari pirolisis minyak kelapa sawit menggunakan zeolit-A yang dihasilkan sebagai katalis menggunakan GC-MS.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat sebagai berikut:

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 hilirisasi dari minyak kelapa sawit.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bioenergi

Dalam konteks pengembangan energi alternatif pengganti bahan bakar fosil yang cadangannya terus menurun sebagai sumber Energi Baru Terbarukan (EBT) berbasis biomassa yang secara umum dikenal sebagai bioenergi atau biofuel, merupakan potensi yang perlu digali untuk menjamin ketersediaan energi di masa depan. Pengembangan EBT terus didukung oleh dua faktor utama. Faktor pertama, karena ketersediaan biomassa dalam jumlah yang melimpah dan tersedia di seluruh dunia serta dapat diperbaharui dalam waktu singkat. Faktor kedua yang mendorong pengembangan EBT adalah teknologi yang terus berkembang dan semakin mapan, sehingga mampu menghasilkan bioenergi yang berbeda.

Untuk menghasilkan EBT dalam bentuk cair, dewasa ini telah berkembang tiga teknologi. Teknologi yang pertama adalah teknologi fermentasi untuk menghasilkan bioetanol. Berdasarkan bahan baku yang digunakan, bioetanol dibagi menjadi generasi pertama, generasi kedua, generasi ketiga, dan generasi keempat. Bioetanol generasi pertama diproduksi dari tanaman pangan seperti beras, ubi, gandum, kentang, jagung, dan tebu. Namun, bioetanol generasi tersebut masih banyak dimanfaatkan sebagai bahan pangan dan pakan dibandingkan untuk energi terbarukan, sehingga dikembangkan bahan berbasis non pangan untuk produksi bioetanol. Bioetanol generasi kedua diproduksi dari limbah biomassa yang mengandung lignoselulosa seperti limbah hutan, biomassa kayu, limbah buah-buahan, limbah sayur-sayuran, jerami, dan rumput-rumputan. Generasi kedua ini juga memiliki kendala yaitu tingginya kandungan lignin, memerlukan teknologi mahal dan tidak ekonomis dalam produksi skala besar.

Oleh karena itu, dilakukan pengembangan bioetanol generasi ketiga yang tidak bertentangan dengan produksi pangan, pakan ternak dan produknya lainnya yang berasal dari tanaman (Chisti, 2007). Bioetanol generasi ketiga diproduksi dari mikroalga dan makroalga, sehingga dikenal sebagai etanol alga (Chong *et al.*, 2020). Keunggulan alga sebagai bahan baku bioetanol karena kemampuannya tumbuh di air limbah, mengkonversi CO₂ menjadi biomassa yang bermanfaat, serta menghasilkan biofuel tanpa mengganggu ketersediaan pangan, biodiversitas mikroorganisme, atau tanaman pertanian (Chaudhary *et al.*, 2014). Namun, bioetanol generasi ketiga ini membutuhkan metode khusus agar biomassa tersebut dapat digunakan dalam kondisi kering (Mauliana, 2015). Selanjutnya pengembangan bioetanol generasi keempat, yang melibatkan modifikasi genetika yang dikenal sebagai etanol lanjut atau *advanced biofuel* (Achinas and Euverink, 2016). Salah satu metode produksinya adalah menangkap emisi CO₂ selama proses dengan teknik *oxy-fuel*, yaitu pembakaran bahan baku menggunakan campuran gas yang diperkaya oksigen. Selain itu, generasi keempat menggunakan metode elektro-fermentasi, yang memanfaatkan listrik untuk mengatur respirasi dengan transfer elektron pada alga hasil rekayasa genetika (Oh *et al.*, 2018). Berkaitan dengan bahan baku tersebut, harus dipertimbangkan penggunaannya karena selain digunakan untuk pembuatan bioetanol, bahan baku tersebut juga digunakan untuk bahan pangan dan bahan baku industri lain, sehingga tidak mungkin digunakan sepenuhnya untuk industri bioetanol. Secara prinsip masalah dengan bahan baku dapat diatasi, akan tetapi dalam praktiknya sendiri masih terdapat beberapa kendala dalam produksi bioetanol, karena proses fermentasi memerlukan waktu yang relatif panjang untuk menghasilkan bioetanol secara optimal.

Teknologi yang kedua adalah transesterifikasi untuk menghasilkan biodiesel. Transesterifikasi adalah proses produksi biodiesel dengan cara memisahkan gliserin dari minyak dan mereaksikan asam lemak bebas dengan alkohol, seperti metanol, sehingga terbentuk metil ester. Biodiesel dapat diproduksi dari minyak nabati dan lemak hewani melalui reaksi kimia dengan alkohol. Minyak nabati dapat berasal dari bahan pangan seperti minyak kelapa (Ahmad *et al.*, 2022), dan minyak kelapa sawit (Lametige dkk., 2022) atau dari minyak non-pangan yang

terus dikembangkan, seperti minyak biji karet (Shahab dan Husnah, 2022), minyak biji ketapang (Diana, 2021), dan minyak jarak pagar (Purnomo dkk., 2020). Namun penggunaan minyak nabati non-pangan masih belum optimal, sehingga minyak pangan tetap banyak digunakan sebagai bahan baku utama. Selain minyak nabati, biodiesel juga bisa diproduksi dari lemak hewani, termasuk lemak daur ulang, yang mengandung trigliserida dan asam lemak bebas. Kelebihan biodiesel antara lain adalah tidak beracun, dapat terurai secara alami (*biodegradable*), memiliki bilangan setana yang tinggi, dan dapat mengurangi emisi karbon monoksida, hidrokarbon, serta NOx. Terlepas dari kenyataan ini, produksi biodiesel masih terkendala oleh biaya produksi yang cukup besar, sehingga secara industri harga biodiesel belum mampu bersaing dengan diesel petrokimia. Selain itu, produksi biodiesel memiliki beberapa kelemahan lain seperti, keterbatasan bahan baku yang digunakan untuk dikonversi menjadi biodiesel, dan meningkatnya produksi biodiesel berdampak pada meningkatnya gliserol sebagai produk samping yang dihasilkan (Giannakoupolou *et al.*, 2010).

Permasalahan yang terjadi dengan dua jenis bahan bakar alternatif tersebut mendorong para ahli untuk mengembangkan lebih lanjut bahan bakar cair hasil dari pirolisis. Dalam perspektif pengembangan EBT berbentuk cair, salah satu keunggulan metode pirolisis dibanding dengan metode transesterifikasi untuk pembuatan biodiesel dan metode fermentasi untuk pembuatan bioetanol adalah pembuatannya tidak terkendala oleh bahan baku, yang dapat digunakan mengolah semua jenis biomassa, dan berlangsung cepat dengan peralatan yang relatif sederhana, serta bahan bakar cair yang digunakan ramah lingkungan (Shamsul *et al.*, 2017). Sehingga bahan bakar cair hasil pirolisis sangat menguntungkan dan berpotensi untuk terus dikembangkan.

2.2 Pirolisis

Pirolisis berasal dari dua suku kata yaitu *pyro* yang berarti panas dan *lysis* berarti penguraian atau degradasi, sehingga pirolisis dapat diartikan sebagai proses penguraian suatu bahan akibat perlakuan termal. Dalam konteks pengolahan

biomassa menjadi EBT, pirolisis diartikan sebagai proses penguraian senyawa organik berukuran besar dengan bantuan panas dalam suasana oksigen yang terbatas atau tanpa oksigen menjadi senyawa organik dengan bobot molekul yang lebih kecil, berupa gas, zat cair, dan residu padat.

Dari tiga jenis produk pirolisis di atas, produk cair atau *Bio Crude Oil* (BCO) merupakan produk yang menjadi target utama, karena berpeluang untuk dimanfaatkan sebagai Energi Baru Terbarukan (EBT). BCO memiliki komposisi yang kompleks, dimana terdapat sejumlah senyawa organik seperti hidrokarbon, asam, fenolik, alkohol, dan oksigenat lainnya. Dari komponen-komponen tersebut, hidrokarbon (biohidrokarbon) merupakan produk pirolisis yang paling diinginkan, karena komponen penyusunnya dapat dibedakan menjadi biogasolin, bioavtur, dan biodiesel. Biogasolin yang merupakan fraksi BCO yang terdiri dari hidrokarbon C_5 - C_{12} , menjadi perhatian khusus karena memiliki karakteristik yang mirip dengan bensin yang berasal dari fosil (Simanjuntak *et al.*, 2021). Beberapa contoh biomassa yang telah diolah dengan metode pirolisis adalah sekam padi (Pandiangan *et al.*, 2022), akar singkong dan minyak kelapa sawit (Simanjuntak *et al.*, 2021), ampas tebu dan minyak biji karet (Simanjuntak *et al.*, 2019), *crude palm oil* (Ahmadhani, 2018), dan minyak jarak kaliki (Pratiwi, 2018).

2.2.1 Mekanisme pirolisis

Secara garis besar, pirolisis biomassa melibatkan dua mekanisme, yaitu mekanisme primer dan sekunder. Pada reaksi primer, senyawa volatil dilepaskan sedangkan ikatan kimia dalam polimer terputus selama proses pemanasan biomassa (Uddin *et al.*, 2018). Proses reaksi primer dapat dijelaskan sebagai berikut (Bamboriya *et al.*, 2019).

a. Pembentukan *char*

Char atau residu padat, terbentuk selama konversi biomassa pada proses pirolisis, karena adanya struktur polisiklik aromatik. Pemisahan *char* primer harus segera dilakukan karena dapat terdekomposisi dengan mudah menjadi

char sekunder, Fokus utama dari proses ini adalah pembentukan cincin benzena yang berkombinasi dengan struktur polisiklik.

b. Depolimerisasi

Proses depolimerisasi terdiri dari pemecahan ikatan polimer lignoselulosa menjadi monomer aromatik yang lebih sederhana dan senyawa jenuh dengan berat molekul rendah pada rentang temperatur 300-450 °C, yang menghasilkan pembentukan rantai dalam rentang yang pendek dan menghasilkan zat volatil yang dapat terkondensasi menjadi cairan pada suhu ruang.

c. Fragmentasi

Fragmentasi terdiri dari pembentukan ikatan kovalen dengan monomer satuan yang menghasilkan gas yang tidak mudah terkondensasi dan pembentukan senyawa linier berantai pendek. Pada temperatur optimum sekitar 600 °C selulosa aktif dipecah menjadi asam karbonil, alkohol dan lain-lain.

Berikutnya pada mekanisme reaksi sekunder, senyawa volatil yang tidak stabil yang dihasilkan dari reaksi primer, selanjutnya terjadi proses perengkahan dan repolimerisasi yang dinamakan reaksi sekunder. Perengkahan ini berkaitan dengan pemutusan ikatan kimia pada zat volatil dan pembentukan komponen baru dengan berat molekul yang lebih besar, komponen ini dapat bertahan dengan polimer atau dengan senyawa volatil. Dalam reaksi repolimerisasi, zat volatil terbentuk kembali dan membentuk hidrokarbon polisiklik dengan berat molekul yang lebih besar. Selanjutnya, proses rekombinasi terjadi di dalam pori-pori residu padat, reaksi ini dapat menghasilkan arang yang dinamakan arang sekunder (Bamboriya *et al.*, 2019).

2.2.2 Jenis-jenis teknologi pirolisis

Teknologi pirolisis dibagi menjadi tiga jenis, yaitu *slow pyrolysis*, *fast pyrolysis*, dan *flash pyrolysis*.

1. *Slow Pyrolysis*

Metode *slow pyrolysis* adalah metode pirolisis dengan laju pemanasan yang kurang dari (0.1-1 °C/s) dan waktu yang relatif lama pada suhu ~400 °C. Metode ini dapat menghasilkan BCO berkisar antara 25-30%, gas 25-35%, dan *char* 30-40%. Beberapa penelitian telah menggunakan metode *slow pyrolysis* untuk mengolah berbagai jenis biomassa, antara lain cangkang kopi (Setter *et al.*, 2020), bambu (Hernandez-Mena *et al.*, 2014), dan tongkol jagung (Shariff *et al.*, 2016). *Slow pyrolysis* dapat memberikan manfaat lingkungan yang lebih besar karena menghasilkan lebih banyak *biochar* yang dapat diterapkan pada tanah untuk meningkatkan kualitasnya dan untuk menyerap karbon, tetapi kurang efisien untuk menghasilkan bahan bakar cair.

2. *Fast Pyrolysis*

Metode *fast pyrolysis*, biomassa dipanaskan pada suhu ~500 °C dengan laju kenaikan suhu yang sangat tinggi (10-200 °C/detik) dalam waktu yang sangat singkat (1-2 detik). BCO yang dihasilkan pada *fast pyrolysis* menghasilkan rendemen yang lebih tinggi berkisar antara 60-75%, 13-20% gas dan 12-20% *char*. Metode ini juga telah dimanfaatkan untuk menghasilkan BCO dari beberapa jenis biomassa, antara lain minyak kelapa sawit (Qiao *et al.*, 2019), tandan kosong kelapa sawit (Chang, 2018), dan bagas tebu (Treedet and Suntivarakorn, 2017). Karakteristik utama dari *fast pyrolysis* adalah transfer panas dan laju pemanasan yang tinggi, uap waktu tinggal singkat, pendinginan uap, dan aerosol yang cepat untuk menghasilkan bahan bakar cair dalam jumlah besar, yang dapat dicapai dengan mengatur suhu reaksi dengan tepat dan presisi dari suhu reaksi (Venderbosch and Prins, 2010). Sehingga *fast pyrolysis* sangat tepat digunakan untuk memproduksi bahan bakar cair.

3. *Flash Pyrolysis*

Metode *flash pyrolysis* menggunakan laju pemanasan yang tinggi dengan suhu reaksi antara 450-1000 °C dan waktu tinggal gas yang sangat singkat (<1s). Produk yang dihasilkan dari *flash pyrolysis* berupa 75% BCO, 13% gas, dan 12% *char* (Dhyani and Bhaskar, 2019). Metode ini telah dimanfaatkan untuk pirolisis biomassa antara lain minyak jarak pagar (Raja *et al.*, 2010), batang lobak (Smets

et al., 2011), dan serai (Madhu *et al.*, 2018). Kelebihan dari *flash pyrolysis* yaitu bisa menghasilkan sampai 75% minyak dari berat produk akan tetapi kelemahannya terletak pada stabilitas termal yang buruk, tidak layak secara ekonomis karena efek yang dihasilkan mengandung residu padat sehingga memerlukan biaya tambahan untuk *upgrade* tingkatan kualitasnya (Zaman *et al.*, 2017).

2.2.3 Faktor-faktor yang mempengaruhi pirolisis

Pirolisis merupakan proses yang kompleks dan dipengaruhi oleh sejumlah faktor seperti dipaparkan dibawah ini.

1. Jenis Biomassa

Sumber biomassa adalah salah satu solusi terbaik dalam energi terbarukan untuk menggantikan atau substitusi sumber daya fosil dalam berbagai aplikasi seperti: produksi energi panas, sumber tenaga, bahan bakar untuk transportasi, produksi bahan kimia, dan biomaterial. Pemanfaatan biomassa untuk energi alternatif dapat mengurangi dampak lingkungan saat ini seperti peningkatan CO₂ dalam lingkungan yang disebabkan oleh penggunaan bahan bakar fosil.

Biomassa umumnya mengandung tiga senyawa yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Proses termokimia biomassa tergantung pada komposisi senyawa biomassa dan kandungan organik lainnya. Biomassa terdiri dari 38-50% selulosa, 23-32% hemiselulosa, 15-25% lignin dan komponen lainnya (anorganik dan ekstraktif) dengan persentase total 5–13. Pirolisis biomassa telah terbukti menjadi jalur konversi biokimia yang layak karena kemampuannya untuk meningkatkan nilai kimia dan kalor dari bahan baku biomassa. Metode konversi ini dapat menghasilkan *bio-oil* 70-95% dari berat bahan. Suhu pembakaran pirolisis biomassa berkisar antara 300-1000 °C (Novita dkk., 2021).

2. Suhu

Suhu reaksi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap hasil dan komposisi gas pirolitik. Selama pirolisis, penguraian biomassa berlangsung melalui beberapa tahap. Pada tahap pertama (122-202 °C) terjadi beberapa penataan ulang internal seperti eliminasi air, pemutusan ikatan, pembentukan radikal bebas, pembentukan gugus karbonil, karboksil, dan hidroperoksida. Pada tahap kedua (200-600 °C), produk pirolisis termasuk arang, minyak nabati, dan gas mulai terbentuk. Tahap ketiga (> 600 °C) adalah penguraian arang dengan kecepatan yang sangat lambat, sehingga terbentuk padatan residu yang kaya akan karbon. Komposisi produk pirolisis juga tergantung pada suhu. Pada suhu yang lebih tinggi dari 600 °C, kandungan senyawa polar, alifatik, dan aromatik meningkat, yang dihasilkan dari reaksi dehidrasi dan dekarboksilasi. Hasil dari senyawa gas yang berbeda juga berubah. Selain itu, jumlah air yang dihasilkan secara signifikan dipengaruhi oleh suhu. Pada suhu hingga 360 °C, produksi air meningkat secara signifikan dan sementara peningkatan suhu lebih lanjut tidak menyebabkan peningkatan produksi air. Namun, pada suhu 580 °C produksi air mulai menurun (Hu and Gholizadeh, 2019).

3. Laju pemanasan

Laju pemanasan memiliki peran penting dalam menentukan produk akhir dari proses pirolisis karena mempengaruhi sifat dan komposisi produk akhir. Laju pemanasan partikel biomassa menjadi parameter untuk membedakan pirolisis lambat dan pirolisis cepat. Pada pirolisis lambat, kisaran laju pemanasan adalah 1-100 °C/menit sedangkan laju pemanasan yang lebih tinggi dari 1000 °C/menit diperlukan untuk proses pirolisis cepat. Depolimerisasi selulosa dan hemiselulosa dapat ditingkatkan dengan meningkatkan laju pemanasan. Hal ini juga meminimalkan waktu tinggal volatil di dalam reaktor dan juga reaksi sekunder. Selain itu, laju pemanasan yang lebih tinggi mendorong reaksi perengkahan dan menghasilkan lebih banyak volatil (*bio-oil*) sementara arang yang dihasilkan lebih sedikit. Di sisi lain, suhu rendah dan laju pemanasan yang rendah akan meningkatkan ikatan hidrogen intramolekuler dari gugus fungsi selulosa, meningkatkan kemungkinan tumbukan untuk menghasilkan reaksi dehidrasi (Hu and Gholizadeh, 2019).

4. Waktu tinggal

Waktu tinggal padatan mempengaruhi jumlah hasil dari pirolisis karena semakin lama bahan di dalam reaktor maka padatan akan semakin terkomposisi menjadi minyak dan gas. Suhu rendah menyebabkan waktu tinggal uap lebih lama sehingga produk arang yang lebih tinggi. Repolimerisasi komposisi kimia biomassa dapat ditingkatkan jika waktu tinggal asap lebih lama sehingga dapat memberikan waktu lebih untuk bereaksi. Menurut (Mohamed *et al.*, 2013), menyatakan bahwa waktu tinggal sangat mempengaruhi komposisi senyawa *bio-oil* dan gas yang dihasilkan dari proses pirolisis, tetapi tidak mempengaruhi hasil arang secara signifikan.

5. Reaktor

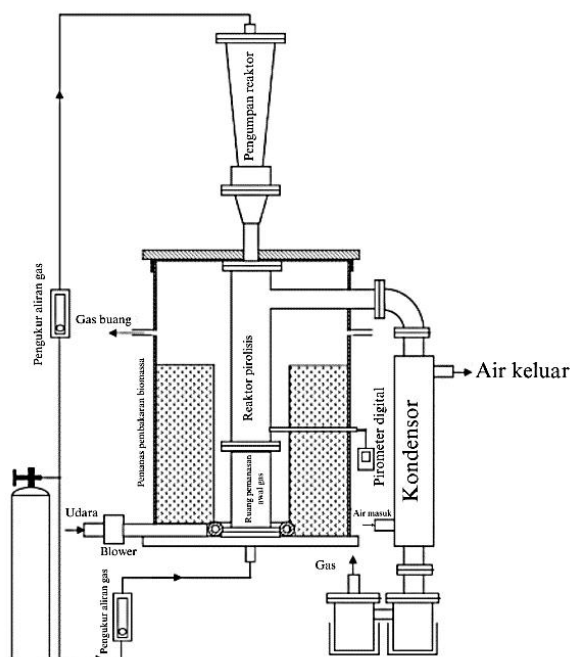
Reaktor merupakan inti dari segala jenis prosedur pirolisis yang telah menjadi subjek penemuan, penelitian signifikan, dan kemajuan untuk memperluas aspek yang sangat diperlukan. Pada awalnya, para pengembang reaktor pirolisis berasumsi bahwa ukuran partikel biomassa yang kecil dan waktu tinggal yang sangat singkat dapat menghasilkan minyak nabati yang menonjol. Namun, penelitian lebih lanjut menemukan hasil yang berbeda. Ukuran partikel komponen dan waktu tinggal uap memiliki sedikit dampak pada hasil *bio-oil*, tetapi parameter tersebut secara signifikan mempengaruhi komposisi *bio-oil*. Reaktor pirolitik tidak diragukan lagi merupakan peralatan paling penting dalam proses pirolisis (Uddin *et al.*, 2018).

Dengan kemajuan teknologi dalam pengembangan reaktor pirolisis, berbagai jenis reaktor telah dirancang dan dieksplorasi untuk mengoptimalkan proses pirolisis serta menghasilkan *bio-oil* dengan kualitas yang lebih baik. Setiap jenis reaktor memiliki karakteristik dan kapasitas produksi yang berbeda-beda, dengan kelebihan dan keterbatasannya masing-masing. Berikut ini adalah beberapa jenis reaktor pirolisis yang umum digunakan.

1) *Fixed bed reactor*

Fixed bed reactor adalah reaktor yang bekerja berdasarkan prinsip kontak langsung antara pereaktan dan partikel-partikel katalis. Pada jenis reaktor ini,

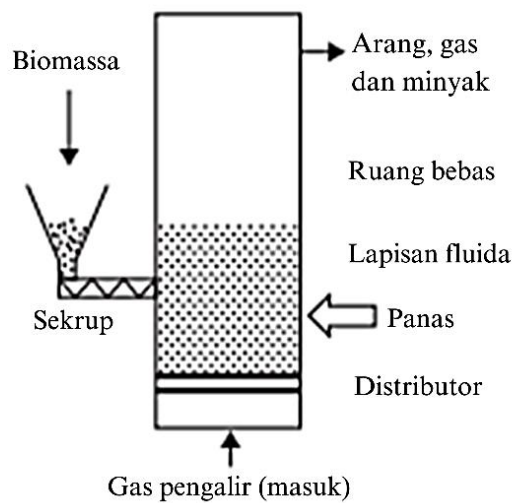
bahan baku ditempatkan di dalam reaktor yang dipanaskan secara eksternal. Sebelum percobaan, reaktor dialiri gas *inert* (N_2 , Ar) dan aliran gas dipertahankan selama proses berlangsung untuk memberikan atmosfer anaerobik. Penggunaan *fixed bed reactor* dalam proses pirolisis telah terbukti efektif dalam konversi biomassa menjadi *bio-oil*, seperti penelitian oleh Simanungkalit dan Mansur (2020), menunjukkan hasil *bio-oil* sebesar 53,40% dari biomassa cangkang kelapa sawit. Reaktor *fixed bed* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Reaktor *fixed bed* (Gholizadeh *et al.*, 2013).

2) *Bubbling fluidized bed reactor*

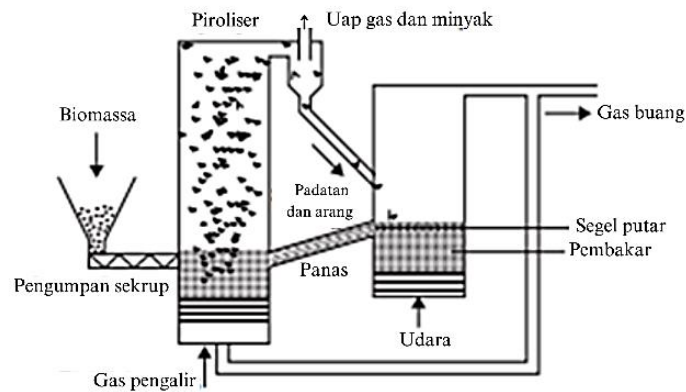
Bubbling fluidized bed reactors adalah reaktor yang telah banyak digunakan karena kesederhanaannya dan kemudahan dalam pengendalian proses. Media padatan yang digunakan dalam reaktor jenis ini adalah pasir, didukung oleh pelat berlubang dan difluidisasi menggunakan gas inert yang mengalir ke atas dari bagian bawah reaktor. Reaktor ini mampu menghasilkan rendemen *bio-oil* sekitar 70-75% (Sharifzadeh *et al.*, 2019). Beberapa penelitian telah menggunakan reaktor ini dalam proses pirolisis, salah satunya penelitian oleh Tran *et al.*, (2021) menunjukkan hasil *bio-oil* sebesar 65,5% dengan menggunakan biomassa *pitch pine* (*Pinus rigida*). Reaktor *bubbling fluidized bed* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Reaktor *bubbling fluidized bed* (Basu, 2013).

3) *Circulating fluidized bed reactor*

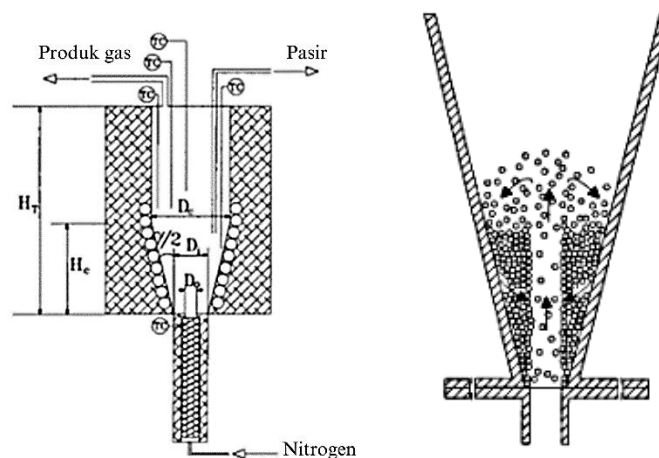
Circulating fluidized bed adalah reaktor yang pada dasarnya merupakan pengembangan dari *bubbling fluidized bed reactors*, dimana aliran gas pembawa mengangkut media reaktor, yang sering kali berupa pasir, masuk dan keluar dari reaktor. Prinsip kerja reaktor ini seluruh padatan material yang terbawa oleh aliran, kemudian *dusting equipment* berfungsi untuk memisahkan material gas. Keuntungan penggunaan jenis reaktor ini antara lain reaksi dapat berjalan dengan cepat, memperoleh konversi yang lebih tinggi, dan produksi tar yang rendah. Disisi lain reaktor ini memiliki kelemahan yaitu perpindahan panas yang tidak efisien (Basu, 2013). Penggunaan reaktor ini telah dilakukan dalam proses pirolisis cepat untuk mengkonversi biomassa menjadi *bio-oil*, seperti penelitian oleh Alvarez *et al.* (2024), menunjukkan hasil *bio-oil* sebesar 36,90% dari biomassa rumput gajah. Reaktor *circulating fluidized bed* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Reaktor *circulating fluidized bed* (Basu, 2013).

4) *Spouted bed reactor*

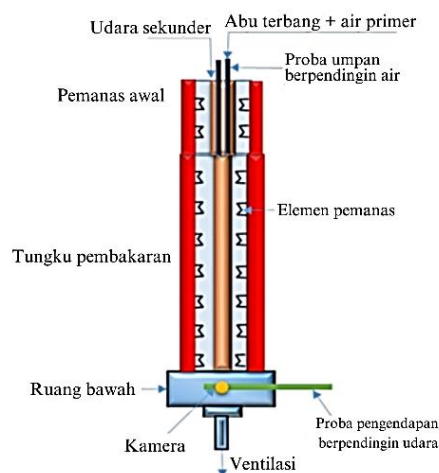
Spouted bed reactor dapat digunakan untuk partikel dengan tekstur yang tidak beraturan, partikel halus, dan partikel dengan distribusi ukuran yang luas. Reaktor ini memiliki beberapa keuntungan diantaranya laju perpindahan panas tinggi, kemudahan pergerakan partikel, dan pengoperasian dengan waktu tinggal gas yang singkat. Selain itu, *spouted bed reactor* sesuai untuk operasi berkelanjutan, yang sangat relevan untuk implementasi pirolisis biomassa pada skala yang lebih besar (Czajczynska *et al.*, 2017). Penggunaan reaktor ini telah dilakukan dalam proses pirolisis cepat untuk mengkonversi biomassa menjadi *bio-oil*, seperti penelitian oleh Alvarez *et al.* (2024), menunjukkan hasil *bio-oil* sebesar 70 wt.% dari sekam padi. Reaktor *spouted bed* dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Reaktor *spouted bed* (Czajczynska *et al.*, 2017).

5) *Entrained flow reactor*

Entrained flow reactors terinspirasi oleh teknologi gasifikasi, dimana partikel-partikel biomassa terbawa oleh aliran gas inert yang telah dipanaskan sebelumnya. Reaktor ini menghasilkan sekitar 50% *bio-oil* dan 20–30% arang pada suhu reaktor 500 °C. Namun reaktor ini memiliki kelemahan, dalam hal transfer panas yang buruk antara gas dan partikel biomassa, yang mengakibatkan laju aliran gas yang besar dan keterbatasan dalam potensi skala-up reaktor (Sharifzadeh *et al.*, 2019). Dalam penelitian sebelumnya Maliutina *et al.* (2017) menggunakan reaktor ini dalam pirolisis cepat yang menunjukkan hasil *bio-oil* sebesar 60,22 wt% pada suhu 800 °C dan 73,74 wt% pada suhu 600 °C diperoleh selama pirolisis mikroalga *Chlorella vulgaris* (MA) dan cangkang kelapa sawit (CKS). Reaktor *entrained flow* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Reaktor *entrained flow* (Raza *et al.*, 2021).

6. Katalis

Katalis merupakan zat yang dapat mempercepat reaksi tanpa mengalami perubahan secara kimiawi pada akhir reaksi, reaksi yang berlangsung dengan bantuan katalis secara umum dikenal dengan reaksi katalisis. Katalis dapat mempercepat reaksi dengan jalan menurunkan energi aktivasi reaksi. Secara umum telah diketahui bahwa komposisi kimia dari *liquid fuel* sangat tergantung pada dua faktor utama, yakni jenis bahan baku yang diolah dan katalis yang

digunakan. Pada umumnya telah diketahui bahwa penggunaan katalis yang berbeda untuk bahan baku tertentu akan menghasilkan *liquid fuel* dengan komposisi yang berbeda. Atas dasar ini, pengembangan teknologi pirolisis dewasa ini pada umumnya difokuskan pada pengembangan katalis yang tepat untuk digunakan dalam pengolahan bahan baku tertentu.

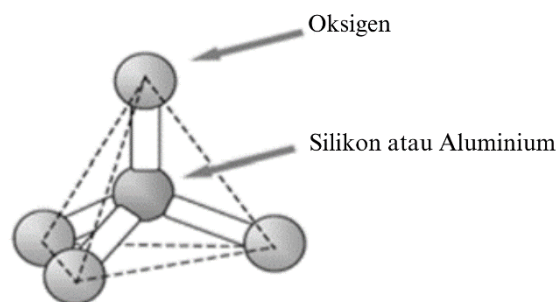
Katalis yang digunakan pada penelitian ini adalah katalis jenis heterogen, karena lebih efektif dan efisien, mudah untuk digunakan dalam berbagai media, tidak korosif, relatif murah, dan dapat dengan mudah diaktifkan untuk mendapatkan sifat katalis yang diinginkan. Berbagai zat padat telah digunakan sebagai penyangga katalis heterogen, antara lain adalah alumina, zeolit, dan silika. Dalam penelitian sebelumnya, salah satu penyangga katalis yang telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi adalah zeolit, karena memiliki kemampuan yang baik untuk menghilangkan oksigen melalui tiga mekanisme, yakni dekarbonisasi, dekarboksilasi, dan hidrideoksigenasi (Dutta *et al.*, 2016). Dengan demikian, penggunaan zeolit sebagai katalis menghasilkan *liquid fuel* dengan kandungan hidrokarbon yang tinggi. Kemampuan tersebut menjadi dasar pemilihan zeolit-A dalam penelitian ini.

2.3 Zeolit

Zeolit merupakan kristal terhidrasi yang terdiri dari unit TO_4 tetrahedral ($\text{T} = \text{Si}$ atau Al) yang membentuk rongga dan saluran antarkristal teratur dengan dimensi atom yang dihubungkan oleh oksigen. Zeolit berdasarkan sumbernya dapat dibedakan menjadi dua, yaitu zeolit alam dan zeolit sintetik. Zeolit alam mengandung kation-kation seperti K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , dan Mg^{2+} . Zeolit alam meskipun memiliki aktivitas katalitik dan harganya murah, namun diketahui mengandung pengotor alami yang mengurangi aktivitasnya serta memiliki komposisi yang sangat beragam tergantung pada daerah dimana zeolit tersebut ditemukan, serta membutuhkan beberapa hari hingga beberapa tahun untuk dibuat. Oleh karena kelemahan tersebut, dewasa ini zeolit sintetik lebih banyak dimanfaatkan. Zeolit sintetik banyak dibuat dari bahan baku yang merupakan senyawa murni, sehingga

tidak mengandung pengotor seperti halnya dengan zeolit alam. Di samping itu, komposisinya dapat diatur dengan mengatur komposisi bahan baku yang digunakan, sehingga zeolit sintetik memiliki karakteristik yang lebih konsisten. Dalam beberapa tahun terakhir, zeolit sintetik dibuat menggunakan mineral alam dikarenakan pembuatan reagen kimia memerlukan biaya yang mahal. Zeolit sintetik tersebut meliputi mordenit, pirofilit, epidesmine, klinoptinolit, chabazite, serta zeolit sintetik lainnya (Meng *et al.*, 2019). Zeolit sintetik 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 (Dongoran dkk., 2021).

Secara sederhana, struktur zeolit digambarkan berbentuk tetrahedral unit TO_4 , dimana T adalah ion Si^{4+} atau Al^{3+} dengan atom O berada diantara dua atom T, seperti ditunjukkan dalam Gambar 6.

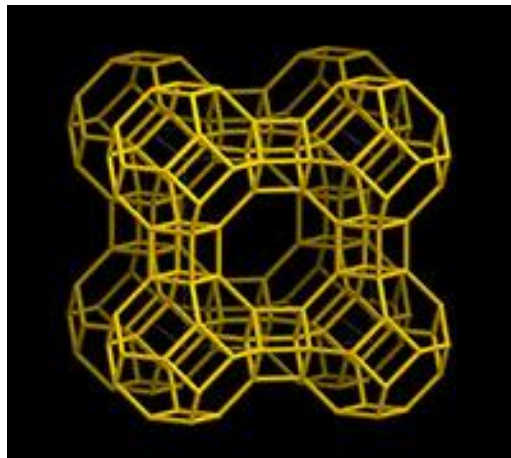


Gambar 6. Struktur kimia zeolit (Georgiev *et al.*, 2009).

2.3.1 Zeolit-A

Dalam penelitian ini menggunakan zeolit sintetik, yakni zeolit-A. Zeolit-A merupakan tipe zeolit sintetik dengan rumus kimia $[Na_{12}(H_2O)_{27}]_8[Al_{12}Si_{12}O_{48}]_8$. Zeolit sintetik juga disebut sebagai NaA atau LTA (*Linde Type A*). Struktur jaringan tiga dimensi zeolit-A terbentuk dari cincin beranggotakan empat ganda yang terhubung oleh kerangka sodalit (Gambar 7) (Indira and Abhitha, 2022). Zeolit-A merupakan tipe dari zeolit sintetik dengan nilai nisbah Si/Al yang

rendah yaitu 1 atau mendekati 1. Reaktan utama dalam sintesis zeolit-A adalah senyawa silika dan alumina.



Gambar 7. Kerangka zeolit-A (*International Zeolite Association (IZA)*, 2017).

Sintesis zeolit-A dengan metode hidrotermal dari berbagai bahan baku yang hingga saat ini terus dikembangkan, silika sekam padi dan aluminium foil *food grade* (Simanjuntak *et al.*, 2021), silika batu apung dan aluminium foil *food grade* (Luthfiyyah, 2023), dan bentonit (Srilai *et al.*, 2020). Sintesis zeolit-A dari bentonit menggunakan metode hidrotermal dua langkah telah dilakukan oleh (Srilai *et al.*, 2020) dengan menggunakan NaOH dalam campuran dengan gel aluminosilikat. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa zeolit-A dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan yang berkaitan dengan katalisis.

2.4 Bentonit

Bentonit merupakan salah satu jenis lempung (*clay*) yang kaya akan mineral montmorillonite, dengan kandungan utama mencapai 85%. Mineral ini tergolong dalam kelompok alumino silikat dengan struktur berlapis hidro, serta ukuran partikel berkisar antara 2 mm hingga 4 mm (Berghuis *et al.*, 2022). Rumus kimia umum bentonit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Bentonit alam mengandung berbagai jenis mineral pengotor seperti kalsit, kuarsa, klinoptilolit, oksida besi, feldspar, dan asam humat (Bukit *et al.*, 2021). Secara teoritis, komposisi kimia bentonit terdiri dari 71,62% SiO_2 , 15,22% Al_2O_3 , dan 13,17% air (Srilai *et al.*, 2020).

Bentonit memiliki beberapa sifat fisik dan kimia yang unik, di antaranya kemampuan untuk mengembang, sifat penukar ion, dan luas permukaan yang besar yang memungkinkan daya serap air yang tinggi. Selain itu, adanya keasaman permukaan bentonit terkait dengan asam Bronsted dan asam Lewis memungkinkan penggunaan bentonit sebagai katalis (Ruskandi dkk., 2020). Bentonit dapat mengembang ketika dilarutkan dalam air, sehingga bentonit memiliki porositas yang tidak permanen serta stabilitas termal dan hidrotermal yang rendah. Oleh karena itu, sifatnya perlu ditingkatkan melalui proses aktivasi atau perlakuan tertentu. Bentonit dapat diaktivasi dengan H_2SO_4 , HCl , CaCl_2 , MgCl_2 , ZnCl_2 , NaOH , KOH , Na_2CO_3 , dan NaCl . Aktivasi bentonit menggunakan HCl menghasilkan permukaan yang lebih berpori melalui proses *leaching* kation dan pengotor. Proses ini membentuk pori-pori kecil dengan luas permukaan yang lebih besar (Muslimah *et al.*, 2023) serta meningkatkan rasio Si/Al (Hamidi *et al.*, 2021). Sebagai katalis heterogen, bentonit memiliki keunggulan seperti stabilitas yang tinggi, selektivitas yang baik, proses penanganan dan pemurnian lebih sederhana, aman digunakan serta lebih ramah lingkungan. Kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 yang tinggi dan ketersediaan bentonit yang melimpah di alam, mendukung pemanfaatan bentonit sebagai bahan baku dalam sintesis zeolit.

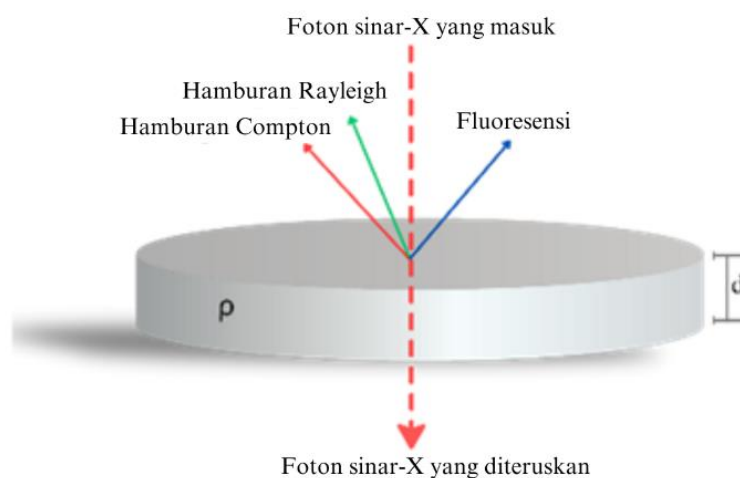
2.5 Karakterisasi Zeolit dan Analisis BCO

Penelitian ini dilakukan karakterisasi XRF untuk menentukan unsur-unsur dan senyawa yang terkandung di dalam bentonit. Hasil sintesis zeolit dikarakterisasi dengan XRD untuk menentukan fasa amorf pada silika serta fasa kristalin atau amorf pada zeolit-A, dan karakterisasi SEM untuk mengetahui morfologi permukaan zeolit pada zeolit-A. Selanjutnya, komposisi kimia dari BCO dianalisis menggunakan GC-MS.

2.5.1 *X-ray fluorescence (XRF)*

XRF adalah metode analitik untuk menentukan komposisi kimia dari semua jenis bahan. Sampel yang dianalisis bisa dalam bentuk padat, cair, bubuk, filtrat atau bentuk lainnya. Metode ini cepat, akurat dan tidak merusak sampel, umumnya hanya membutuhkan persiapan sampel yang minimal. Presisi dan reproduktifitas analisis XRF sangat tinggi. Hasil yang sangat akurat dimungkinkan ketika spesimen standar yang baik tersedia, waktu pengukuran tergantung pada jumlah elemen yang akan ditentukan dan akurasi yang diperlukan, serta bervariasi antara beberapa detik atau 30 menit. Waktu analisis setelah pengukuran hanya beberapa detik (Brouwer, 2010).

Prinsip kerjanya adalah sebagai berikut: Terdapat tiga interaksi utama ketika sinar-X bersentuhan dengan materi: Fluoresensi, hamburan Compton, dan hamburan Rayleigh. Jika seberkas foton sinar-X diarahkan ke lempengan material dalam fraksi untuk ditransmisikan, sebagian kecil diserap menghasilkan radiasi fluoresen dan sebagian kecil didistribusikan kembali. Hamburan dapat terjadi dengan hilangnya energi atau tanpa kehilangan energi. Hamburan pertama dikenal sebagai hamburan Compton, dan kedua adalah Rayleigh. Fluoresensi dan hamburan bergantung pada ketebalan, densitas dari komposisi material dan pada energi sinar-X yang ditunjukkan pada Gambar 8 (Brouwer, 2003).



Gambar 8. Interaksi sinar-X dengan materi (Brouwer, 2010).

2.5.2 X-Ray Diffraction (XRD)

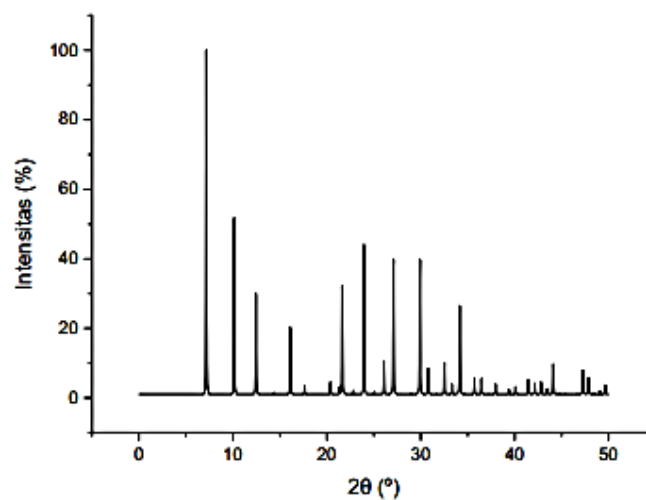
Karakterisasi XRD bertujuan untuk mengidentifikasi fasa (kuantitatif) dan untuk menentukan struktur kristal atau kristalinitas (kualitatif) dari suatu katalis dengan memanfaatkan radiasi gelombang elektromagnetik sinar-X. Kebanyakan dari katalis berbentuk padatan kristal seperti oksida logam, zeolit dan logam yang berpenyangga. XRD menjadi teknik yang cukup handal dan mendasar untuk mengevaluasi sifat-sifat fasa kristal dan ukuran kristal (Leofanti *et al.*, 1997).

Prinsip dasar XRD adalah membelokkan cahaya yang melalui celah kristal. Difraksi cahaya oleh kisi-kisi atau kristal ini dapat terjadi apabila difraksi tersebut berasal dari radius yang memiliki panjang gelombang yang setara dengan jarak antar atom, yaitu sekitar 1 Angstrom. Radiasi yang digunakan berupa radiasi sinar-X, elektron dan neutron. Sinar-X merupakan foton dengan energi tinggi yang memiliki panjang gelombang berkisar antara 0,5-2,5 Angstrom. Ketika berkas sinar-X berinteraksi dengan suatu material, maka sebagian berkas akan diabsorpsi, ditransmisikan dan sebagian lagi dihamburkan terdifraksi. Hamburan terdifraksi inilah yang dideteksi oleh XRD. Berkas sinar-X yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasanya sama. Berkas sinar-X yang saling menguatkan itulah yang disebut sebagai berkas difraksi. Hukum Bragg merumuskan tentang persyaratan yang harus dipenuhi agar berkas sinar-X yang dihamburkan tersebut merupakan berkas difraksi (Hakim dkk., 2019).

Zeolit hasil sintesis dapat dianalisis dengan menggunakan bantuan *International Zeolite Association* (IZA), JCPDS, PCPDF, ataupun Match untuk menyamakan puncak 2θ yang muncul pada zeolit hasil sintesis dengan standar zeolit.

Berdasarkan IZA bila diamati dari hasil karakterisasi dengan XRD zeolit-A memiliki puncak-puncak karakteristik yang khas ditunjukkan pada Gambar 9.

Puncak 2θ yang khas muncul pada zeolit-A 7,2; 10,3; 12,6; 16,2; 21,8; 24; 26,2; 27,2; 30; 30,9; 31,1; 32,6; 33,4; dan 34,3°.



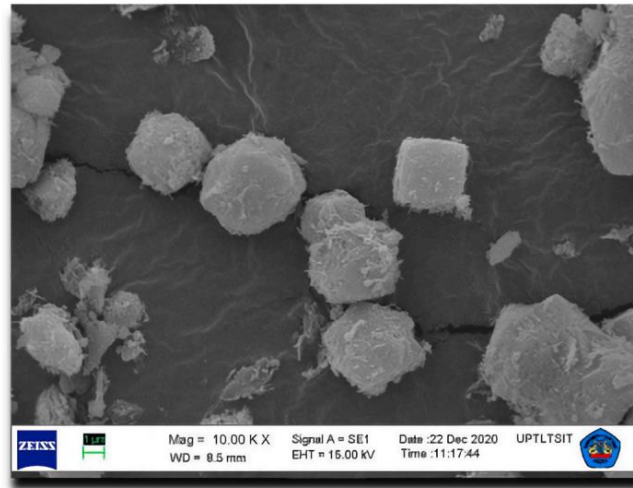
Gambar 9. Difraktogram XRD standar zeolit-A (*International Zeolite Association (IZA), 2017*).

2.5.3 *Scanning Electron Microscopy (SEM)*

SEM merupakan instrumen yang sangat kuat untuk menguji, menginterpretasikan mikro struktur dari suatu material, dan secara luas digunakan dalam ilmu material. SEM biasa digunakan untuk melihat morfologi permukaan, menghasilkan gambar visual yang detail dari sebuah partikel dengan kualitas tinggi dan resolusi spasial 1 nm, dan perbesaran alat ini dapat mencapai 300.000x. Mikrograf yang dihasilkan dari analisis dengan SEM memberikan beberapa informasi yang berada di permukaan sampel, yakni topografi, morfologi, komposisi, dan informasi kristalografi. Instrumen SEM bekerja berdasarkan prinsip bahwa elektron primer yang dilepaskan dari sumbernya memberikan energi kepada elektron atom spesimen, yang kemudian dilepaskan sebagai elektron sekunder (SE). Gambar dibentuk dengan mengumpulkan elektron sekunder dari setiap titik spesimen.

Analisis SEM digunakan untuk mengkaji morfologi permukaan sampel, termasuk bentuk, ukuran, dan distribusi partikel pada permukaan. Hasil analisis ini dapat memastikan apakah sintesis zeolit tertentu berhasil. Penelitian yang dilakukan oleh Simanjuntak *et al.* (2021) berhasil mensintesis zeolit-A dari silika sekam padi

dan aluminium foil *food grade*, yang menunjukkan kristal kubus seperti terlihat pada Gambar 10.



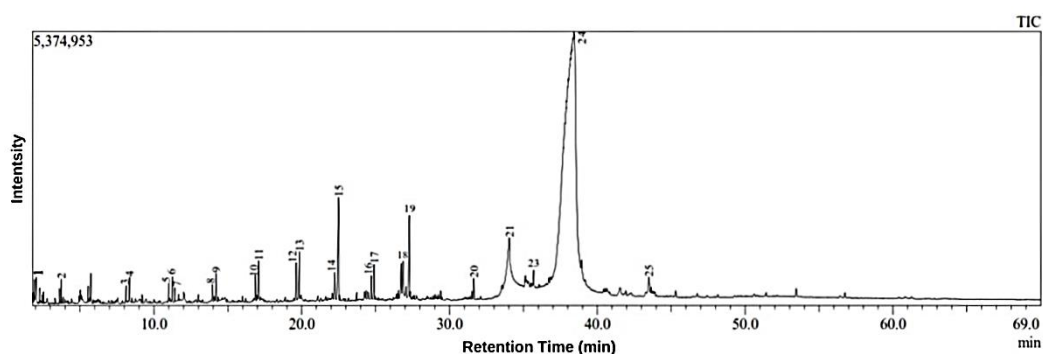
Gambar 10. Morfologi SEM zeolit-A (Simanjuntak *et al.*, 2021).

2.5.4 Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

GC-MS adalah teknik analitik yang menggabungkan sifat pemisahan kromatografi gas-cair dengan fitur deteksi spektrometri massa untuk mengidentifikasi zat yang berbeda dalam sampel yang diuji. GC membutuhkan analit yang memiliki tekanan uap yang signifikan antara 30 dan 300 °C. Prinsip kerja GC-MS adalah campuran sampel diinjeksikan, diuapkan, dan dialirkan ke dalam kolom yang dikontrol secara termal oleh gas *inert*, sehingga senyawa sampel dapat berinteraksi dengan fasa diam melalui berbagai gaya antarmolekul seperti gaya van der Waals dan interaksi dipol-dipol. Beberapa senyawa cenderung berinteraksi lebih kuat karena polaritasnya, sehingga menghasilkan konsentrasi yang lebih tinggi pada fasa diam dibandingkan dengan fasa gerak. Akibatnya, senyawa-senyawa ini tertahan dengan kuat di dalam kolom dan memiliki waktu retensi (RT) yang lebih lama dibandingkan dengan senyawa yang interaksinya lebih lemah dengan fasa diam. Seiring waktu, dengan aliran gas *inert* yang terus menerus dan kolom yang dikontrol secara termal, variasi koefisien partisi senyawa menghasilkan

pemisahan senyawa dalam campuran. Senyawa yang terpisah kemudian terelusi dari kolom dan terdeteksi (Jackie *et al.*, 2020).

Pada penelitian ini, BCO yang dihasilkan akan dianalisis komposisi kimianya menggunakan GC-MS. 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. GC digunakan untuk mencari senyawa volatil pada kondisi vakum tinggi dan tekanan yang rendah jika dipanaskan. Sedangkan, spektrometri massa digunakan untuk menentukan rumus molekul, bobot molekul serta menghasilkan molekul bermuatan. Sebagai contoh, penelitian sebelumnya oleh Aulia *et al.*, (2024), BCO yang dihasilkan dari pirolisis umbi singkong dan minyak biji karet pada transformasi zeolit-A ditunjukkan kromatogram GC pada Gambar 11.



Gambar 11. Kromatogram GC BCO yang diperoleh tanpa katalis (Aulia *et al.*, 2024).

Pada kromatogram yang ditunjukkan pada Gambar 11, terdapat puncak yang memiliki intensitas yang sangat rendah dan oleh karena itu tidak teridentifikasi. Setiap puncak mewakili komponen yang berbeda, dengan area puncak yang bervariasi menunjukkan persentase relatif yang terkait dengan masing-masing komponen. Dengan menggunakan sistem perpustakaan WILEY7.LIB, 25 puncak diidentifikasi. Adapun komponen yang teridentifikasi ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia BCO yang dihasilkan dari percobaan tanpa katalis.

No Puncak	Waktu Retensi (menit)	Nama Senyawa	Rumus Kimia	Persen Relatif (%)	Kategori
1	2,05	2,3-dimetil-1-Pentanol	$C_7H_{16}O$	0,59	Alkohol
2	3,74	Oktana	C_8H_{18}	0,32	Hidrokarbon
3	8,11	1-Dekena	$C_{10}H_{20}$	0,27	Hidrokarbon
4	8,35	Dekana	$C_{11}H_{22}$	0,42	Hidrokarbon
5	11,00	1-Undekena	$C_{12}H_{26}$	0,40	Hidrokarbon
6	11,25	Dodekana	$C_{11}H_{22}$	0,53	Hidrokarbon
7	11,42	(E)-4-Undekena	$C_{12}H_{24}$	0,29	Hidrokarbon
8	13,96	Dodekena	$C_{13}H_{28}$	0,32	Hidrokarbon
9	14,21	Tridekana	$C_{14}H_{28}$	0,60	Hidrokarbon
10	16,86	(Z)-3-Tetradekena	$C_{16}H_{34}$	0,56	Hidrokarbon
11	17,09	Heksadekana	$C_{15}H_{30}$	0,94	Hidrokarbon
12	19,63	1-Pentadekena	$C_{16}H_{34}$	0,93	Hidrokarbon
13	19,85	Isoheksadekana	$C_{17}H_{34}$	1,31	Hidrokarbon
14	22,24	1-Heptadekana	$C_{15}H_{32}$	0,79	Hidrokarbon
15	22,50	Pentadekana	$C_{18}H_{36}$	3,91	Hidrokarbon
16	24,71	(E)-3-Oktadekena	$C_{20}H_{42}$	0,62	Hidrokarbon
17	24,89	Eikosana	$C_{17}H_{34}$	0,88	Hidrokarbon
18	26,72	Heptadek-8-ena	$C_{18}H_{36}$	1,28	Hidrokarbon
19	27,28	(E)-9-Oktadekena	$C_{17}H_{36}$	1,40	Hidrokarbon
20	31,65	2-Heptadekana	$C_{17}H_{36}$	2,88	Hidrokarbon
21	31,65	Heptadekanon	$C_{17}H_{34}O$	0,54	Keton
22	34,05	Asam 2-Heksadekanoat	$C_{16}H_{32}O_2$	3,70	Asam
23	35,68	9,12-Heksadekanoat	$C_{16}H_{32}O_2$	0,42	Asam
24	38,33	Metil ester Asam heksadekanoat	$C_{17}H_{30}O_2$	75,42	Ester
25	43,49	3,12-dietil-2,5,9-Tetradekatriena	$C_{18}H_{32}$	0,69	Hidrokarbon

Sumber: Aulia *et al.*, 2024.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2024-Maret 2025 di Laboratorium Anorganik/Fisika Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Karakterisasi dan analisis sampel dilakukan di beberapa tempat institusi yaitu karakterisasi *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Negeri Padang (UNP), karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (LTSIT) Universitas Lampung. Analisis *Bio Crude Oil* (BCO) menggunakan analisis GC-MS dilakukan di Universitas Gadjah Mada (UGM).

3.2 Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah autoklaf, reaktor pirolisis, furnace, neraca analitik, oven, magnetik stirer, ayakan 300 mesh, corong pisah, corong kaca, cawan porselin, kondensor, klem dan statif, mortar dan alu, peralatan gelas yang umum digunakan di laboratorium, wadah plastik, batang pengaduk, spatula, dan botol sampel. 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.

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

3.3.1 Analisis bentonit sebelum purifikasi

Pada penelitian ini, sintesis zeolit-A dilakukan menggunakan bentonit sebagai bahan utama. Bentonit terlebih dahulu digerus agar tidak ada komponen yang menggumpal kemudian disaring bentonit menggunakan mesh 300 nm. Bentonit yang digunakan berupa serbuk halus berwarna kekuningan. Selanjutnya bentonit dikarakterisasi menggunakan XRF, XRD, dan SEM.

3.3.2 Purifikasi bentonit

Bentonit yang telah dikarakterisasi selanjutnya dilakukan purifikasi atau pemurnian terlebih dahulu, untuk menghilangkan atau mengurangi berbagai mineral yang terdapat didalamnya. Purifikasi dilakukan dengan cara merendam bentonit dalam HCl 1M dengan perbandingan bentonit : HCl (1:5, g/mL), lalu mengaduk campuran tersebut menggunakan *stirrer* untuk melarutkan logam secara perlahan selama 24 jam. Selanjutnya menyaring campuran dengan kertas saring, lalu mencucinya dengan akuades hingga pH larutan netral untuk menghilangkan sisa-sisa asam. Langkah selanjutnya mengeringkan bentonit pada suhu 100 °C selama 8 jam. Kemudian karakterisasi awal dilakukan menggunakan XRF untuk mengetahui komposisi unsur kimia pada bentonit yang telah dipurifikasi. Selanjutnya, analisis XRD dilakukan untuk mengidentifikasi struktur kristal dan mengetahui perubahan fasa akibat proses purifikasi. Selain itu,

karakterisasi menggunakan SEM digunakan untuk mengidentifikasi morfologi permukaan bentonit setelah purifikasi.

3.3.3 Sintesis zeolit-A dengan metode hidrotermal

Sintesis zeolit-A diawali dengan menimbang NaOH (p.a) sebanyak 43,01 g, aluminium foil *food grade* sebanyak 21,78 g, dan bentonit sebanyak 50 g. Kemudian, melarutkan aluminium foil *food grade* (FGAF) ke dalam 250 mL NaOH secara perlahan sambil mengaduknya menggunakan magnetik stirer agar didapatkan larutan homogen. Selanjutnya menambahkan 50 g bentonit sambil distirer kembali hingga larutan homogen. Lalu memasukkan campuran ke dalam botol polipropilen dan dimasukkan ke dalam autoklaf, lalu dilakukan penuaan (*aging*) selama 24 jam dalam keadaan tertutup untuk menumbuhkan inti kristal zeolit, dan kemudian mengkristalkan selama 72, 96, dan 120 jam dalam oven pada suhu 100 °C. Sampel disaring dan dikeringkan pada suhu 100 °C selama 8 jam. Sampel yang sudah kering, digerus menjadi serbuk dan diayak dengan ukuran 300 mesh dan kemudian dikalsinasi pada suhu yang bervariasi yaitu tanpa kalsinasi, 500, 600, 700, dan 800 °C selama 8 jam.

3.3.4 Karakterisasi katalis zeolit-A

3.3.4.1 X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi dengan XRD dilakukan untuk menganalisis struktur kristalografi zeolit-A, semakin tinggi puncak difraksi maka semakin tinggi tingkat kristalinitas sampel. Data difraktogram memberikan informasi tentang struktur ataupun fasa berdasarkan letak sudut 2θ . Karakterisasi XRD pada penelitian ini, dilakukan di Universitas Negeri Padang (UNP) dengan tipe XRD yang digunakan yaitu XPERT PRO PANalytical PW3040/60 Tahun 2013 produksi Belanda. Pola XRD akan dihasilkan pada $\lambda = 0,154 \text{ \AA}$, dengan sumber radiasi anoda tembaga (Cu), tegangan 40 kV dan arus 30 Ma. Pengukuran dilakukan dengan langkah scan

0,02° pada rentang sudut difraksi 5-100°. Data XRD yang diperoleh selanjutnya dianalisis menggunakan perangkat lunak *Match!3 Version 3.16 build 288* dan data tersebut kemudian dibandingkan dengan data standar pada *International Zeolite Association (IZA)*.

3.3.4.2 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Karakterisasi menggunakan SEM bertujuan untuk mengetahui morfologi permukaan sampel seperti bentuk, ukuran, dan distribusi partikel zeolit-A. Pada penelitian ini, karakterisasi sampel dengan SEM dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (LTSIT) Universitas Lampung dengan mengikuti prosedur yang ditetapkan oleh institusi tersebut. Adapun SEM yang digunakan yaitu ZEISS EVO MA 10, yang dioperasikan pada 8 kV dengan tegangan elektron 20 kV. Pemindaian sampel dilakukan pada perbesaran 1.000; 5.000; 10.000; dan 15.000x untuk mendapatkan tampilan permukaan sampel yang lebih baik.

3.3.5 Uji aktivitas zeolit-A

3.3.5.1 Uji pirolisis

Percobaan pirolisis akan dilakukan dalam unit pirolisis skala laboratorium. Uji pirolisis dilakukan dengan mencampurkan 200 mL minyak kelapa sawit, 10 g katalis, 10 g aluminium *heat exchanger* dan kemudian dimasukkan ke dalam reaktor. Proses pirolisis dibiarkan berjalan selama 1 jam. Uap yang terbentuk dialirkan dari reaktor kemudian didinginkan di kondensor untuk menghasilkan distilat berupa BCO. Produk cair yang diperoleh kemudian dipindahkan ke dalam corong pemisah dan dibiarkan terpisah antara fase air dan fase organik (BCO). Fase organik dikarakterisasi menggunakan GC-MS.

3.3.5.2 Karakterisasi produk hasil pirolisis

Karakterisasi menggunakan GC-MS bertujuan untuk mengidentifikasi senyawa kimia yang terdapat dalam hasil pirolisis, terutama pada lapisan organik yang mengandung hidrokarbon (biohidrokarbon). Pada penelitian ini, karakterisasi sampel menggunakan GC-MS dilakukan di laboratorium Universitas Gadjah Mada (UGM) dengan tipe alat yaitu QP2010S SHIMADZU untuk mengidentifikasi tipe kolom Rtx 5 (panjang 30 m; ID 0,25 mm; ketebalan film: 0,25 m; gas pembawa: Helium; EI 70 Ev). Suhu injektor 300 °C dengan mode split, suhu detektor 250 °C, suhu kolom oven 40 °C, laju alir pada tekanan 12,9 kPa dan total aliran 34,5 mL/menit.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Purifikasi bentonit berhasil dilakukan menggunakan HCl 1M, yang ditandai dengan penurunan kadar logam besi (Fe).
2. Sintesis zeolit-A yang bersumber dari bentonit purifikasi dan *Food Grade Alumunium Foil* (FGAF) menggunakan metode telah berhasil disintesis, dibuktikan dengan analisis XRD yang dibandingkan dengan standar IZA dan SEM.
3. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa waktu kristalisasi terbaik adalah 96 jam, ditandai dengan terbentuknya fasa zeolit-A tertinggi sebesar 8,3%.
4. Hasil karakterisasi XRD zeolit hasil transformasi menunjukkan bahwa zeolit-A dengan suhu kalsinasi 700 °C merupakan zeolit hasil transformasi terbaik yang dibuktikan dengan memiliki kemiripan posisi 2 θ dengan perbandingan menggunakan standar IZA zeolit-A dan komposisi fasa zeolit-A sebesar 9,6%.
5. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan morfologi kristalin dengan struktur kubus yang mulai terbentuk, meskipun belum sempurna dan masih terdapat fasa sodalit dan amorf.
6. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa hasil sintesis zeolit-A bersifat multifasik, dengan terbentuknya tidak hanya fasa zeolit-A, tetapi juga fasa lain seperti sodalit dan nefelin.

7. Hasil analisis BCO dari minyak kelapa sawit yang terbaik dihasilkan dengan menggunakan katalis zeolit-A suhu kalsinasi 700 °C dengan kandungan hidrokarbon sebesar 81,92%.

5.2 Saran

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

1. Melakukan pengembangan metode purifikasi menggunakan HCl dengan konsentrasi lebih tinggi atau reagen lain yang lebih efektif guna menurunkan kadar logam pengotor, sehingga kemurnian bentonit sebagai bahan baku sintesis zeolit-A dapat ditingkatkan.
2. Melakukan pengembangan metode sintesis dengan memisahkan fraksi silika dan alumina sebelum proses hidrotermal. Pemisahan ini bertujuan untuk mengontrol perbandingan molar Si/Al secara lebih tepat, sehingga fase kristal zeolit-A yang terbentuk menjadi lebih dominan dan seragam dibandingkan dengan hasil sintesis menggunakan metode campuran yang diterapkan dalam penelitian ini.
3. Disarankan agar dilakukan proses *upgrading* untuk meningkatkan kandungan hidrokarbon, karena BCO yang dihasilkan masih mengandung asam dalam kadar yang relatif tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, Apriyanti, M., Sunardi, Santoso, U. T., Junaidi, A. B., Aditiya, D., and Irawati, U. 2019. Pyrolysis of palm oil using zeolite catalyst and characterization of the boil-oil. *Green Processing and Synthesis*. 8(1): 649-658.
- Achinas, S., and Everink, G. J. W. 2016. Consolidated Briefing of Biochemical Ethanol Production for Lignocellulosic Biomass. *Electronic Journal of Biotechnology*. 23: 44-53.
- Ahmadhani, M. Y. 2018. Pengolahan Crude Palm Oil (CPO) Parit Menjadi Liquid Fuel dengan Metode Pirolisis Menggunakan Zeolit Sintetik Berbasis Silika Sekam Padi. *Skripsi*. Universitas Lampung. Bandar Lampung. 102 hlm.
- Ahmad, A. F., Zulkurnain, N., Rosid, S. J. M., Azid, A., Endut, A., Toemen, S., Ismail, S., Abdullah, W. N. W., Aziz, S. M., Yusoff, N. M., Rosid, S. M., and Nasir, N. A. 2022. Catalytic Transesterification of Coconut Oil in Biodiesel Production: A review. *Catalysis Surveys from Asia*. 26(3): 129-143.
- Alvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J., and Olazar, M. 2014. Bio-oil Production from Rice Husk Fast Pyrolysis in A Conical Spouted Bed Reactor. *Fuel*. 128: 162-169.
- Arneli., Solichah, F., Alfiansyah., Suseno, A., dan Astuti, Y. 2017. Sintesis Zeolit dari Abu Sekam Padi Menggunakan Metode Hidrotemal: Variasi Waktu dan Temperatur. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 20(2): 58-61.
- Aulia, S., Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., and Rilyanti, M. 2024. Transformation of Lampung Natural Zeolite into Zeolite-A by Aluminium Addition and Application as Catalyst for Biomass Pyrolysis. *Indonesian Journal of Energy*. 7(2): 124-140.

- Ayele, L., Pérez-Pariente, J., Chebude, Y., and Díaz, I. 2015. Synthesis of Zeolite A from Ethiopian Kaolin. *Microporous and Mesoporous Materials*. 215: 29-36.
- Bamboriya, O. P., Thakur, L. S., Parmar, H., Varma, A. K., and Hinge, V. K. 2019. A Review on Mechanism and Factors Affecting Pyrolysis of Biomass. *International Journal of Research in Advent Technology*. 7(3): 1014-1024.
- Basu, P. 2010. *Biomassa Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory* (2th ed). Elsevier. New York. p.13.
- Basu, P. 2013. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. In *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*.
- Berghuis, N. T., Mutaqqin, M., Hidayat, F. I., Sugianto, S., Pratama, H., Kirana, A., Rifaldi, D. A., Jesica, A., Maulana, P., dan Thufail, A. 2022. Perbandingan Penggunaan Katalis Alam (Zeolit dan Bentonit) dalam Sintesis Biodiesel dari Minyak Goreng Komersil. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*. 18(2): 174.
- Brouwer, P. 2003. *Theory of XRF*. PANalytical BV. Netherlands
- Brouwer, P. 2010. *Theory of XRF*. In Almelo: PANalytical BV.
- Chang, S. H. 2018. Bio-oil Derived from Palm Empty Fruit Bunches: Fast Pyrolysis, Liquefaction and Future Prospects. *Biomass and Bioenergy*. 119: 263-276.
- Chaudhary, L., Pradhan, P., Soni, N., Singh, P., and Tiwari, A. 2014. Algae as A Feedstock for Bioethanol Production: New Entrance in Biofuel World. *Int. Journal Chemistry Technology Res*. 6: 1381-1389.
- Chisti, Y. 2007. Biodiesel From Microalgae. *Biotechnology Advances*. 25: 294-306.
- Chong, T. Y., Cheah, S. A., Ong, C. T., Wong, L. Y., Goh, C. R., Tan, I. S., Foo, H. C. Y., Lam, M. K., and Lim, S. 2020. Techno-Economic Evaluation of Third-Generation Bioethanol Production Utilizing the Macroalgae Waste: A Case Study in Malaysia. *Energy*. 210: 118491.
- Czajczyńska, D., Anguilano, L., Ghazal, H., Krzyżyńska, R., Reynolds, A. J., Spencer, N., and Jouhara, H. 2017. Potential of Pyrolysis Processes in the

- Waste Management Sector. *Thermal Science and Engineering Progress*. 3: 171-197.
- Darmadinata, M., Jumaeri, J., dan Sulistyaningsih, T. 2019. Pemanfaatan Bentonit Teraktivasi Asam Sulfat sebagai Adsorben Anion Fosfat dalam Air. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 8(1): 1-8.
- Dhyani, V., and Bhaskar, T. 2019. *Pyrolysis of Biomass*. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*. Academic Press. United States. 217-244.
- Diana, P. 2021. Pengaruh Jenis Katalis dan Waktu Esterifikasi yang digunakan pada Pengolahan Minyak Biji Ketapang (*Terminalia catappa*) untuk Pembuatan Biodiesel (Doctoral dissertation, Universitas Gadjah Mada).
- Dongoran, J., Sulistiawati, P., Simangunsong, S. Y., Paksi, P. G. R., dan Pasaribu, M. H. 2021. Perkembangan Zeolit sebagai Katalis Alam Potensial. *Jurnal Jejaring Matematika Dan Sains*/. 3(2): 28-39.
- Dutta, A., Schaidle, J. A., Humbird, D., Baddour, F. G., and Sahir, A. 2016. Conceptual Process Design and Techno-Economic Assessment of Ex-Situ Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass: A Fixed Bed Reactor Implementation Scenario for Future Feasibility. *Topics in Catalysis*. 59: 2-18.
- Georgiev, D., Bogdan, B., Angelova, K., Markovska, I., and Hristov, Y. 2009. Synthetic Zeolite-structure, Classification, Current Trends in Zeolite Synthesis. *Economics and Society Development on the Base of Knowledge*. 1: 1-6.
- Gandhi, D., Bandyopadhyay, R., and Soni, B. 2022. Naturally occurring bentonite clay: Structural augmentation, characterization and application as catalyst. *Materials Today: Proceedings*. 57. 194-201.
- Gholizadeh, M., Li, C., Zhang, S., Wang, Y., Niu, S., Li, Y., and Hu, X. 2020. Progress of the Development of Reactors for Pyrolysis of Municipal Waste. *Sustainable Energy and Fuels*. 4(12): 5885–5915.
- Giannakoupolou, K., Michael, L., Aleksey, V., Christoph, B., and Hans, S. 2010. Low Pressure Catalytic Co-Conversion of Biogenic Waste (Rapeseed Cake) and Vegetable Oil. *Bioresource Technology*. 101 : 3209-3219.

- Ginting, S. B., dan Nurfiqah, 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. *Universitas Lampung*. 9(1).
- Hakim, L., Dirgantara, M., dan Nawir, M. 2019. Karakterisasi Struktur Material Pasir Bongkahan Galian Golongan C dengan Menggunakan X-Ray Difraction (X-RD) di Kota Palangkaraya. *Jurnal Jejaring Matematika Dan Sains*. 1(1): 44-51.
- Hamidi, R., Khoshbin, R., and Karimzadeh, R. 2021. A New Approach for Synthesis of Well-Crystallized Y Zeolite from Bentonite and Rice Husk Ash Used in Ni-Mo/Al₂O₃-Y Hybrid Nanocatalyst for Hydrocracking Of Heavy Oil. *Advanced Powder Technology*. 32(2). 524-534.
- Hernandez-Mena, L. E., Pécora, A. A. B., and Beraldo, A. L. 2014. Slow Pyrolysis of Bamboo Biomass: Analysis of Biochar Properties. *Chemical Engineering Transactions*. 37: 115-120.
- Hu, X., and Gholizadeh, M. 2019. Biomass pyrolysis: A Review of the Process Development and Challenges from initial researches up to the commercialisation stage. *Journal of Energy Chemistry*. 39: 109-143.
- Indira, V., and Abhitha, K. 2022. A Review on Recent Developments in Zeolite A Synthesis for Improved Carbon Dioxide Capture: Implications for the Water Energy Nexus. *Energy Nexus*. 7. 100095 : 1-12.
- IZA (International Zeolite Association). 2017. <http://www.iza-structure.org/databases/>. Diakses 2 Agustus 2024.
- Jackie, Lee, C., and Toyama, A. 2020. *Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)*. Shimadzu Corporation. Japan.
- Jumaeri., Jananti, P. D., dan Kusumastuti, E. 2013. Sintesis Zeolit A dari Abu Layang Batubara melalui Modifikasi Proses Hidrotermal. *Jurnal Sain dan Teknologi*. 11(2): 1-12.
- Lametige, J. A., Sangian, H. F., Tanauma, A., dan Rombang, J. 2020. Penerapan Metode Transesterifikasi Subkritis Mendekati Isokorik dalam Pembuatan Biodiesel. *Jurnal MIPA*. 9(1): 10-13.
- Leofanti, G., Tozzola, G., Padovan, M., Petrini, G., Bordiga, S., and Zecchina, A. 1997. Catalyst Characterization : Application. *Catalysis Today*. 34: 329-352.

- Liu, B., Sun, H., Peng, T., and He, Q. 2018. One-step synthesis of hydroxysodalite using natural bentonite at moderate temperatures *Minerals*. 8(11): 521.
- Luthfiyyah, Z. 2023. Zeolit-A dari Silika Batu Apung dan Aluminium Foil Food Grade serta Aplikasinya sebagai Katalis Pirolisis Minyak Kelapa. *Skripsi*. Bandar Lampung. 96 hlm.
- Madhu, P., Livingston, T. S., and Kanagasabapathy, H. 2018. Flash Pyrolysis of Lemon Grass (*Cymbopogon Flexuosus*) for Bio-Oil Production in an Electrically Heated Fluidized Bed Reactor. *Waste and Biomass Valorization*. 9(6): 1037-1046.
- Maliutina, K., Tahmasebi, A., Yu, J., and Saltykov, S. N. 2017. Comparative Study on Flash Pyrolysis Characteristics of Microalgal and Lignocellulosic Biomass in Entrained-Flow Reactor. *Energy Conversion and Management*. 151: 426-438.
- Mauliana, R.M., Sutikno, Marniza. 2015. Effects of Seaweed (*Eucheuma Cottonii*) Extraction and Hydrolysis on Reducing Sugar for Bioethanol Production. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi VI. Lembaga Penelitian dan Pengabdian Universitas Lampung*. Bandar Lampung. 447-458.
- Meng, X., Zhang, M., Chen, C., Li, C., Xiong, W., and Li, M. 2018. Insights Into the Role of Silanols in Methanol to Propene Reaction Over Silicalite-2 Zeolite Through Post-Treatments. *Applied Catalysis A: General*. 558: 122-130.
- Mohamed, R. M., Mkhallid, I. A., and Barakat, M. A. 2013. Rice Husk Ash as a Renewable Source for the Production of Zeolite NaY and Its Characterization. *Arabian Journal of Chemistry*. 8(1): 48-53.
- Nabil, B., and Malek, O.M. 2021. Characterization and Purification of Algerian Natural Bentonite for Pharmaceutical and Cosmetic Applications. *BMC chemistry*. 15: 1-11.
- Muslimah, M., Wahyuningsih, P., and Yusnawati, Y. 2023. Effectiveness of Hydrochloric Acid Activated Bentonite in Local Salt Purification. *Elkawanie: Journal of Islamic Science and Technology*. 9(1): 71-80.
- Oh, Y. K., Hwang, K. R., Kim, C., Kim, J. R., and Lee, J. S. 2018. Recent

Developments and Key Barriers to Advanced Biofuels: A Short Review. *Bioresource Technology*. 257: 320-333.

Oster. 2015. *Chemical Composition Limits of Aluminium Purity Grades and Alloys*. A. J. Oster. America.

Pandiangan, K. D., Nisa, K., Simanjuntak, W., Alista, D. I., Noviana, E., and Hasan, S. A. 2024. Application of Response Surface Methodology (RSM) to Study Transesterification of Palm Oil in the Presence of Zeolite-A as Catalyst. *Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science*. 4(1): 146-157.

Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Avista, D., Arinanda, A. G., Hadi, S., dan Amrulloh, H. 2022. Synthesis of hydroxy-sodalite from rice husk silica and food-grade aluminum foil as a catalyst for biomass pyrolysis. *Trends in Sciences*. 19(20): 6252-6252.

Pandiangan, K. D. and Simanjuntak, W. 2013. Transesterification of Coconut Oil Using Dimethyl Carbonate and $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ Heterogeneous Catalyst. *Indonesian Journal of Chemistry*. 13(1): 47-52.

Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Pratiwi, E., and Rilyanti, M. 2019. Characteristics and Catalytic Activity of Zeolite-A Synthesized from Rice Husk Silica and Aluminium Metal by Sol-Gel Method. *Journal of Physics: Conference Series*. 1338(1).

Pratiwi. 2018. Pengolahan Campuran Bagas Tebu dan Minyak Jarak Kaliki (*Ricinus communis* L.) Menjadi Liquid Fuel dengan Metode Pirolisis Menggunakan Zeolit Sintetik Berbasis Silika Sekam Padi sebagai Katalis. *Thesis*. Universitas Lampung. Bandar Lampung. 1-88.

Prokof'ev, V. Y., and Gordina, N. E. 2013. A Study of Thermal Treatment and Hydrothermal Crystallization Stages in Production of Granulated NaA Zeolite from Mechanically Activated Metakaolin. *Russian Journal of Applied Chemistr*. 86: 332-338.

Purnomo, V., Hidayatullah, A. S., Inam, A., Prastuti, O. P., Septiani, E. L., dan Herwoto, R. P. 2020. Biodiesel dari Minyak Jarak Pagar dengan Transesterifikasi Metanol Subkritis. *Jurnal Teknik Kimia*. 14(2): 73-79.

Qiao, Y., Wang, B., Zong, P., Tian, Y., Xu, F., Li, D., and Li, F. 2019. Thermal Behavior Kinetics and Fast Pyrolysis Characteristics of Palm Oil: Analytical TG-FTIR and Py-GC/MS Study. *Energy Conversion and Management*. 199: 110.

- Raja, S. A., Kennedy, Z. R., Pillai, B. C., and Lee, C. L. R. 2010. Flash Pyrolysis of Jatropha Oil Cake in Electrically Heated Fluidized Bed Reactor. *Energy*. 35(7): 2819–2823.
- 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*. 13(19): 11061.
- Ridhuan, K., dan Suranto, J. 2017. Perbandingan Pembakaran Pirolisis dan Karbonisasi pada Biomassa Kulit Durian terhadap Nilai Kalori. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*. 5(1): 50-56.
- Ruskandi, C., Siswanto, A., dan Widodo, R. 2020. Karakterisasi Fisik dan Kimiawi Bentonit untuk Membedakan Natural Sodium Bentonit dengan Sodium Bentonit Hasil Aktivasi. *Jurnal Polimesin*. 18(1): 53-60.
- Setter, C., Borges, F. A., Cardoso, C. R., Mendes, R. F., and Oliveira, T. J. P. 2020. Industrial Crops and Products Energy Quality of Pellets Produced from Coffee Residue: Characterization of The Products Obtained Via Slow Pyrolysis. *Industrial Crops and Products*. 154: 1-11.
- Shahab, A., dan Husnah, H. 2022. Produksi Biodiesel dari Minyak Biji Karet dengan Teknologi Transesterifikasi Menggunakan Katalis KOH. *Jurnal Redoks*. 7(2): 33-38.
- Shamsul, S. N., S. K. Kamarudin, and N. A. Rahman. 2017. Conversion of Bio-Oil to Bio Gasoline Via Pyrolysis and Hydrothermal: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 80: 538-549.
- Shariff, A., Syairah, N., Aziz, M., Ismail, N. I., and Abdullah, N. 2016. Corn Cob as Potential Feedstock for Slow Pyrolysis of Biomass. *Journal of Physical Science*. 27(2): 123-137.
- Sharifzadeh, M., Sadeqzadeh, M., Guo, M., Borhani, T. N., Konda, N. M., Garcia, M. C., Wang, L., Hallett, J., and Shah, N. 2019. The Multi-Scale Challenges of Biomass Fast Pyrolysis and Bio-Oil Upgrading: Review of the State of Art and Future Research Directions. *Progress in Energy and Combustion Science*. 71: 1-80.
- Simanjuntak, A., Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., and Sembiring, Z. 2019. The Effect of Sugarcane Bagasse to Rubber Seed Oil Ratios on the

Composition of Liquid Fuels Produced by Zeolite-y Catalyzed Pyrolysis. *Journal of Physics: Conference Series*. 1338(1) : 1-9.

Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Febriyanti, T. D., Islami, A. P., Hadi, S., and Ilim, I. 2024. Catalytic Upgrading of Palm Oil Derived Bio-Crude Oil for Bio-Hydrocarbon Enrichment Using Protonated Zeolite-Y As Catalyst. *AIMS Energy*. 12(3): 600-616.

Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Sembiring, Z., and Sihombing, I. P. 2021. Biogasoline Production by Zeolite-A Catalyzed Co-Pyrolysis of Torrefied Cassava Root and Palm Oil. *Journal of Physics: Conference Series*. 1751(1).

Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Sembiring, Z., Simanjuntak, A., and Hadi, S. 2021. The Effect Of Crystallization Time On Structure, Microstructure, and Catalytic Activity Of Zeolite-A Synthesized from Rice Husk Silica and Food-Grade Aluminum Foil. *Biomass and Bioenergy*. 148: 106050.

Simanungkalit, S. P., dan Mansur, D. 2020. Co-Pyrolysis Cangkang Kelapa Sawit dan Limbah Plastik Kemasan. *Widyariset*. 6(2): 62-74.

Smets, K., Adriaenssens, P., Reggers, G., Schreurs, S., Carleer, R., Yperman, J., and J. 2011. Flash Pyrolysis of Rapeseed Cake: Influence of Temperature on The Yield and The Characteristics of The Pyrolysis Liquid. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 90(2): 118-125.

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

Sulaiman, A. A., Djufry, F., Syamsuri, P., Setiyanto, A., Bahrin, A. H., Hendrawati, D., dan Ridha, M. F. 2024. *Sawit Indonesia dalam Dinamika Pasar Dunia*. Pertanian Press. Jakarta.

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.

Treedet, W., and Suntivarakorn, R. 2017. Fast Pyrolysis of Sugarcane Bagasse Circulating Bed District Heating and Fluidized Reactor - Part A: Effect of Hydrodynamics Performance to Bio-Oil Production. *Energy Procedia*. 138: 801-805.

- Uddin, M. N., Techato, K., Taweekun, J., Rahman, M. M., Rasul, M. G., Mahlia, T. M. I., and Ashrafur, S. M. 2018. An Overview of Recent Developments in Biomass Pyrolysis Technologies. *Energies*. 11: 1-24.
- Venderbosch, R. H. and W. Prins. 2010. Review: Fast Pyrolysis Technology Development. *Biofuel*. 4(2): 178-208
- Wardhani, G. A. P. K., Taufiq, A., dan Syaifie, P. H. 2019. Sintesis Dan Karakterisasi Zeolit Berbahan Dasar Abu Sekam Padi Karawang. *Jurnal Berkala Ilmiah Sains dan Terapan Kimia*. 13(2): 89-98.
- Zahra, L. 2023. Sintesis Zeolit-A dari Silika Batu Apung dan Aluminium Foil Food Grade serta Aplikasinya sebagai Katalis Pirolisis Minyak Kelapa. *Skripsi*. Universitas Lampung. Bandar Lampung. 96 hlm.
- Zaman, C. Z., Pal, K., Yehye, W. A., Sagadevan, S., Shah, S. T., Adebisi, G. A., Marliana, E., Rafique, R. F., and Johan, R. Bin. 2017. Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste. *Pyrolysis*. 3-36.
- Zhan, Y., Li, X., Zhang, Y., Han, L., and Chen, Y. 2013. Phase And Morphology Control Of LTA/FAU Zeolits by Adding Trace Amounts of Inorganic Ions. *Ceramics International*. 39(5): 5997-6003.