

**PENGUNAAN ZEOLIT-X HASIL MODIFIKASI BENTONIT SEBAGAI
KATALIS PADA PROSES PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT
MENJADI *BIO CRUDE OIL* (BCO)**

Skripsi

Oleh

**ERWANDA LILI UTARI
2117011057**



**JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PENGUNAAN ZEOLIT-X HASIL MODIFIKASI BENTONIT SEBAGAI KATALIS PADA PROSES PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI *BIO CRUDE OIL* (BCO)

Oleh

Erwanda Lili Utari

Biohidrokarbon merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang sedang dikembangkan secara luas sebagai biofuel generasi kedua. Energi ini dapat dihasilkan dari minyak nabati menjadikannya sebagai alternatif energi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan *Bio Crude Oil* (BCO) melalui proses pirolisis minyak kelapa sawit menggunakan katalis zeolit-X termodifikasi bentonit. Kemudian zeolit-X disintesis dari bentonit dengan menggunakan aluminium foil. Purifikasi bentonit menggunakan larutan HCl 1M, kemudian dikarakterisasi dengan metode *X-Ray Fluorescence*, X-Ray Diffraction, dan Scanning Electron Microscope. Hasil analisis XRF menunjukkan bahwa rasio Si/Al mengalami peningkatan bentonit setelah proses purifikasi. Selain itu, berkurangnya kandungan Fe setelah perlakuan asam menunjukkan bahwa logam pengotor berhasil di kurangi.

Karakterisasi XRD menunjukkan bahwa bentonit memiliki campuran fasa kristalin dan amorf yang ditandai dengan keberadaan mineral monmorilonit dan kuarsa. Hasil pengamatan SEM menunjukkan, partikel permukaan sebelum pemurnian cenderung menggumpal dan padat, dan tidak teratur tidak homogen. Setelah pemurnian permukaan partikel menjadi lebih terstruktur dan tersebar merata menunjukkan peningkatan kualitas morfologi.

Zeolit-X disintesis menggunakan metode hidrotermal dengan variasi waktu kristalisasi 72, 96, dan 120 jam. Hasil terbaik diperoleh pada 72 jam, dibuktikan dengan kesesuaian pola difaktogram terhadap standar *Internasional Zeolit Association*. Morfologi hasil sintesis menunjukkan struktur tetrahedral khas untuk zeolit-X meskipun masih ada kandungan sodalit pada katalis sampel digunakan dalam proses pirolisis minyak kelapa sawit dengan pemanasan awal 0 hingga 40 menit. Berdasarkan analisis *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* produk BCO terbaik yang diperoleh pada waktu pemanasan 10 menit hidrokarbon sebesar 78,72%.

Kata kunci: Bentonit, katalis zeolit-X, minyak kelapa sawit, pirolisis, *bio crude oil* (BCO).

ABSTRACT

THE USE OF ZEOLITE-X MODIFIED BY BENTONITE AS A CATALYST IN THE PYROLYSIS PROCESS OF PALM OIL INTO BIO CRUDE OIL (BCO)

By

Erwanda Lili Utari

Biohydrocarbons are a form of renewable energy that is being widely developed as a second-generation biofuel. This energy can be produced from vegetable oils making it an environmentally friendly and sustainable energy alternative. This research aims to produce Bio Crude Oil (BCO) through palm oil pyrolysis process using bentonite modified zeolite-X catalyst. Then zeolite-X was synthesized from bentonite using aluminum foil. Purification of bentonite using 1M HCl solution, then characterized by X-Ray Fluorescence, X-Ray Diffraction, and Scanning Electron Microscope methods. The results of XRF analysis showed that the Si/Al ratio increased in bentonite after the purification process. In addition, the reduced Fe content after acid treatment showed that the impurity metal was successfully reduced.

XRD characterization shows that bentonite has a mixture of crystalline and amorphous phases characterized by the presence of monmorillonite and quartz minerals. SEM observation results show that the surface particles before purification tend to be lumpy and dense, irregular and inhomogeneous. After purification, the surface particles became more structured and evenly dispersed, indicating an improvement in morphological quality.

Zeolite-X was synthesized using hydrothermal method with crystallization time variation of 72, 96, and 120 hours. The best results were obtained at 72 hours, as evidenced by the conformity of the diffractogram pattern to the International Zeolite Association standard. The morphology of the synthesized results showed a typical tetrahedral structure for zeolite-X although there was still sodalite content in the catalyst samples used in the pyrolysis process of palm oil with 0 to 40 minutes preheating. Based on Gas Chromatography-Mass Spectrometry analysis the best BCO product obtained at 10 min heating time hydrocarbon amounted to 78.72%.

Keywords: Bentonite, zeolite-X catalyst, palm oil, pyrolysis, bio crude oil (BCO).

**PENGUNAAN ZEOLIT-X HASIL MODIFIKASI BENTONIT SEBAGAI
KATALIS PADA PROSES PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT
MENJADI *BIO CRUDE OIL* (BCO)**

Oleh

Erwanda Lili Utari

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 : PENGGUNAAN ZEOLIT-X HASIL MODIFIKASI
BENTONIT SEBAGAI KATALIS PADA PROSES
PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI *BIO*
CRUDE OIL (BCO)

Nama Mahasiswa : **Erwanda Tili Utari**

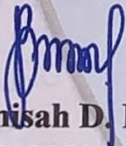
NPM : 2117011057

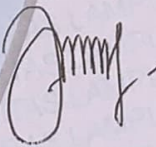
Program Studi : Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



1. Komisi Pemimbing


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


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

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA


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

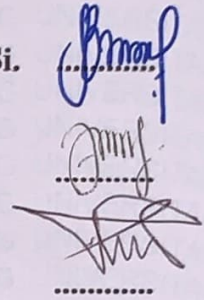
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

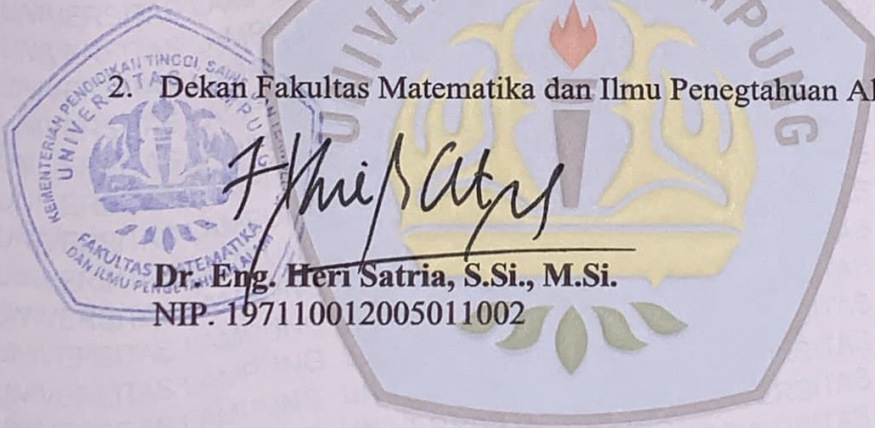
Ketua : Prof. Dr. Kamisah D. Pandiangan, S.Si. M.Si.

Sekretaris : Devi Nur Annisa, S.Pd. M.Sc.

Anggota : Prof. Dr. Sutopo Hadi, S.Si. M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Penegtaahuan Alam



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 10 Juli 2025

**LEMBAR PERNYATAAN
KEASLIAN SKRIPSI**

Yang bertanda tangan dibawah ini,

Nama : Erwanda Lili Utari
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117011057
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul
**“Penggunaan Zeolit-X Hasil Modifikasi Bentonit Sebagai Katalis pada Proses
Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Menjadi *Bio Crude Oil* (BCO)”** adalah benar
karya saya sendiri, baik gagasan, hasil, dan analisisnya. Selanjutnya saya juga
tidak keberatan jika sebagian atau 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, 10 Juli 2025
Yang menyatakan,



Erwanda Lili Utari
NPM. 2117011089

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Erwanda Lili Utari, lahir di Karanganyar, Kecamatan Ambarawa, Kabupaten Pringsewu, Provinsi Lampung pada tanggal 4 Juni 2002. Penulis merupakan anak terakhir dari lima bersaudara dari pasangan Bapak Suhadi dan Ibu Wagiyah. Penulis memulai pendidikan di Sekolah Dasar (SD) N 4 Kresnomulyo pada tahun 2009 dan lulus tahun 2015. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) N 2 Ambarawa pada tahun 2015 dan berhasil lulus pada tahun 2018, pada tahun 2018 penulis melanjutkan pendidikannya di Sekolah Menengah Atas (SMA) N 1 Ambarawa dan lulus pada tahun 2021. Pada tahun 2021 penulis diterima sebagai salah satu mahasiswa baru Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif berorganisasi sebagai anggota biro penerbitan di Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) pada periode 2021-2022. Penulis juga ikut serta dalam mengikuti kegiatan Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) Magang Industri beserta PKL di UPT Laboratorium Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung pada tahun 2023. Kemudian pada bulan Juli-September 2023 penulis mengikuti Riset MBKM. Penulis mengikuti Kuliah Kerja Nyata selama 40 hari di Sidodadi, Kecamatan Teluk Pandan, Pesawaran. Penulis pernah menjadi asisten praktikum kimia dasar jurusan fisika dan biologi untuk mahasiswa baru 2024. Penulis menyelesaikan penelitian yang dilakukan di Laboratorium Polimer dan Anorganik Fisik yang berjudul “Penggunaan Zeolit-X Hasil Modifikasi Bentonit Sebagai Katalis pada Proses Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Menjadi *Bio Crude Oil* (BCO)”.

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan dengan kesanggupannya. Dia mendapatkan pahala dari kebijakan yang dikerjakan mendapatkan siksa dari kejahatan yang diperbuatnya”

(Q.S Al-Baqarah: 286)

Tidak mungkin bagi matahari mengejar bulan dalam malam pun tidak dapat mendahului siang, masing-masing beredar pada garis edarnya”

(Q.S. Yasin: 40)

“Takdir milik Allah, tapi usaha dan do’a milik kita. Terus berdoa sampai bismillah menjadi alhamdulillah”

(Q.S Ghafir: 60)

“Tidak ada mimpi yang terlalu tinggi dan tidak ada mimpi yang patut diremehkan. Lambungkan setinggi yang kau inginkan dan gapailah dengan selayaknya yang kau harapkan”

(Maudy Ayiunda)

“Perang telah usai, aku bisa pulang. Kubaringkan panah dang berteriak MENANG!!!

(Nadin Amizah)



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

Kedua Orang Tua Tercinta,
Ayahanda Suhadi dan Ibunda Wagiyah yang telah membimbingku dari kecil hingga menyelesaikan studi sarjana ini, yang telah memberikan semangat, dukungan, dan selalu mendoakanku tanpa henti.

Keluarga Tersayang,
Eka Yuniarti, Dwi Januarto, Eli Ermawati, Wardani, Hardiyanto, Dedi Susanto, Sugiantoro, Helma Yunita, dan Febriyanti Malarake, yang selalu mendoakan dan memberiku semangat.

Pembimbing penelitianku, Prof. Dr. Kamisah Delillawati Pandiangan S.Si., M.Si., dan Ibu Devi Nur Annisa., S.Pd. M.Sc. yang selalu sabar dalam membimbingku.

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

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

Almamater Tercinta

Universitas Lampung

SANWACANA

Dengan mengucap rasa syukur dan *alhamdulillah* atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan limpahan rahmat serta karunia-Nya dan tak lupa iringan solawat senantiasa kita sanjung agungkan kepada Rosulullah Muhammad SAW yang semoga kita mendapatkan syafaatnya di yaumil akhir kelak, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian yang berjudul, **“Penggunaan Zeolit-X Hasil Modifikasi Bentonit pada Proses Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Menjadi *Bio Crude Oil* (BCO)”** dengan baik.

Penulis menyadari skripsi ini dapat terselesaikan karena adanya bantuan, motivasi, dan doa dari orang tersayang. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan kesehatan jasmani dan rohani kepada penulis serta memberikan rahmat dan karunia-Nya kepada kita semua.
2. Kepada kedua orang tua tercinta, Bapak Suhadi dan Ibu Wagiyah saya ucapkan terima kasih atas setiap tetes keringat dalam setiap langkah pengorbanan dan kerja keras yang dilakukan untuk memberikan yang terbaik kepada penulis, mengusahakan yang yang terbaik untuk penulis, mendidik, membimbing, memotivasi serta memberikan dukungan dan mendoakan penulis dalam keadaan apapun sehingga penulis mampu bertahan untuk melangkah setapak demi setapak dalam meraih mimpi di masa depan. Terima kasih karena kalian selalu ada di setiap perjalanan penulis dan menjadi alasan bagi penulis untuk menyelesaikan penulisan skripsi ini sehingga memperoleh gelar Sarjana Sains. Bapak, Ibu sekarang putri kecilmu sudah memasuki usia yang dewasa dan siap untuk melanjutkan mimpi yang lebih tinggi lagi, semoga setiap usaha yang

engkau berikan menjadi bekal perjalanan putri kecilmu ini untuk melangkah lebih jauh lagi.

3. Kepada kakak Eka, Dwi, Eli, Dani dan Ardi, terima kasih karena selalu memberikan dukungan serta memberikan uluran tangan serta memotivasi penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
4. Kepada seluruh keluarga besar yang selalu mendoakan penulis dalam penyusunan skripsi selama ini.
5. Ibu Prof. Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing I dan selaku orang tua kedua yang telah memberikan bimbingan, saran, motivasi, dan bentuk dukungan lainnya kepada penulis selama menyelesaikan penelitian.
6. Ibu Devi Nur Annisa., S.Pd., M.Sc. selaku dosen pembimbing II yang sudah banyak memberikan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi.
7. Bapak Prof. Dr. Sutopo Hadi., S.Si., M.Si. selaku dosen pembahas, terima kasih atas masukan, saran, dan nasehatnya sehingga penulis mampu dalam menyelesaikan skripsi.
8. Bapak Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D., selaku dosen pembimbing akademik atas segala bimbingan, arahan, dan saran sejak awal masuk studi.
9. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. sebagai Dekan FMIPA Unila.
10. Ibu Dr. Mita Rilyanti S.Si., M.Si. selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Unila.
11. Bapak/Ibu Dosen, segenap staf dan karyawan Jurusan Kimia FMIPA Unila, terima kasih atas segala bimbingan, ilmu, serta pembelajaran yang telah diberikan kepada penulis selama perkuliahan serta selalu dalam lindungan Tuhan YME.
12. Rekan-rekan penelitian Hanna, Tyas, Desrita, Nurul, Azizah, Bella, Melisa, Khairi, Aditya, Ayu, dan Daffa, terima kasih karena telah memberikan bantuan, dukungan, pengalaman suka maupun duka dan berbagai hal yang pernah dilalui bersama.
13. Rekan-rekan Asrama Putri Ayu: Aviana, Hanna, Vanessa, Nadira, Rika

Ayu, Tyas, Hasma, Ulma dan Caca, terima kasih karena telah memberikan bantuan, motivasi, dukungan serta menjadi bagian dari keluarga penulis dari suka maupun duka yang selalu dilalui bersama.

14. Alfin Taufani terima kasih telah menjadi bagian dalam perjalanan hidup saya, memberikan motivasi serta semangat kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
15. Kepada seseorang yang pernah bersama penulis dan tidak bisa disebut namanya. Terima kasih karena telah berkontribusi selama penelitian tapi tidak menemani sampai selesai. Terima kasih untuk patah hati yang diberikan saat proses penyusunan skripsi ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
16. Teman-teman seperjuangan Kimia angkatan 2021 terkhusus untuk kelas A. Terima kasih karena telah kebersamaan penulis selama 4 tahun sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsinya.
17. Adik-adik MBKM Maula Rayyanie, Pinkan Aling, Ester Wanitri, Giovani Ramadhan, Garneta Heppy, dan Muthiara Wamiga serta adik-adik Polimer 22 lainnya telah bekerja sama mengerjakan penelitian MBKM, sukses, dan semangat selalu.
18. Kak Risvania, Kak Gom, Kak Sabil, Kak Qori, dan Kak Maulana, penulis sampaikan terima kasih telah memberikan ilmu dan pengalaman kepada penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.
19. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terima kasih telah memberikan bantuan, dukungan, dan pengalaman kepada penulis.
20. Terakhir terima kasih kepada wanita sederhana yang memiliki impian besar, namun terkadang sulit untuk dimengerti isi kepalanya, yaitu penulis itu sendiri, Erwanda Lili Utari. Anak bungsu yang sekarang berjalan memasuki usia 22 tahun, anak yang sangat keras kepala namun memiliki ambisi yang sangat besar, terima kasih karena telah berusaha keras untuk meyakinkan dan menguatkan dirimu sendiri. Rayakanlah dirimu sendiri dimanapun kakimu melangkah. Jangan sia-siakan usaha serta doa yang selalu kamu langitkan. Karena Allah telah merencanakan dan memberikan porsi terbaik untuk setiap perjalanan hidupmu. Semoga setiap langkah

kebaikan selalu menyertaimu dan semoga Allah selalu meridhoi setiap langkahmu serta menjagamu dalam lindungan-Nya Amin.

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

Bandar Lampung, 10 Juli 2025

Penulis

Erwanda Lili Utari

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR.....	vii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan.....	4
1.3 Manfaat Penelitian.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Energi Baru Terbarukan	6
2.2 Biohidrokarbon.....	7
2.3 Minyak Kelapa Sawit	8
2.4 Pirolisis Biomassa	9
2.4.1 Mekanisme Reaksi Pirolisis.....	10
2.4.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi pirolisis	11
2.4.3 Jenis-Jenis Pirolisis.....	11
2.4.4 Aplikasi Pirolisis Biomassa	13
2.4.5 Analisis produk katalis zeolit-X hasil pirolisis menggunakan Gas <i>Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS)</i>	14
2.5 Katalis.....	15
2.6 Katalis Zeolit-X.....	16
2.6.1 Teknik Preparasi	17
2.6.2 Karakterisasi Katalis zeolit-X.....	17
2.7 Bentonit	19
2.8 Modifikasi Bentonit.....	20
2.9 Purifikasi Bentonit.....	20
2.10 Karakterisasi Bentonit	21
2.10.1 <i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i>	22
2.10.2 <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	23
2.10.3 <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	26
III. METODE PENELITIAN	27
3.1 Waktu dan Tempat	27
3.2 Alat dan Bahan	27
3.2.1 Alat-alat yang digunakan.....	27
3.2.2 Bahan-bahan yang digunakan.....	28

3.3 Prosedur Penelitian.....	28
3.3.1 Analisis Bentonit Sebelum Purifikasi.....	28
3.3.2 Purifikasi Bentonit.....	28
3.3.4 Karakterisasi Zeolit X Hasil Modifikasi	29
3.3.4.1 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	30
3.3.4.2 Karakterisasi <i>Scanning Electron Microscope</i> SEM	30
3.3.5 Uji Katalitik Zeolit-X Hasil Modifikasi Bentonit pada Pirolisis <i>Crude Palm Oil</i> (CPO).....	31
3.3.6. Analisis Produk Hasil Pirolisis dengan <i>Gas Chromatography – Mass Spectroscopy</i> (GC-MS)	31
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	32
4.1 Pengantar.....	32
4.2 Purifikasi Bentonit	32
4.4 Modifikasi Bentonit Menjadi Zeolit-X	36
4.5 Uji Katalitik Zeolit-X Hasil Modifikasi Bentonit	41
V. KESIMPULAN.....	49
5.1 Kesimpulan.....	49
5.2 Saran	50
DAFTAR PUSTAKA.....	51
LAMPIRAN.....	57

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Data d-spacing bentonit (B) dan bentonit teraktivasi (BA).....	24
2. Data hasil analisis XRF bentonit sebelum dan sesudah purifikasi.....	33
3. Perbandingan standar IZA dengan zeolit-X hasil sintesis pada waktu bervariasi	37
4. Perbandingan standar IZA sodalit dengan zeolit-X hasil sintesis pada variasi waktu yang berbeda.	38
5. Perbandingan standar IZA faujasit dengan zeolit-X hasil sintesis dengan zeolit- X hasil sintesis dengan waktu yang bervariasi	38
6. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit katalis zeolit-X tanpa pemanasan	44
7. Komposisi relatif BCO yang dihasilkan menggunakan katalis zeolit-X dengan tanpa pemanasan dan variasi waktu pemanasan 10, 20, 30, dan 40 menit.....	47
8. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit katalis zeolit-X waktu pemanasan 10 menit	62
9. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit katalis zeolit-X waktu pemasn 20 menit.....	63
10. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit katalis zeolit-X waktu pemanasan 30 menit	63
11. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit katalis zeolit-X waktu pemanasan 40 menit	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Aplikasi produk pirolisis cepat	14
2. Kromatogram <i>Bio Crude Oil</i> (BCO) hasil pirolisis.	15
3. Struktur Kristal Zeolit-X IZA	18
4. Skema alat XRD.....	19
5. Difraktogram Zeolit-X IZA(Internasional Zeolite Association).....	19
6. Mikrograf zeolit-X hasil sintesis dengan perbesaran (a) 5000x dan (b) 15.000x	20
7. Prinsip kerja spectrometer XRF	24
8. Difaktogram adsorben bentonit (B) dan bentonit teraktivasi (BA).....	25
9. Difraktogram XRD (a) Bentonit Alami (b) bentonit teraktivasi HCl	26
10. Mikrograf SEM (a) Bentonit Alami (b) Bentonit Aktif HCl.	27
11. Difraktogram bentonit (a) sebelum purifikasi, dan (b) setelah purifikasi.....	35
12. Hasil analisis difraktogram menggunakan aplikasi Match! 3 (a) bentonit alam dan (b) bentonit setelah purifikasi.....	36
13. Mikrograf bentonit; (a) sebelum purifikasi dengan perbesaran 15.000x dan (b) setelah purifikasi dengan perbesaran 15.000x	37
14. Difaktogram zeolit-X (a) Standar IZA zeolit-X (b) Standar IZA sodalit, (c) standar IZA faujasit, hasil modifikasi bentonit dengan variasi waktu kristalisasi (d) 72, (e) 96, dan (f) 120 jam.....	38
15. Hasil analisis difraktogram zeolit-X menggunakan aplikasi Match! 3 pada variasi waktu kristalisasi (a) 72, (b) 96 dan (c) 120 jam.....	41
16. Mikrograf zeolit-X variasi waktu kristalisasi 72 jam dengan perbesaran yang berbeda (a) 10.000x dan (b) 15.000x	42
17. Hasil pirolisis minyak kelapa sawit menggunakan katalis zeolit-X tanpa pemanasan dan variasi pemanasan 10, 20, 30 dan 40 menit.....	43

18. Kromatogram BCO minyak kelapa sawit tanpa pemanasan.....	44
19. Diagram komposisi BCO minyak kelapa sawit katalis zeolit-X tanpa pemanasan	46
20. Kromatogram GC dan komposisi relatif BCO hasil pirolisis menggunakan katalis zeolit-X dengan variasi waktu pemanasan (a) 10, (b) 20, (c) 30, dan (d) 40 menit.....	47
21. Komposisi relatif hidrokarbon tanpa pemanasan dan dengan variasi pemanasan 10, 20, 30, dan 40 menit.	49

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Minyak bumi yang menjadi sumber energi non-terbarukan, membutuhkan waktu yang sangat lama untuk mengolah bahan mentahnya menjadi produk akhir. Penurunan cadangan minyak bumi, yang terus berlangsung seiring waktu, menjadi salah satu masalah utama dalam sektor energi di Indonesia, terutama karena konsumsi minyak bumi yang terus meningkat. Kementrian ESDM, (2019) melaporkan bahwa cadangan minyak bumi terus menurun, dengan data dari tahun 2018 menunjukkan bahwa rata-rata produksi minyak bumi masih sekitar 773 ribu barrel per hari. Produksi pada tahun 2018 jauh lebih rendah dibandingkan tahun 2017 yang mencapai 949 ribu barrel per hari. Penurunan ini terjadi seiring dengan penurunan produksi minyak, sementara kebutuhan terus meningkat akibat penambahan penduduk dan kendaraan bermotor, termasuk sepeda motor dan mobil. Untuk mengatasi masalah ini dan meningkatkan cadangan energi, diperlukan inovasi dalam bahan bakar alternatif dengan mengembangkan energi baru terbarukan yang dapat menghasilkan biohidrokarbon. Salah satu energi baru terbarukan yang kini menjadi fokus penelitian global adalah bahan bakar berbasis biomassa (*biofuel*). Potensi bahan bakar ini didukung oleh ketersediaan bahan baku yang terus menerus dapat diperbarui serta kemajuan teknologi konversi biomassa menjadi energi, yang ramah lingkungan, tidak beracun, dan memiliki emisi gas buangan yang rendah saat digunakan dalam pembakaran (Wijaya, 2021).

Biohidrokarbon menjadi salah satu jenis energi terbarukan yang sedang dikembangkan secara luas. Sebagai *biofuel* generasi kedua, biohidrokarbon

dapat diproduksi dari minyak nabati, menjadikannya sumber energi yang terbarukan dan ramah lingkungan. Penggunaan biohidrokarbon juga dapat membantu mengatasi penurunan cadangan bahan bakar fosil. Minyak nabati seperti minyak kelapa sawit dapat diubah menjadi biohidrokarbon. Proses ini tidak hanya mengurangi biaya produksi (karena harganya yang murah) tetapi juga menangani masalah limbah. Untuk mempercepat konversi minyak kelapa sawit bekas menjadi biohidrokarbon, reaksi katalis dilakukan sehingga menghasilkan *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) (Aziz, 2023).

Minyak kelapa sawit dipilih sebagai bahan baku karena tanaman kelapa sawit banyak tumbuh di Indonesia. Oleh karena itu, minyak kelapa sawit yang tidak digunakan dapat dimanfaatkan menjadi suatu produk unggulan yang memiliki nilai ekonomis. Minyak kelapa sawit yang digunakan untuk pembuatan bahan baku biohidrokarbon dihasilkan dari minyak kelapa sawit. Minyak kelapa sawit ataupun minyak nabati pangan pada umumnya memiliki kekentalan yang relatif tinggi dibandingkan dengan minyak solar dari fraksi minyak. Seiring dengan kemajuan teknologi dan ilmu pengetahuan minyak kelapa sawit, dapat diubah menjadi asap cair, produk yang menguntungkan secara ekonomi. Asap cair yang dapat dibuat melalui proses pirolisis (Labibah dkk., 2024).

Pirolisis dinilai sebagai teknologi terbaik karena produk yang dihasilkan terdiri dari *bio-crude oil* (BCO) sebagai gas terkondensasi, gas sintetis (gas tidak terkondensasi seperti CO₂, H₂), dan arang (*biochar*) (Seith, 2009). *Fast pyrolysis* merupakan proses dekomposisi termal dari komponen organik tanpa adanya kehadiran oksigen didalam proses pada suhu 350–600 °C. Proses ini mensyaratkan bahan baku biomassa yang relatif kering atau dibatasi kelembaban tertentu. Proses ini menghasilkan sejumlah produk yaitu uap organik, gas (CO₂, H₂O, CO) dan padatan berupa arang. Padatan dalam produk pirolisis yang umumnya mengandung komponen karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O) dengan sedikit unsur logam. Komponen cair yang dihasilkan merupakan uap organik terkondensasi (BCO) yang mengandung asam karboksilat, alkohol, keton, aldehid, hidrokarbon, dan senyawa lainnya (Solikhah dkk., 2022).

Berdasarkan penelitian menunjukkan bahwa BCO seperti campuran dari berbagai kelompok senyawa organik seperti hidrokarbon, alkohol, aldehid, keton, asam karboksilat, ester, furan, dan fenol. Didalamnya terdapat komposisinya yang kompleks dan adanya komponen yang berbahaya jika digunakan sebagai bahan bakar, seperti asam karboksilat, aldehid, dan fenol menyebabkan BCO tidak dapat diaplikasikan sebagai bahan bakar. Untuk meningkatkan mutunya, BCO perlu diolah lebih lanjut dengan tujuan menghilangkan komponen yang tidak diinginkan dan meningkatkan kadar hidrokarbon yang sesuai sebagai bahan bakar (Baloch *et al.*, 2021).

Salah satu target dari pengolahan BCO seperti biogasoline, memiliki campuran hidrokarbon dengan panjang rantai karbon $C_5 - C_{12}$. Biogasoline memiliki karakteristik yang menyerupai gasoline (bensin) petrokimia, sehingga dapat digunakan sebagai alternatif pengganti bensin petrokimia (Simanjuntak *et al.*, 2019). Untuk mendapatkan biogasoline, metode yang sedang berkembang dengan pesat adalah proses pirolisis BCO dengan bantuan katalis dengan tujuan mengubah komponen BCO menjadi *biogasoline*. Dalam proses ini katalis memegang peran penting untuk menentukan jenis senyawa yang terbentuk.

Akibat Peranan yang penting, berbagai jenis katalis telah diteliti seperti zeolit-HZSM-5, zeolit- β , Pt/C, CaO, Pt-Ni/y- Al_2O_3 dan Zeolit Y. Dari sejumlah katalis tersebut, zeolit sintetik menjadi salah satu yang paling sering digunakan. Zeolit sintetik mampu mempercepat reaksi deoksigenasi serta meningkatkan pembentukan senyawa hidrokarbon (Mohabeer *et al.*, 2019). Diantara berbagai jenis katalis, zeolit yang paling sering digunakan dan dikembangkan salah satunya zeolit-X. Zeolit-X dapat disintesis dari bahan-bahan seperti sekam padi, alumunium, dan bentonit. Bentonit dipilih sebagai bahan dasar untuk pembuatan katalis zeolit-X karena kandungan mineral bentonit yang termasuk dalam kelompok aluminosilikat, dengan partikel berukuran lebih dari 2 mm dan kurang dari 4 mm. Ukuran serta rasio luas permukaan terhadap beberapa sifat katalitik dari aluminium dan silikon, interaksi dengan air, serta termoplastik juga berperan dalam karakteristiknya (Berghuis *et al.*, 2022).

Pada penelitian ini bahan baku yang digunakan untuk mensintesis zeolit-X berasal dari bentonit yang ketersediaannya sangat melimpah di alam. Bentonit salah satu jenis lempung yang mempunyai kandungan utama mineral smektit (montmorillonit) dengan kadar 85-95%, bersifat plastis dan koloidal tinggi. Berdasarkan sifat fisiknya bentonit dibedakan atas Na-bentonit dan Ca-bentonit. Na-bentonit memiliki kandungan Na^+ yang besar pada antar lapisannya, memiliki sifat mengembang dan akan tersuspensi bila didispersikan ke dalam air. Pada Ca-bentonit, kandungan Ca^{2+} dan Mg^{2+} relatif lebih banyak bila dibandingkan dengan kandungan Na^+ . Ca-bentonit bersifat sedikit menyerap air dan jika didispersikan ke dalam air akan cepat mengendap atau tidak terbentuk suspensi. Bentonit dapat digunakan sebagai penyangga katalis, sedangkan bentonit yang telah dimodifikasi dapat digunakan sebagai katalis (Febriawan, dkk., 2014).

Dalam upaya untuk mengetahui hasil dari uraian diatas, pada penelitian ini digunakan katalis zeolit-X yang telah disintesis dari bentonit yang diharapkan mampu mengolah minyak kelapa sawit menjadi senyawa biohidrokarbon melalui metode pirolisis. Zeolit-X yang telah disintesis dari bentonit kemudian diaktivasi menggunakan proses kalsinasi pada suhu 600°C . Zeolit tersebut kemudian akan dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Kemudian dilakukan suhu pemanasan pra perlakuan pirolisis pada variasi waktu pemanasan 10, 20, 30, dan 40 menit dan tanpa pemanasan, selanjutnya produk pirolisis kemudian dikarakterisasi menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS).

1.2 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mempurifikasi bentonit dengan menggunakan pelarut asam
2. Memperoleh katalis zeolit-X dari modifikasi bentonit.
3. Mendapatkan data karakterisasi zeolit-X menggunakan teknik XRD dan SEM
4. Mendapatkan informasi tentang komposisi BCO yang dihasilkan dari pirolisis minyak kelapa sawit dengan waktu pra-perlakuan pemanasan yang bervariasi.

5. Mendapatkan data karakterisasi *Bio Crude Oil* (BCO) dengan menggunakan analisis GC-MS

1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Meningkatkan nilai ekonomis bentonit sebagai bahan baku pembuatan katalis
2. Memberikan informasi tentang teknik pirolisis

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Baru Terbarukan

Energi adalah kebutuhan mendasar manusia yang terus meningkat seiring dengan kemajuan hidup. Bahan Bakar Minyak (BBM) memiliki peran penting dalam pemenuhan energi nasional, dengan komposisi konsumsi saat ini adalah BBM 52,50%, gas 19,04%, batubara 21,52% air 3,37%, panas ,01% dan energi baru 0,2%. Kebijakan subsidi di masa lalu terhadap BBM berdampak pada pertumbuhan ekonomi, tetapi produksi minyak Indonesia menurun karena faktor alam dan Cadangan yang semakin menipis. Dengan tingginya harga minyak mentah dunia dan subsidi yang membebani anggaran, pemerintah berupaya mengurangi ketergantungan pada BBM dan mencari sumber energi alternatif. Saat ini, Indonesia masih mengimpor minyak untuk memenuhi konsumsi dalam negeri, dan diversifikasi energi menjadi penting dengan memanfaatkan beragam sumber daya energi yang ada di seluruh wilayah Indonesia (Kholiq, 2015)

Kebutuhan energi dalam negeri selama ini dipasok dari produksi dalam negeri dan sebagian dari impor, yang cenderung meningkat. Komponen terbesar dari impor energi adalah minyak bumi dan BBM. Kemampuan produksi minyak bumi semakin menurun sehingga membatasi tingkat produksinya, dimana dalam satu dekade terakhir, kapasitas produksi kilang BBM dalam negeri tidak bertambah, sementara permintaan BBM dalam negeri meningkat pesat. Pada tahun 2005, minyak bumi impor berperan untuk menyuplai 40% kebutuhan bahan baku kilang, dan 32% untuk pemakaian domestik. Pertumbuhan permintaan akan minyak nabati dan biofuel juga meningkat, yang dihasilkan dari kelapa sawit karena kelapa sawit dapat menghasilkan minyak hingga ton per hektar, lebih tinggi

dibandingkan kedelai yang hanya 3 ton. Indonesia memiliki potensi besar dalam pengembangan perkebunan kelapa sawit berkat cadangan lahan yang luas, tenaga kerja yang tersedia, dan kondisi agroklimat yang mendukung. Pada tahun 2007 luas perkebunan kelapa sawit mencapai sekitar 6,8 juta hektar, dimana 60% dikelola oleh perkebunan besar dan sisanya oleh petani kecil (Al-kusuma dkk, 2016).

2.2 Biohidrokarbon

Biohidrokarbon adalah senyawa hidrokarbon dengan jumlah karbon yang bervariasi. Jenis-jenis hidrokarbon meliputi *biogasoline*, yang merupakan campuran hidrokarbon dengan rantai karbon C_5 - C_{12} , bahan bakar kerosin atau bioavtur, yang terdiri dari hidrokarbon dengan rantai karbon C_{13} - C_{17} , dan biodiesel, yang mengandung C_8 - C_{28} . Peluang produksi hidrokarbon meningkat berkat perkembangan teknologi pirolisis. Dimana minyak kelapa sawit dipanaskan dalam kondisi minimum atau tanpa oksigen menghasilkan produk gas, cair dan padat. Produk cair, yang dikenal sebagai minyak pirolisis atau *Bio crude Oil* (BCO), merupakan campuran kompleks dari berbagai senyawa, termasuk hidrokarbon dan senyawa organik teroksidasi seperti asam, aldehida, keton, ester dan fenol. Proses ini menjanjikan karena dapat menghasilkan biohidrokarbon yang serupa dengan hidrokarbon fosil tanpa kandungan racun seperti logam berat, belerang dan nitrogen (Makertiarha *et al*, 2020).

Hidrokarbon dapat dibedakan berdasarkan dengan jenis komponennya. Pada hidrokarbon jarak rendah (LRH) mencakup rantai karbon kisaran C_5 - C_9 , sedangkan hidrokarbon rentang menengah (MRH) mencapai rantai karbon berada pada kisaran C_9 - C_{35} . Istilah organik tentang bensin (GRO) digunakan untuk hidrokarbon dengan rentang karbon C_6 - C_{10} , organik rentang diesel (DRO) untuk C_{11} - C_{28} , dan organik tentang minyak (ORO) untuk karbon C_{28} - C_{35} dalam konteks Total Petroleum Hydrocarbons (THP). Total Petroleum Hydrocarbons (THP) biasanya mencakup hidrokarbon volatil (VPH) dan hidrokarbon yang dapat diekstraksi (EPH). Minyak tanah yang juga dikenal sebagai bahan bakar minyak

nomor satu, minyak parafin, minyak lampu dan minyak batu bara yang merupakan cairan hidrokarbon mudah terbakar yang biasanya digunakan sebagai bahan bakar. Minyak tanah dihasilkan dari minyak bumi dan dimanfaatkan dalam pemanas rumah tangga, lampu, atau tungku serta sebagai komponen bahan bakar untuk mesin diesel, traktor, jet, roket, dan pelarut untuk minyak pelumas serta insektisida. Sebagai bahan bakar umum untuk memasak, komposisi minyak tergantung pada kompleks dari hidrokarbon C_9 - C_{16} . Pada bahan bakar diesel diperoleh melalui fraksinasi minyak mentah dan terutama digunakan dalam kendaraan motor dan mesin kereta api yang terdiri dari campuran hidrokarbon C_{10} - C_{15} (Kuppusamy *et al.*, 2020)

2.3 Minyak Kelapa Sawit

Kelapa sawit adalah tanaman penghasil minyak nabati yang paling efisien di dunia. Produk turunan dari minyak kelapa sawit, seperti biodisel, menjadi topik populer terkait masa depan energi. Indonesia merupakan produsen terbesar di dunia, menyumbang sekitar 44,46% dari total produksi global. Perkembangan penggunaan bahan bakar bio (*biofuel*) (Aziza, 2015). Biofuel menghasilkan emisi karbon dioksida yang lebih rendah hingga 48% dibandingkan dengan bensin biasa. Sementara itu biodiesel hanya mengeluarkan sekitar seperempat dari emisi karbon dioksida yang dilepaskan oleh solar konvensional. Hal ini menjadikan biofuel sebagai alternatif bahan bakar yang lebih ramah lingkungan daripada bahan bakar fosil. Salah satu bahan baku yang dianggap paling efisien untuk memproduksi biodiesel adalah minyak kelapa sawit, karena tanaman ini memiliki hasil panen tertinggi dibandingkan tanaman penghasil minyak nabati lainnya. Selain itu pohon kelapa sawit juga memiliki siklus hidup yang cukup panjang. Uni Eropa menyadari pentingnya kelapa sawit sebagai salah satu komoditas utama dalam perdagangan global. Kelapa sawit disebut sebagai jenis minyak nabati yang paling banyak diproduksi dan diperdagangkan secara global, mencakup sekitar 40% dari total perdagangan minyak nabati internasional (Pradana, 2020).

2.4 Pirolisis Biomassa

Pirolisis adalah metode yang digunakan untuk menghasilkan asap cair melalui proses dekomposisi material dengan pemanasan. Proses ini berlangsung pada suhu tinggi tanpa adanya oksigen (O_2). Bahan yang digunakan dalam pirolisis bisa berasal dari sumber alam seperti biomassa atau dari polimer. Melalui proses pirolisis, biomassa dan polimer mengalami pemutusan ikatan kimia, menghasilkan molekul yang lebih kecil dan sederhana. Secara umum, pirolisis biomassa melibatkan dekomposisi bahan organik yang menghasilkan arang aktif, gas, uap, dan aerosol. Gas yang dikondensasikan menjadi cairan stabil pada suhu kamar ini terdiri dari senyawa hidrokarbon yang dikenal sebagai *biofuel* atau *bio-oil* (Febriyanti ddk., 2019).

Pirolisis adalah salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengubah biomassa menjadi produk dengan nilai ekonomi yang lebih tinggi. Pirolisis merupakan proses konversi termal di mana material dipanaskan dalam kondisi atmosfer inert tanpa adanya udara atau oksigen. Proses ini menghasilkan padatan berupa arang (*char* atau *biochar*), senyawa volatil yang dapat dikondensasi (distilat), serta gas yang tidak dapat dikondensasi. Pirolisis dapat berlangsung secara lambat atau cepat tergantung pada metode yang digunakan. Proses ini melewati empat tahap, dimulai dengan penguapan air, diikuti oleh dekomposisi hemiselulosa, selulosa, dan lignin. Pirolisis hemiselulosa dan selulosa terjadi pada suhu antara 180°C hingga 350°C, menghasilkan asam karboksilat dan senyawa karbonil. Sementara itu, lignin mengalami pirolisis pada suhu antara 300°C hingga 500°C, menghasilkan fenol. Pirolisis kayu sering menghasilkan senyawa yang tidak diinginkan, seperti hidrokarbon aromatik polisiklik (HAP). HAP adalah kelompok senyawa yang sebagian terbentuk secara alami dan sebagian lagi dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna, biasanya terbentuk pada suhu pirolisis antara 500°C dan 900°C (Maulina, dkk, 2017).

2.4.1 Mekanisme Reaksi Pirolisis

Mekanisme reaksi pirolisis dapat dibagi menjadi dua, yaitu secara primer dan sekunder. Pada reaksi primer senyawa volatile terjadi karena dilepaskan sedangkan ikatan kimia dalam polimer terputus selama proses pemanasan biomassa (Uddin *et al.*, 2018). Reaksi primer dapat ditentukan dengan cara pembentukan char, depolimerisasi, dan fragmentasi. Sedangkan mekanisme reaksi sekunder, senyawa volatile memiliki sifat ketidak stabilan yang dilepaskan selama proses depolimerisasi dan fragmentasi dibawah kondisi reaktor yang kemudian terjadi reaksi pemecahan yang lebih lanjut yang dinamakan dengan reaksi sekunder. Selama proses pirolisis itu berlangsung biomassa dapat mengalami reaksi yang kompleks seperti reaksi dehidrasi, depolimerisasi, dekarbosilasi, dan isomerisasi.

Pirolisis pada umumnya mengandung selulosa, hemiselulosa dan lignin yang dengan setiap komponen yang dimilikinya berbeda untuk menghasilkan produk BCO. Selulosa merupakan polimer yang terdiri dari monomer glukopiranososa, yang berasal dari dua residu glukosa anhidrida yang dihubungkan dengan ikatan β (1-4) glikosida. Selulosa dapat terurai ketika dilakukannya pirolisis menjadi oligosakarida dan mengalami pemutusan pada rantai ikatannya hingga mencapai ikatan monosakarida. Dehidrasi glukosa membentuk monosakarida yang dapat dipolimerisasi dan diubah kembali dalam bentuk fragmentasi atau kondensasi dari hidrasi, dekarboksilasi maupun dekarbonisasi yang dapat menghasilkan senyawa furfural beserta turunannya. Produk akhir yang dihasilkan dari pirolisis selulosa yaitu berupa senyawa aromatik yang dihasilkan dari dehidrasi, dekarbonilasi, dan dekarbosilasi (Lin *et al.* 2009). Terdapat hemiselulosa yang memberikan struktur atau rute pirolisis yang tidak jauh berbeda dengan pirolisis menggunakan selulosa, Dimana hemiselulosa yang terurai menjadi monomer gula seperti xilosa, glukosa, manosa dan galaktosa. Reaksi hemiselulosa juga melibatkan adanya dehidrasi, dekarbosilasi, dan dekarboksilasi yang akan menghasilkan produk akhir berupa senyawa aromatik (Lin *et al.* 2020).

2.4.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi pirolisis

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi proses pirolisis diantaranya adalah sebagai berikut:

a. Ukuran Partikel

Ukuran partikel biomassa dapat berpengaruh dalam proses pirolisis. Hal ini dapat terjadi ketika terjadi perubahan ukuran partikel dari bahan baku minyak kelapa sawit dalam rentang ukurannya dari 0 sampai 1 mm yang dapat mempengaruhi produk yang dihasilkan. Untuk menghasilkan produk BCO yang maksimum memiliki nilai 38% yang ditemukan pada partikel dengan diameter 0,4 mm (Garg *et al.*, 2016).

b. Suhu

Dalam proses pirolisis dapat mempengaruhi reaksi yang memiliki ikatan C-C dan menghasilkan produk senyawa yang memiliki rantai karbon pendek (Miandad *et al.*, 2016). Dengan adanya contoh, pirolisis dari limbah minyak kelapa sawit menunjukkan bahwa jumlah BCO yang optimal dihasilkan pada suhu 400-550 °C, dan menurun ketika proses pirolisis dilakukan pada suhu 550-600 °C. Karena BCO diubah menjadi gas melalui reaksi sekunder (Kan *et al.*, 2012).

c. Laju Pemanasan

Berdasarkan laju pemanasan yang mampu meningkatkan BCO dan mengurangi *char*. Seperti pada produk BCO dari tebu meningkat dengan meningkatkan laju pemanasan. Suhu pirolisis 500 °C dengan laju pemanasan yang berbeda mulai dari 10-50 °C per menit, hasil BCO meningkat dari 42,34% menjadi 45,53% dan hasil *char* menurun dari 31,8% menjadi 29,8% (Varma and Mondal, 2016).

2.4.3 Jenis-Jenis Pirolisis

Kualitas dan komposisi *Bio Crude Oil* (BCO) yang dihasilkan dari proses pirolisis bergantung pada jenis biomassa dan parameter operasi pirolisis, seperti konfigurasi reaktor penggunaan katalis, laju pemanasan, suhu waktu tinggi dan

ukuran partikel. Berdasarkan laju pemanasan dan jenis produk yang dihasilkan, pirolisis dibagi menjadi tiga jenis yaitu, pirolisis lambat, pirolisis cepat, dan pirolisis kilat.

a. Pirolisis Lambat (*Slow Pyrolysis*)

Pirolisis lambat adalah metode dengan laju pemanasan yang rendah antara 0,1 hingga 1,0 °C/detik. Dalam proses ini biomassa dipanaskan secara perlahan tanpa adanya oksigen pada suhu yang relatif rendah, sekitar dibawah 400 °C, dan memakan waktu yang lama. Metode ini mampu menghasilkan arang (*char*) berkualitas tinggi dengan laju pemanasan yang rendah. Namun karena waktu tinggal yang lama, kualitas produk BCO yang dihasilkan relatif rendah. Proses ini telah diaplikasikan untuk biomassa seperti residu zaitun, cangkang almond, lignit dan Jerami gandum. Pirolisis lambat dapat menghasilkan 30-40% char, 25-35% gas dan 25-35% BCO. Kelebihan dari metode lambat adalah peralatannya yang sederhana dan biaya yang murah (Dhyani and Bhaskar 2019).

b. Pirolisis Cepat (*Fast Pyrolysis*)

Pirolisis cepat yang dilakukan dengan memanaskan biomassa pada suhu 500 °C dengan laju pemanasan yang sangat tinggi yaitu 10-200 °C/detik dan waktu reaksi yang sangat singkat yaitu 1-2 detik. Metode ini telah digunakan untuk menghasilkan BCO dari berbagai biomassa seperti minyak kelapa sawit, sekam padi, dan bagas tebu. Proses ini menghasilkan konversi BCO yang lebih tinggi, sekitar 60-75% dengan sisa 15-25% char dan 10-20% gas. Pirolisis cepat sangat efektif untuk produksi BCO karena laju pemanasannya yang tinggi, waktu tinggal yang singkat, dan pendinginan uap yang cepat (Zaman *et al.*, 2017).

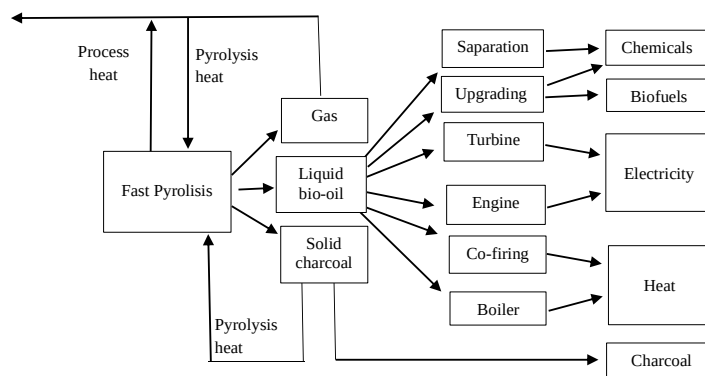
c. Pirolisis kilat (*Flash Pyrolysis*)

Produk BCO dengan metode ini dapat meningkat hingga 75%. Metode ini dilakukan dengan devolatilisasi cepat di atmosfer bahwa inert menggunakan laju pemanasan yang lebih tinggi dengan suhu pirolisis sekitar 450-1000 °C dan waktu tinggal gas yang sangat singkat (< 1 detik). Namun proses ini memiliki beberapa keterbatasan teknologi, misalnya produk BCO yang dihasilkan memiliki kestabilan termal yang buruk dan bersifat korosif, terdapat

padatan dalam BCO sehingga meningkatkan viskositas efek katalitik dari char yang terdapat dalam BCO (Zaman *et al.*, 2017). Produk yang dihasilkan dari flash pirolisis berupa 75% BCO, 13% gas, dan 12% char (Dhyani dan Bhaskar., 2019). Metode ini telah diterapkan untuk mengolah berbagai biomassa antara tembakau lain (Calabuig dan Marcilla, 2021).

2.4.4 Aplikasi Pirolisis Biomassa

Diantara berbagai teknik konversi biomassa, seperti fermentasi biokimia yang menghasilkan bioetanol (Vaid *et al.*, 2021), konversi kimia untuk memproduksi biodiesel (Pandiangan *et al.*, 2017), serta proses digesti biokimia yang menghasilkan biogas (Alaswad *et al.*, 2015), pirolisis menjadi salah satu metode yang menawarkan berbagai keuntungan. Beberapa kelebihanannya termasuk rendahnya emisi yang dihasilkan, penggunaan biomassa yang beragam serta kemampuan untuk memanfaatkan semua produk sampingan hasil pirolisis (Uddin *et al* 2018). Proses pirolisis menghasilkan produk berupa padatan, cairan, (bio-oil tar, dan air) gas yang terdiri dari CO₂, CO, H₂ dan CH₄. Masing-masing produk tersebut dapat dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi tergantung pada komposisi tamanya. Sebagai contoh, produk padatan seperti char atau arang hasil pirolisis umumnya digunakan sebagai adsorben (Kan *et al.*, 2021) sementara produk gas (syngas) digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk mesin pembakar internal (Elnajjar *et al.*, 2021; Peng *et al.*, 2022; Ramalingam., 2019).

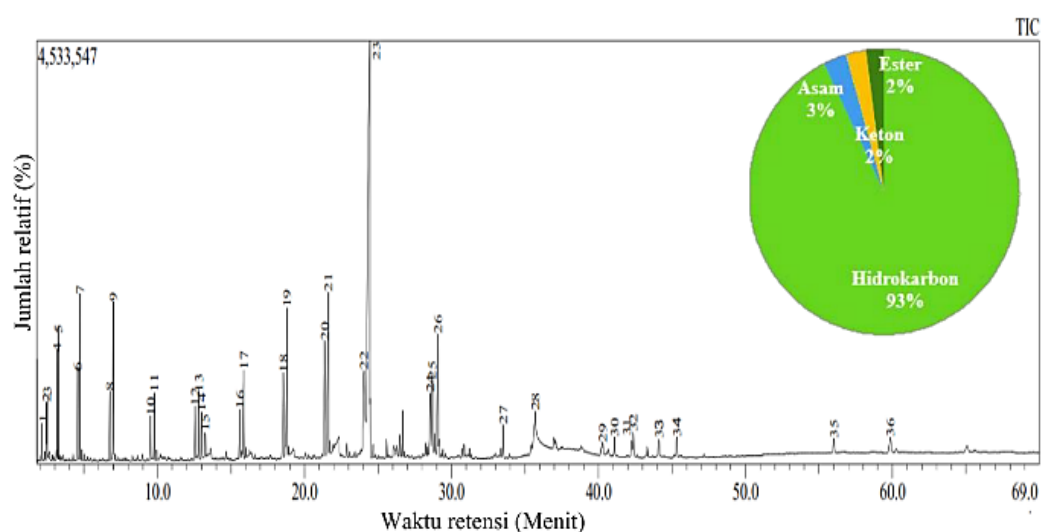


Gambar 1. Aplikasi produk pirolisis cepat (Bridgwater, 2013).

Gambar 1 menunjukkan bahwa produk utama dari pirolisis yaitu *Bio Crude Oil* (BCO), dapat digunakan diberbagai sektor, seperti pada turbin, mesin pembangkit listrik atau boiler untuk menghasilkan panas (Beld *et al.*, 2018; Broumand *et al* 2021; Martin dan Boateng 2014).

2.4.5 Analisis produk katalis zeolit-X hasil pirolisis menggunakan Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS)

Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) adalah metode analisis yang mengkombinasikan gas kromatografi dan spektrometri massa untuk mengidentifikasi berbagai zat dalam sampel uji. GC-MS terdiri dari dua bagian utama: gas kromatografi dan spektrometer massa. Tujuan utama dari analisis menggunakan GC-MS adalah untuk mengidentifikasi berbagai zat dalam sampel dengan membandingkan konsentrasi relatif massa atom dalam spektrum yang dihasilkan. Alat ini digunakan untuk menganalisis senyawa volatil yang disuntikkan ke dalam sistem GC, di mana senyawa tersebut dipisahkan dalam kolom berdasarkan polaritasnya. Setelah keluar dari sistem GC, setiap senyawa yang terpisah masuk ke sistem MS untuk proses fragmentasi menggunakan energi ionisasi tertentu (Nadhief, 2023). Kromatogram dari *Bio Crude Oil* hasil pirolisis ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kromatogram *Bio Crude Oil* (BCO) hasil pirolisis.

2.5 Katalis

Katalis adalah zat yang mempercepat laju reaksi dengan menyediakan jalur alternatif dan menurunkan energi aktivasi (Joshi dan Renade, 2016). Katalis berpartisipasi dalam reaksi namun tidak mengalami perubahan permanen, sehingga pada akhir reaksi, katalis tetap ada dan tidak menjadi bagian dari produk akhir. Proses reaksi yang melibatkan katalis disebut reaksi katalisis, di mana katalis berperan dalam menurunkan energi aktivasi, yang merupakan energi minimum yang dibutuhkan agar reaksi kimia terjadi. Katalis tidak mempengaruhi kesetimbangan kimia atau komposisi kesetimbangan reaksi, tetapi hanya mempengaruhi laju reaksinya (Joshi dan Renade, 2016).

Secara umum, katalis yang baik harus memenuhi beberapa kriteria, seperti mampu bekerja pada reaksi transesterifikasi dan esterifikasi, tidak terdeaktivasi oleh air, stabil, aktif pada suhu rendah, dan memiliki selektivitas tinggi. Namun, katalis dapat kehilangan efektivitasnya seiring waktu karena proses deaktivasi yang disebabkan oleh pengotor. Aktivitas dan selektivitas katalis menentukan kinerjanya. Faktor penting yang perlu diperhatikan dalam pemanfaatan katalis meliputi aktivitas, selektivitas, durasi penggunaan, dan kemudahan regenerasi (Koh dan Tinea, 2011). Dalam industri, katalis dapat berbentuk padat atau cair, dengan katalis padat sering lebih disukai karena mudah dipisahkan dan lebih ramah lingkungan dibandingkan katalis cair (Indriawati *et al.*, 2014).

Terdapat dua jenis katalis berdasarkan fasanya:

1. Katalis Homogen

Katalis homogen memiliki fasa yang sama dengan medium reaksi, sehingga bercampur merata dengan zat pereaksi. Kekurangan katalis ini adalah sulitnya memisahkan katalis dari produk setelah reaksi selesai (Chen *et al.*, 2015).

Contoh katalis homogen yang sering digunakan dalam reaksi transesterifikasi antara lain KOH (Budiman *et al.*, 2014), NaOH (Heidi *et al.*, 2018), H_2SO_4 , dan HCl (Jyoti *et al.*, 2018).

2. Katalis Heterogen

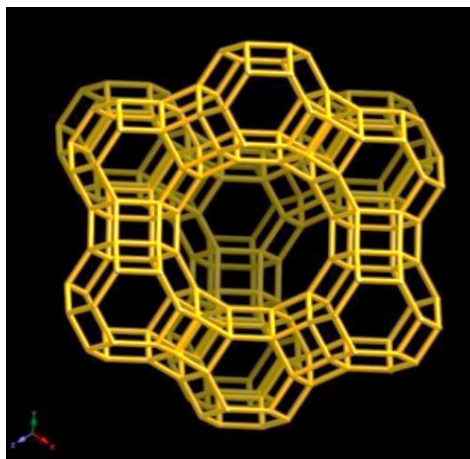
Katalis heterogen memiliki fasa yang berbeda dari medium reaksinya, biasanya

berupa katalis padat dengan substrat berupa gas atau cairan, sehingga tidak bercampur dengan zat pereaksi. Katalis ini mudah dipisahkan dan dapat digunakan kembali, serta lebih tahan terhadap suhu tinggi dibandingkan katalis homogen (Raidah, 2012). Keunggulan lain katalis heterogen adalah aktivitasnya yang tinggi, tidak korosif, ramah lingkungan, biaya produksi rendah, efisiensi tinggi, serta kemudahan dalam pemisahan dan penggunaannya kembali (Pandiangan dan Simanjuntak, 2013). Katalis heterogen yang umum digunakan dalam reaksi transesterifikasi meliputi logam, oksida logam, oksida berpenyangga, dan zeolit. Untuk meningkatkan efektivitasnya, bahan penyangga seperti alumina aktif, zeolit, dan silika sering digunakan (Pandiangan *et al.*, 2021; Syani, 2014).

2.6 Katalis Zeolit-X

Salah satu jenis katalis yang sering digunakan dalam proses pirolisis adalah zeolit. Zeolit merupakan mineral kristalin alumina silika berpori dengan struktur kerangka tiga dimensi, tersusun dari tetrahedral $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$. Tetrahedral ini terhubung melalui atom oksigen, membentuk struktur rangka dengan rongga yang diisi oleh ion logam alkali atau alkali tanah, serta molekul air yang dapat bergerak bebas (Safitri dan Jahro, 2021). Zeolit terdiri dari tiga jenis utama, yaitu zeolit sintetik, alami, dan termodifikasi. Zeolit sintetik dan termodifikasi (komposit) memiliki keunggulan dalam hal kemurnian, ukuran pori yang seragam, serta kemampuan pertukaran ion yang lebih baik dibandingkan zeolit alami (Fanta *et al.*, 2019). Salah satu jenis zeolit sintetik yang banyak dikembangkan adalah zeolit-X. Zeolit-X memiliki komposisi kimia khas $\text{Na}_{86}(\text{AlO}_2)_{86}(\text{SiO}_2)_{106} \cdot 264\text{H}_2\text{O}$ (Rizal *et al.*, 2022). Zeolit ini termasuk dalam kelompok Faujasit (FAU) karena memiliki topologi kerangka yang sama, meskipun karakteristiknya berbeda (Sekarini, 2009). Zeolit-X memiliki ukuran pori sekitar 8 Å dan permukaan dengan morfologi kubik. Walaupun strukturnya mirip dengan zeolit-Y, zeolit-X memiliki rasio Si/Al yang lebih rendah, yaitu antara 1,1-1,5, dibandingkan dengan zeolit-Y yang memiliki rasio antara 1,5-3,0. Zeolit-X memiliki keunikan seperti

luas permukaan dan volume pori yang besar, serta pori-pori yang seragam dengan struktur mirip sarang lebah (Enrik, 2024). Bentuk kristalnya adalah oktahedral, sebagaimana terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Struktur kristal zeolit-X (IZA (International Zeolit Association), 2017).

2.6.1 Teknik Preparasi

Zeolit dengan tingkat kemurnian dan kristalinitas yang tinggi dapat dilakukan dengan sintesis hidrotermal dengan memanfaatkan mineral alam Indonesia yang kualitasnya masih rendah. Zeolit-X dengan kemurnian dan kristalinitas yang lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan bahan sintesis atau silika. Suhu pada proses hidrotermal juga menjadi faktor penting dalam menentukan terbentuknya zeolit-x murni. Perlakuan suhu selama proses hidrotermal berpengaruh terhadap sintesis zeolit.

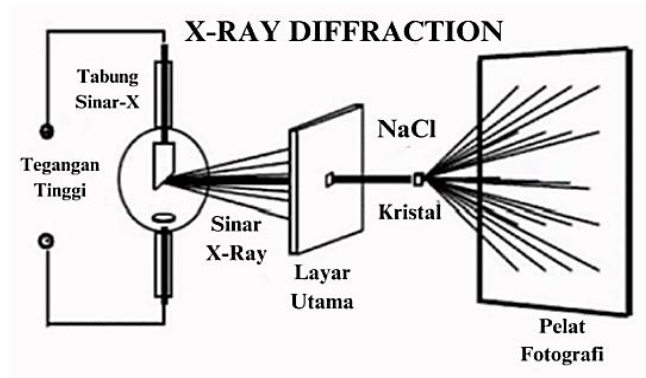
2.6.2 Karakterisasi Katalis zeolit-X

Analisis yang dilakukan terhadap katalis zeolit-X pada penelitian ini meliputi X-Ray Diffraction (XRD) untuk mengidentifikasi unsur-unsur dan senyawa-senyawa

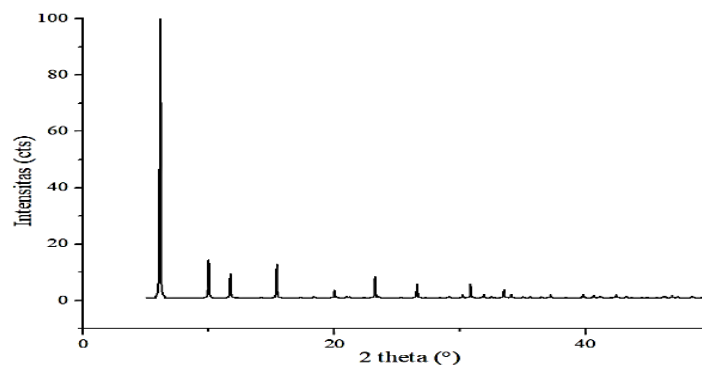
yang terkandung dalam sampel. *Scanning Electron Microscopy* (SEM) digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan sampel.

a) *X-Ray Diffraction* (XRD)

adalah teknik analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi material kristalin. Selain itu, XRD juga dapat digunakan untuk mengetahui susunan atom dalam kristal, keberadaan cacat, orientasi, serta ketidaksempurnaan kristal. Prinsip dasar XRD melibatkan difraksi sinar melalui celah-celah dalam kristal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Proses difraksi ini menghasilkan pola berdasarkan intensitas puncak, yang mencerminkan parameter kisi kristal atau indeks Miller (hkl) sebagai fungsi dari 2θ (2 theta), di mana θ (theta) merupakan sudut difraksi, sesuai dengan hukum Bragg. Hukum ini menghubungkan panjang gelombang radiasi elektromagnetik dengan sudut difraksi dan jarak antar kisi dalam sampel kristal (Nadhief, 2023). Difraktogram standar untuk zeolit-X ditampilkan pada Gambar 7.



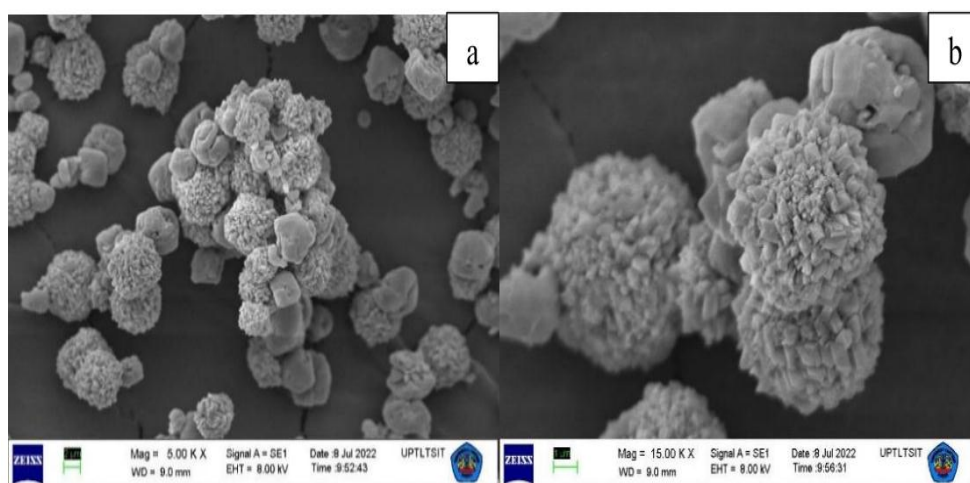
Gambar 4. Skema alat XRD (Anonim, 2024).



Gambar 5. Difraktogram zeolit-X (IZA (International Zeolit Association), 2017).

b) *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah jenis mikroskop elektron yang digunakan untuk memvisualisasikan permukaan sampel melalui proses pemindaian dengan menggunakan energi tinggi dari elektron dalam pola scan (Rafika, 2023). SEM bekerja dengan menembakkan serangkaian elektron pada permukaan objek untuk menghasilkan citra dengan perbesaran tinggi. SEM biasanya digunakan untuk mempelajari topografi permukaan secara rinci. Dalam karakterisasi zeolit-X, SEM bertujuan untuk mengidentifikasi mikrostruktur, terutama menampilkan morfologi permukaan yang menunjukkan pembentukan kluster dengan variasi ukuran dan bentuk (Yulianda, 2023). Contoh mikrograf dari sampel zeolit-X dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Mikrograf zeolit-X hasil sintesis dengan perbesaran (a) 5000x dan (b) 15.000x (Rezani, 2022).

2.7 Bentonit

Bentonit adalah jenis lempung yang mengandung mineral montmorilonit, yang termasuk dalam kelompok alumino silikat dengan ukuran partikel antara 2 mm hingga 4 mm. Bentonit berasal dari kelompok smektit dan memiliki rumus kimia $(\text{OH})_4\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20} \cdot x\text{H}_2\text{O}$. Struktur atom monmorillonit terdiri dari lapisan

oktahedral alumina yang diapit oleh lapisan tetrahedral silika (Srilai *et al.*, 2020). Pada lapisan tetrahedral terjadi substitusi isomorfik antara ion Si^{4+} dengan Al^{3+} , sementara pada lapisan oktahedral, Al dapat digantikan oleh Fe atau Mg. Substitusi isomorfik ini menyebabkan montmorilonit bermuatan negatif, dan muatan tersebut distabilkan oleh kation yang berada di lapisan antar-lembaran. Ukuran kecil dan rasio luas permukaan terhadap volume yang besar memberikan bentonit sifat-sifat khusus, seperti kapasitas pertukaran kation yang tinggi, sifat katalitik karena adanya logam Al dan Si, interaksi dengan air, serta sifat termoplastik (Petrov dan Michalev, 2012).

2.8 Modifikasi Bentonit

Bentonit merupakan sumber daya mineral yang melimpah di Indonesia dan belum dimanfaatkan secara optimal. Permukaan bentonit bermuatan negatif, sehingga mampu mengadsorpsi ion-ion logam yang bermuatan positif, tetapi kemampuannya dalam mengadsorpsi anion rendah, oleh karena itu bentonit perlu dimodifikasi sebelum digunakan. Cara yang digunakan untuk memodifikasi adalah dengan polarisasi yaitu menginterklasikannya suatu agen pemilar dengan lapis silikat pada bentonit sehingga dapat menghasilkan kation dalam jumlah yang besar. Polarisasi dilakukan dengan menggunakan polioksokation seperti, Zr^{4+} , Al^{3+} , Si^{4+} , Ti^{4+} , Fe^{3+} , dan Cr^{3+} . Yang paling banyak digunakan adalah polikation jenis legging $[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_2]^{7+}$ karena lebih mudah untuk diproduksi dapat meningkatkan struktur pori yang mengandung sisi asam Lewis dan Bronsted yaitu mempunyai kestabilan termal yang tinggi (Ningsih dan Yulizar, 2014).

2.9 Purifikasi Bentonit

Merujuk pada penelitian (Tanjaya dkk., 2006) dilakukan kajian mengenai pengaruh aktivasi menggunakan asam sulfat (H_2SO_4) dan asam klorida (HCl) terhadap efektivitas bentonit dalam proses bleaching. Aktivitas bentonit Pacitan

dilakukan dengan mencampurkan dengan asam pada berbagai konsentrasi. Kemampuan bentonit sebagai agen mucat dievaluasi berdasarkan kemampuannya dalam mengurangi warna, kadar asam lemak bebas (FFA), dan nilai peroksida (PV) pada minyak sawit. Meningkatnya konsentrasi asam dalam proses aktivitas dapat menghilangkan lebih banyak warna dari minyak. Namun konsentrasi yang terlalu tinggi dapat meningkatkan kadar FFA dalam minyak. Oleh karena itu penelitian ini menguji konsentrasi asam yang optimal untuk aktivitas bentonit guna menghasilkan minyak sawit yang diputihkan dengan warna paling rendah, kadar FFA dan PV yang tetap rendah. *Bleaching earth* adalah tanah liat yang dapat berupa *fuller earth* dalam bentuk alami atau *activated bleaching earth* setelah diaktivasi. Material ini memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi zat warna dan komponen-komponen yang tidak diinginkan dalam minyak selama proses pemurnian minyak yang dapat dikonsumsi. Peran utama *bleaching earth* adalah untuk meningkatkan kualitas, rasa, aroma, serta kestabilan produk akhir. Komponen utamanya adalah bentonit, yang tersusun dari kristal alumunium silikat (SiO_2 , AlO_3), air terikat logam alkali seperti kalsium oksida (CaO) dan magnesium oksida (MgO) serta logam transisi seperti besi oksida (Fe_2O_3). Kemampuan memucat dari *bleaching earth* berasal dari ion aluminium permukaan adsorben yang mampu menyerap partikel zat warna. Aktivitas dengan asam mineral seperti HCl atau H_2SO_4 meningkat kemampuan memucat karena asam tersebut bereaksi dengan komponen seperti tar, serta garam Ca dan Mg yang menyumbat pori-pori adsorben, sehingga meningkatkan luas permukaannya. Selain itu sam mineral juga dapat melarutkan AlO_3 , sehingga rasio antara SiO_2 dan Al_2O_3 meningkat dari 2-3 menjadi 5-6. Penambahan HCl pada proses purifikasi juga berfungsi untuk menurunkan kadar Fe, serta purifikasi yang dilakukan menjadi lebih maksimal dibandingkan sebelum dilakukan aktivasi dengan menggunakan HCl (Hasyim dkk., 2017).

2.10 Karakterisasi Bentonit

Analisis yang dilakukan terhadap bentonit pada penelitian ini meliputi *X-Ray Fluorescence* (XRF), untuk mengidentifikasi, mendeteksi, serta menentukan

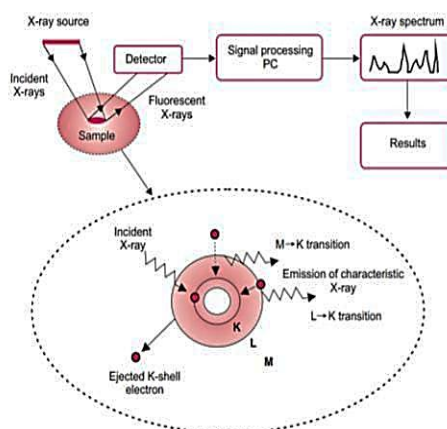
konsentrasi unsur dalam suatu material, baik berupa padatan, bubuk, maupun cairan. *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi unsur-unsur dan senyawa-senyawa yang terkandung dalam sampel. *Scanning Electron Microscopy* (SEM) digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan sampel.

2.10.1 X-Ray Fluorescence (XRF)

XRF adalah teknik analisis yang cepat, akurat, dan tidak merusak, yang digunakan untuk mengidentifikasi, mendeteksi, serta menentukan konsentrasi unsur dalam suatu material, baik berupa padatan, bubuk, maupun cairan. Beberapa keunggulan XRF antara lain persiapan sampel yang sederhana, tidak memerlukan ruang vakum seperti dalam spektroskopi energi *dispersife* serta mampu mengidentifikasi berbagai unsur sekaligus. Spektrometer XRF data beroperasi dalam dua mode utama, yaitu mode analisis material dan mode pengukuran ketebalan. Pada mode analisis material, XRF mampu menganalisis unsur mulai dari aluminium ($Z=13$) hingga uranium ($Z=92$) dengan akurasi mendeteksi komposisi material dalam rentang 0,1% hingga 100%. Sistem spektrometer XRF dilengkapi dengan empat kolimator dengan ukuran minimum 100 μm . Sedangkan pada mode pengukuran ketebalan, spektrometer XRF dapat mengukur kedalaman penetrasi yang bervariasi tergantung pada bahan yang dianalisis (Ardebili *et al.*, 2018).

Secara umum spektrometer XRF mengukur panjang gelombang setiap komponen dalam material secara individual berdasarkan emisi fluoresensi yang dihasilkan oleh sampel ketika dipaparkan sinar-X. Ketika sinar-X atau sinar gamma dengan energi tinggi mengenai sampel, elektron kulit atom akan tereksitasi. Hal ini menyebabkan atom menjadi tidak stabil hingga kekosongan elektron pada kulit dalam tersebut diisi oleh elektron dari kulit luar, yang disertai dengan pelepasan energi spesifik untuk setiap unsur. Proses ini disebut eksitasi dimana elektron mengisi posisi pada kulit atom dengan energi yang lebih rendah. Selama di eksitasi, cahaya dipancarkan dengan energi yang lebih rendah dari energi awal yang menyebabkan eksitasi. Perbedaan energi antara dua kulit atom tersebut menghasilkan sinar-X yang dipancarkan oleh atom. Spektrum sinar-X yang

dihasilkan selama proses ini menunjukkan puncak karakteristik Tingkat energi setiap spesies atom yang berfungsi sebagai sidik jari spektroskopi untuk mengidentifikasi unsur dalam sampel. Hasil analisis XRF berupa spektrum yang menunjukkan hubungan antara energi eksitasi dan intensitas sinar-X. Energi eksitasi mengidentifikasi unsur penyusun material, sementara intensitasnya menunjukkan jumlah unsur tersebut (Simon, 2018). Prinsip kerja XRF dapat dilihat pada Gambar 7.

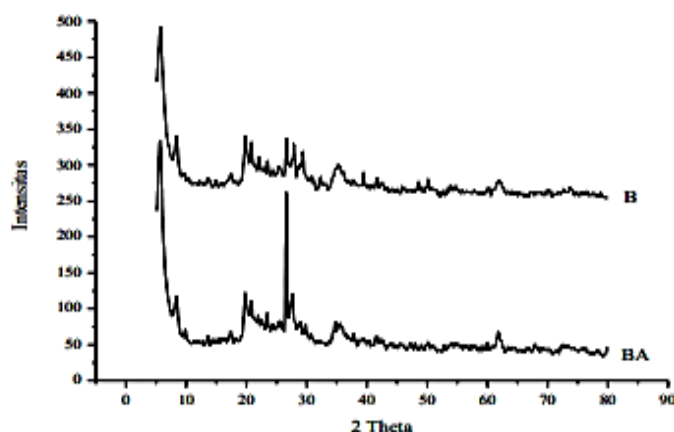


Gambar 7. Prinsip kerja spectrometer XRF (Haq dan Schela, 2008).

2.10.2 X-Ray Diffraction (XRD)

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan oleh (Darmadinata dkk., 2019), telah diperoleh hasil karakterisasi adsorben menggunakan metode *X-Ray Diffraction* (XRD) terhadap ion fosfat dalam larutan baik oleh bentonit hasil preparasi maupun bentonit yang telah diaktivasi dengan larutan asam sulfat 1,5 M. Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui sifat adsorben. Melalui difraksi sinar-X (XRD), dapat diperoleh informasi lengkap mengenai jenis mineral yang menyusun bentonit sebagai adsorben. Selain itu, teknik ini juga mampu mendeteksi perubahan jarak antar lapisan silikat (*d-spacing*) pada struktur bentonit. Pola difraksi (difraktogram) dan hasil analisis nilai *d-spacing* untuk bentonit sebelum dan sesudah aktivasi (masing-masing diberi kode B dan BA)

yang ditampilkan pada Gambar 8 dan Tabel 1. Bentonit alami menunjukkan puncak intensitas difraksi tertinggi pada sudut 2θ sekitar 5,84; 20,19; dan 22,01; yang telah dikonfirmasi dengan data d-spacing mineral berdasarkan mineral powder diffraction file. Hasil ini sejalan dengan temuan pada bentonit (B), yang memperlihatkan puncak khas di sudut 2θ : 5,74; 19,80; dan 26,61. Puncak utama terletak pada 2θ : 5,74 yang merupakan ciri khas bidang (001) dari kelompok lempung smektit. Selain itu, bahwa lempung tersebut termasuk jenis montmorillonit. Sementara itu, puncak pada 2θ 26,61 mengidentifikasi adanya kuarsa yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Difraktogram adsorben bentonit (B) dan bentonit teraktivasi (BA)

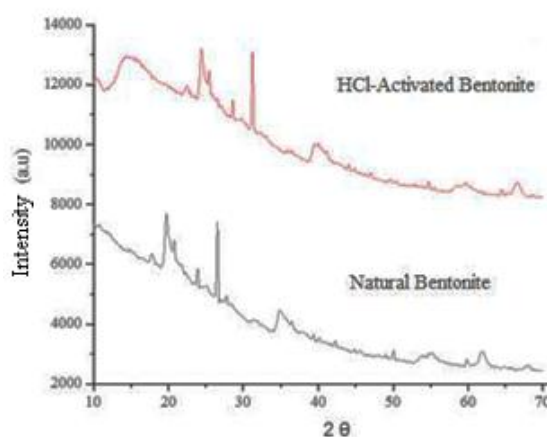
Tabel 1. Data d-spacing bentonit (B) dan bentonit teraktivasi (BA)

Adsorben	2θ	d(Å)	Karakteristik
B	5,2500	16,8311	Monmorillonit
	5,7477	15,3767	
BA	5,2058	16,9758	
	5,6563	15,6247	
B	19,8095	4,4819	SiO ₂
BA	19,7212	4,5017	
B	23,525	3,7816	
BA	23,4703	3,7904	
B	26,6122	3,3496	Kuarsa
BA	26,6027	3,3508	

Berdasarkan hasil interpretasi difraktogram sinar-X tersebut, dapat disimpulkan bahwa bentonit merupakan jenis lempung smektit dan montmorillonit sebagai komponen utamanya, namun juga terdapat kuarsa dan sejumlah kecil mineral pengotor lainnya. Setelah bentonit mengalami aktivasi menggunakan asam,

struktur montmorillonit tetap tidak mengalami perubahan signifikan yang dibuktikan dengan munculnya puncak-puncak khas montmorillonit dan keberadaan SiO_2 sebagai komponen utama rangka struktur bentonit.

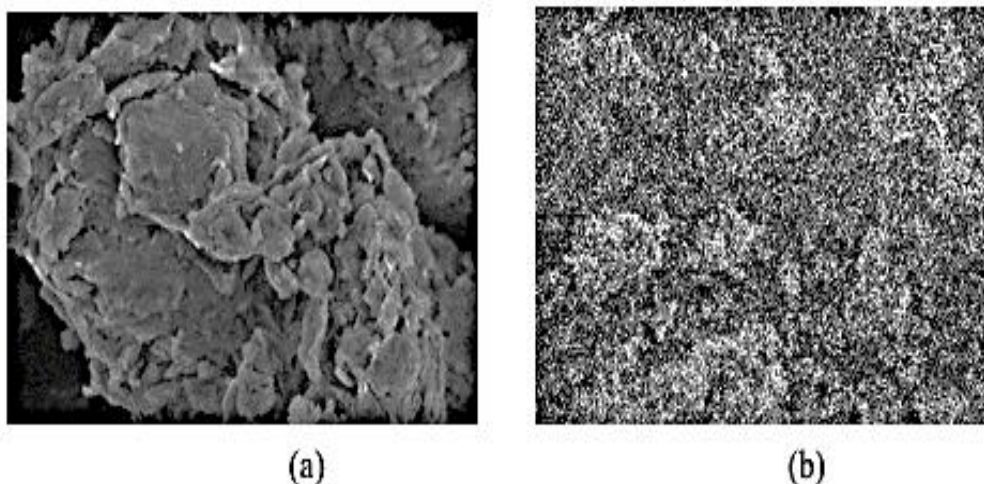
Menurut (Muslimah, dkk.,2023) telah diperoleh hasil karakterisasi bentonit yang telah teraktivasi dengan asam menggunakan analisis *X-Ray Diffraction* dilakukan untuk mengetahui pola difraksi pada sudut 2θ serta jarak antar bidang kristalnya. Hasil dari analisis ini dalam rentang sudut 2θ antara 2° hingga 65° ditampilkan pada Gambar 9. Puncak-puncak difraksi dari bentonit muncul pada sudut 2θ sebesar $19,7^\circ$, $26,5^\circ$ dan $34,91^\circ$, $54,34^\circ$ dan $61,80^\circ$, yang sesuai dengan data standar dari kartu COD nomor 96-901-0958. Data ini menunjukkan bahwa struktur mineral dari bentonit tersebut termasuk kedalam kelompok montmorillonit. Meskipun telah ditambahkan asam klorida (HCl), jarak antar bidang 001 pada difraktogram tidak mengalami perubahan. Namun pada Gambar 9(a) dan 9(b) terlihat adanya pergeseran sudut 2θ dan perubahan jarak antar bidang kristal yang mengarah ke nilai yang lebih besar (pergeseran kanan). Pergeseran ini terjadi karena adanya interaksi kimia antara asam dan bentonit, yang menyebabkan ukuran pori bentonit menjadi lebih kecil setelah proses aktivasi. Perubahan ini juga berkaitan dengan transformasi struktur internal bentonit yang disusun acak menjadi lebih teratur setelah diperlakukan dengan HCl sehingga berkontribusi pada penyusutan ukuran pori yang ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Difraktogram XRD (a) bentonit alami (b) bentonit teraktivasi HCl

2.10.3 Scanning Electron Microscope (SEM)

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan oleh (Muslimah dkk., 2023), telah diperoleh karakterisasi *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan hasil analisis morfologi terhadap bentonit alami dan bentonit yang telah diaktivasi menggunakan asam, dilakukan menggunakan SEM dengan perbesaran 500 kali, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 10. Permukaan bentonit yang telah mengalami aktivasi dengan HCl menunjukkan pembentukan agregat yang lebih besar dibandingkan dengan bentonit yang belum diaktivasi. Perlakuan dengan HCl menyebabkan permukaan bentonit menjadi lebih berpori akibat hilangnya kation dan pengotor. Aktivasi dengan HCl membuka struktur pori mengindikasikan peningkatan luas permukaan yang pada gilirannya meningkatkan kemampuan bentonit dalam menyerap logam berat yang ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Mikrograf SEM (a) bentonit alami (b) bentonit aktif HCl.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2024-Maret 2025 di Laboratorium Kimia Anorganik-Fisik Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Karakterisasi dan analisis sampel dilakukan di beberapa tempat institusi yaitu karakterisasi *X-Ray Fluorescence* (XRF) dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Negeri Padang, *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Negeri Padang (UNP), karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi Universitas Lampung, serta analisis hasil pirolisis menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) dilakukan di Laboratorium Universitas Gajah Mada.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat-alat yang digunakan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini diantaranya adalah neraca analitik, autoklaf, oven, peralatan gelas, spatula, *magnetic stirrer*, *furnace*, cawan porselen, ayakan 300 mesh, reaktor pirolisis, botol sampel, klem, statif, corong pisah, corong kaca, batang pengaduk, mortar dan alu. Karakterisasi dilakukan menggunakan instrumen *X-Ray Fluorescence* (XRF) PANalytical Epsilon 3, *X-Ray Diffraction* (XRD) XPERT PRO PANalytical PW3040/60, dan *Scanning*

Electron Microscopy (SEM) ZEISS EVO MA 10. Analisis produk pirolisis menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) QP2010S SHIMADZU tipe X'Pert Pro 3040/60 dan *Gas Chromatography-Mass Spectroscopy* (GC-MS) tipe QP2010S SHIMADZ.

3.2.2 Bahan-bahan yang digunakan

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

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Analisis Bentonit Sebelum Purifikasi

Pada penelitian ini, sintesis zeolit-X dilakukan dengan menggunakan bentonit sebagai bahan utamanya Bentonit. Bentonit dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk menentukan komposisi unsur-unsur yang terkandung dalam bentonit yang dioperasikan dengan tegangan 30 kV, dan arus 300 μ A, sehingga dapat memberikan informasi mengenai kandungan oksidasi logam atau unsur lain. Bentonit yang digunakan berupa serbuk halus berwarna kekuningan.

3.3.2 Purifikasi Bentonit

Bentonit yang telah dikarakterisasi dengan menggunakan XRF selanjutnya dilakukan purifikasi atau pemurnian terlebih dahulu, untuk menghilangkan zat pengotor seperti logam berat salah satunya adalah besi. Purifikasi dilakukan dengan cara mencampurkan bentonit dengan HCl 1M dengan perbandingan 1:5, lalu diaduk campuran tersebut dengan menggunakan stirrer untuk melarutkan

logam secara perlahan selama 24 jam. Proses selanjutnya yaitu menyaring campuran dengan kertas saring, lalu mencucinya dengan akuades hingga mencapai pH netral untuk menghilangkan sisa-sisa asam dalam campuran. Kemudian bentonit dikeringkan pada suhu 100°C selama 8 jam, kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengukur kandungan yang terkandung pada bentonit.

3.3.3 Modifikasi Bentonit Menjadi Zeolit-X

Pembuatan katalis zeolit-X diawali dengan menyiapkan 100 mL larutan NaOH (pa) dengan melarutkan 13,78 g, NaOH dengan 100 mL aquades. Dimasukan larutan NaOH ke gelas beaker kemudian di *stirrer* tanpa pemanasan. Kemudian ditambahkan alumunium foil yang sudah digunting kecil sebanyak 6,1375 g secara perlahan hingga seluruh alumunium foil larut. Setelah seluruh alumunium foil larut, ditambahkan 50 g bentonit yang sudah diayak. Jika bentonit sudah mulai tidak tercampur, ditambahkan 20 mL akuades. Kemudian dimasukan kedalam autoklaf dan di-aging selama 24 jam. Selanjutnya dilakukan kristalisasi dalam oven selama 72 jam dengan suhu 100°C. Diperoleh sampel zeolit-X yang kemudian dicuci dengan akuades setelah didinginkan hingga pH Menjadi 7-8. Dikeringkan Kembali dengan suhu 100°C selama 23 jam. Setelah itu dilakukan penghalusan dengan mortar dan diayak dengan saringan mesh ukuran 300 nm. Dilakukan kalsinasi pada suhu 600°C selama 8 jam. Kemudian diperoleh zeolit-X. Untuk membuktikan hasil yang diperoleh itu sesuai dengan yang diinginkan, maka zeolit-X. Perlu dilakukan karakterisasi dengan SEM dan XRD. Kemudian dilakukan prosedur pirolisis.

3.3.4 Karakterisasi Zeolit X Hasil Modifikasi

Karakterisasi zeolit-X dilakukan untuk memastikan keberhasilan modifikasi bentonit dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk memberikan

informasi mengenai struktur kristalografi sampel zeolit-X dan analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan sampel zeolit-X.

3.3.4.1 X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi dengan XRD dilakukan untuk menganalisis struktur kristalografi zeolit-X, 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 UPT Laboratorium Terpadu Universitas Negeri Padang (UNP) Dengan tipe XRD yang digunakan yaitu XPERT PRO PW 3040/60 Tahun 2013 produksi Belanda. Pola XRD akan dihasilkan pada $\lambda = 0,154 \text{ \AA}$, dengan sumber radiasi anoda tembaga (Cu), tegangan 40 kV dan arus 30 Ma. Pengukuran dilakukan dengan langkah scan 0,02 derajat pada rentang sudut difraksi $10\text{-}100^\circ$.

3.3.4.2 Karakterisasi *Scanning Electron Microscope* SEM

Karakterisasi menggunakan SEM bertujuan untuk memberikan informasi tentang morfologi permukaan sampel. Pada penelitian ini karakterisasi SEM dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (LTSIT), dengan mengikuti prosedur yang diterapkan oleh Institusi tersebut. Alat SEM yang digunakan yaitu ZEISS EVO MA 10 yang dioperasikan pada 8 Kv dengan tegangan percepatan elektron 20 kv. Katalis zeolit-X hasil sintesis dipindai pada perbesaran 1.000, 5.000, 10.000, dan 15.000x untuk mendapatkan tampilan permukaan yang lebih baik.

3.3.5 Uji Katalitik Zeolit-X Hasil Modifikasi Bentonit pada Pirolisis Minyak Kelapa Sawit

Pada penelitian ini pengujian aktivitas zeolit-X menggunakan perangkat pirolisis dalam skala laboratorium yang terdiri dari reaktor pemanas yang dihubungkan dengan dengan kondensor dan wadah untuk menampung produk hasil pirolisis. Dalam pirolisis, ini diawali dengan memanaskan minyak kelapa sawit dengan tujuannya untuk mengurangi kadar air dan memastikan minyak kelapa sawit dalam keadaan stabil sebelum proses pirolisis berlangsung. Pemanasan sebelum pirolisis menjadi fokus kajian pada penelitian ini dengan variasi waktu pemanasan minyak kelapa sawit yaitu 10, 20, 30, 40 menit, dan tanpa pemanasan.

Setelah pemanasan awal sebanyak 300 mL minyak kelapa sawit dicampurkan dengan 10gram katalis zeolit-X lalu dimasukkan kedalam reaktor dan *heat exchanger* sebanyak 10 gram dimasukkan ke dalam reaktor. Reaktor dipanaskan dan dibiarkan berlangsung selama 1 jam. Uap yang terbentuk dialirkan dari reaktor kemudian didinginkan di kondensor untuk menghasilkan destilat berupa BCO. Produk cair yang dihasilkan dipindahkan kedalam corong pisah dan dibiarkan terpisah antara fase air dan fase organik (BCO)

3.3.6. Analisis Produk Hasil Pirolisis dengan *Gas Chromatography – Mass Spectroscopy* (GC-MS)

Karakterisasi menggunakan GC-MS bertujuan untuk mengidentifikasi senyawa kimia yang terdapat dalam hasil pirolisis, terutama biohidrokarbon. Pada penelitian ini, karakterisasi sampel menggunakan GC-MS dilakukan di Laboratorium Universitas Gajah Mada dengan tipe alat yaitu QP2010S SHIMADZU untuk mengidentifikasi tipe kolom Rtx 5 (panjang 30 m; ID 0,25 mm; ketebalan film: 0,25 m; gas pembawa: Helium; EI 70 Ex). Suhu injektor 310 °C dengan mode split, suhu detektor 250 °C, suhu kolom oven 40 °C, laju alir pada tekanan 13 kPa dan total aliran 80 mL/menit.

V. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Purifikasi bentonit berhasil dilakukan dengan menggunakan HCl 1M, yang ditandai menurunnya persentase Fe.
2. Sintesis zeolit-X yang dilakukan dengan metode hidrotermal berhasil dibuktikan dengan hasil sintesis terbaik ditunjukkan pada variasi waktu 72 jam, yang dibuktikan dengan hasil analisis XRD dan SEM.
3. Karakterisasi XRD menunjukkan bahwa zeolit-X hasil modifikasi dengan waktu kristalisasi 72 jam dengan suhu kalsinasi 600°C merupakan zeolit hasil terbaik yang dibuktikan dengan memiliki kemiripan yang tinggi pada posisi 2θ dengan perbandingan menggunakan standar IZA zeolit-X dan dibuktikan dengan hasil analisis SEM.
4. Pra pemanasan minyak kelapa sawit selama 10 menit menjadi waktu yang optimal untuk proses pirolisis minyak kelapa sawit dibandingkan tanpa pra-perlakuan pemanasan.
5. Analisis BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit dengan pra perlakuan pemanasan 10 menit menghasilkan kandungan hidrokarbon sebesar 78,72%, dengan asam 16,62%, alkohol 4,66 % dan keton 0%.

5.2 Saran

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

1. Mengkaji pengaruh suhu kalsinasi selain 600 °C pada proses sintesis zeolit-X.
2. BCO yang dihasilkan mengandung senyawa volatil yang terlalu tinggi, sehingga disarankan suhu pemanasan ketika pirolisis ditambah agar lebih efektif untuk meningkatkan kandungan hidrokarbon.

DAFTAR PUSTAKA

- Al kusuma, M.Y., Hadiyanto dan Hermawan. 2016. Pengembangan Potensi Energi Alternatif Dengan Pemanfaatan Limbah Cair Kelapa Sawit Sebagai Sumber Energi Baru Terbarukan Di Kabupaten Kotawaringin Timur. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 2(14): 96-102.
- Alaswad, A., Dassisti, M., Prescott, T., and Olabi, A.G. 2015. Technologies and developments of third generation biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 51: 1446-1460.
- Ardebili, H., Zhang, J., and Pecht, M.G. 2018. Defect and failure analysis techniques for encapsulated microelectronics. In *Encapsulation Technologies for Electronic Applications*. William Andrew.
- Aziz, I., Saridewi, N., Febriyani, F., Adhani, L. 2023. Deoksigenasi Katalitik Metil Ester Asam Lemak Menjadi Biohidrokarbon menggunakan Katalis Cr₂O₇/Zeolit. *Jurnal Penelitian Kimia*. 2(19): 170-176.
- Nur Azizah. 2015. Analisis Ekspor Crude Palm Oil (CPO) Indonesia Di Uni Eropa Tahun 2000-2011. *Economics Development Analysis Journal*. 4(3): 2252-6765.
- Baloch, H. A., Nizamuddin, S., Siddiqui, M. T. H., Riaz S. Konstas, K., Mubarak, N. M., Srinivasan, M. P., and Griffin, G. J. 2021. Catalysis upgradation of bio-oil over metal supported activated carbon catalyst in sub-supercritical ethanol. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9(2): 105959.
- Bari, S, Lim, H. T, dan Yu, W. C. 2002. Effect Of Preheating of *Crude Palm Oil* (CPO) on Injection System, Performance and Emission of a Diesel Engine. *Renewable Energi*. 27: 339-351.

- Beld, B. van de, Holle, E., and Florijn, J. 2018. The use of a fast pyrolysis oil Ethanol blend in diesel engines for chip applications. *Biomass and Bioenergy*. 110: 114-122.
- Berghuis, N. T., Mutaqqin, Hidayat, F. I., Sugianto, 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 Komersial. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*. 18(2). 174–182.
- Bridgwater, A. 2013. Fast pyrolysis of biomass for the production of liquids. In Biomass Combustion Science, Technology and Engineering. *Woodhead Publishing*. 130-171.
- Broumand, M., Khan, M. S., Yun, S., Hong, Z., and Thomson, M. J. 2021. The effect of thermo-catalytic reforming of a pyrolysis bio-oil on its performance in a micro-gas turbine burner. *Applications in Energy and Combustion Science*. 5: 100017.
- Calabuig, E., and Marcilla, A. 2021. Effect of a mesoporous catalyst on the flash pyrolysis of tobacco. *Thermochimica Acta*. 705: 179032.
- Dhyani, V., and Bhaskar, T. 2019. Pyrolysis of Biomass. In Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels. *Academic Press*. Oxford. 217-244.
- Darmadhinata, M., Jumaeri, dan Triastuti. S. 2019. Pemanfaatan Bentonit Teraktivasi Asam Sulfat Sebagai Adsorben Anion Fosfat dalam Air. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 8(1).
- Elnajjar, E., Syam, M. M., and Al-Omari, S. 2021. Experimental Investigations of bio-syngas production using microwave pyrolysis of UAE'S palm date seed pits. *Fuel*. 303: 121348.
- Febriawan. B. F., Supartono, dan Kusumo. E. 2014. Reaksi Transesterifikasi Minyak Biji Karet dan Metanol Terkatalis Bentonit Alam Teraktivasi Asam. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 3(1): 2252-6951.
- Febriyanti, F., Fadila, N., Sanjaya, S. A., Bindar, Y., dan Irawan, A. 2019. Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Menjadi Bio-Char, Bio-Oil dan Gas Dengan Metode Pirolisis. *Jurnal Chemurgy*. 2(4).
- Garg, R., Anand, N., and Kumar, D. 2016. Pyrolysis of babool seeds (*Acacia nilotica*) in a fixed bed reactor and bio-oil characterization. *Renewable Energy*. 96:167-171.

- Hasyim, H. U dan Gema Fitriyanto. 2016. Pengaruh Konsentrasi HCl dan Massa Adsorbent Dalam Pengolahan Limbah Pelumas Bekas Dengan Kajian Keseimbangan Adsorpsi Bentonit Terhadap Logam Fe. *Jurnal Integrasi Proses*, 4 (16): 191-196.
- Haq, G. dan Schwela, D., 2009. *Foundation Course on Air Quality Management in Asia*, SEI York. Sweden. Retrieve. 1-19.
- Hindryawati, N., Maniam, G. P., Karim, M. R., and Chong, K. F. 2014. Transesterification of Used Cooking Oil Over Alkali Metal (Li, Na, K) Supported Rice Husk Silica as Potential Solid Base Catalyst. *Engineering Science and Technology, an International Journal*.17(2): 95–103.
- Joshi, S, and Renade, V. 2016. Industrial Catalytic Process for Fine and Specialty Chemicals. *ElsevierInc*.
- Kan, T., Strezov, V., Evans, T., Kumar, R., He, J., Zhou, X., Ren, J., and Lu, Q. 2021. Catalytic pyrolysis of biomass impregnated with elements from steelmaking slag leaching and simultaneous fabrication of phosphorus adsorbent. *Journal of Cleaner Production*. 328: 129490.
- Imam K. 2015. Pemanfaatan Energi Alternatif Sebagai Energi Terbarukan Untuk Mendukung Substitusi BBM. *Jurnal IPTEK*. 2(19): 1411-7010.
- Kuppusamy, S., Maddela, N. R., Megharaj, M., and Venkateswarlu, K. 2019. *Total Petroleum Hydrocarbons: Environmental Fate, Toxicity, and Remediation*. Springer Nature Switzerland AG. Switzerland.
- Labibah, C. N. A., Chairunisa, N. D., Nurohman, P.T., Radianto, O. D, Yuliono, Q. K. G. 2024. Upaya Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit. *Jurnal Sains Student Research*. 2(2):148-153.
- Li, L., Rowbotham, J. S., Greenwell, H. C., dan Dyer, P. W. 2013. An introduction to pyrolysis and catalytic pyrolysis: versatile techniques for biomass conversion. *Elsevier*. 173-208.
- Lin, Y., Cho, J., Tompsett, G. A., Westmoreland, P. R., and Huber, G. W. 2009. Kinetics and Mechanism of Cellulose Pyrolysis. *The Journal of Physical Chemistry*. 113(46): 20097-20107.
- Lin, X., Zhang, D., Ren, X., Zhang, Q., Cai, H., Yi, W., and Lei, H. 2020. Catalytic co-pyrolysis of waste corn stover and high-density polyethylene for hydrocarbon production: The coupling effect of potassium and HZSM-5

zeolit. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*.150:104895.

- Makertihartha, I. G. B. N., Kadja, G. T. M., Gunawan, M. L., Mukto, R. R., and Subagjo. 2020. Exceptional Aromatic Distribution in the Conversion of Palm-Oil to Biohydrocarbon Using Zeolite-Based Catalyst. *Journal of Engineering and Technological Science*. 52(4): 584–597.
- Martin, J. A., and Boateng, A. A. 2014. Combustion performance of pyrolysis oil/ethanol blends in a residential-scale oil-fired boiler. *Fuel*.133:34-44.
- Maulina, S., Putri, S. F. 2017. Pengaruh Suhu, Waktu, dan Kadar Air Bahan Baku Terhadap Pirolisis Serbuk Pelepah Kelapa Sawit. *Jurnal Teknik Kimia USU*. 6(2): 35-40.
- Mohabeer, C., Reyes, L., Abdelouahed, L., Marcotte, S, Buvat, J. C., Tidahy L., Abi-Aad, E., and Taouk, B. 2019. Production of liquid bio-fuel from catalytic de-oxygenation: Pyrolysis of beech wood and flax shives. *Journal of Fuel Chemistry and Tecnology*. 47(2): 153-166.
- Mulyati, A. T, Pujiono, E. F, dan Prima A. L. 2015. Pengaruh Lama Pemanasan Terhadap Kualitas Minyak Goreng Kemasan Kelapa Sawit. *Jurnal Wiyata*, 2 (2): 2355-6498.
- Muslimah, Wahyuningsih. P., dan Yusnawati. 2023. Effectiveness Of Hydrochloric Acid Activated Bentonit in Local Salt Purification. *Journal of Islamic Science and Technology*.9(1): 71-80.
- Ningsih, N. Y., dan Yulizar, Y. 2014. Modifikasi bentonit terpolimer Al dengan polianilin sebagai reduktor ion Cr (VI). *Journal of The Indonesian Society of Integrated Chemistry*. 6(2): 7-19.
- Nura, A. S. 2015. Sintesis dan Karakterisasi Zeolit X Dari Abu Vulkanik Gunung Kelud Dengan Variasi Suhu Hidrotermal Menggunakan Variasi Suhu Hidrotermal Menggunakan Metode Sol Gel. Universitas Islam Negri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.
- Pandiangan, K. D., Arief, S., Jamarun, N., and Simanjuntak, W. 2017. Synthesis of zeolit-X from rice husk silica and aluminum metal as a catalyst for transesterification of palm oil. *Journal of Materials and Environmental Science*. 8(5): 1797-1802.
- Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Jamarun, N., and Arief, S. 2021. The Use of MgO/SiO₂ as Catalyst for Transesterification of Rubber Seed Oil with Different Alcohols. *Journal of Physics: Conference Series*. 1751(1): 1-7.

- 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.
- Peng, W., Zhang, H., Lü, F., Shao, L., and He, P. 2022. From food waste and its digestate to nitrogen self-doped char and methane-rich syngas: Evolution of pyrolysis products during autogenic pressure carbonization. *Journal of Hazardous Materials*. 424: 127249.
- Petrov, I., Michalev, T. 2012. Synthesis of Zeolit A: a Review. *Proceedings of the Scientific Papers of the University of Russia*. 51: 30–35.
- Pradana.,A.M. 2020. Analisis Perubahan Sikap Uni Eropa Terhadap Impor Minyak Kelapa Sawit Indonesia. *Journal of International Relations*, 4(6): 525-535.
- Ramadhas, S.A. 2005. *Alternatif Fuels for Transportation*. London New York. CRC Press.
- Ramalingam, S., Ezhumalai, M., and Govindasamy, M. 2019. Syngas: Derived from biodiesel and its influence on Cengine. *Energy*. 189: 116189.
- Rekia Enrik. 2024. Konversi Metil Ester dari Minyak Biji Karet (*Hervea brasiliensis*) Menggunakan Katalis Zeolit-X Dengan Reaktor Autoclave Menjadi Senyawa Nitrogen dan Uji Aktivitas Sebagai Inhibitor Korosi Baja Lunak. Universitas Lampung.
- Simanjuntak, W., Aulia, S., Pandiangan, D. K., dan Rilyanti, M. 2019. Transformation Of Lampung Natural Zeolit into Zeolit-A by Alumunium Addition and Application as Catays for Biomassa Pyrolisis. *Indonesia Jurnal of Energi*. 2(7): 124-140.
- Solikhah, D.M., Barus, R.B., Kismanto, A., Prawitasari, A., Prismantoko, A. 2022. Perancangan Reaktor Untuk Produksi Biodisel Generasi 2 dari Biomassa Sawit. *Jurnal Teknologi*. 14(2): 197-212.
- Srilai, S., Tanwongwan, W., Onpecth, K., Wongkitikun, T., Panpiemrasda, K., Panomsuwan, G., Eiad-ua, A. 2020. Synthesis of Zeolit X from Bentonit via Hydrothermal Method. *Materials Science Forum*. 990: 144–148.
- Syani, F. 2014. Sintesis Zeolit Berbasis Sekam Padi dengan Metode Elektrokimia sebagai Katalis Transesterifikasi Minyak Kelapa. Universitas Lampung.

- Tanjaya, A. 2006. Aktivasi Bentonit Alam Pacitan sebagai Bahan Penjerap pada Proses Pemurnian Minyak Sawit. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*. 5(1): 429-434.
- 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(11): 1-23.
- Vaid, S., Sharma, S., Dutt, H. C., Mahajan, R., and Bajaj, B. K. 2021. One pot bioprocess for conversion of *Saccharum spontaneum* biomass to ethanol-biofuel. *Energy Conversion and Management*. 250: 114880.
- Varma, A. K., and Mondal, P. 2017. Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization of products. *Industrial Crops and Products*. 95:704-717.
- Wardani, K. R. A. 2016. Influence Of Hydrothermal Temperature and Time At Synthesis of Zeolite-X Supported on Glasswool Fiber for CO₂ Adsorption-Desorption. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wijaya, A. 2021. Analisis Dampak Defisit Bahan Bakar Minyak Terhadap Kinerja Sektor Transportas di Indonesia. *Jurnal Ekonomi Bisnis dan Manajemen*. 23(1): 95-106.
- 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: Asustainable way to generate energy from waste. In Pyrolysis edited by Samer, M. InTech. Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste.