

**PENGARUH PRA-PERLAKUAN PEMANASAN TERHADAP
KARAKTERISTIK PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI
BIO CRUDE OIL (BCO) DENGAN KATALIS ZEOLIT-A HASIL
MODIFIKASI BENTONIT**

(Skripsi)

Oleh

**ADRYAN DAFFA DZULFIQAR
2117011075**



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

ABSTRAK

PENGARUH PRA-PERLAKUAN PEMANASAN TERHADAP KARAKTERISTIK PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI *BIO CRUDE OIL* (BCO) DENGAN KATALIS ZEOLIT-A HASIL MODIFIKASI BENTONIT

Oleh

ADRYAN DAFFA DZULFIQAR

Minyak kelapa sawit merupakan salah satu sumber biomassa yang berpotensi untuk dikonversi menjadi bahan bakar cair terbarukan melalui proses pirolisis. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pra-perlakuan pemanasan terhadap karakteristik *Bio Crude Oil* (BCO) yang dihasilkan dari pirolisis minyak kelapa sawit, dengan menggunakan katalis zeolit-A yang disintesis dari bentonit hasil purifikasi.

Bentonit dipurifikasi menggunakan larutan HCl 1 M, kemudian bentonit alami dan hasil purifikasi dikarakterisasi menggunakan *X-ray Fluorescence* (XRF), *X-ray Diffraction* (XRD), dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengidentifikasi komposisi unsur, struktur kristal, dan morfologi permukaannya. Bentonit kemudian dimodifikasi menjadi zeolit-A melalui metode hidrotermal dengan waktu kristalisasi 72, 96, dan 120 jam, kemudian dikarakterisasi kembali menggunakan XRD dan SEM. Proses pirolisis dilakukan pada suhu konstan dengan variasi waktu pemanasan awal minyak kelapa sawit selama 0, 10, 20, 30, dan 40 menit. Produk BCO yang dihasilkan dianalisis menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) untuk mengidentifikasi senyawa penyusunnya.

Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa proses purifikasi berhasil menurunkan kandungan logam Fe dalam bentonit. Zeolit-A hasil sintesis memiliki morfologi kubus dan struktur kristal yang sesuai. Pirolisis minyak kelapa sawit dengan katalis zeolit-A dan perlakuan pemanasan awal selama 20 menit menghasilkan BCO dengan kandungan hidrokarbon yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pra-perlakuan pemanasan dan penggunaan katalis zeolit-A dari bentonit memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kualitas BCO.

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

ABSTRACT

EFFECT OF PRE-HEATING TREATMENT ON THE PYROLYSIS CHARACTERISTICS OF PALM OIL INTO BIO CRUDE OIL (BCO) WITH BENTONITE MODIFIED ZEOLITE-A CATALYST

By

ADRYAN DAFFA DZULFIQAR

Palm oil is one of the biomass sources with potential to be converted into renewable liquid fuel through the pyrolysis process. This study aims to investigate the effect of pre-heating treatment on the characteristics of Bio Crude Oil (BCO) produced from palm oil pyrolysis, using zeolite-A catalyst synthesized from purified bentonite.

Bentonite was purified using 1 M HCl solution. Both natural and purified bentonite were characterized using X-ray Fluorescence (XRF), X-ray Diffraction (XRD), and Scanning Electron Microscopy (SEM) to identify elemental composition, crystal structure, and surface morphology. The bentonite was then modified into zeolite-A via the hydrothermal method with crystallization times of 72, 96, and 120 hours, and subsequently recharacterized using XRD and SEM. The pyrolysis process was carried out at a constant temperature with variations in the pre-heating time of palm oil for 0, 10, 20, 30, and 40 minutes. The resulting BCO product was analyzed using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) to identify its constituent compounds.

Characterization results showed that the purification process successfully reduced the Fe metal content in bentonite. The synthesized zeolite-A exhibited cubic morphology and the expected crystal structure. Pyrolysis of palm oil using zeolite-A catalyst and a pre-heating treatment of 20 minutes produced BCO with a higher hydrocarbon content. This indicates that pre-heating treatment and the use of zeolite-A catalyst derived from bentonite significantly influence the improvement of BCO quality.

Keywords : bentonite, zeolite-A, palm oil, pyrolysis, BCO

**PENGARUH PRA-PERLAKUAN PEMANASAN TERHADAP
KARAKTERISTIK PIROLISIS MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI
BIO CRUDE OIL (BCO) DENGAN KATALIS ZEOLIT-A HASIL
MODIFIKASI BENTONIT**

Oleh

ADRYAN DAFFA DZULFIQAR

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 : PENGARUH PRA-PERLAKUAN PEMANASAN
TERHADAP KARAKTERISTIK PIROLISIS MINYAK
KELAPA SAWIT MENJADI *BIO CRUDE OIL* (BCO)
DENGAN KATALIS ZEOLIT-A HASIL MODIFIKASI
BENTONIT

Nama : *Adryan Daffa Dzulfiqar*

NPM : 2117011075

Program Studi : Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



1. Komisi Pembimbing

[Signature]
Prof. Dr. Kamisan D. Pandiangan, M.Si.
NIP. 197212051997032001

[Signature]
Prof. Rudy T.M. Situmeang, M.Sc., Ph.D.
NIP. 196006161988111001

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung

[Signature]
Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si
NIP. 19720530200003200

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

Sekretaris : Prof. Rudy T.M. Situmeang, M.Sc., Ph.D.

Penguji
Bukan Pembimbing : Dr. Dian Herasari, M.Si

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Penegtahan Alam



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

NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 9 Juli 2025

**LEMBAR PERNYATAAN
KEASLIAN SKRIPSI**

Yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama	: Adryan Daffa Dzulfiqar
Nomor Pokok Mahasiswa	: 2117011075
Jurusan	: Kimia
Fakultas	: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi	: Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul **“Pengaruh Pra-Perlakuan Pemanasan Terhadap Karakteristik Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Menjadi Bio Crude Oil (BCO) Dengan Katalis Zeolit-A Hasil Modifikasi Bentonit”** adalah benar karya saya sendiri, baik gagasan, hasil, dan analisisnya. Selanjutnya saya juga tidak keberatan jika sebagian atau seluruhnya data di dalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi, sepanjang nama saya disebutkan dan terdapat kesepakatan sebelum dilakukan publikasi.

Bandar Lampung, 09 Juli 2025
Yang menyatakan,



Adryan Daffa Dzulfiqar
NPM. 2117011075

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Adryan Daffa Dzulfiqar, lahir pada tanggal 05 Oktober 2002 di Rejosari, Natar, Lampung Selatan. Penulis merupakan anak ketiga dari 3 bersaudara dari pasangan Bapak Edy Supriadi dan Ibu Juni Astuti.

Penulis menyelesaikan pendidikan di TK Tunas Melati pada tahun 2009 dan dilanjutkan pendidikan dasar di SDN 4

Rejosari hingga tahun 2015. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Terbanggi Besar hingga lulus pada tahun 2018. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SMAN 1 Natar dan lulus tahun 2021. Pada tahun yang sama, penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai organisasi, di antaranya sebagai kader muda dan anggota inti Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) pada tahun 2021 dan 2022. Pada tahun 2022, penulis menjabat sebagai anggota Biro Penerbitan (BP) HIMAKI. Penulis juga aktif dalam Unit Kegiatan Mahasiswa Fakultas (UKMF) menjabat sebagai anggota Bidang Informasi dan Komunikasi di Rohasi Islam (Rois) serta anggota Bidang Multimedia di Pers Natural. Pada tahun 2023 menjabat sebagai ketua di Bidang Media Centre Rois dan anggota Biro Usaha dan Periklanan di Pers Natural.

Penulis dikenal aktif dan bertanggung jawab dalam setiap kegiatan organisasi yang diikuti, serta tetap menunjukkan komitmen tinggi dalam bidang akademik.

Penulis mengikuti program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) Riset di Universitas Lampung pada tahun 2023 dan 2024.

Setelah mengikuti program MBKM Riset, penulis melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di CV Wira Bhumi Segara, Laboratorium Polimer dan Anorganik/Fisik dari bulan Januari hingga Maret 2024. Selain itu, penulis juga pernah menjadi Asisten Praktikum Kimia Dasar untuk mahasiswa angkatan 2024 di Jurusan Kimia dan Asisten Praktikum Kimia Dasar 2 untuk mahasiswa angkatan 2024 di Prodi Geologi, Jurusan Geofisika.

Penulis menyelesaikan penelitian di Laboratorium Polimer dan Anorganik/Fisik dengan judul *"Pengaruh Pra-Perlakuan Pemanasan Terhadap Karakteristik Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Menjadi Bio Crude Oil (BCO) Dengan Katalis Zeolit-A Hasil Modifikasi Bentonit"* pada tahun 2025

MOTTO

"Dia memberikan hikmah kepada siapa yang Dia kehendaki. Dan barang siapa diberi hikmah, sesungguhnya dia telah diberi kebaikan yang banyak"

(QS. Al-Baqarah: 269)

"Jadikanlah sabar dan shalat sebagai penolongmu. Sesungguhnya Allah beserta orang-orang yang sabar."

(QS. Al-Baqarah: 153)

"Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal ia baik bagimu. Dan boleh jadi kamu menyukai sesuatu, padahal ia buruk bagimu. Allah mengetahui, sedang kamu tidak mengetahui."

(QS. Al-Baqarah: 216)

"Sesungguhnya rahmat Allah sangat dekat kepada orang-orang yang berbuat baik."

(QS. Al-A'raf: 56)

"Seperti harapan yang tak selalu tampak namun diam-diam bertahan, kuantum mengajarkan bahwa dalam setiap kekacauan, tersembunyi harmoni yang lembut — tak terucap dalam logika, tapi hidup dalam getar sunyi antara keberadaan dan kemungkinan."

(Adryan Daffa Dzulfiqar)



Segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat, kasih sayang, dan hidayah-Nya yang tiada henti, sehingga penulis dapat menyelesaikan pendidikan di jenjang perguruan tinggi ini. Dengan penuh rasa syukur dan cinta, penulis mempersembahkan karya ini kepada:

Kedua Orang Tua Tercinta,

Ayahanda Edy Supriadi dan Ibunda Juni Astuti yang telah membimbingku dari kecil hingga menyelesaikan studi sarjana ini dan telah menjadi cahaya dalam setiap langkah, mencintai tanpa syarat, serta mendoakan tanpa lelah.

Keluarga Tersayang,

Merza Pratama Putri, Arri Yudha Afriza , Faradhika Nitasya, Budi Santoso, dan Ashaquille Elcielo Dhamaza yang selalu mendoakan dan memberiku semangat.

Pembimbing Penelitianku, Prof. Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, M.Si. dan Prof Rudy T. M. Situmeang, M.Sc., Ph.D. 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 dan semua orang yang hadir dalam perjalanan ini, yang telah menemani dalam suka dan duka, serta memberi kehangatan di saat sedih.

Almamater Tercinta

Universitas Lampung

SANWACANA

Alhamdulillahirabbil'alamin, Segala puji bagi Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Pra-Perlakuan Pemanasan Terhadap Karakteristik Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Menjadi Bio Crude Oil (BCO) Dengan Katalis Zeolit-A Hasil Modifikasi Bentonit”**. Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada baginda Rasulullah Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga dan para sahabat serta umatnya di akhir zaman. Semoga di yaumul akhir kelak mendapatkan syafa'atnya. *Aamiin*.

Penulis menyadari laporan ini dapat tersusun dan diselesaikan dengan adanya bantuan, motivasi, dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini sebagai wujud rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya kepada kita semua.
2. Prof. Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, M.Si. selaku Pembimbing I sekaligus orang tua kedua bagi penulis atas segala bimbingan, nasehat, serta saran yang telah diberikan hingga selesainya penelitian ini.
3. Prof Rudy T. M. Situmeang, M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan masukan dan saran selama penulis mengerjakan penelitian ini.
4. 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.

5. Ibu Dr. Dian Herasari, M.Si. selaku dosen pembahas II yang telah bersedia menggantikan dosen pembahas I untuk memberikan kritik dan saran kepada penulis.
6. Prof. Wasinton Simanjuntak, M.Sc., Ph.D. dan Prof. Dr. Dra. Ilim, M.S. yang secara tidak langsung telah memberikan arahan dan pengetahuan baru selama penelitian ini.
7. Prof. Ir. Suharso, Ph.D selaku dosen pembimbing akademik atas segala saran yang telah diberikan.
8. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan FMIPA Unila beserta jajaran FMIPA lainnya.
9. Bapak Edy Supriadi dan Ibu Juni Astuti selaku kedua orang tua atas kasih sayang yang telah diberikan selama ini serta segala doa nasihat, motivasi dan dukungan finansial, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Semoga Allah SWT membalas atas segala yang telah diberikan dengan Jannah-Nya, Aamiin.
10. Kakakku tercinta Merza Pratama Putri dan Faradhika Nitasya yang tidak hanya menjadi saudara, tetapi juga sahabat, motivator, dan tempatku berbagi dalam suka maupun duka. Terima kasih atas semangat yang telah diberikan, perhatian yang tak pernah lelah, serta dukungan yang selalu hadir bahkan tanpa diminta.
11. Kakak ipar Arri Yudha Afriza dan Budi Santoso yang selalu memberikan dukungan penulis dalam keadaan yang kurang baik
12. Keponakan tersayang Ashaquille Elcielo Dhamaza yang telah menjadi penghibur setiap tingkah laku yang ditunjukkan di saat penulis merasa lelah maupun jenuh.
13. Rafif Maulana, sahabat terbaik sekaligus adik tersayang yang selalu hadir dalam setiap fase perjalananku. Terima kasih atas kebersamaan, semangat, serta waktu yang telah diberikan selama proses ini. Terima kasih atas pengalaman hidup untuk menjadi adik penulis yang penuh dengan cerita baik maupun buruk. Terima kasih telah hadir dengan penuh kasih sayang.
14. Sahabat terbaik Harry Firmanda yang selalu hadir disaat penulis sedang penuh dengan keluh kesah. Terima kasih atas kehadiran dan bantuan yang

telah diberikan selama ini. Terima kasih juga telah menjadi pendengar yang baik, tempat berbagi cerita dan keluh kesah, serta selalu memberikan nasihat dan dukungan yang tulus.

15. Tim Katalis *et al.* 2021 Hanna Luthfia Maghfiroh, Erwanda Lili Utari, dan Nurul Natasha Berliani yang selalu kebersamai penelitian penulis hingga akhir dan menjadi saksi perjalanan penelitian penulis.
16. Sahabat KIW 21 Aditya Anugrah Sahyani, Azizah Rosihana Tiara Putri, Bella Agustin, Melissaputri, Khairi Hayad Febriana, Desrita Pratiwi, Tyas Nurfitria, dan Ayu Fortune Lisa Hutabarat yang senantiasa membantu penulis dalam menyelesaikan tugasnya baik dalam suka maupun duka.
17. Diah Vio Ramadhanti dan Marsanda Nur Wahyu Ning Tyas yang telah kebersamai penulis selama penulis menyelesaikan studinya.
18. Mita Ardelia, Sulistiawati, dan Mela Liswida Sari selaku sahabat yang selalu memberikan semangat dan nasihat kepada penulis.
19. Teman media seperjuangan Na'imah Khoiriyah yang telah memberikan pengalaman di bidang media dan tempat mengeluh kesah selama menjadi *partner media*.
20. Ketiga Adik Rois kebanggaan Ahmad Maulana Alfatah, Ghulam Dariz Fauzan, dan Arip Saputra untuk menemukan banyak pengalaman baru dan mendukung penulis hingga akhir masa studi.
21. Tiara Ardelia Putri D. W. yang telah menjadi sahabat sejati semenjak SMP bagi penulis. Terima kasih atas waktu untuk mendengarkan semua keluh kesah dan sebagai penghibur dengan penuh kehangatan walaupun terhalang jarak yang sangat jauh tetapi tetap menjadi sahabat terbaik sepanjang hidup.
22. Raihan M. D. R. yang telah menjadi *partner game* bagi penulis untuk menghibur, memberikan kesenangan dan kebahagiaan saat sedang lelah.
23. Teman-teman Donyah Bagoes MayangKoro, Cindar Umami Widiarsi, Elsa Savira, Krisna Adqilna A., Luh Yuke Ariyanti, Melisa Dwi Amanda, Tri Neviah Ramadhani, Syifa Amelia, dan Wina Kemala Sari yang telah menemani penulis sejak SMA hingga akhir masa studi.
24. Teman-teman KKN desa Mekarsari dan keluarga Bapak Supardy yang telah memberikan penulis pengalaman dan kenangan yang berharga.

25. Adik-adik MBKM Raharjo, M. Rizal Fernando, Maula Rayyanie, Pinkan Aling, Ester Wanitri, Giovani Ramadhan, Garneta Heppy, dan Muthiara Wamiga serta adik-adik Polimer 22 lainnya yang telah memberikan kesan baik kepada penulis.
26. Mba Gege, Kak Rekia, Kak Gom, Kak Sabil, Kak Qori, dan Kak Nurul penulis sampaikan terimakasih telah memberikan ilmu dan pengalaman kepada penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.
27. Mba Evita Wulandari, Mba Anissa Salsabila, Mba Oktavia Nur Azizah, dan Mba Husnul Nur Afifah yang selalu menjadi tempat mengeluh dan memberikan semangat kepada penulis.
28. Teman-teman Rois FMIPA 2023 khususnya Ariz, Irvandi, Sayyidah, Rara, Yulina, Utami, Nurul, dan Azzet. Terima kasih karena telah memberikan kesempatan bagi penulis untuk menjadi bagian dari kalian dan memberikan kesan menyenangkan.
29. Teman-teman Pers Natural 2022 dan 2023 yang telah memberikan pengalaman dibidang Pers bagi penulis. Terima kasih atas kebersamaan yang sangat hangat.
30. Sahabat seperjuangan di Jurusan Kimia Sayyid Amanullah G., Misbakhul Anam, Alif Zidane, dan A. Whisnu Shakti A. G. yang telah menemani penulis hingga akhir studi.
31. Sahabat semenjak SMP Rifki Abdullah, Raihan Adi P., dan Zainal Abidin yang telah memberikan tempat untuk singgah sementara bagi penulis.
32. Sahabat seperjuangan di UIN Raden Intan Azka Alvaro, Arvi Reyhan H., dan Irsyad yang telah menemani penulis hingga akhir studi.
33. Teman-teman seperjuangan Kimia angkatan 2021 khususnya anggota kelas C. Terima kasih telah memberikan kesempatan bagi penulis untuk menjadi bagian dari kalian semua.
34. Teman-teman Himaki 2022 khususnya Biro Penerbitan yang telah banyak memberikan penulis pengalaman dan pelajaran baru yang berharga.
35. Rekan-rekan di Laboratorium Polimer dan Laboratorium Anorganik/Fisik FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan bantuan dan saran kepada penulis.

36. Almamaterku tercinta serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu, terima kasih atas segala bantuan dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dan menyelesaikan studi sebagai mahasiswa S1 Kimia.
37. *Last but not least, I just wanna say thank to me*, Terima kasih telah bertahan dan hidup hingga saat ini. Ingat perjalanan mu masih panjang, *So lets start a new journey*.

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, 20 Juni 2025

Penulis

Adryan Daffa Dzulfiqar

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR.....	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	4
1.3 Manfaat Penelitian.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Minyak Kelapa Sawit	5
2.2 <i>Bio Crude Oil</i> (BCO)	6
2.3 Pirolisis	7
2.4 Biohidrokarbon.....	9
2.5 Katalis.....	10
2.5.1 Katalis homogen.....	11
2.5.2 Katalis heterogen.....	11
2.6 Zeolit	12
2.6.1 Zeolit alam.....	13
2.6.2 Zeolit sintesis.....	14
2.6.3 Zeolit-A	15
2.7 Bentonit	16
2.7.1 Purifikasi bentonit	16
2.8 Karakterisasi Bentonit, Zeolit, dan Analisis BCO	17
2.8.1 <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF)	17
2.8.2 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	19
2.8.3 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	22
2.8.4 <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS).....	24
III. METODE PENELITIAN	28
3.1 Waktu dan Tempat	28
3.2 Alat dan Bahan	28

3.3	Prosedur Penelitian	29
3.3.1	Preparasi bentonit.....	29
3.3.2	Purifikasi bentonit.....	29
3.3.3	Karakterisasi Bentonit.....	30
3.3.4	Modifikasi bentonit menjadi zeolit-A.....	30
3.3.5	Karakterisasi zeolit-A hasil modifikasi.....	30
3.3.6	Preparasi minyak kelapa sawit.....	31
3.3.7	Uji katalitik zeolit-A hasil modifikasi bentonit pada pirolisis minyak kelapa sawit.....	32
3.3.8	Karakterisasi <i>Bio Crude Oil</i> (BCO) menggunakan <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS)	32
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1	Lingkup Penelitian	33
4.2	Purifikasi Bentonit.....	33
4.3	Modifikasi Bentonit Menjadi Zeolit-A Menggunakan Metode Hidrotermal	39
4.4	Karakterisasi Zeolit-A Hasil Modifikasi Bentonit	39
4.4.1	<i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	39
4.4.2	<i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	43
4.5	Preparasi Minyak Kelapa Sawit dan Uji Aktivitas Katalitik Zeolit-A Hasil Modifikasi Bentonit Menggunakan Metode Pirolisis.....	44
4.6	Analisis Produk Hasil Pirolisis dengan <i>Gas Chromatography Mass Spectrometry</i> (GC-MS).....	46
V.	SIMPULAN DAN SARAN	52
5.1	Kesimpulan.....	52
5.2	Saran	53
	DAFTAR PUSTAKA.....	54
	LAMPIRAN.....	61

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komponen kimia bentonit.....	18
2. Komposisi kimia dari BCO yang diperoleh dari pirolisis minyak kelapa sawit tanpa penggunaan katalis.....	26
3. Data hasil analisis XRF bentonit.....	34
4. Perbandingan standar IZA zeolit-A dan dengan zeolit-A hasil disintesis pada waktu kristalisasi yang bervariasi.....	41
5. Perbandingan standar IZA sodalit dengan zeolit-A hasil disintesis pada waktu kristalisasi yang bervariasi.	41
6. Komposisi BCO hasil pirolisis dengan zeolit-A tanpa pra-perlakuan pemanasan.	47
7. Komposisi relatif BCO hasil pirolisis dengan variasi pemanasan 10, 20, 30, 40 menit dan tanpa pemanasan.....	50
8. Nilai kristalinitas bentonit dan zeolit-A hasil modifikasi pada variasi.	66
9. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit curah menggunakan katalis zeolit-A dengan pra-perlakuan pemanasan 10 menit.	67
10. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit curah menggunakan katalis zeolit-A dengan pra-perlakuan pemanasan 20 menit.	68
11. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit curah menggunakan katalis zeolit-A dengan pra-perlakuan pemanasan 30 menit.	69

12.Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa sawit curah menggunakan katalis zeolit-A dengan pra-perlakuan pemanasan 40 menit.	70
---	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Rangkaian alat pirolisis sederhana.	8
2. Skema struktur zeolit.....	12
3. Kerangka zeolit-A.	15
4. Bagian dan prinsip kerja dari XRF.....	18
5. Bagian dan prinsip kerja dari XRD.....	19
6. Pola XRD bentonit alam dan bentonit purifikasi	20
7. Pola XRD zeolit-A hasil sintesis bentonit dengan 1 M larutan (a) NaOH, (b) KOH, (c) Na ₂ CO ₃ , dan (d) K ₂ CO ₃	21
8. Difraktogram XRD zeolit-A hasil sintesis dan zeolit-A standar IZA	21
9. Bagian dan prinsip kerja dari SEM	22
10. Mikrograf bentonit (a) alam, (b) purifikasi, dan (c) aglomerasi setelah purifikasi	23
11. Hasil analisis SEM dari zeolit-A.....	24
12. Bagian dan prinsip kerja dari GC-MS.....	25
13. Kromatogram BCO yang dihasilkan.....	26
14. Pola difraksi XRD (a) bentonit alam dan (b) bentonit purifikasi.....	35
15. Difraktogram Match! (a) bentonit alam dan (b) bentonit purifikasi.	36

16. Mikrograf SEM bentonit (a) 1.000x, (b) 5.000x, (c) 10.000x, dan (d) 15.000x.	37
17. Mikrograf SEM bentonit hasil purifikasi (a) dengan perbesaran 1.000x, (b) 5.000x, (c) 10.000x, dan (d) 15.000x.....	38
18. Difraktogram (a) standar IZA zeolit-A, (b) standar IZA sodalit, hasil modifikasi bentonit pada waktu kristalisasi: (c) 72 jam, (d) 96 jam dan (e) 120 jam.....	40
19. Difraktogram Match! zeolit-A kristalisasi (a) 72 jam, (b) 96 jam, dan (c) 120 jam.....	42
20. Mikrograf SEM zeolit-A kristalisasi 96 jam dengan perbesaran (a) 1.000x, (b) 5.000x, (c) 10.000x, dan (d) 15.000x.....	43
21. Rangkaian alat pirolisis.....	45
22. Hasil pirolisis BCO dengan pra-perlakuan (a) tanpa pemanasan dan dengan pemanasan pada variasi waktu (b) 10, (c) 20, (d) 30, dan (e) 40 menit.....	45
23. Kromatogram BCO hasil pirolisis dengan zeolit-A tanpa pra-perlakuan pemanasan.....	46
24. Komposisi relatif BCO hasil pirolisis dengan zeolit-A tanpa pra-perlakuan pemanasan.....	48
25. Kromatogram BCO hasil pirolisis dengan variasi pemanasan (a) 10, (b) 20, (c) 30, dan (d) 40 menit.	49
26. Komposisi relatif hidrokarbon dengan variasi waktu pemanasan.	50
27. Bentonit (a) alam dan (b) purifikasi.....	62
28. Hasil sintesis zeolit-A waktu kristalisasi (a) 72 jam, (b) 96 jam, dan (c) 120 jam.....	62

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara penghasil dan pengekspor minyak kelapa sawit terbesar di dunia, mengungguli negara-negara lain seperti Malaysia, Belanda, dan Papua Nugini. Sejak tahun 2009, Indonesia secara konsisten menempati posisi teratas dengan rata-rata ekspor mencapai 24,01 juta ton per tahun, yang setara dengan kontribusi sebesar 46,12% dari total ekspor minyak kelapa sawit dunia (Yanita *et al.*, 2020). Tingginya produksi tersebut menjadikan minyak kelapa sawit sebagai salah satu komoditas strategis nasional yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai bahan baku energi terbarukan. Selama satu dekade terakhir, bahan bakar cair alternatif yang berasal dari biomassa telah menarik perhatian luas, terutama karena kemampuannya dalam mengurangi emisi gas rumah kaca serta mendiversifikasi sumber energi yang selama ini masih bergantung pada bahan bakar fosil (Xu *et al.*, 2020). Minyak kelapa sawit juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif, salah satunya melalui konversi menjadi *Bio Crude Oil* (BCO) menggunakan metode pirolisis. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa minyak kelapa sawit mampu digunakan pada mesin diesel tanpa modifikasi besar, yang menjadi salah satu faktor pendorong utama pemanfaatannya sebagai sumber energi alternatif (Cahyo *et al.*, 2023).

Menurut Simanjuntak *et al.* (2024), BCO umumnya dikenal sebagai biohidrokarbon, yang merupakan campuran kompleks yang dari berbagai senyawa, termasuk hidrokarbon dan senyawa organik teroksigenasi, seperti asam, aldehida, keton, ester, dan fenol. Biohidrokarbon atau hidrokarbon cair dari konversi minyak kelapa sawit telah menjadi fokus utama dalam berbagai

penelitian di tingkat global. Biohidrokarbon terdiri dari hidrokarbon dengan jumlah atom karbon yang bervariasi. Biohidrokarbon dapat dibedakan menjadi *biogasoline*, *bioavtur*, dan biodiesel. Peluang untuk memproduksi biohidrokarbon didorong oleh kemajuan dalam teknologi pirolisis, di mana biomassa diperlakukan secara termal tanpa atau dengan sedikit oksigen untuk menghasilkan produk dalam bentuk gas, cair, dan padat.

Metode pirolisis menjadi salah satu cara untuk memproduksi bahan bakar cair dari biomassa, termasuk biohidrokarbon, melalui dekomposisi termal yang dilakukan dengan laju pemanasan dan suhu pirolisis yang tepat. Proses pirolisis memanfaatkan panas dan reaksi kimia untuk menguraikan biomassa menjadi produk yang berguna, seperti gas, *biochar*, dan *bio-oil*. *Bio-oil* adalah cairan dengan komposisi kimia yang kompleks dan membentuk emulsi (Majid *et al.*, 2022). Pirolisis dapat dikategorikan menjadi perengkahan termal langsung dan perengkahan katalitik. Perengkahan termal menghasilkan campuran produk yang kompleks. Dalam proses ini, distribusi komponen produk sangat dipengaruhi oleh berbagai variabel reaksi, seperti jenis reaktor, waktu tinggal, komposisi bahan baku, suhu reaksi, serta prosedur pengumpulan dan teknik analisis yang digunakan. Perengkahan termal pada minyak nabati biasanya dilakukan pada suhu 350–500 °C atau lebih tinggi dengan tekanan sedang, menghasilkan hingga 70% hidrokarbon. Peningkatan suhu pirolisis berkontribusi pada peningkatan selektivitas dalam pembentukan hidrokarbon ringan. Untuk meningkatkan hasil dan selektivitas produk yang diinginkan, trigliserida diproses pada suhu tinggi dengan bantuan suatu zat salah satunya adalah katalis (Setyaningsih *et al.*, 2022).

Katalis dapat mempercepat reaksi, menurunkan suhu yang dibutuhkan, dan menentukan komposisi produk yang dihasilkan. Zeolit merupakan salah satu jenis katalis yang banyak diminati dalam pirolisis biomassa karena kemampuannya dalam mempercepat reaksi deoksigenasi dan meningkatkan kandungan biohidrokarbon pada proses pirolisis. Salah satu zeolit sintetis yang telah banyak digunakan adalah zeolit-A (Simanjuntak *et al.*, 2019) zeolit-X (Febriyanti *et al.*, 2021), zeolit-Y (Ali *et al.*, 2023), dan zeolit ZSM-5 (Solikhah dkk., 2022). Pada penelitian ini digunakan zeolit-A karena telah diuji berbagai aplikasinya, seperti

pada membran, penyerap, pertukaran ion, dan sebagai katalis, zeolit-A telah menjadi salah satu bahan yang paling menarik dengan rasio silikon terhadap aluminium (Si/Al) antara 1,0 hingga 1,7 dan 1,0 hingga 2,0 (Aulia *et al.*, 2024).

Sumber Si dan Al banyak ditemukan pada mineral bentonit yang dianggap sebagai bahan baku alternatif yang sangat menjanjikan untuk sintesis zeolit-A. Bentonit adalah bahan lempung alami yang banyak digunakan dalam berbagai industri seperti *bonding*, *plasticizing*, dan *suspending*. Bentonit terdiri dari lembaran silika tetrahedral dan satu lembar alumina oktahedral di tengahnya. Komposisi teoritis bentonit mencakup 71,62 % SiO₂, 15,22 % Al₂O₃, dan 13,17 % air. Dalam konteks ini, bentonit memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan awal dalam sintesis zeolit karena rasio Si/Al-nya (sekitar 4,7) berada dalam kisaran yang sesuai untuk sintesis zeolit-A, seperti pada penelitian Srilai *et al.* (2020) di mana zeolit-A telah berhasil disintesis dari bentonit menggunakan metode hidrotermal dengan didapatkan komposisi utama bentonit adalah Si dan Al.

Pada penelitian ini, bentonit dipurifikasi dan dilakukan karakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF), *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM), kemudian dilakukan sintesis zeolit-A hasil modifikasi bentonit yang dihasilkan dikarakterisasi dengan XRD dan SEM. Hasil sintesis zeolit-A selanjutnya diuji aktivitas katalitik pada proses pirolisis minyak kelapa sawit untuk mendapatkan BCO yaitu berupa biohidrokarbon dengan variasi waktu pemanasan minyak kelapa sawit. Tujuan dari proses pemanasan awal ini adalah untuk menurunkan kandungan air dalam minyak kelapa sawit serta menentukan waktu pemanasan yang paling efektif dalam memperoleh produk biohidrokarbon dengan tingkat kemurnian yang tinggi. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan pengkajian terhadap pengaruh suhu dan waktu pemanasan pra-perlakuan sebelum pirolisis, dengan variasi waktu 10, 20, 30, 40 menit, dan tanpa pemanasan sebagai pembanding. Produk yang dihasilkan dari proses pirolisis kemudian dianalisis menggunakan *Gas Chromatography–Mass Spectrometry* (GC-MS) untuk mengidentifikasi senyawa kimia yang terkandung di dalamnya.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan pada penelitian ini antara lain:

1. Mendapatkan informasi karakteristik bentonit dan bentonit hasil purifikasi menggunakan pelarut asam yang dikarakterisasi menggunakan teknik XRF, XRD, dan SEM
2. Memperoleh zeolit-A dari modifikasi bentonit dengan metode hidrotermal.
3. Mendapat data karakteristik zeolit-A menggunakan teknik XRD dan SEM.
4. Mempelajari pengaruh waktu pra-perlakuan pemanasan sampel minyak kelapa sawit yang dipirolisis menggunakan zeolit-A terhadap karakteristik BCO.
5. Menganalisis BCO dari proses pirolisis menggunakan analisis GC-MS.

1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Meningkatkan nilai ekonomis bentonit sebagai bahan baku pembuatan katalis.
2. Memberikan informasi tentang teknik pirolisis minyak kelapa sawit.
3. Menyediakan energi baru terbarukan (EBT) dari pengolahan biomassa minyak kelapa sawit.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Minyak Kelapa Sawit

Kelapa sawit (*Elaenis guineensis*) telah menjadi spesies tanaman dan komoditas penting di dunia. Kelapa sawit dimanfaatkan sebagai bahan baku karena beberapa keuntungan, termasuk kandungan minyaknya yang tinggi di mana bagian kulit (serabut) mengandung 45-50 % minyak, sedangkan bagian intinya (kernel) mengandung 44 % minyak (Rafika, 2023; Tampubolon, 2021). Kelapa sawit sebagai penghasil minyak adalah salah satu komoditas perkebunan dengan jumlah produksi yang tinggi dikarenakan kebutuhan produk turunannya tiap tahun terus meningkat dan produktivitas tanaman tersebut memang tinggi dibandingkan tanaman penghasil minyak nabati lainnya. Minyak yang dihasilkan dari buah kelapa sawit ada dua jenis, yaitu minyak kelapa sawit yang diperoleh dari proses ekstraksi daging buah kelapa sawit dan belum dimurnikan, serta minyak inti sawit yang didapatkan dari inti buah kelapa sawit. Sebelum dijadikan bahan pangan, minyak kelapa sawit harus melalui proses pemurnian terlebih dahulu, di mana minyak ini diekstraksi dari bagian *mesocarp* buah sawit secara mekanis dan fisik di pabrik kelapa sawit, dengan fraksi cair dan padat yang dihasilkan oleh trigliserida yang mengandung komponen utama asam palmitat dan oleat dengan komposisi seimbang (Rahardja *et al.*, 2019; Syafrianti *et al.*, 2021).

Menurut Cahyo *et al.* (2023), Minyak kelapa sawit banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam produksi biodiesel karena metode pengolahannya yang relatif sederhana. Selain itu, minyak kelapa sawit memiliki keunggulan dari segi biaya dan ketersediaan, mengingat proses transesterifikasi dalam produksi biodiesel memerlukan bahan tambahan seperti metanol dan katalis. Namun demikian,

penggunaan minyak kelapa sawit secara langsung pada mesin diesel dapat menyebabkan penurunan daya keluaran mesin serta peningkatan konsumsi bahan bakar. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi berbagai aspek penggunaan minyak kelapa sawit, termasuk pengaruhnya terhadap kondisi internal mesin diesel baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Selain sebagai bahan baku biodiesel, minyak kelapa sawit juga dapat dikonversi menjadi biohidrokarbon melalui metode pirolisis, yang menghasilkan produk berupa BCO.

2.2 Bio Crude Oil (BCO)

BCO merupakan senyawa hidrokarbon cair yang dihasilkan dari biomassa melalui proses degradasi termal. Terdapat dua teknologi konversi biomassa yang umum digunakan, yaitu pirolisis dan pencairan biomassa (*liquefaction*). Salah satu metode termokimia yang digunakan adalah *hydrothermal liquefaction* (HTL), yaitu proses konversi biomassa menggunakan air dalam kondisi subkritis dan superkritis pada suhu antara 200–370 °C dan tekanan 40–200 bar. Proses HTL terbagi menjadi tiga tahap, yaitu *liquefaction*, *catalytic gasification*, dan *high-temperature gasification*. Perubahan sifat kimia dan fisika air secara signifikan terjadi dalam kondisi ekstrem tersebut, menjadikannya komponen penting dalam mekanisme reaksi HTL (Hanief dkk., 2022).

Secara fisik, BCO berbentuk cairan kental berwarna hitam, tidak larut dalam air, dan terdiri dari senyawa hidrokarbon kompleks dengan kandungan oksigen yang relatif tinggi. BCO tersusun atas beragam senyawa hidrokarbon rantai pendek hingga menengah (C₅–C₁₄) yang terbentuk dari proses degradasi dan reaksi lanjutan senyawa hidrokarbon rantai panjang, seperti yang terkandung dalam komponen utama biomassa yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. BCO terbentuk melalui proses kondensasi asap hasil pembakaran biomassa, khususnya melalui pirolisis, yang dianggap sebagai teknologi konversi paling efektif dalam menghasilkan biofuel cair dari biomassa dan limbah. Senyawa kimia penyusun BCO merupakan campuran uap organik yang kompleks, seperti alkohol, aldehida,

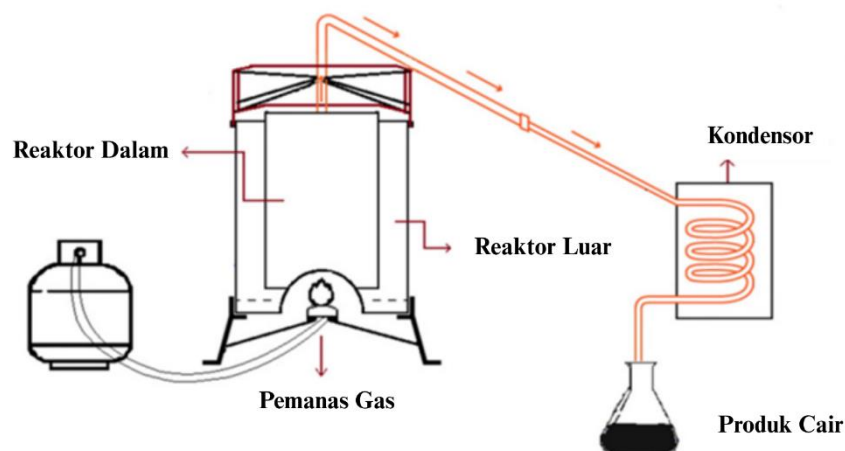
asam karboksilat, eter, ester, keton, fenol, furan, butandion, asetaldehida, metanol, serta hidrokarbon alifatik dan aromatik. Secara visual, BCO memiliki warna gelap menyerupai kopi dan beraroma asap khas hasil pembakaran (Saputra dkk., 2023).

2.3 Pirolisis

Bahan bakar alternatif (*biofuel*) dapat dihasilkan dari berbagai jenis sumber daya alam terbarukan misalnya minyak kelapa sawit. Beberapa teknik telah dipelajari untuk mengubah minyak nabati dan lemak hewani menjadi *biofuel*. Salah satu teknik yang mudah dilakukan adalah teknik pembuatan bahan bakar alternatif dari minyak nabati dan hewani adalah pirolisis. Pirolisis juga dikenal sebagai perengkahan termal dan perengkahan katalitik (Silalahi *et al.*, 2021). Pirolisis merupakan suatu dekomposisi kimia bahan organik melalui proses pemanasan pada suhu tinggi yang terjadi dengan tanpa atau sedikit oksigen. Material yang digunakan dalam pirolisis dapat berupa bahan alami dari tumbuhan, yang sering disebut biomassa (Harlianingtyas dkk., 2023).

Proses pirolisis biomassa dapat dibedakan menjadi tiga jenis utama, yaitu pirolisis lambat, pirolisis cepat, dan pirolisis kilat, yang masing-masing dibedakan berdasarkan laju pemanasan, suhu operasi, serta waktu tinggal dalam reaktor. Pirolisis lambat dilakukan dengan laju pemanasan rendah (sekitar 0,1–2 °C/detik) dan suhu tidak lebih dari 500 °C, dengan waktu tinggal yang cukup lama. Proses ini menghasilkan biochar sebagai produk utama, dengan *bio-oil* dan gas sebagai produk samping. Pirolisis cepat berlangsung pada suhu 400–600 °C dengan laju pemanasan yang lebih tinggi (10–200 °C/detik) dan waktu tinggal yang singkat (kurang dari 2 detik). Pada kondisi ini, *bio-oil* menjadi produk dominan dengan rendemen tinggi, sehingga metode ini banyak digunakan dalam produksi bahan bakar cair dari biomassa. Pirolisis kilat atau *flash pyrolysis* menggunakan laju pemanasan sangat tinggi (hingga >1000 °C/detik) dan waktu reaksi yang sangat singkat (<0,5 detik). Metode ini dirancang untuk memaksimalkan produksi *bio-oil* dengan efisiensi yang lebih tinggi dibanding pirolisis cepat (Fahmy *et al.*, 2020).

Proses pirolisis energi panas mendorong terjadinya oksidasi sehingga molekul karbon yang kompleks terurai sebagian besar menjadi karbon atau arang. Istilah lain dari pirolisis adalah *destructive distillation* atau destilasi kering, di mana merupakan suatu proses yang tidak teratur dari bahan-bahan organik disebabkan oleh pemanasan yang tidak berhubungan dengan udara luar. Distilasi adalah suatu cara pemisahan larutan dengan menggunakan panas sebagai pemisah atau *separating agent* (Sahrums *et al.*, 2021). Metoda pirolisis sendiri dapat diterapkan dalam penggunaan untuk menghasilkan suatu senyawa yang dapat dijadikan sebagai sumber bahan bakar berupa cairan (Nofendri dan Haryanto, 2021). Para peneliti banyak yang melakukan metode pirolisis dibantu katalis padat. Hasil dan komposisi produk pirolisis sangat dipengaruhi oleh katalisator (Afriansyah *et al.*, 2022). Berikut merupakan rangkaian alat pirolisis sederhana dapat dilihat di Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian alat pirolisis sederhana (Simanjuntak *et al.*, 2024).

Mekanisme reaksi pirolisis dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu primer dan sekunder. Pada reaksi primer, senyawa volatil dilepaskan, sementara ikatan kimia dalam polimer terurai selama pemanasan biomassa (Uddin *et al.*, 2018). Proses reaksi primer pada pirolisis dapat dijelaskan sebagai berikut; pertama, pembentukan *char* terjadi ketika residu padat terbentuk selama konversi biomassa akibat adanya struktur polisiklik aromatik. *Char* primer ini harus segera dipisahkan karena dapat terdekomposisi menjadi *char* sekunder. Fokus utama

proses ini adalah pembentukan cincin benzena yang berkombinasi dengan struktur polisiklik. Selanjutnya, dalam proses depolimerisasi, ikatan polimer pada lignoselulosa dipecah menjadi monomer aromatik sederhana dan senyawa jenuh dengan berat molekul rendah pada rentang suhu 300-450 °C. Proses ini menghasilkan rantai pendek yang mengeluarkan senyawa volatil, yang kemudian dapat terkondensasi menjadi cairan pada suhu ruang. Tahap ketiga adalah fragmentasi, di mana terbentuk ikatan kovalen pada unit monomer yang menghasilkan gas tak terkondensasi serta senyawa linier berantai pendek. Pada suhu sekitar 600 °C, selulosa aktif terurai menjadi senyawa seperti asam karbonil, alkohol, dan lainnya.

Mekanisme reaksi sekunder terjadi ketika senyawa volatil yang tidak stabil dilepaskan selama proses depolimerisasi dan fragmentasi pada suhu tinggi di dalam reaktor. Senyawa tersebut kemudian mengalami pemecahan lebih lanjut dan repolimerisasi, yang dikenal sebagai reaksi sekunder. Pemecahan ini melibatkan pemutusan ikatan kimia pada senyawa volatil dan menghasilkan komponen-komponen baru dengan berat molekul lebih besar, yang dapat bergabung dengan polimer atau berinteraksi dengan senyawa volatil lainnya. Dalam proses repolimerisasi tersebut, zat volatil kembali terbentuk dan menghasilkan hidrokarbon polisiklik dengan berat molekul yang lebih besar serta sifat kimia yang lebih kompleks. Reaksi sekunder ini sangat berpengaruh pada pembentukan produk akhir, terutama dalam sistem yang melibatkan polimerisasi dan dekomposisi termal (Bamboriya *et al.*, 2019).

2.4 Biohidrokarbon

Biohidrokarbon adalah sumber energi terbarukan yang bersih dan ramah lingkungan, karena menghasilkan emisi gas polutan yang jauh lebih rendah dibandingkan energi fosil, sehingga dampak negatif emisi CO₂ lebih kecil dan penerapannya dianggap non-konvensional. Bahan bakar seperti biohidrokarbon diperlukan untuk mengurangi konsentrasi CO₂ di atmosfer (Saragih *et al.*, 2023). Biohidrokarbon sendiri merupakan senyawa hidrokarbon dengan jumlah karbon

yang bervariasi, dan dibedakan menjadi *biogasoline* (rantai karbon C₅-C₁₂), bahan bakar kerosene atau *bioavtur* (rantai karbon C₁₃-C₁₇), serta biodiesel (rantai karbon C₁₈-C₂₈). Peluang produksi biohidrokarbon didorong oleh pengembangan teknologi pirolisis, di mana minyak kelapa sawit dipanaskan dalam kondisi minim atau tanpa oksigen, menghasilkan produk gas, cair, dan padat. Produk cair ini dikenal sebagai minyak pirolisis atau BCO, yang merupakan campuran kompleks dari berbagai senyawa seperti hidrokarbon dan senyawa organik teroksidasi, termasuk asam, aldehida, keton, ester, dan fenol (Simanjuntak *et al.*, 2024). Penggunaan biohidrokarbon juga merupakan salah satu cara untuk mengantisipasi penurunan cadangan bahan bakar fosil. Metode yang terbukti dalam menghasilkan biohidrokarbon adalah deoksigenasi katalitik (Aziz dkk., 2023).

2.5 Katalis

Katalis adalah zat yang mempercepat laju reaksi menuju kesetimbangan tanpa mengalami konsumsi dalam proses tersebut. Meskipun katalis terlibat dalam reaksi, ia akan kembali ke bentuk semula setelah reaksi selesai, sehingga tidak menambah energi ke sistem dan tidak mempengaruhi kesetimbangan secara termodinamika. Katalis memungkinkan reaktan untuk melewati jalur alternatif dengan kondisi yang lebih ringan, seperti suhu dan tekanan yang lebih rendah. Tanpa katalis, reaksi akan berlangsung lebih lambat karena membutuhkan suhu dan tekanan yang tinggi dengan menyediakan jalur alternatif yang memiliki kinetika lebih baik, katalis menurunkan energi aktivasi. Energi aktivasi adalah energi minimum yang diperlukan agar suatu reaksi dapat terjadi dan menghasilkan produk. Berdasarkan jenisnya, katalis dibagi menjadi dua, yaitu katalis homogen dan katalis heterogen (Kusniawati dkk., 2021).

2.5.1 Katalis homogen

Katalis homogen adalah katalis yang memiliki fasa yang sama dengan reaktan dan produknya. Katalis jenis ini memiliki aktivitas dan selektivitas yang tinggi, tidak mudah teracuni oleh pengotor, mudah dioperasikan, mudah dimodifikasi, serta mudah dipelajari (Kusniawati dkk., 2021). Katalis homogen dapat dibagi menjadi asam, basa, organik dan anorganik, serta dikenali secara fisik oleh fasa yang sama dengan reaktan. Klasifikasinya didasarkan pada kemampuannya untuk mudah bercampur dengan reaktan, baik asam maupun basa. Kelebihan utama katalis homogen adalah selektivitas yang sangat tinggi karena memiliki banyak situs aktif dan dapat digunakan dalam kondisi operasi yang relatif ringan. Namun, kelemahannya meliputi kesulitan dalam memisahkan katalis dari produk setelah reaksi, adanya risiko korosi signifikan pada peralatan reaktor, serta kemungkinan efek samping seperti saponifikasi, yang dapat diatasi dengan menggunakan katalis heterogen (Fadhillah dan Sari, 2023).

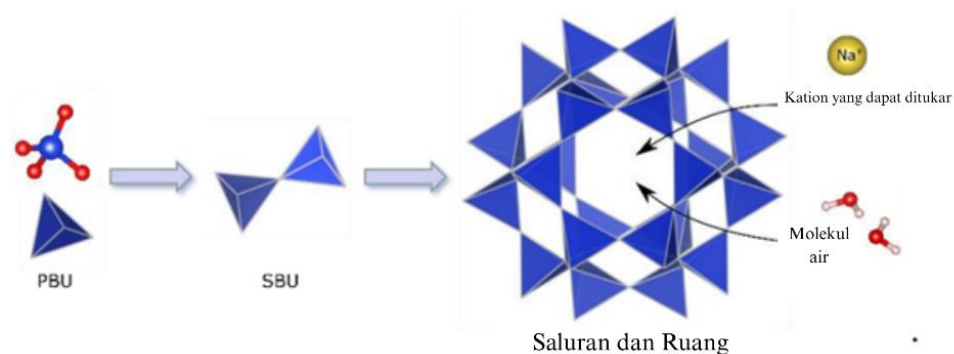
2.5.2 Katalis heterogen

Katalis heterogen adalah katalis yang berada dalam fasa yang berbeda dari reaktannya. Biasanya, katalis heterogen menggunakan katalis padat, di mana interaksi terjadi di permukaan antara padatan dengan gas atau cairan. Aktivitas katalis terjadi di permukaan pori-pori padatan tersebut. Mekanisme katalisis heterogen melibatkan proses adsorpsi dan desorpsi, dan umumnya memiliki tahapan yang lebih kompleks dibandingkan dengan katalisis homogen karena katalis dalam katalisis heterogen tidak terdistribusi secara merata di media reaksi. Meskipun begitu, penggunaan katalis heterogen lebih praktis dibandingkan dengan katalis homogen (Kusniawati dkk., 2021). Hal ini disebabkan oleh beberapa keunggulan katalis heterogen, seperti kemudahan pemisahan setelah reaksi selesai, kemampuan untuk digunakan kembali, serta sifatnya yang ramah lingkungan (Ulfa dan Samik, 2023). Katalis heterogen juga memiliki beberapa karakteristik penting, termasuk ketahanan dan stabilitas pada suhu tinggi,

kemudahan pemisahan, struktur yang sederhana, umur yang panjang, namun juga mudah teracuni (Kusniawati dkk., 2021).

2.6 Zeolit

Zeolit adalah kristal aluminosilikat terhidrasi yang terdiri dari jaringan tiga dimensi $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$, yang saling terhubung melalui atom oksigen. Kata "zeolit" berasal dari bahasa Yunani "Zeo" yang berarti mendidih dan "Lithos" yang berarti batu. Istilah ini diperkenalkan oleh Axel Fredrik Constedt setelah ia menemukan bahwa ketika mineral stilbite dipanaskan, uap air dilepaskan dari mineral yang telah menyerap air. Ini berhubungan dengan sifat zeolit yang dapat menyerap air dan melepaskannya saat dipanaskan (Moshoeshoe *et al.*, 2017). Berikut adalah skema struktur dari zeolit yang dapat terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema struktur zeolit (Król, 2020).

Zeolit terdiri dari kerangka dasar aluminosilikat, yang tersusun dari susunan tetrahedral ion silikon (Si^{4+}) dan ion aluminium (Al^{3+}) yang dikelilingi oleh empat anion oksigen (O^{2-}). Setiap ion oksigen dalam ikatan Si–O dan Al–O terhubung dengan dua kation dan dibagi antara dua tetrahedron, sehingga membentuk kerangka tiga dimensi dengan Si sebagai ion tetravalen dalam $\text{SiO}_{4/2}$ dan Al sebagai ion trivalen bermuatan negatif dalam $\text{AlO}_{4/2}$. Muatan negatif dan pori-pori dalam zeolit dapat diisi oleh molekul air serta ion logam dari golongan IA dan IIA. Ini dapat dinyatakan dengan rumus umum zeolit $\text{M}_x/n [(\text{AlO}_2)_x(\text{SiO}_2)_y] \cdot z\text{H}_2\text{O}$, di mana M adalah kation alkali atau alkali tanah, n adalah valensi kation, z adalah

jumlah molekul air per unit sel, sedangkan x dan y adalah jumlah total tetrahedral per unit sel. Rasio y/x umumnya berkisar antara 1 hingga 5, meskipun untuk silika zeolit, rasio ini dapat mencapai antara 10 hingga 100 (Derbe *et al.*, 2021). Zeolit dapat diklasifikasikan menjadi 2 bagian, yaitu zeolit alam dan juga zeolit sintetik.

2.6.1 Zeolit alam

Zeolit alam bersifat hidrotermal dan sebagian besar berasal dari gunung berapi. Zeolit dapat terbentuk dalam bentuk kristal yang ditemukan di batuan beku dan metamorf, serta dalam bentuk butiran berdiameter lebih kecil yang terakumulasi di batuan sedimen (Król, 2020). Menurut Ulfa dan Samik (2023), cadangan zeolit alam di Indonesia tersebar di 20 lokasi dengan total 447.490.160 ton. Zeolit ini digunakan sebagai katalis biodiesel karena biayanya yang rendah, tersusun dari kerangka silika alumina, ramah lingkungan, tidak beracun, memiliki daya serap tinggi, selektivitas yang baik, serta banyak pori-pori aktif yang memberi luas permukaan yang besar. Struktur zeolit alam berbentuk tiga dimensi dan terdiri dari kristal alumina silika. Karena bisa ditambang langsung dari alam, zeolit ini lebih murah daripada zeolit sintesis. Struktur khasnya memberikan sifat fisika dan kimia yang menarik, seperti selektivitas adsorpsi, pertukaran ion, dan aktivitas katalis. Rumus kimia oksida zeolit alam berdasarkan satuan sel kristal umumnya adalah: $M_{2/n}O \cdot Al_2O_3 \cdot aSiO_2 \cdot bH_2O$ atau $M_{c/n} \{ (AlO_2)_c (SiO_2)_d \} \cdot bH_2O$, dengan n sebagai valensi logam, serta a, b, c, dan d menunjukkan jumlah molekul dan tetrahedra alumina-silika. Rasio silika terhadap alumina (Si/Al) berkisar antara 1-5, dan semakin tinggi rasio ini, semakin tinggi pula kristalinitas produk. Sekitar 50 spesies mineral zeolit alam telah ditemukan, tetapi yang paling umum adalah klinoptilolit, modernit, erionit, laumontit, ferrierit, phillipsit, analcim, heulandit, dan chabazit. Di Indonesia, zeolit alam sebagian besar terdiri dari mineral modernit dan klinoptilolit, dengan sedikit kandungan heulandit.

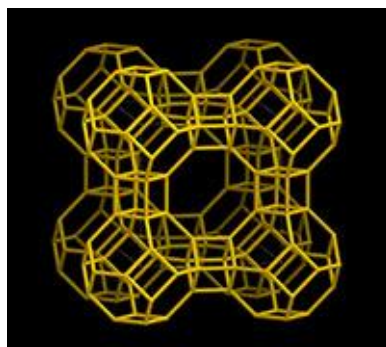
2.6.2 Zeolit sintesis

Zeolit sintetis dibuat dari bahan dasar silika dan alumina dengan menggunakan senyawa murni. Zeolit ini merupakan alternatif utama untuk menggantikan zeolit alami. Zeolit sintetis dapat disesuaikan dengan lebih presisi dalam karakteristik fisik dan kimianya, serta memiliki kualitas yang lebih konsisten dibandingkan dengan zeolit alami (Król, 2020). Berbagai metode sintesis dapat digunakan untuk menghasilkan zeolit seperti metode kopresipitasi, hidrotermal, hidrogel, dan lain-lain (Kurniawidi *et al.*, 2021). Sintesis hidrotermal merupakan proses kristalisasi multifasa yang biasanya melibatkan setidaknya satu fasa cair dan satu fasa padat amorf, dengan hasil berupa fasa kristal. Faktor utama yang memengaruhi kinetika dan kualitas produk akhir meliputi metode yang digunakan, suhu, durasi sintesis, dan tekanan yang optimal. Semakin tinggi suhu, semakin cepat kristalisasi, yang berpengaruh pada fasa kristal zeolit dan menghasilkan ukuran pori yang lebih besar (Vegere *et al.*, 2020).

Proses sintesis hidrotermal zeolit terdiri dari dua tahap: pertama, pembentukan gel aluminosilikat terhidrasi, dan kedua, tahap kristalisasi. Pada tahap kristalisasi, ada empat langkah utama: (i) kondensasi anion polisilikat dan aluminat, (ii) nukleasi zeolit, (iii) pertumbuhan inti, dan (iv) pertumbuhan kristal zeolit. Dalam kondisi basa atau asam, aluminium amorf dan silikat dilarutkan dalam air untuk membentuk sol gel atau larutan bening, kemudian dipanaskan dalam autoklaf hingga kristal subunit yang terorganisir terbentuk. Kristal zeolit kecil dengan keteraturan jarak jauh terbentuk selama proses nukleasi, dan akhirnya terbentuk kristal zeolit yang matang. Secara umum, metode hidrotermal melibatkan kristalisasi gel aluminosilikat, yaitu campuran larutan aluminat dan silika dengan alkali hidroksida dan basa organik (Derbe *et al.*, 2021). Kelebihan dari zeolit sintetis adalah kemampuannya untuk dirancang secara spesifik yang digunakan mendukung reaksi tertentu, serta fleksibilitas dalam mengatur ukuran pori-porinya tepat (Moshoeshoe *et al.*, 2017).

2.6.3 Zeolit-A

Zeolit-A merupakan salah satu jenis zeolit sintetis dengan rumus kimianya adalah $[\text{Na}_{12}(\text{H}_2\text{O})_{27}][\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}]_8$ dan disebut juga LTA (*Linde Type A*) atau NaA. Struktur jaringan tiga dimensi zeolit-A dibentuk oleh kerangka sodalit yang dihubungkan oleh cincin beranggota empat (D4R). Kisi zeolit-A terdiri dari dua jenis kerangka: kerangka α dan kerangka β (atau kerangka sodalit). Dalam struktur rangka zeolit, delapan kerangka sodalit dihubungkan oleh cincin rangkap empat untuk membentuk kerangka super α di tengahnya (Indira *and* Abhitha, 2022). Zeolit-A lebih sering disintesis karena memiliki kapasitas pertukaran kation yang tinggi, yaitu sekitar 347 meq/100 g, serta diameter pori yang cukup besar, sekitar 4,2 Å. Oleh karena itu, zeolit-A banyak digunakan dalam proses adsorpsi dan pertukaran ion. Bahan sintetis seperti natrium aluminat dan natrium silikat, yang relatif mahal, digunakan untuk mensintesis Zeolit-A. Secara umum, zeolit-A disintesis menggunakan metode hidrotermal dalam autoklaf untuk kristalisasi. Mineral aluminosilikat pada zeolit-A berfungsi sebagai adsorben untuk limbah cair. Keunggulan zeolit-A dibandingkan jenis zeolit lainnya adalah proses sintesisnya yang mudah, kapasitas pertukaran kation yang tinggi, dan kemampuan adsorpsi yang baik (Putri *et al.*, 2024). Rasio silikon terhadap aluminium (Si/Al) untuk sintesis zeolit-A berkisar antara 1,0 hingga 1,7 dan 1,0 hingga 2,0 (Aulia *et al.*, 2024). Berikut merupakan kerangka dari zeolit-A yang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Kerangka zeolit-A (*International Zeolite Association (IZA), 2017*).

2.7 Bentonit

Bentonit adalah mineral alumina silikat hidrat yang termasuk dalam kelompok pilosilikat atau silikat berlapis, dengan struktur jaringan tetrahedral (SiO_4). Rumus kimia bentonit secara umum adalah $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Bentonit juga mengandung beberapa mineral pengotor seperti kwarsa, kalsit, mika, dan klorit. Struktur montmorillonit, komponen utama bentonit, terdiri dari tiga lapisan, yaitu satu lapisan alumina (AlO_6) berbentuk oktahedral di tengah yang diapit oleh dua lapisan silika (SiO_2) berbentuk tetrahedral (Bukit dkk, 2021). Bentonit terbentuk dari tanah liat yang kaya montmorillonite, yang dihasilkan melalui proses devitrifikasi abu vulkanik. Bentonit adalah senyawa mineral berbasis montmorillonite yang mengandung lapisan kristal alumina octahedral yang mampu menyerap air dalam volume besar, kemampuan pertukaran kation yang tinggi, dan kemampuan mengembang (Nasir *et al.*, 2020). Struktur montmorillonite menciptakan luas permukaan bentonit yang mencapai 700–800 m^2/g , sehingga memberikan kemampuan tinggi untuk menyerap ion logam dan senyawa organik. Sifat pengembangannya yang besar dan luas permukaannya yang luas memungkinkan bentonit dimanfaatkan sebagai adsorben (Annisah *et al.*, 2021). Sebagai salah satu jenis lempung yang mengandung montmorillonite, bentonit termasuk dalam golongan aluminosilikat berlapis hidro dengan ukuran partikel berkisar antara 2 hingga 4 μm . Kombinasi antara ukuran dan rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi memberikan bentonit karakteristik khusus, seperti kapasitas pertukaran kation yang tinggi, sifat katalitik yang dihasilkan dari keberadaan logam Al dan Si, interaksi dengan air, dan sifat termoplastik (Berghuis *et al.*, 2022).

2.7.1 Purifikasi bentonit

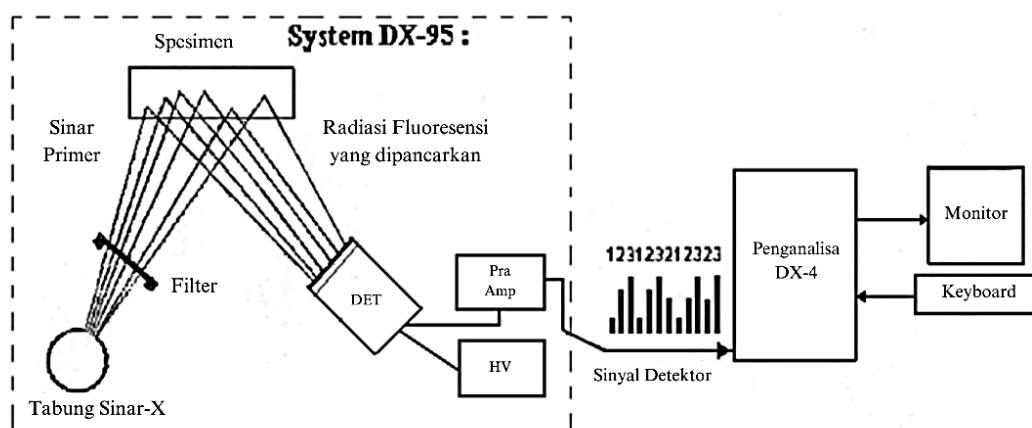
Pada penelitian ini digunakan bahan baku bentonit yang memerlukan purifikasi untuk mengurangi kadar logam pada bentonit. Metode purifikasi (*leaching*) merupakan metode sintesis dengan menggunakan prinsip transfer difusi

komponen terlarut dari padatan *inert* ke dalam pelarutnya sehingga dapat mengurangi kandungan unsur-unsur pengotor atau kadar logam. Pada penelitian yang dilakukan oleh Darwis dkk., (2017). Pasir kuarsa dapat dengan mudah untuk disintesis atau dimurnikan dalam larutan HCl apabila ukuran partikel pasir kuarsa berukuran nano atau serbuk. Purifikasi dilakukan untuk menghilangkan zat pengotor, terutama logam berat seperti besi dan magnesium, yang dapat mengganggu proses pembentukan zeolit, sehingga dihasilkan bentonit yang lebih murni. Penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Hamidi *et al.*, (2021) menggunakan metode purifikasi bentonit dengan perlakuan asam menunjukkan bahwa logam-logam tersebut dapat dihilangkan seperti penurunan kadar Fe_2O_3 dan MgO , dengan hasil peningkatan rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dari 5,1 menjadi 14,68. Hasil ini menunjukkan bahwa bentonit tersebut dapat dianggap sebagai sumber silika untuk sintesis zeolit.

2.8 Karakterisasi Bentonit, Zeolit, dan Analisis BCO

2.8.1 *X-Ray Fluorescence (XRF)*

XRF adalah perangkat yang digunakan untuk menganalisis unsur-unsur dalam suatu bahan baik secara kualitatif, dengan mengidentifikasi jenis unsur berdasarkan spektrum sinar-x karakteristik, maupun secara kuantitatif, dengan mengukur jumlah unsur dari tinggi puncak spektrum. Prinsip kerjanya melibatkan efek fotolistrik, di mana sinar-x berenergi tinggi menumbuk elektron atom dalam sampel. Ketika energi sinar-x melebihi energi ikat elektron, elektron keluar dari orbitnya, dan kekosongan ini diisi oleh elektron dari orbit luar yang melepaskan sinar-x. Sinar-x yang dihasilkan adalah gabungan spektrum kontinu dan energi tertentu, tergantung pada perpindahan elektron dalam atom (Jamaludin dan Adiantoro, 2012). Berikut bagian dan prinsip kerja dari XRF dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Bagian dan prinsip kerja dari XRF (Jamaludin dan Adiantoro, 2012).

Sinar-x karakteristik yang dihasilkan ditangkap oleh detektor Silikon Lithium (SiLi), yang berfungsi pada suhu di bawah -115°C menggunakan nitrogen cair untuk menjaga kinerjanya. Alat ini mampu mendeteksi unsur-unsur dengan energi sinar-x lebih dari 0,840 keV dan konsentrasi lebih dari 0,01%. Hasil analisis kualitatif ditunjukkan dalam bentuk spektrum yang menggambarkan komposisi unsur sesuai energi karakteristiknya, sementara hasil kuantitatif dihitung menggunakan metode perbandingan terhadap standar yang diketahui. XRF banyak digunakan dalam berbagai bidang untuk analisis unsur karena kemampuannya yang cepat dan akurat (Jamaludin dan Adiantoro, 2012).

Pada penelitian ini XRF digunakan untuk mengetahui komposisi dari bentonit yang akan digunakan untuk mensintesis zeolit-A. Contoh data analisis XRF dari bentonit berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Yuliana *et al.* (2023) dapat terlihat pada Tabel 1.

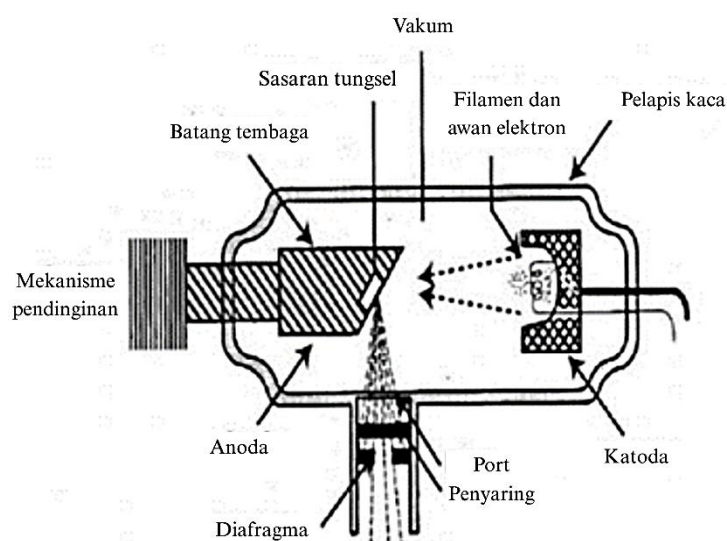
Tabel 1. Komponen kimia bentonit.

Bahan	Komponen kimia (wt %)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O
Bentonit	61.23	8.56	0.72	4.15	0.44	2.8	0.00

Sumber: Yuliana *et al.*, 2023.

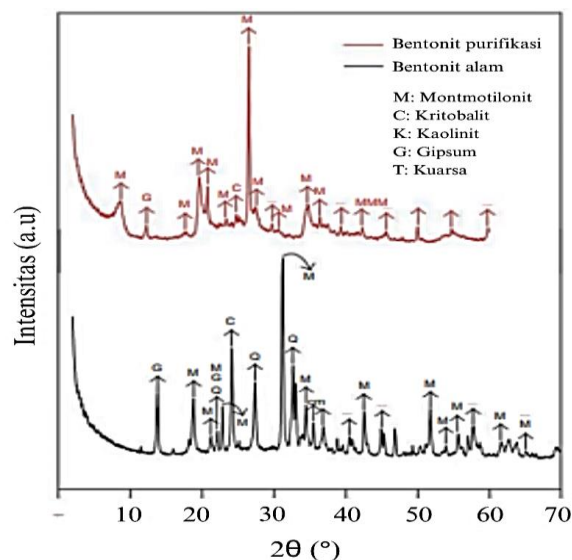
2.8.2 X-Ray Diffraction (XRD)

XRD merupakan teknik analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi material kristalin, baik secara kualitatif maupun kuantitatif, dengan memanfaatkan radiasi gelombang elektromagnetik sinar-X. XRD digunakan untuk mengetahui struktur kristal, fasa, orientasi kristal (tekstur), dan rincian lainnya seperti susunan atom, kehadiran cacat, ukuran butiran rata, kristalinitas, ketegangan, dan cacat kristal. Selain itu, XRD adalah metode yang tidak merusak dan sangat berguna untuk analisis komposisi fasa atau senyawa dalam material serta karakterisasi kristal secara mendalam (Alfarisa *et al.*, 2018; Hakim *et al.*, 2019). Prinsip dasar XRD adalah mendifraksi cahaya melalui celah kristal. Difraksi ini terjadi ketika panjang gelombang cahaya sebanding dengan jarak antar atom, sekitar 1 Å. Radiasi yang digunakan mencakup sinar-X, elektron, dan neutron. Sinar-X, yang merupakan foton energi tinggi dengan panjang gelombang 0,5-2,5 Å, berinteraksi dengan sampel, di mana sebagian radiasi diabsorpsi, ditransmisikan, dan dihamburkan. XRD mendeteksi hamburan yang terdifraksi. Berkas sinar-X yang dihamburkan bisa saling menghilangkan (interferensi destruktif) atau saling menguatkan (interferensi konstruktif), di mana berkas yang saling menguatkan disebut sebagai berkas difraksi (Islami, 2022). Berikut ini bagian dari alat XRD dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Bagian dan prinsip kerja dari XRD (Syamsudin dkk., 2023).

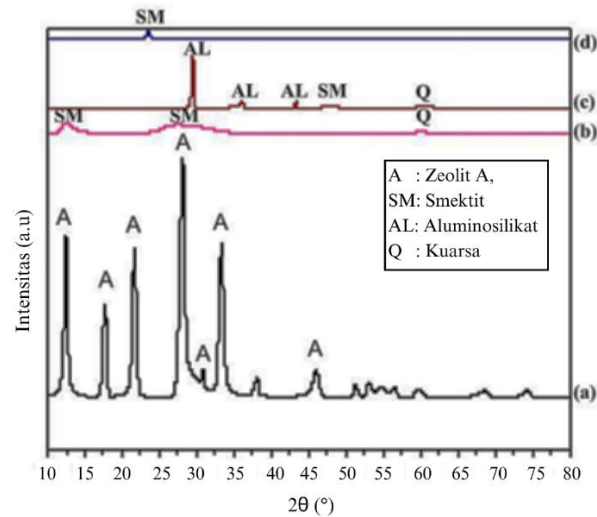
Pada penelitian ini XRD digunakan untuk mengetahui puncak difraktogram bentonit alam, bentonit purifikasi dan zeolit-A sintesis dari bentonit. Seperti pada penelitian oleh Al-Essa (2018), menunjukkan bahwa proses aktivasi bentonit menggunakan HCl berpotensi besar dalam menghilangkan zat berat ion logam dan senyawa fenolik sebagai polutan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Pola XRD bentonit alam dan bentonit purifikasi (Al-Essa, 2018).

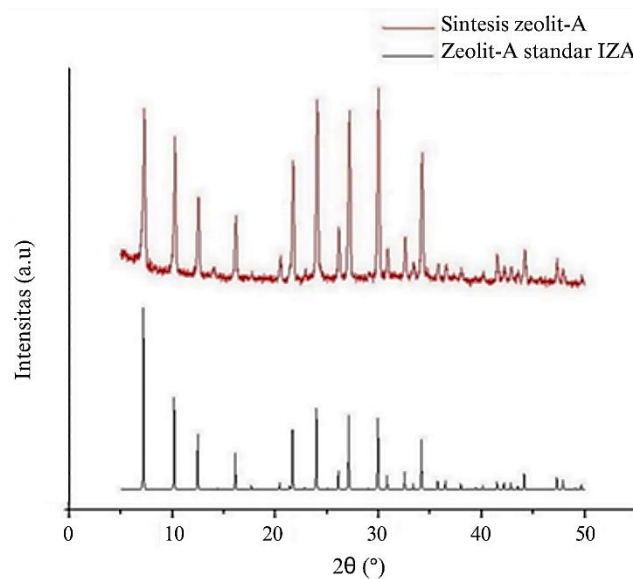
Berdasarkan Gambar 6 purifikasi bentonit menggunakan asam klorida (HCl) menyebabkan penurunan intensitas puncak difraksi, terutama pada puncak yang berkaitan dengan struktur montmorillonit. Hal ini menunjukkan terjadinya pengurangan kandungan montmorillonit dalam struktur bentonit. Selain itu, kandungan kuarsa yang sebelumnya teridentifikasi sebagai pengotor tampak menghilang setelah proses aktivasi. Penurunan intensitas dan pelebaran puncak pada sudut 2θ sebesar $24,1^\circ$ menunjukkan bahwa kristalinitas bentonit mengalami penurunan akibat perlakuan asam. Hal ini menandakan bahwa aktivasi asam tidak hanya mengurangi keteraturan struktur kristal, tetapi juga menyebabkan terbentuknya fase amorf dalam material.

Pada penelitian zeolit-A sintesis seperti yang dilakukan oleh (Srilai *et al.*, 2020) menunjukkan bahwa puncak difraktogram yang dihasilkan pada karakterisasi zeolit-A sintetis dari bentonit hidrotermal yang direaksikan dengan larutan NaOH, KOH, Na_2CO_3 , dan K_2CO_3 1 M dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Pola XRD zeolit-A hasil sintesis bentonit dengan 1 M larutan (a) NaOH, (b) KOH, (c) Na_2CO_3 , dan (d) K_2CO_3 (Srilai *et al.*, 2020).

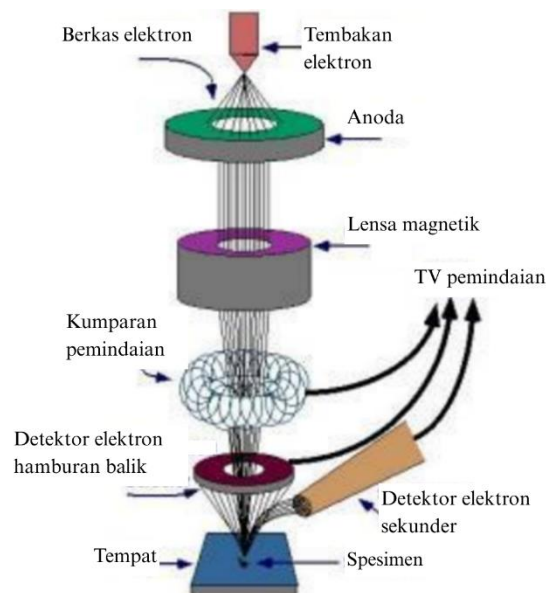
Penelitian yang dilakukan oleh Pandiangan *et al.* (2023) melaporkan bahwa difraktogram sampel yang disintesis menunjukkan puncak difraksi tajam, mengonfirmasi bahwa bahan tersebut bersifat kristal. Namun, fasa amorf juga terdeteksi, ditunjukkan oleh tonjolan kecil yang tersebar di rentang 2θ yang luas pada seluruh difraktogram. Untuk memverifikasi pembentukan zeolit-A, difraktogram sampel yang disintesis dibandingkan dengan standar zeolit-A dari database *International Zeolite Association* (IZA), seperti terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Difraktogram XRD zeolit-A hasil sintesis dan zeolit-A standar IZA (Pandiangan *et al.*, 2023).

2.8.3 Scanning Electron Microscope (SEM)

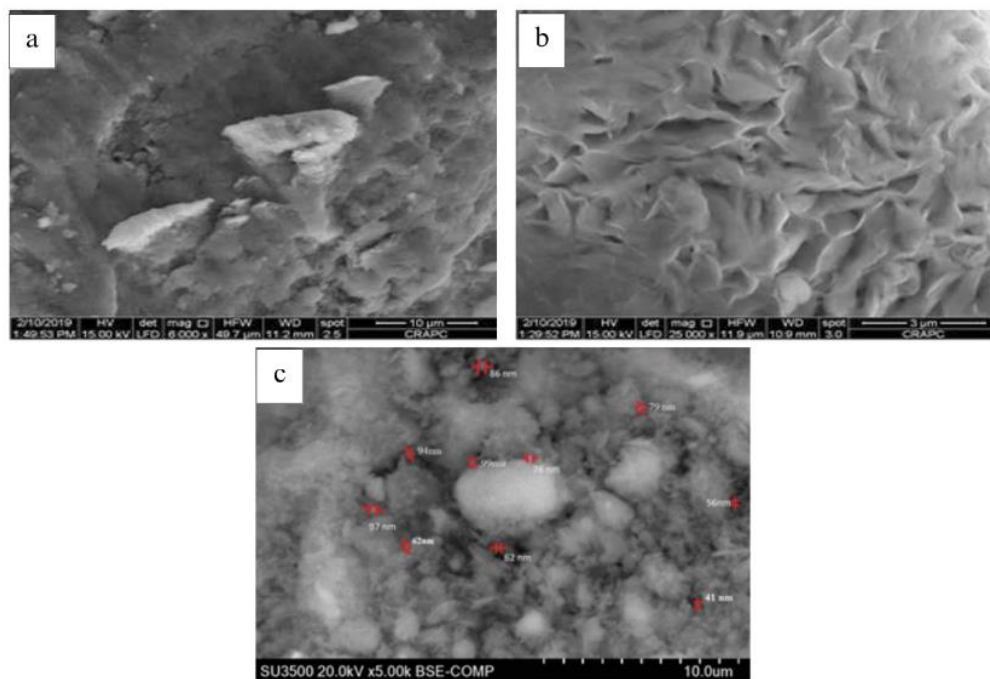
SEM merupakan salah satu alat yang populer untuk mengukur ketebalan dan ukuran butir suatu material. SEM adalah salah satu jenis mikroskop elektron yang menggunakan berkas elektron untuk menggambar profil permukaan atau morfologi suatu material. Prinsip kerjanya melibatkan penembakan berkas elektron berenergi tinggi ke permukaan benda, yang harus bersifat konduktif. Oleh karena itu, material non-konduktif perlu dilapisi dengan bahan konduktif terlebih dahulu sebelum dianalisis. Biasanya, material konduktif yang digunakan adalah emas (Au) atau campuran emas-paladium (Au-Pt) (Didik, 2020). Berikut bagian dan prinsip kerja dari SEM ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Bagian dan prinsip kerja dari SEM (Syamsudin dkk., 2023).

Sumber elektron dari filamen katoda ditembakkan menuju sampel dalam prinsip kerja SEM. Pancaran elektron diarahkan ke anoda untuk membatasi sudut hamburan, kemudian diteruskan ke lensa magnetik, di mana elektron difokuskan oleh lensa kondensor sebelum mencapai permukaan sampel. Setelah itu, *Backscattered Electron* (BSE) dan *Secondary Electron* (SE) dihasilkan, yang kemudian diperkuat oleh amplifier untuk menampilkan morfologi sampel pada monitor (Syamsudin dkk., 2023).

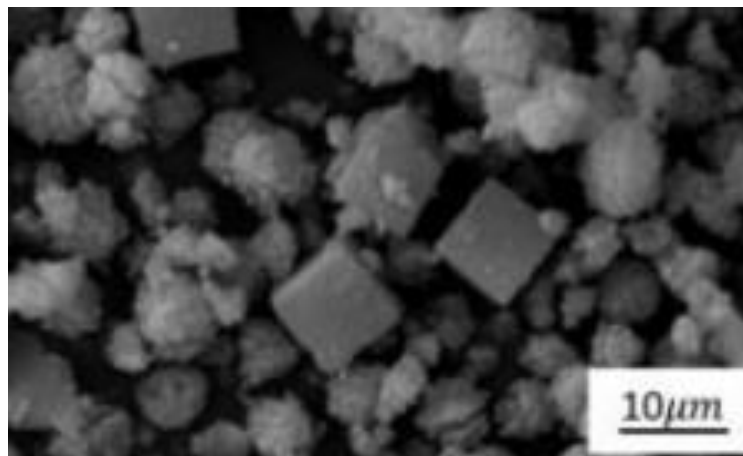
Pada penelitian ini SEM digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dari bentonit alam, bentonit hasil purifikasi, dan zeolit-A hasil sintesis. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Nabil *and* Malek (2021), menunjukkan bahwa bentonit alam memiliki morfologi dengan sudut tidak beraturan, serta terdapat proporsi partikel bulat berukuran besar dan asosiasi partikel melingkar berukuran kecil. Setelah dilakukan pemurnian menggunakan asam, morfologi permukaan mengalami perubahan yang signifikan. Permukaan bentonit hasil aktivasi menunjukkan keberadaan pori-pori makro yang tersusun dalam bentuk lembaran, yang merupakan ciri khas dari struktur natrium bentonit. Hasil ini berbeda dengan temuan dalam penelitian yang dilakukan oleh Sirait *et al.* (2017), di mana morfologi bentonit setelah proses perendaman dengan asam menunjukkan adanya aglomerasi atau penggumpalan. Hal tersebut diduga terjadi akibat interaksi dengan oksigen setelah proses purifikasi, yang berkontribusi terhadap peningkatan luas permukaan bentonit. Perubahan morfologi ini dapat diamati pada Gambar 10.



Gambar 10. Mikrograf bentonit (a) alam, (b) purifikasi (Nabil *and* Malek (2021), dan (c) aglomerasi setelah purifikasi (Sirait *et al.*, 2017).

Pada penelitian untuk zeolit-A sintesis seperti yang dilakukan oleh Srilai *et al.*, (2020) melakukan analisis SEM pada struktur zeolit-A dari bentonit. Hasil

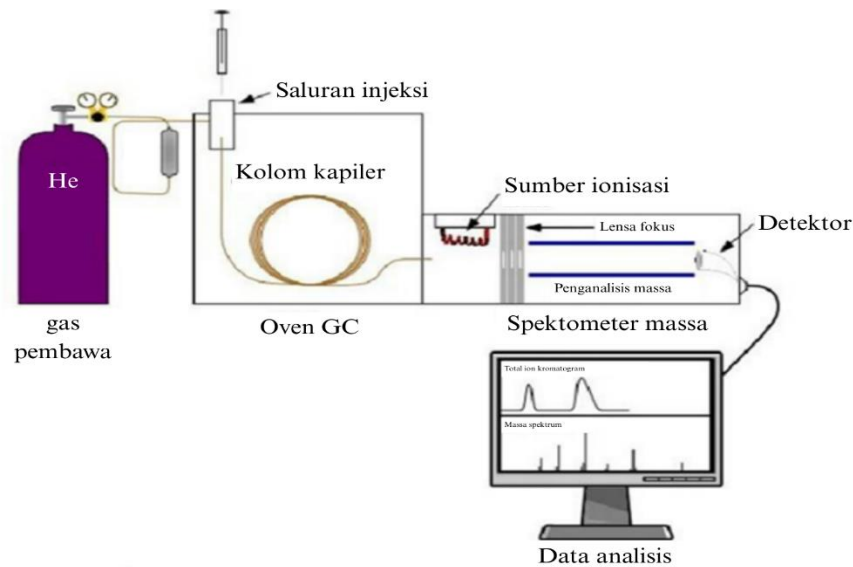
analisis menunjukkan bahwa mikrograf dari zeolit-A berbentuk kubus yang menandakan adanya fasa kristalin pada permukaan zeolit. Berikut ini hasil karakterisasi zeolit-A menggunakan SEM ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Hasil analisis SEM dari zeolit-A (Srilai *et al.*, 2020).

2.8.4 Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

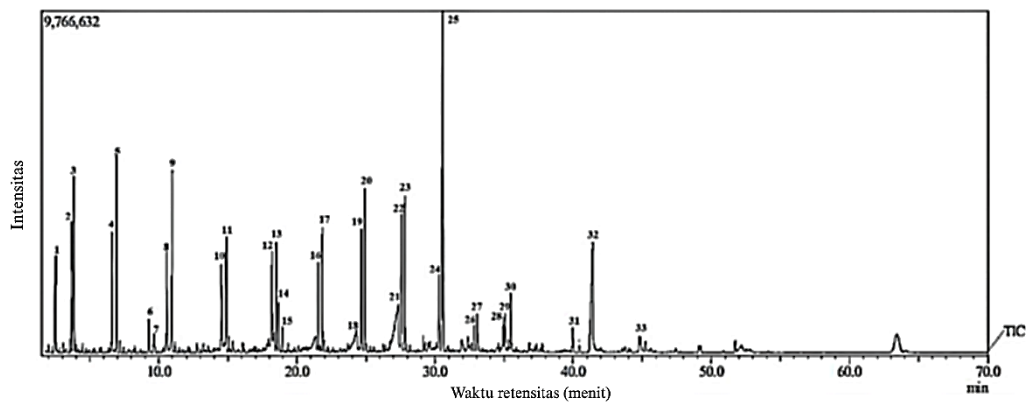
GC-MS adalah metode analisis yang menggabungkan gas kromatografi dan spektrometri massa untuk mendeteksi berbagai zat dalam sampel. GC-MS terdiri dari dua bagian utama: gas kromatografi dan spektrometer massa. Tujuan utama metode ini adalah mengidentifikasi zat dalam sampel dengan membandingkan konsentrasi relatif massa atom dari spektrum yang dihasilkan. Alat ini digunakan untuk menganalisis senyawa yang mudah atau semi mudah menguap. Sampel yang telah diuapkan disuntikkan ke sistem GC untuk dipisahkan dalam kolom berdasarkan polaritasnya. Setelah dipisahkan oleh GC, senyawa-senyawa tersebut masuk ke sistem MS untuk mengalami fragmentasi menggunakan energi ionisasi yang spesifik (Nadhief, 2023). Berikut ini bagian dan prinsip kerja dari GC-MS. ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Bagian dan prinsip kerja dari GC-MS (Margareta dan Wonorahardjo, 2023).

Prinsip kerja GC adalah memisahkan campuran menjadi zat-zat individu berdasarkan waktu retensi yang berbeda ketika dipanaskan. Gas pembawa, seperti helium, membawa campuran yang dipanaskan melalui kolom. Saat zat-zat terpisah keluar dari ujung kolom, mereka mengalir ke spektrometer massa (MS). MS mengidentifikasi senyawa berdasarkan massa molekulnya. Dalam GC-MS, molekul gas bermuatan dipisahkan berdasarkan massa dan beratnya. Sampel diubah menjadi ion bergerak, kemudian dipisahkan berdasarkan rasio massa terhadap muatan (m/e). Ionisasi menghasilkan fragmen-fragmen yang membentuk spektrum massa, yang menggambarkan distribusi relatif dari fragmen-fragmen ini berdasarkan rasio massa terhadap muatan (m/e) (Hotmian dkk., 2021). Pengujian menggunakan GC-MS dipengaruhi oleh beberapa faktor, terutama suhu injeksi, suhu kolom, dan suhu ion source. Suhu injeksi biasanya diatur 50 °C di atas suhu senyawa yang dianalisis. Suhu injeksi yang terlalu rendah mengurangi efisiensi, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat memecah sampel. Suhu injeksi mempengaruhi volatilitas sampel, di mana sampel dengan volatilitas tinggi dapat dianalisis pada suhu rendah, sedangkan suhu tinggi bisa menyebabkan komponen sampel terurai. (Margareta dan Wonorahardjo, 2023).

Pada penelitian ini, GC-MS digunakan untuk menganalisis senyawa-senyawa yang terkandung dalam BCO. Proses identifikasi dilakukan dengan membandingkan spektrum massa hasil analisis dengan data referensi dari pustaka spektrum GC-MS. Komposisi setiap senyawa ditentukan berdasarkan luas area puncak kromatogram, yang dinyatakan dalam satuan persentase relatif. Data tersebut kemudian digunakan untuk mengidentifikasi senyawa yang terdapat dalam sampel secara kualitatif dan semi-kuantitatif. Berikut ini hasil karakterisasi BCO menggunakan analisis GC-MS yang telah dilakukan oleh Simanjuntak *et al.*, (2024) dapat ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Kromatogram BCO yang dihasilkan (Simanjuntak *et al.*, 2024).

Gambar 13 menunjukkan kromatogram produk hasil pirolisis minyak kelapa sawit tanpa menggunakan katalis, yang memperlihatkan sebanyak 33 puncak. Hal ini mengindikasikan bahwa terdapat 33 komponen senyawa yang terkandung dalam BCO. Rincian senyawa yang teridentifikasi disajikan pada Tabel 2.

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

Nomor puncak.	Waktu retensi (min)	Similar indeks (%)	Nama komponen	Rumus molekul	Persen relatif (%)	Kategori
1	2,475	94	1-Heksena	C_6H_{12}	2,39	Hidrokarbon
2	3,694	97	1-Heksena	C_7H_{14}	2,17	Hidrokarbon
3	3,861	96	Heptana	C_7H_{16}	3,01	Hidrokarbon
4	6,605	96	1-Oktena	C_8H_{16}	2,89	Hidrokarbon
5	6,941	95	Oktena	C_8H_{18}	4,69	Hidrokarbon
6	9,279	96	Etilbenzena	C_8H_{10}	0,9	Hidrokarbon

Nomor puncak.	Waktu retensi (min)	Similar indeks (%)	Nama komponen	Rumus molekul	Persen relatif (%)	Kategori
7	9,645	94	Benzena	C ₈ H ₁₀	0,91	Hidrokarbon
8	10,598	96	1-Nonena	C ₉ H ₁₈	3,03	Hidrokarbon
9	10,967	96	Nonana	C ₉ H ₂₀	5,11	Hidrokarbon
10	14,552	98	1-Dekena	C ₁₀ H ₂₀	2,75	Hidrokarbon
11	14,89	96	Dekena	C ₁₀ H ₂₂	3,26	Hidrokarbon
12	18,202	96	1-Undekana	C ₁₁ H ₂₂	3,04	Hidrokarbon
13	18,505	96	Undekana	C ₁₁ H ₂₄	2,62	Hidrokarbon
14	18,66	95	2-Undekana	C ₁₁ H ₂₂	1,21	Hidrokarbon
15	21,351	85	Asam undesilat	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	0,92	Asam
16	21,551	95	1-Dodekena	C ₁₂ H ₂₄	2,25	Hidrokarbon
17	21,828	97	Dodekena	C ₁₂ H ₂₆	3,11	Hidrokarbon
18	24,292	86	Asam Dodekanoat	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	1,15	Asam
19	24,666	96	1-Tridesen	C ₁₃ H ₂₆	3,41	Hidrokarbon
20	24,921	97	Tridekana	C ₁₃ H ₂₈	4,43	Hidrokarbon
21	27,331	91	Asam Tetradekanoat	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	7,35	Asam
22	27,573	98	1-Tetradesena	C ₁₄ H ₂₈	3,94	Hidrokarbon
23	27,803	97	Tetradesena	C ₁₄ H ₃₀	4,17	Hidrokarbon
24	30,293	97	1-Pentadesen	C ₁₅ H ₃₀	2,25	Hidrokarbon
25	30,553	97	Pentadesen	C ₁₅ H ₃₂	12,25	Hidrokarbon
26	32,856	98	1-Heksadesena	C ₁₆ H ₃₂	0,8	Hidrokarbon
27	33,043	96	Heksadesena	C ₁₆ H ₃₄	1,21	Hidrokarbon
28	34,935	93	1-Heptadekena	C ₁₇ H ₃₄	1,31	Hidrokarbon
29	35,075	97	8-Heptadekena	C ₁₇ H ₃₄	1,33	Hidrokarbon
30	35,475	96	Heptadekena	C ₁₇ H ₃₆	1,79	Hidrokarbon
31	39,979	94	2-Heptadecanone	C ₁₇ H ₃₄ O	0,84	Ketone
32	41,405	92	Asam Oktadekanoat	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	8,19	Asam
33	44,788	93	Asam Oleat	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	1,32	Asam

Sumber: Simanjuntak *et al.*, 2024.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan pada bulan Oktober 2024 hingga Maret 2025 di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Karakterisasi bentonit alam dan purifikasi menggunakan XRF yang dilaksanakan di Laboratorium Instrumen Kimia, Universitas Negeri Padang (UNP). Karakterisasi fasa bentonit alam, bentonit purifikasi, dan zeolit-A menggunakan XRD yang dilaksanakan di Laboratorium Instrumen Kimia, Universitas Negeri Padang (UNP). Dan analisis morfologi permukaan bentonit alam, bentonit purifikasi, dan katalis zeolit-A menggunakan SEM dilaksanakan di Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (LTSIT) FMIPA, Universitas Lampung. Karakterisasi untuk mengidentifikasi senyawa kimia produk hasil pirolisis menggunakan GC-MS dilaksanakan di Laboratorium Kimia, Universitas Gadjah Mada (UGM).

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah; seperangkat alat pirolisis, *hot plate*, oven, *magnetic stirrer*, autoklaf, corong pisah, *furnace*, termometer, saringan mesh ukuran 300 nm, cawan porselen, mortar dan alu, batang pengaduk, gunting, wadah plastik tahan panas, neraca analitik, gelas beaker, spatula, Erlenmeyer, gelas ukur, botol *vial*, *Scanning Electron Microscope* (SEM) ZEISS EVO® MA 10, *X-Ray Fluorescence* (XRF) PANALytical Epsilon 3

X-Ray Diffraction (XRD) PANalytical tipe X'Pert Pro 3040/60, dan *Gas Chromatography-Mass Spectroscopy* (GC-MS) tipe QP2010S SHIMADZU

Adapun bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah; bentonit, HCl 1 M, NaOH_(pa), *aluminium foil food grade*, minyak kelapa sawit (curah), akuades, indikator pH, kertas TBA, dan kertas saring.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Preparasi bentonit

Bentonit yang digunakan berasal dari toko komersial melalui situs online. Sebelum pemakaian, menggerus bentonit terlebih dahulu agar tidak ada komponen yang menggumpal. Selanjutnya, menyaring bentonit halus menggunakan mesh 300 nm dan pindahkan ke wadah bersih.

3.3.2 Purifikasi bentonit

Proses purifikasi dilakukan untuk menghilangkan zat pengotor, terutama logam berat seperti besi dan magnesium, yang dapat mengganggu pembentukan zeolit, sehingga bentonit menjadi lebih murni. Lakukan purifikasi dengan merendam bentonit dalam larutan HCl 1 M menggunakan Erlenmeyer, dengan perbandingan bentonit: HCl (1:5), kemudian aduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 24 jam untuk melarutkan logam secara perlahan. Setelah itu, mencuci bentonit menggunakan akuades hingga pH netral dan saring menggunakan kertas saring, guna menghilangkan sisa asam. Bentonit dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C selama 8 jam.

3.3.3 Karakterisasi Bentonit

Karakterisasi bentonit sebelum dan sesudah purifikasi menggunakan analisis 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 oksida logam atau unsur lain. Kemudian dikarakterisasi menggunakan analisis XRD untuk menentukan komposisi fasa kristalin, setelah itu dikarakterisasi menggunakan SEM untuk melihat morfologi permukaan.

3.3.4 Modifikasi bentonit menjadi zeolit-A

Modifikasi bentonit menjadi zeolit-A diawali dengan menyiapkan larutan $\text{NaOH}_{(\text{pa})}$ 2 mol dengan melarutkan 43,01 g NaOH dengan 250 mL akuades. Memasukkan larutan NaOH ke gelas beaker kemudian homogenkan dengan *stirrer*. Setelah itu menambahkan aluminium foil yang sudah digunting kecil sebanyak 21,78 g secara perlahan hingga seluruh aluminium foil habis. Setelah seluruh aluminium foil larut, menambahkan 50 g bentonit yang sudah diayak. Kemudian, memasukkan sampel ke dalam autoklaf dan *aging* selama 24 jam. Selanjutnya kristalisasi sampel dalam oven selama 72, 96, dan 120 jam dengan suhu 100 °C. Setelahnya lakukan penghalusan sampel zeolit-A dengan mortar dan pengayakan dengan saringan mesh ukuran 300 nm. Kemudian kalsinasi pada suhu 600 °C selama 8 jam. Untuk membuktikan hasil yang diperoleh itu sesuai dengan yang diinginkan, maka zeolit-A perlu dilakukan karakterisasi dengan SEM dan XRD.

3.3.5 Karakterisasi zeolit-A hasil modifikasi

Zeolit-A hasil sintesis dilakukan karakterisasi menggunakan analisis XRD dan SEM untuk melihat kemurnian pada zeolit yang terbentuk.

3.3.5.1 X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi dengan XRD dilakukan untuk menganalisis pengaruh suhu kalsinasi terhadap struktur kristalografi sampel katalis zeolit-A, apakah bersifat amorf atau kristalin. Data difraktogram memberikan informasi mengenai struktur ataupun fasa berdasarkan letak sudut 2θ . Difraktometer yang digunakan yaitu PANalytical tipe X'Pert Pro 3040/60. Pola XRD dihasilkan setelah pemindaian radiasi Cu-K α ($\lambda = 0,154 \text{ \AA}$) dengan energi 40 kV dan arus 30 mA. Pola direkam pada sudut (2θ) dengan rentang 10-100 ° dengan langkah scan 0,02 °. Kemudian dilakukan perbandingan dengan standar yang telah ditetapkan oleh *International Zeolite Association* (IZA). Pola difraktogram yang diperoleh selanjutnya dianalisis secara kualitatif menggunakan aplikasi Match! untuk mengidentifikasi fasa kristalin sampel.

3.3.5.2 Scanning Electron Microscope (SEM)

Karakterisasi menggunakan SEM bertujuan untuk memberikan informasi tentang morfologi permukaan sampel. Alat SEM yang digunakan yaitu ZEISS EVO® MA 10, yang dioperasikan pada 8 kV dengan tegangan percepatan elektron 20 kV. Katalis hasil sintesis dipindai pada perbesaran 1.000; 5.000; 10.000x, dan 15.000x untuk mendapatkan tampilan permukaan yang lebih baik.

3.3.6 Preparasi minyak kelapa sawit

Sebelum uji katalitik zeolit-A hasil modifikasi bentonit, preparasi minyak kelapa sawit (curah) melalui pemanasan dengan variasi waktu 0, 10, 20, 30, dan 40 menit, untuk mengurangi viskositas serta kandungan air, meningkatkan reaksi pirolisis, dan menghilangkan zat pengotor saat proses pirolisis berlangsung.

3.3.7 Uji katalitik zeolit-A hasil modifikasi bentonit pada pirolisis minyak kelapa sawit

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan alat pirolisis dengan reaktor bagian dalam berbahan stainless steel dan bagian luar berbahan besi. Reaktor ini dilengkapi dengan pemanas yang menggunakan gas untuk membuat biohidrokarbon dan dihubungkan dengan kondensor untuk mendinginkan asap yang menghasilkan asap cair. Campurkan minyak kelapa sawit sebanyak 200 mL dengan 10 g zeolit-A hasil kalsinasi dan 10 g *heat exchanger*, kemudian masukkan ke dalam reaktor pirolisis. Panaskan reaktor selama 1 jam dan cairan hasil pirolisis ditampung dalam wadah. Pirolisis hingga tidak ada lagi *liquid fuel* yang keluar dari selang pirolisis. Pisahkan produk cair yang dihasilkan dari proses pirolisis antara fasa organik (bahan bakar cair) dan fasa air selama 24 jam. Fasa organik yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan GC-MS.

3.3.8 Karakterisasi *Bio Crude Oil* (BCO) menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS)

Karakterisasi bahan bakar cair dilakukan dengan menggunakan GC-MS tipe QP2010S Shimadzu untuk mengidentifikasi komponen dalam sampel dengan kolom tipe Rtx 5 (panjang 30 m; ID 0,25 mm; ketebalan film: 0,25 m; gas pembawa: Helium; EI 70 Ev). Suhu injektor adalah 300 °C dengan mode split, suhu detektor adalah 250 °C, suhu kolom oven adalah 40 °C, laju alir pada tekanan 12,9 kPa dan aliran total 34,5 mL.min⁻¹. Standar yang digunakan untuk karakterisasi bahan bakar cair adalah dengan menggunakan standar GC-MS.. Analisis ini dilakukan untuk mengidentifikasi komponen dalam sampel dan secara khusus untuk melihat apakah senyawa-senyawa dalam sampel mampu diubah menjadi hidrokarbon.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Purifikasi bentonit berhasil dilakukan menggunakan HCl 1 M, yang ditandai dengan penurunan kadar logam besi (Fe).
2. Zeolit-A hasil modifikasi bentonit dan aluminium foil *food grade* dengan menggunakan metode hidrotermal 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 21,2% dan menunjukkan kemiripan pada posisi 2θ dengan perbandingan menggunakan standar IZA.
4. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa morfologi kristalin berbentuk kubus mulai terbentuk, namun belum sepenuhnya sempurna karena masih teridentifikasi keberadaan fasa sodalit dan amorf.
5. Pra-perlakuan pemanasan minyak kelapa sawit selama 20 menit menjadi waktu yang optimal untuk proses pirolisis dibandingkan tanpa pra-perlakuan pemanasan.
6. Hasil analisis BCO dari minyak kelapa sawit yang terbaik dihasilkan dengan menggunakan katalis zeolit-A dengan pra-perlakuan pemanasan 20 menit menghasilkan kandungan hidrokarbon sebesar 68,96 %, asam 25,13%, keton 3,22%, ester 0,81% dan alkohol 1,88%.

5.2 Saran

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

1. Melakukan pengembangan metode lanjutan untuk mensintesis zeolit-A baik dari segi aktivasi bahan baku.
2. Melakukan pra-perlakuan yang lain pada bahan baku untuk mendapatkan persentase hidrokarbon yang lebih optimal pada proses pirolisis.
3. BCO yang dihasilkan masih mengandung senyawa asam, keton, ester, dan alkohol yang relatif tinggi, sehingga disarankan melakukan *upgrading* untuk menghilangkan senyawa volatil yang terkandung dalam BCO.

DAFTAR PUSTAKA

- Afriansyah, H., Ramlan, M. R., Roulina T, M., Bow, Y., and Fatria. (2022). Pyrolysis of Lubricant Waste into Liquid Fuel using Zeolite Catalyst. *International Journal of Research in Vocational Studies*. 1(4): 26–31.
- Al-Essa, K. (2018). Activation of Jordanian Bentonite by Hydrochloric Acid and Its Potential for Olive Mill Wastewater Enhanced Treatment. *Journal of Chemistry*. 2018: 1-10.
- Alfarisa, S., Rifai, D. A., dan Toruan, P. L. (2018). Studi Difraksi Sinar-X Struktur Nano Seng Oksida (ZnO). *Risalah Fisika*. 2(2): 53–57.
- Ali, G., Afraz, M., Muhammad, F., Nisar, J., Shah, A., Munir, S., and Tasleem Hussain, S. (2023). Production of Fuel Range Hydrocarbons from Pyrolysis of Lignin over Zeolite Y, Hydrogen. *Energies*. 16(1): 1–14.
- Annisah, A., Bahar, Y., dan Husni, A. (2021). Pengolahan Bentonit Bekas sebagai Adsorben pada Proses Penurunan Kadar FFA dan Warna Minyak Jelantah. *Jurnal Teknik Kimia*. 27(1): 29–37.
- 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.
- Aziz, I., Saridewi, N., Febriyani, F., dan Adhani, L. (2023). Deoksigenasi Katalitik Metil Ester Asam Lemak Menjadi Biohidrokarbon Menggunakan Katalis $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Zeolit}$. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*. 19(2): 170-176.
- Bamboriya, O. P., Singh Thakur, L., Parmar, H., Kumar Varma, A., 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.

- 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 Komersial. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*. 18(2): 174–182.
- Bukit, F. R. A., Frida, E., Bukit, N., dan Bukit, B. F. (2021). Karakterisasi dan Analisis Bentonit Alam sebagai Bahan Pengisi Komposit. *Juitech*. 5(2): 54–62.
- Cahyo, N., Sitanggang, R. B., Simareme, A. A., and Paryanto, P. (2023). Impact of Crude Palm Oil on Engine Performance, Emission Product, Deposit Formation, and Lubricating Oil Degradation Of Low-Speed Diesel Engine: An experimental study. *Results in Engineering*. 18(101156): 1-8.
- Darwis, D., Khaeroni, R., dan Iqbal, I. (2017). Pemurnian dan Karakterisasi Silika Menggunakan Metode Purifikasi (Leaching) dengan Variasi Waktu Milling pada Pasir Kuarsa Desa Pasir Putih Kecamatan Pamona Selatan Kabupaten Poso. *Natural Science: Journal of Science and Technology*. 6(2): 187–193.
- Derbe, T., Temesgen, S., and Bitew, M. (2021). A Short Review on Synthesis, Characterization, and Applications of Zeolites. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021: 1-17.
- Didik, L. A. (2020). Penentuan Ukuran Butir Kristal $\text{CuCr}_{0,98}\text{Ni}_{0,02}\text{O}_2$ dengan Menggunakan X-ray Dirfraction (XRD) dan Scanning Electron Microscope (SEM). *Indonesian Physical Review*. 3(1): 6–14.
- Fadhillah, G. N. dan Sari, D. A. (2023). Produksi Biodiesel yang Berbahan Baku Kelapa Sawit dengan Melibatkan Katalis Homogen dan Heterogen. *Pena: Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi*. 37(2): 87-94.
- Fahmy, T. Y. A., Fahmy, Y., Mobarak, F., El-Sakhawy, M., and Abou-Zeid, R. E. (2020). Biomass Pyrolysis: Past, Present, and Future. *Environment, Development and Sustainability*. 22(1): 17–32.
- Febriyanti, T. D., Simanjuntak, W., and Pandiangan, K. D. (2021). Pyrolytic Conversion of Palm Oil Into Liquid Fuel Using Protonated Zeolite-X Prepared from Rice Husk Silica and Aluminum Foil as Catalyst. *Journal of Physics: Conference Series*. 1751(1): 1-9.
- Ginting, S. B., Arya Perdana, G., Darmansyah, D., Agustina Iryani, D., dan Wardono, H. (2019). Pengaruh Waktu Aging pada Sintesis Zeolit Linde Type-A (LTA) dari Zeolit Alam Lampung (ZAL) dengan Metode Step Change Temperature of Hydrothermal. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 14(1): 1–11.

- Ginting, S. B. dan Nurfiqih, M. Y. (2018). Sintesis Zeolit A Dari Coal Bottom Ash dengan Metode Step Change of Synthesis Temperature dengan Variasi Suhu Kalsinasi Diaplikasikan untuk Dehidrasi Etanol. *Mechanical*. 9(1): 7-15.
- Hakim, L., Dirgantara, M., dan Nawir, M. (2019). Karakterisasi Struktur Material Pasir Bongkahan Galian Golongan C dengan Menggunakan X-Ray Diffraction (X-RD) di Kota Palang. *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.
- Hanief, S., Surya Pradana, Y., Prasakti, L., and Budiman, A. (2022). Effect of Catalyst Addition on Hydrothermal Liquefaction Process from Microalgae *Botryococcus Braunii* To Bio-Crude Oil. *REPROKIMIA*. 1(1) 42–49.
- Harlianingtyas, I., Sugiyarto, Triwiarto, C., dan Supriyadi. (2023). Pembuatan Asap Cair, Biochar, dan Arang Aktif dengan Alat Pirolisis Detachable pada Rintisan Teaching Factory Pembibitan Politeknik Negeri Jember. *Agrimas: Jurnal Pengabdian Masyarakat Bidang Pertanian*. 2(2): 97–104.
- Hotmian, E., Suoth, E., Fatimawali, F., dan Tallei, T. (2021). Analisis GC-MS (Gas Chromatography - Mass Spectrometry) Ekstrak Metanol dari Umbi Rumput Teki (*Cyperus Rotundus* L.) Methanolic Extract. *Pharmacon : Jurnal Farmasi Indonesia*. 10(2): 849-856.
- Ikhtiyarova, G. A., Özcan, A. S., Gök, Ö., and Özcan, A. (2012). Characterization of Natural- and Organobentonite by XRD, SEM, FT-IR and Thermal Analysis Techniques and its Adsorption Behaviour in Aqueous Solutions. *Clay Minerals*. 47(1): 31–44.
- 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.
- Islami, A. P. (2022). Upgrading Bio-Crude Oil Hasil Pirolisis Minyak Kelapa Sawit menjadi Biogasoline Menggunakan Zeolit-Y Terprotonasi sebagai Katalis. *Skripsi*. Universitas Lampung
- IZA (International Zeolite Association). 2017.
<http://www.izastructure.org/databases/>. Diakses pada 03 Oktober 2024
- Jamaludin, A. dan Adiantoro, D. (2012). Analisis Kerusakan X-Ray Fluoresence (XRF). *Batan*. 5(9–10): 19–28.

- Król, M. (2020). Natural vs. Synthetic zeolites. *Crystals*. 10(7): 1–8.
- Kurniawidi, D. W., Alaa, S., Mulyani, S., dan Rahayu, S. (2021). Sintesis Zeolit dari Batu Apung (Pumice) Daerah Ijobalit Lombok Timur sebagai Adsorben Logam Fe. *ORBITA: Jurnal Pendidikan Dan Ilmu Fisika*. 7(2): 313-317.
- Kusniawati, E., Anggraini, I. F., dan Saputra, R. (2021). Analisis Karakteristik Katalis Pertamina untuk Proses Hydrotreating Kerosin Menjadi Avtur. *Jurnal Teknik Patra Akademika*. 12(01): 4–12 .
- Liu, B., Sun, H., Peng, T., and He, Q. (2018). One-Step Synthesis of Hydroxysodalite Using Natural Bentonite at Moderate Temperatures. *Minerals*. 8(11): 1-14.
- Majid, Z. A. N. M., Rahmawati, L., and Riyani, C. (2022). Identification of Bio-Oil Chemical Compounds from Pyrolysis Process of Oil Palm Empty Fruit Bunches. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1063(1): 1-5.
- Margareta, M. A. H. dan Wonorahardjo, S. (2023). Optimasi Metode Penetapan Senyawa Eugenol dalam Minyak Cengkeh Menggunakan Gas Chromatography – Mass Spectrum dengan Variasi Suhu Injeksi. *Jurnal Sains Dan Edukasi Sains*. 6(2): 95–103.
- Moshoeshoe, M., Nadiye-Tabbiruka, M. S., and Obuseng, V. 2017. A Review of the Chemistry, Structure, Properties and Applications of Zeolites. *American Journal of Materials Science*. 7(5): 196–221.
- Mulyati, T. A., Pujiono, F. E., dan Lukis, P. A. (2015). Pengaruh Lama Pemanasan Terhadap Kualitas Minyak Goreng Kemasan Kelapa Sawit. *Jurnal Wiyata*. 2(2): 162–168.
- Nabil, B. and Malek, O. H. (2021). Characterization and Purification of Algerian Natural Bentonite for Pharmaceutical and Cosmetic Applications. *BMC Chemistry*. 15(1): 1–11.
- Nadhief, M. A. (2023). Optimasi Waktu Konversi Metil Ester dari Minyak Kelapa (Cocos Nucifera L.) Menjadi Senyawa Nitrogen Menggunakan Autoclave dan Aplikasinya sebagai Inhibitor Korosi Baja Lunak. *Skrispi*. Universitas Lampung.
- Nasir, S., Chrisya Andira, S., and Dona, V. (2020). Utilizing Adsorption Bentonit and Hybrid UF-RO in Processing Liquid Waste of Pulp Industry. *Journal of Innovation and Technology*. 1(1): 17–22..
- Nofendri, Y. dan Haryanto, A. (2021). Perancangan Alat Pirolisis Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar. *Jurnal Kajian Teknik Mesin*. 6(1): 1–11.

- 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., Hadi, S., Ilim, I., Alista, D. I., and Sinaga, D. A. 2023. Study on the Reaction Parameters on Transesterification of Rubber Seed Oil Using MgO/zeolite-A Catalyst. *Trends in Sciences*. 20(8): 1-14.
- Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Avista, D., Arinanda, A. G., Hadi, S., and 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): 1-11.
- Putri, A. N. R., Fadlilah, I., dan Prasadi, O. (2024). Pemanfaatan Zeolit-A sebagai Adsorben Logam Berat Kromium Total (Cr) pada Limbah Cair Sisa Analisis Chemical Oxygen Demand (COD). *Ruwa Jurai: Jurnal Kesehatan Lingkungan*. 18(1): 33–40.
- Rafika, C. (2023). Pengaruh Suhu Kalsinasi Terhadap Aktivitas CaO/SiO₂ dengan Komposisi Massa 1:10 sebagai Katalis Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit. *Skripsi*. Universitas Lampung.
- Rahardja, I. B., Sukarman, dan Ramadhan, A. I. (2019). Analisis Kalori Biodiesel Crude Palm Oil (CPO) dengan Katalis Abu Tandan Kosong Kelapa Sawit (ATKKS). 1–12.
- Sahrum, R. P., Syaiful, A. Z., dan Al-Gazali. (2021). Uji Kualitas Asap Cair Tempurung Kelapa dan Serbuk Gergaji Kayu Metode Pirolisis. *Saintis*. 2(2). 72–78.
- Saputra, H., Siregar, A. L., Oktavia, R. Y., dan Simatupang, D. F. (2023). Sintesis Biooil dari Limbah Pelepah Kelapa Sawit Berbasis Metode Pirolisis. *REACTOR: Journal of Research on Chemistry and Engineering*. 4(1): 12-18.
- Saragih, M. A., Hasibuan, M. I., Simangunsong, L., Pulungan, A. N., and Sihombing, J. L. (2023). Hydrodeoxygenation of Castor Oil as an Alternative Source of Biohydrocarbon Using Nickel Catalyst Loaded on HZSM-5 Zeolite. *Elkawanie*. 8(2). 1-3.
- Sari, D. A. P., Nikmah, M., and Sasongko, N. A. (2023). Life Cycle Assessment in the Production Process of Crude Palm Oil (CPO) on Palm Oil Plantation and Mills. *International Journal of GEOMATE*. 25(111). 177–184.

- Hanipa, P., Pardoyo, Taslimah, Arnelli, dan Astuti, Y. (2017). Pengaruh Variasi Waktu Hidrotermal terhadap Sintesis dan Karakterisasi Nanokristal Zeolit A dari Abu Sekam Padi. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 20(1): 79–83.
- Setyaningsih, D., Siagian, C. A., Muna, N., and Purwoko. (2022). Synthesis of Bio Hydrocarbon from Palm Olein through Pyrolysis at Various Temperature. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1034(1). 1-8.
- Silalahi, D., Supeno, M., and Taufik, M. (2021). Conversion of Palm Oil (CPO) into Fuel Biogasoline through Thermal Cracking Using a Catalyst Based Na-Bentonite and Limestone of Soil Limestone NTT. 1–11.
- Simanjuntak, W., Delilawati Pandiangan, K., Sembiring, Z., and Simanjuntak, A. (2019). Liquid Fuel Production by Zeolite-A Catalyzed Pyrolysis of Mixed Cassava Solid Waste and Rubber Seed Oil. *Oriental Journal of Chemistry*. 35(1): 71–76.
- Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Febriyanti, T. D., Islami, A. P., Hadi, S., and Ilim, I. (2024). Catalytic Upgrading of Palm Oil Derived Bio-Crude Oil for Bio-Hydrocarbon Enrichment Using Protonated Zeolite-Y As Catalyst. *AIMS Energy*. 12(3). 600–616.
- Sirait, M., Bukit, N., and Siregar, N. (2017). Preparation and Characterization of Natural Bentonite in to Nanoparticles by Co-Precipitation Method. *AIP Conference Proceedings*. 1801: 1-5.
- Solikhah, M. D., Prismantoko, A., Prawitasari, A., Barus, B. R., dan Kismanto, A. (2022). Perancangan Reaktor untuk Produksi Biodiesel Generasi 2 dari Biomasa Sawit. *Jurnal Teknologi*. 14(2): 197–212.
- Srilai, S., Tanwongwan, W., Onpecth, K., Wongkitikun, T., Panpiemrasda, K., Panomsuwan, G., and Eiad-Ua, A. (2020). Synthesis Of Zeolite A from Bentonite Via Hydrothermal Method: The Case of Different Base Solution. *AIP Conference Proceedings*. 2279: 1-7
- Syafrianti, A., Lubis, Z., and Elisabeth, J. (2021). Study of Crude Palm Oil (CPO) Handling and Storage Process in Palm Oil Mills in an Effort to Improve CPO Quality and Reduce the Risk of Contaminants Formation. *Journal of Food and Pharmaceutical Sciences*. 9(2): 461–470.
- Syamsudin, F. I., Rahmawati, F., Indrowati, M., Suryana, R., and Saputro, S. (2023). Kajian Pustaka Aplikasi Nanopartikel Melalui Metode Sol-Gel sebagai Fotoanoda pada Dye Sensitized Solar Cell (DSSC). *Jurnal Fisika : Fisika Sains Dan Aplikasinya*. 8(2): 9–16.

- Tampubolon, Y. T. R. (2021). Pengaruh Suhu Kalsinasi Zeolit-X Terhadap Karakteristik Liquid Fuel Hasil Pirolisis Minyak Kelapa Sawit. *Skripsi*. Universitas Lampung.
- 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.
- Ulfa, S. N. S. dan Samik, S. (2023). Artikel Review: Pemanfaatan Katalis Zeolit Alam Teraktivasi dalam Sintesis Biodiesel dengan Metode Esterifikasi dan Transesterifikasi. *Unesa Journal of Chemistry*. 11(3): 165–181.
- Vegere, K., Kravcevic, R., Krauklis, A. E., and Juhna, T. (2020). Comparative Study of Hydrothermal Synthesis Routes of Zeolite A. *Materials Today: Proceedings*. 33: 1-5.
- Waly, N. A., Patuwan, S. Z., Amin, Z., and Arshad S. E. (2023). Hydrothermal Synthesis of Zeolite A Utilizing Commercial Bentonite Clay as the Si/Al Source. *Transactions on Science and Technology*. 10(1): 8–13.
- Xu, H., Lee, U., and Wang, M. (2020). Life-Cycle Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Palm Fatty Acid Distillate Derived Renewable Diesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 134: 1-17.
- Yanita, M., Napitupulu, D. M., & Rahmah, K. (2020). Analysis of Factors Affecting the Competitiveness of Indonesian Crude Palm Oil (CPO) Export in the Global Market. *Indonesian Journal of Agricultural Research*. 2(3): 97–110.
- Yuliana, A., Mohadi, R., Arsyad, F. S., and Safaruddin, S. (2023). Comparison of Bentonite Characteristics Before and After be Used as Coagulan of Liquid Tofu Waste. *International Journal of Social Service and Research*. 3(2): 411–417.
- Yuningsih, L. M., Anwar, D. I., dan Arizal, N. L. (2016). Characterization of Liquid Smoke from Corn Husk Waste by Pyrolysis and Distillation Method. *Inovasi Teknik Kimia*. 10(1): 12–21.
- Zhang, Y., He, Y., Zhang, K., Chen, Y., and Ye, W. (2021). Montmorillonite Alteration and its Influence on Sr (II) Adsorption on GMZ Bentonite. *Environmental Earth Sciences*. 80(24): 1–12.