

**SINTESIS ZEOLIT-A DARI SILIKA BATU APUNG DAN ALUMINIUM
FOIL *FOOD GRADE* SERTA APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS
PIROLISIS MINYAK KELAPA**

(Skripsi)

Oleh

**ZAHRA LUTHFIYAH
NPM 1917011084**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRACT

SYNTHESIS OF ZEOLIT-A FROM PUMICE SILICA AND FOOD GRADE ALUMINIUM FOIL AND ITS APPLICATION AS A CATALYST PYROLYSIS OF COCONUT OIL

By

ZAHRA LUTHFIYAH

In this research, the synthesis of zeolite-A from pumice silica and food grade aluminum foil was carried out with various concentrations, namely 3.72, 2.79, 2.23, 1.86, and 1.30 M, as their utilization for bio upgrading catalysts. -crude oil (BCO) from pyrolysis of coconut oil to produce biogasoline. Zeolite-A was characterized using X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) instruments. Characterization by XRD showed that zeolite-A at a concentration of 1.30 M was successfully synthesized and showed the presence of crystalline and amorphous in zeolite-A. SEM characterization identified a morphology characterized by the presence of cuboidal particles. The catalytic activity test was carried out by pyrolysis of bio-crude oil (BCO) from coconut oil pyrolysis which was identified by GCMS. Pyrolysis experiments showed that there was an effect of the type of zeolite on the composition of the resulting BCO. The results showed that the BCO produced by pyrolysis using a 600 °C zeolite-A catalyst had a hydrocarbon content of 72.49% with a biogasoline content of 34.29%.

Keywords: zeolite-A, pyrolysis, bio-crude oil (BCO), coconut oil, biogasoline.

ABSTRAK

SINTESIS ZEOLIT-A DARI SILIKA BATU APUNG DAN ALUMINIUM FOIL *FOOD GRADE* SERTA APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS PIROLISIS MINYAK KELAPA

Oleh

ZAHRA LUTHFIYYAH

Pada penelitian ini telah dilakukan sintesis zeolit-A dari silika batu apung dan aluminium foil *food grade* dengan variasi konsentrasi yakni 3,72, 2,79, 2,23, 1,86, dan 1,30 M, sebagai pemanfaatannya untuk katalis *upgrading bio-crude oil* (BCO) hasil pirolisis minyak kelapa menjadi *biogasoline*. Zeolit-A dikarakterisasi dengan menggunakan instrument *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Karakterisasi dengan XRD menunjukkan bahwa zeolit-A pada konsentrasi 1,30 M berhasil disintesis dan menunjukkan adanya kristalin dan amorf di zeolit-A. Karakterisasi SEM mengidentifikasi morfologi yang ditandai dengan adanya partikel berbentuk kubus. Pengujian aktivitas katalitik ini dilakukan dengan pirolisis *bio-crude oil* (BCO) hasil pirolisis minyak kelapa yang diidentifikasi dengan GCMS. Percobaan pirolisis menunjukkan adanya pengaruh jenis zeolit terhadap komposisi BCO yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa BCO hasil pirolisis dengan menggunakan katalis zeolit-A 600 °C memiliki kandungan hidrokarbon sebesar 72,49% dengan kandungan *biogasoline* sebesar 34,29%.

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

**SINTESIS ZEOLIT-A DARI SILIKA BATU APUNG DAN ALUMINIUM
FOIL *FOOD GRADE* SERTA APLIKASINYA SEBAGAI KATALIS
PIROLISIS MINYAK KELAPA**

Oleh

ZAHRA LUTHFIYYAH

Skripsi

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

Pada

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



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul : **SINTESIS ZEOLIT-A DARI SILIKA
BATU APUNG DAN ALUMINIUM FOIL
FOOD GRADE SERTA APLIKASINYA
SEBAGAI KATALIS PIROLISIS
MINYAK KELAPA**

Nama : **Zahra Luthfiyyah**


Nomor Pokok Mahasiswa : **1917011084**


Jurusan : **Kimia**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**


MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing


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


Prof. Dr. Kamisah D. Pandiangan, M.Si.
NIP. 196505251990032002

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA


Mulyono, Ph.D.
NIP. 197406112000031002

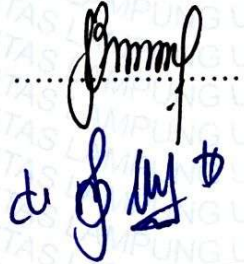
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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



Sekretaris : **Prof. Dr. Kamisah D. Pandiangan, M.Si.**



Anggota : **Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.**

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si, M.Si.
NIP. 19711001 200501 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 3 Agustus 2023

**SURAT PERNYATAAN
KEASLIAN SKRIPSI**

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa : Zahra Luthfiyyah
Nomor Pokok Mahasiswa : 1917011084
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul **“Sintesis Zeolit-A dari Silika Batu Apung dan Aluminium Foil *Food Grade* serta Aplikasinya sebagai Katalis Pirolisis Minyak Kelapa”** adalah benar karya sendiri dan saya tidak keberatan jika sebagian atau seluruh data di dalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi sesuai dengan kesepakatan.

Bandar Lampung, 11 Agustus 2023
Menvatakan



Zahra Luthfiyyah
1917011084

RIWAYAT HIDUP



Zahra Luthfiyah lahir di Tambak Sari, pada 23 Maret 2002. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Jumeno dan Ibu Nuraini. Penulis mempunyai adik perempuan bernama Nabila Luthfiana dan Naila Luthfiana. Penulis telah menyelesaikan pendidikan mulai dari taman kanak-kanak di RA MA Tempel Rejo pada tahun 2007, pendidikan sekolah dasar di SDN 1 Pasir

Sakti pada tahun 2013, pendidikan sekolah menengah pertama di MTs Ma'arif 18 RU Pasir Sakti pada tahun 2016, dan pendidikan sekolah menengah atas di SMAN 1 Pasir Sakti pada tahun 2019. Pada tahun 2019 penulis diterima sebagai mahasiswi di Universitas Lampung, program S-1 Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama masa perkuliahan selain aktif dalam bidang akademik, penulis juga aktif dalam kegiatan organisasi. Organisasi yang pernah penulis ikuti adalah Himpunan Mahasiswa Kimia (Himaki) FMIPA Unila mulai sebagai kader muda pada tahun 2019, anggota Biro Usaha Mandiri (BUM) Himaki FMIPA Unila periode 2020 dan aktif sebagai sekretaris Biro Usaha Mandiri (BUM) Himaki FMIPA Unila periode 2021. Selama berorganisasi di Himaki penulis banyak mengikuti kegiatan baik sebagai peserta maupun panitia, salah satunya sebagai sekretaris koordinator Dana dan Usaha Himaki Chemistry Expo XXIV.

Penulis pernah mengikuti kegiatan Karya Wisata Ilmiah (KWI) yang diselenggarakan oleh BEM FMIPA Unila pada tahun 2019 di desa Tambah Dadi, Lampung Timur dan melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Sidodadi, Pekalongan pada tahun 2022. Pada tahun yang sama penulis menyelesaikan praktik kerja lapangan dengan judul “Distribusi Ukuran Partikel Silika Sekam Padi yang Dihasilkan dengan Metode Sol Gel Menggunakan Asap Cair *Grade 2* dan Residu *Grade 2*” di Laboratorium Anorganik/Fisik jurusan Kimia, FMIPA Universitas Lampung. Penulis juga pernah menjadi anggota peneliti pada Penelitian Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) pada tahun 2022. Penulis juga pernah menjadi asisten Praktikum Kimia Dasar pada semester ganjil tahun 2022, dan Praktikum Kimia Fisik 2 pada semester genap tahun 2023, serta menjadi tutor mata kuliah Kimia Fisik 1 pada semester genap tahun 2023.

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

(Q.S. Al-Baqarah: 286)

“Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan”

(Q.S. Al-Insyirah: 6)

“Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah nasib suatu kaum sehingga mereka mengubah keadaan yang ada pada diri mereka sendiri.”

(Q.S. Ar-Ra'd: 11)

“Dan Dia mendapatimu sebagai seorang yang bingung, lalu Dia memberikan petunjuk.”

(Q.S. Ad-Duha: 7)

“Ketahuilah bahwa kemenangan bersama kesabaran, kelapangan bersama kesempitan, dan kesulitan bersama kemudahan.”

(HR Tirmidzi)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

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

Kedua orang tuaku tercinta,

***Bapak Jumeno dan Ibu Nuraini** yang telah membimbingku dengan cinta dan kasih sayang sejak kecil hingga dapat menyelesaikan studi sarjana, keringat yang selalu menjadi saksi akan perjuangannya untukku. Bapak dan Ibu, lewat karya ini aku ingin berterimakasih atas segala cinta, kesabaran, kekuatan, pengorbanan, kasih sayang serta ketulusan yang tak pernah lelah dalam setiap sujudnya mendo'akan hidupku. Kedua adikku tercinta **Nabila Luthfiana dan Naila Luthfiana** yang selalu mendoakan, memberikan dukungan, semangat dan keceriaan dalam menyelesaikan karya ini.*

*Pembimbing penelitianku, **Bapak Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D.** dan **Ibu Prof. Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, M.Si.** yang selalu sabar dalam membimbingku.*

Bapak Ibu Dosen Jurusan Kimia atas dedikasi dan ilmu yang telah diberikan selama menempuh pendidikan di kampus.

Keluarga besarku dan teman-teman yang senantiasa memberikan semangat dan bantuan untukku, selalu mengajarkan tentang arti berbagi, cinta dan kebersamaan.

*Serta
Almamaterku Tercinta*

SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Sintesis Zeolit-A dari Silika Batu Apung dan Aluminium Foil *Food Grade* serta Aplikasinya sebagai Katalis Pirolisis Minyak Kelapa”**. Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga dan para sahabat serta umatnya di akhir zaman. Semoga di yaumul akhir kelak mendapatkan syafa'atnya. *Aamiin*.

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

1. Bapak Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D. selaku Dosen Pembimbing I, atas kebaikan, bimbingan, arahan, masukan, dan seluruh ilmu pengetahuan yang diberikan selama proses perkuliahan s.d. penyelesaian skripsi.
2. Ibu Prof. Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, M.Si. selaku Dosen Pembimbing II, atas kebaikan, bimbingan, arahan, masukan, dan seluruh ilmu pengetahuan yang diberikan selama proses perkuliahan s.d. penyelesaian skripsi.
3. Ibu Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembahas, atas kebaikan, bimbingan, arahan, masukan, dan seluruh ilmu pengetahuan yang diberikan selama proses perkuliahan s.d. penyelesaian skripsi.
4. Bapak Prof. Suharso, Ph.D. selaku Pembimbing Akademik atas segala saran dan bantuan selama menjalani masa-masa perkuliahan hingga selesai.

5. Bapak Mulyono, Ph.D. selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
6. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung atas seluruh dedikasi dan ilmu yang diberikan kepada penulis selama perkuliahan
7. Bapak dan Ibu Tenaga Kependidikan, serta PLP Laboratorium Kimia Anorganik - Fisik Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.
8. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si, M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
9. Orang tua penulis Bapak Jumeno dan Ibu Nuraini yang telah membimbing penulis sejak kecil hingga menyelesaikan studi sarjana ini. Terima kasih atas kepercayaannya dan mendukung segala keputusan yang penulis pilih, selalu memberikan kasih sayang, nasihat, motivasi, semangat, dan segalanya.
10. Adik penulis Nabila Luthfiana dan Naila Luthfiana yang selalu mendoakan, memberikan dukungan, semangat dan keceriaan dalam menyelesaikan skripsi ini.
11. Keluarga besar penulis yang selalu mendoakan, memberikan dukungan, semangat dan nasihat untuk penulis.
12. Sahabat terbaik penulis “MADESU (Masa Depan Sukses)”: Ejak, Happy, Jamil, Shilvia, Muni, Devy, dan Yohana yang memberikan warna selama masa perkuliahan ini, mendengarkan keluh kesah, memberikan dukungan, dan semangat kepada penulis selama 4 tahun berkuliah.
13. Sahabat kontrakan : Hilda, Anjel, Partini, Verinda, Sinta, dan Chinta atas segala dukungan, bantuan, dan semangat selama masa perkuliahan.
14. Akmalludin, atas segala hal selama penyelesaian skripsi.
15. Marcella Indriani selaku teman sejak menjadi mahasiswa baru hingga saat ini, yang selalu memberikan motivasi serta dukungan kepada penulis.
16. Mohammad Rizky Arpan Zein dan Quntum Ramadhina, selaku *partner* dalam penelitian penulis yang memberikan semangat, membantu, menemani, dan bekerja bersama-sama hingga penelitian dan skripsi ini dapat terselesaikan.
17. Keluarga laboratorium polimer Rifdah, Devy, Selvia, Erika, Thio, Rangga, Arya, Dito, Kak Diska, Kak Laila, Kak Anggun, Kak Annida, Kak Aryani,

Kak Syahrul, Kak Randi, Kak Chori, Kak Alya, Kak Zira, Kak Elis, Kak Nabila, dan lainnya yang tidak dapat disebutkan namanya satu persatu terima kasih atas segala bantuannya dalam menemani penulis selama melakukan penelitian.

18. Teman-Teman Kimia 2019 terutama Kelas C atas segala kenangan selama kuliah.
19. Seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung penulis yang tidak dapat dituliskan satu per satu.
20. Kepada diri saya sendiri Zahra Luthfiyyah, terima kasih karena telah berjuang dan bertahan hingga selesai.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat beberapa ketidaksempurnaan, tetapi penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan di masa depan.

Bandar Lampung, 11 Agustus 2023
Penulis

Zahra Luthfiyyah

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Manfaat Penelitian.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Energi Baru dan Terbarukan (EBT).....	4
2.2. Pirolisis.....	6
2.2.1. Mekanisme Pirolisis	7
2.2.2. Jenis-Jenis Teknologi Pirolisis.....	9
2.2.3. Faktor yang Mempengaruhi Pirolisis	11
2.3. Zeolit	13
2.3.1. Jenis-Jenis Zeolit.....	15
2.3.2. Zeolit-A	17
2.4. Minyak Kelapa	19
2.5. Karakterisasi	20
2.5.1. <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	20
2.5.2. <i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i>	22
2.5.3. <i>Fourier Transform Infra-Red (FTIR)</i>	22
2.5.4. <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	24
2.5.5. <i>Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS)</i>	25
III. METODE PENELITIAN	26
3.1. Tempat dan Waktu Penelitian	26
3.2. Alat dan Bahan	26
3.2.1. Alat-Alat.....	26
3.2.2. Bahan-Bahan	27
3.3. Prosedur Penelitian.....	27
3.3.1. Preparasi Batu Apung	27
3.3.2. Ekstraksi Silika Batu Apung.....	27
3.3.3. Sintesis Zeolit-A dengan Metode Hidrotermal	28

3.3.4. Karakterisasi Katalis Zeolit-A.....	28
3.3.5. Uji Aktivitas Zeolit-A Sebagai Katalis	29
3.3.6. Karakterisasi Produk Pirolisis	29
IV.HASIL DAN PEMBAHASAN.....	30
4.1. Pengantar	30
4.2. Preparasi Batu Apung.....	30
4.3. Ekstraksi Silika Batu Apung	31
4.4. Sintesis Zeolit-A dengan Metode Hidrotermal	36
4.5. Karakterisasi Zeolit-A	37
4.6. Uji Aktivitas Zeolit-A sebagai Katalis	43
4.7. Karakterisasi produk pirolisis.....	45
V. SIMPULAN DAN SARAN	55
5.1. Simpulan.....	55
5.2. Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN.....	64

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Parameter operasi dari proses pirolisis yang berbeda	10
2. Proses pirolisis pada suhu yang berbeda.....	11
3. Komposisi asam lemak dalam minyak kelapa	19
4. Komposisi kimia batu apung ditentukan oleh XRF	22
5. Hasil ekstraksi silika batu apung.....	32
6. Data hasil analisis XRF silika batu apung	34
7. Variasi konsentrasi NaOH	36
8. Perbandingan data XRD standar IZA dan zeolit-A hasil sintesis variasi konsentrasi NaOH 1,30 M dengan suhu kalsinasi 600, 700, dan 800 °C.....	41
9. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa tanpa pasir silika	47
10. Komposisi BCO hasil pirolisis minyak kelapa dengan penambahan pasir silika.....	50
11. Komposisi relatif <i>biogasoline</i> hasil <i>catalytic upgrading</i> BCO dengan berbagai katalis	53
12. Komposisi BCO hasil pirolisis dengan katalis zeolit-A kalsinasi suhu 600 °C.....	71
13. Komposisi BCO hasil pirolisis dengan katalis zeolit-A kalsinasi suhu 700 °C.....	72
14. Komposisi BCO hasil pirolisis dengan katalis zeolit-A kalsinasi suhu 800 °C.....	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Mekanisme primer dan sekunder dari pirolisis	8
2. Mekanisme rinci dari pirolisis.....	8
3. Gambar skema struktur zeolit	14
4. Gambar aplikasi zeolit	15
5. Difraktogram sinar-X (a) batu apung dan (b) silika amorf	21
6. Difraktogram XRD zeolit-A hasil sintesis dan zeolit-A standar IZA.	21
7. Spektrum FTIR (a) batu apung dan (b) silika amorf.....	23
8. Morfologi SEM zeolit-A	24
9. Hasil preparasi batu apung (a) batu apung setelah pencucian, (b) serbuk batu apung sebelum pemurnian, dan (c) serbuk batu apung setelah pemurnian.	31
10. Hasil ekstraksi silika batu apung dengan variasi konsentrasi larutan NaOH (a) 2,5 M dan (b) 4 M.....	32
11. Pola difraksi XRD silika batu apung pada konsentrasi NaOH (a) 2,5 M dan (b) 4 M.....	32
12. Pola XRD T: <i>Tridymite</i> , C: <i>Cristobalite</i> , Q: <i>Quartz</i>).....	33
13. Spektrum FTIR silika yang diperoleh dari batu apung	35
14. Hasil sintesis zeolit-A (a) larutan natrium silikat, (b) larutan natrium aluminat, (c) prekursor zeolit-A, dan (d) Katalis zeolit-A.....	37
15. Difraktogram XRD Zeolit-A variasi konsentrasi NaOH (a) 3,72 M, (b) 2,79 M, (c) 2,23 M, (d) 1,86 M, dan (e) 1,30 M.	38

16. Difraktogram zeolit-A (a) standar IZA zeolit-A, (b) standar IZA sodalit, (c) variasi konsentrasi NaOH 3,72 M, (d) 2,79 M, (e) 2,23 M, (f) 1,86 M, dan (g) 1,30 M.....	39
17. Difraktogram XRD Zeolit-A dengan variasi konsentrasi NaOH 1,30 M kalsinasi (a) 700 °C, dan (b) 800 °C.....	40
18. Difraktogram zeolit-A (a) standar IZA zeolit-A, (b) suhu kalsinasi 600 °C, (c) suhu kalsinasi 700 °C, dan (d) suhu kalsinasi 800 °C.	41
19. Mikrograf SEM zeolit-A (a) 600 °C dengan perbesaran 10.000 x, (b) 600 °C dengan perbesaran 15.000 x, (c) 700 °C dengan perbesaran 10.000 x, dan (d) 700 °C dengan perbesaran 15.000 x.	43
20. Rangkaian alat pirolisis.....	44
21. Hasil pirolisis BCO dan <i>biogasoline</i> hasil <i>catalytic upgrading</i> BCO (a) tanpa pasir silika, (b) dengan penambahan pasir silika, (c) zeolit-A 600 °C, (d) zeolit-A 700 °C, dan (e) zeolit-A 800 °C.	45
22. Kromatogram BCO minyak kelapa tanpa pasir silika.	46
23. Komposisi relatif BCO minyak kelapa tanpa pasir silika.	48
24. Kromatogram BCO minyak kelapa dengan penambahan pasir silika.	49
25. Komposisi relatif BCO minyak kelapa dengan penambahan pasir silika.	49
26. Kromatogram GC <i>biogasoline</i> hasil <i>catalytic upgrading</i> BCO dengan katalis zeolit-A kalsinasi (a) 600 °C, (b) 700 °C, dan (c) 800 °C.	51
27. Komposisi relatif <i>biogasoline</i> hasil <i>catalytic upgrading</i> BCO dengan katalis zeolit-A kalsinasi (a) 600 °C, (b) 700 °C, dan (c) 800 °C.	52
28. Grafik perbandingan tiap komponen senyawa kimia dalam sampel BCO dan <i>biogasoline</i>	54

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam pengembangan energi baru dan terbarukan (EBT) berbasis biomassa, pirolisis merupakan metode yang berkembang sangat pesat. Metode pirolisis ini menarik banyak perhatian dari peneliti karena mempunyai sejumlah keuntungan seperti efisiensi yang tinggi, dapat diterapkan terhadap semua jenis biomassa, prosesnya yang cepat, dan tidak memerlukan peralatan yang mahal (Supriyanto, *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2021). Metode pirolisis juga memberikan sejumlah manfaat, salah satunya adalah emisi gas rumah kaca yang jauh lebih sedikit serta semua produk sampingnya bisa digunakan kembali (Uddin *et al.*, 2018).

Proses pirolisis merupakan pemecahan molekul organik berukuran besar menjadi suatu senyawa yang lebih sederhana lagi seperti dalam bentuk cair, gas, dan padat yang disebut sebagai biochar dengan perlakuan termal. Dalam konteks energi baru terbarukan, target utama pirolisis biomassa adalah produk cair yang dikenal sebagai *bio crude oil* (BCO) dan telah dihasilkan dari berbagai biomassa seperti minyak kelapa sawit (Febriyanti *et al.*, 2021), minyak kelapa (Muttaqii *et al.*, 2019), ampas tebu dan minyak biji karet (Simanjuntak *et al.*, 2019), serta jeram padi (Chen *et al.*, 2019). Produk BCO mempunyai komposisi yang kompleks dan terdiri dari berbagai jenis sejumlah besar senyawa organik seperti hidrokarbon, keton, ester, asam dan alkohol (Simanjuntak *et al.*, 2021). BCO mempunyai komposisi yang kompleks, oleh karena itu BCO tidak dapat digunakan langsung sebagai bahan bakar. Untuk meningkatkan mutu dan menghilangkan komponen yang tidak memenuhi syarat sebagai bahan bakar, BCO perlu diolah lanjut dengan melakukan pirolisis ulang. Pengolahan lanjut ini secara umum dikenal sebagai proses *upgrading* dengan salah satu tujuan utama adalah meningkatkan

kandungan *biogasoline*, yakni senyawa hidrokarbon dengan panjang rantai karbon C₅-C₁₂ karena karakteristiknya yang mirip dengan bahan bakar yang berasal dari fosil. Metode *upgrading* BCO yang paling umum digunakan adalah dengan bantuan katalis atau dikenal sebagai *catalytic upgrading*.

Katalis berperan penting dalam *catalytic upgrading* sehingga sampai saat ini berbagai jenis katalis terus dikembangkan. Contoh katalis yang digunakan adalah katalis heterogen (Mohadesi *et al.*, 2019; Sulaiman *et al.*, 2013), katalis homogen (Mohadesi *et al.*, 2019), dan katalis sintetik (Situmeang and Ahmadhani, 2018). Salah satu contoh katalis sintetik yang telah digunakan adalah zeolit-A. Sintesis zeolit-A terbuat dari berbagai bahan baku yang hingga saat ini terus dikembangkan, seperti zeolit alam Lampung (Ginting *et al.*, 2019), silika sekam padi dan aluminium foil *food grade* (Simanjuntak *et al.*, 2019), dan batu apung (Manurung *et al.*, 2022). Dalam penelitian ini, batu apung dipilih sebagai sumber silika karena peneliti sebelumnya (Muralitharan and Ramasamy, 2015) telah melaporkan bahwa batu apung mengandung silika amorf dengan kadar yang cukup tinggi, yakni berkisar antara 68,56%. Di samping itu, silika amorf dalam batu apung dapat diekstraksi dengan pelarut alkalis dengan cara yang sederhana. Penggunaan aluminium foil *food grade* juga karena mudah diperoleh dengan harga yang lebih murah dibanding garam aluminium dan memiliki kemurniaan yang tinggi (Simanjuntak *et al.*, 2021).

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari *catalytic upgrading* BCO yang dihasilkan dari pirolisis minyak kelapa menggunakan zeolit-A yang disintesis dari silika batu apung dan aluminium foil *food grade* sebagai bahan baku. Zeolit-A hasil sintesis dikarakterisasi dengan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Zeolit selanjutnya dikalsinasi pada suhu yang berbeda untuk mempelajari pengaruh suhu kalsinasi terhadap kinerja zeolit, dengan indikator utama kandungan *biogasoline* dalam BCO yang di*upgrading*.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan yaitu sebagai berikut :

1. Mendapatkan zeolit-A dari silika batu apung dan aluminium foil *food grade*.
2. Memperoleh data karakterisasi zeolit hasil sintesis.
3. Memperoleh data tentang kaitan antara suhu kalsinasi zeolit-A dengan kandungan *biogasoline* dalam produk *catalytic upgrading* BCO hasil pirolisis minyak kelapa.

1.3. Manfaat Penelitian

Selain sebagai upaya pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi sintesis zeolit dan produksi *biogasoline*, penelitian ini juga bermanfaat untuk meningkatkan nilai tambah dari batu apung melalui pemanfaatannya sebagai sumber silika untuk pembuatan zeolit dan minyak kelapa untuk produksi *biogasoline*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Energi Baru dan Terbarukan (EBT)

Energi terbarukan adalah sumber energi yang berasal dari alam yang mampu dibuat kembali secara bebas, serta mampu diperbarui terus-menerus dan tidak terbatas. Energi terbarukan telah mampu diproduksi dengan memanfaatkan perkembangan teknologi yang semakin canggih. Salah satu kelompok EBT yang terus berkembang dewasa ini adalah EBT berbasis biomassa, meliputi biogas, bioetanol, biodiesel dan *bio crude oil* (BCO) yang dihasilkan dari pengolahan biomassa dengan metode pirolisis (Siti *et al.*, 2020).

Biogas adalah energi biomassa terbarukan yang penting, karena dapat menggantikan energi biomassa tradisional, seperti sedotan, kayu bakar, dan sumber energi komersial, termasuk batubara. Sejumlah besar biomassa (seperti jerami, kotoran ternak, residu organik industri, dan sampah organik perkotaan (Lu *and* Gao, 2021)) dapat diolah untuk menghasilkan biogas. Biogas juga dapat digunakan untuk menghasilkan listrik, dan biogas murni dapat digunakan dalam mobil untuk menggantikan bensin dan bahan bakar fosil lainnya. Teknologi biogas menyediakan sumber energi bersih bagi petani; melindungi lingkungan ekologis (khususnya vegetasi hutan); memperbaiki kebersihan lingkungan desa yang kotor, berantakan, dan buruk (Lu *and* Gao, 2021). Biogas juga memiliki beberapa kekurangan, yaitu perlunya teknologi yang tinggi dimana sistem yang digunakan dalam produksi belum efisien, pengaruh temperatur pada produksi biogas, dan masih mengandung kotoran (Pujianti, 2020).

Bioetanol merupakan bahan bakar dari sumber daya hayati yang dapat dijadikan sebagai sumber energi alternatif terbarukan. Bioetanol berasal dari biomassa

seperti glukosa, sukrosa, lignoselulosa dan pati yang diproses melalui proses hidrolisis dan fermentasi. Bioetanol *fuel grade* adalah bioetanol yang telah diproses melalui tahap pemisahan dan pemurnian. Sebagai kelas bahan bakar, konsentrasi bioetanol harus lebih tinggi dari 99%. Proses pemisahan digunakan untuk memisahkan produk fermentasi etanol dari air melalui distilasi. Namun, konsentrasi maksimum etanol yang dicapai dengan distilasi hanya 95% karena kondisi azeotropik. Proses pemurnian digunakan untuk meningkatkan konsentrasi etanol dari 95% hingga lebih tinggi dari 99% (Hargono *et al.*, 2021). Kelebihan bioetanol adalah aman digunakan sebagai bahan bakar, titik nyala etanol tiga kali lebih tinggi dibandingkan bensin, dan emisi hidrokarbon lebih sedikit. Kekurangan-kekurangan bioetanol pada mesin dingin lebih sulit melakukan starter dan bioetanol bereaksi dengan logam seperti magnesium dan aluminium (Setiawati, 2013).

Biodiesel adalah bahan bakar alternatif untuk mesin diesel yang diproduksi dengan mereaksikan minyak nabati atau lemak hewani secara kimiawi dengan alkohol seperti metanol. Reaksi membutuhkan katalis, biasanya basa kuat, seperti natrium atau kalium hidroksida, dan menghasilkan senyawa kimia baru yang disebut metil ester. Ester inilah yang kemudian dikenal sebagai biodiesel (Gerpen, 2005). Biodiesel, umumnya dibuat melalui suatu proses kimia yang disebut reaksi transesterifikasi atau esterifikasi, yaitu suatu reaksi senyawa ester dan alkohol dengan menggunakan suatu katalisator. Biodiesel terbuat dari minyak nabati yang berasal dari sumber daya alam yang dapat diperbaharui. Bahan baku yang berpotensi sebagai bahan baku pembuat biodiesel antara lain: kelapa sawit, kedelai, bunga matahari, jarak pagar, tebu, alpukat dan beberapa jenis tumbuhan lainnya. Selain minyak nabati, bahan baku juga bisa dari lemak hewani, lemak bakas atau lemak daur ulang. Semua bahan baku ini mengandung trigliserida, asam lemak bebas, dan pencemar (Devita, 2015). Biodiesel memiliki beberapa kelebihan dibanding bahan bakar diesel petroleum. Kelebihan tersebut yaitu, biodiesel merupakan bahan bakar yang tidak beracun dan dapat dibiodegradasi, mempunyai bilangan setana yang tinggi, dapat mengurangi emisi karbon monoksida, hidrokarbon dan NO_x, Bahan bakar diesel dikehendaki relatif

mudah terbakar sendiri (tanpa harus dipicu dengan letikan api busi) jika disemprotkan ke dalam udara panas bertekanan. dan terdapat dalam fasa cair (Haryanto, 2002). Menurut Bustaman (2009) selain kelebihan tersebut, biodiesel juga memiliki kelemahan. Minyak nabati mempunyai viskositas (kekentalan) 20 kali lebih tinggi dari bahan bakar diesel fosil sehingga mempengaruhi atomisasi bahan bakar dalam ruang bakar motor diesel. Atomisasi yang kurang baik akan menurunkan daya (tenaga) mesin dan pembakaran mesin menjadi tidak sempurna, oleh karena itu viskositas minyak nabati perlu diturunkan melalui proses transesterifikasi metil ester nabati. Proses ini menghasilkan bahan bakar yang sesuai dengan sifat dan kinerja diesel fosil. Selain itu, metanol yang digunakan juga masih menggunakan metanol impor.

BCO mengacu pada produk minyak yang diperoleh melalui proses pencairan termal. BCO merupakan campuran dari berbagai golongan senyawa organik seperti hidrokarbon, asam fenolik, alkohol, dan oksigenat. Namun, tidak dapat digunakan secara langsung karena kandungan air dan oksigen yang tinggi, stabilitasnya rendah, viskositas tinggi, korosif dan nilai kalor yang rendah. BCO memiliki sifat yang tidak diinginkan seperti bersifat asam, korosif, mengandung senyawa teroksidasi yang tinggi, dan tidak stabil secara termal. Oleh karena itu, BCO perlu diolah lebih lanjut untuk meningkatkan mutunya supaya dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar, yang secara umum dikenal sebagai proses *upgrading*. Metode *upgrading* BCO dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu secara fisik dan kimia. Teknik *upgrading* secara fisik melibatkan penurunan dan pengendalian viskositas BCO dengan beberapa metode seperti filtrasi uap panas, penambahan pelarut, atau campuran, dan emulsi (Chen *et al.*, 2011). Teknik *upgrading* secara kimia umumnya dilakukan dengan menggunakan katalis, yang diklasifikasikan menjadi dua kategori utama yaitu hidrideoksidasi dan perengkahan katalitik/zeolit cracking.

2.2. Pirolisis

Pirolisis adalah suatu teknologi energi yang sudah sangat lama digunakan untuk pemanfaatan energi, akan tetapi hal ini kembali menjadi pusat perhatian yang

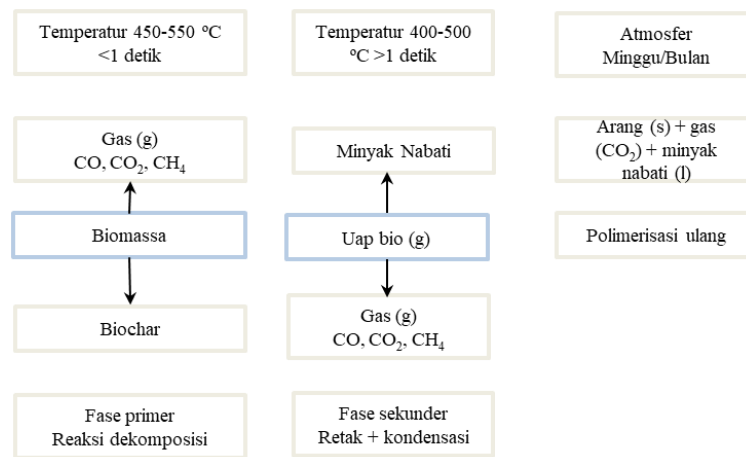
menarik untuk para peneliti sebagai suatu pemanfaatan energi biomassa. Pirolisis juga dideskripsikan sebagai suatu metode termokimia untuk pengolahan biomassa dengan sedikit atau tanpa oksigen dan dilangsungkan pada suhu tinggi ($>300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Bahan organik berukuran besar dalam biomassa yang di pirolisis akan mengalami perengkahan menghasilkan produk dengan ukuran yang lebih kecil berupa padatan, cairan, dan gas. Pada awal mula pirolisis dipergunakan itu hanya untuk memperoleh batu bara dan arang, akan tetapi dengan seiringnya perkembangan zaman saat ini pirolisis terus dikembangkan untuk memproduksi asap cair, arang, metanol, karbon aktif (Sharma *et al.*, 2014) dan BCO (Dhayani *and* Bhaskar, 2019).

2.2.1. Mekanisme Pirolisis

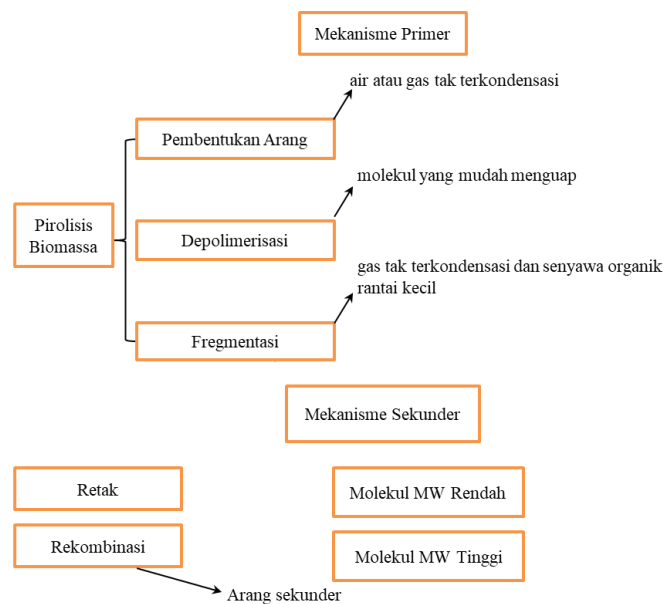
Secara garis besar, pirolisis biomassa melibatkan dua mekanisme, yaitu mekanisme primer dan sekunder. Mekanisme primer mencakup reaksi pelapasan senyawa volatil dalam reaktor termal dan pada ikatan kimia terputus saat biomassa termal. Mekanisme utama dilakukan dengan menggunakan tiga tahapan berbeda yaitu, fragmentasi, pembentukan arang, dan polimerisasi. Tahap awal sintesis termal memperoleh cincin benzena yang membentuk residu arang padat dengan bahan organik yang terurai sampai suhu $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada reaksi penyusunan kembali residu dalam matriks yang berlangsung senyawa volatil yang tidak stabil dilakukan tambahan reaksi yang dideskripsikan sebagai mekanisme sekunder. Pada proses polimerisasi, polimer dipecah menjadi komponen monomer yang menurunkan derajat polimerisasi tersebut. Pelepasan akhir dilakukan pada tingkat yang lebih tinggi yaitu sekitar $250\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ dari tahap awal (Zaman *et al.*, 2017). Tahap yang terakhir yaitu fragmentasi dari mekanisme ini terciptanya senyawa organik dengan rantai kecil dan gas yang tidak dapat dikondensasikan sebab asosiasi ikatan kovalen dalam monomer (Van de Velden *et al.*, 2010).

Pada mekanisme sekunder, ini senyawa volatil yang tidak stabil akan dianalisis kembali. Pada saat pelepasan senyawa volatil terurai membentuk molekul dengan berat molekul yang rendah dan pada saat penggabungan senyawa volatil akan terjadi senyawa volatil dengan berat molekul yang tinggi (Van de Velden *et al.*, 2010). Pirolisis pada laju pemanasan lambat dan suhu kurang dari $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ akan

menghasilkan jumlah biochar yang lebih tinggi, rentang suhu menengah dengan laju pemanasan yang sedikit lebih tinggi akan menghasilkan jumlah bio-oil yang lebih tinggi, dan laju pemanasan yang tinggi pada suhu yang lebih besar dari 800 °C akan menghasilkan jumlah yang lebih besar dari gas dan abu (Zaman *et al.*, 2017). Mekanisme primer dan sekunder dari pirolisis terdapat pada Gambar 1 sedangkan mekanisme rinci dari metode pirolisis dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Mekanisme primer dan sekunder dari pirolisis (Al-Rumaihi *et al.*, 2022).



Gambar 2. Mekanisme rinci dari pirolisis (Uddin *et al.*, 2018).

2.2.2. Jenis-Jenis Teknologi Pirolisis

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

1. *Slow Pyrolysis*

Pada tahun 1990-an *slow pyrolysis* dilakukan untuk pirolisis kayu selama 24 jam yang akan menghasilkan asam asetat, metanol, etanol dan batu bara (Uddin *et al.*, 2018). *Slow pyrolysis* disebut juga teknik arang atau sistem kontiu dengan secara perlahan dilakukan biomassa termal pada suhu 400° C dengan tanpa oksigen. Biomassa dipirolisis dengan tingkat panas maksimum sekitar 5-7 °C/minimum dengan laju pemanasan maksimum sekitar 20-100 °C/menit dan dimana produksi batubara dimaksimalkan sedangkan produk gas dan cair minimal (Goyal *et al.*, 2018). Pada *slow pyrolysis* dilakukan dengan laju pemanasan pada suhu berkisar 400-650 °C dengan waktu biomassa reaktor berkisar 5-30 menit. Pada *slow pyrolysis* dihasilkan produk utamanya yaitu berupa bio-minyak, batu bara, dan gas. Dilakukan kombinasi pirolisis suhu yang rendah, laju pemanasan yang rendah, dan waktu yang tinggi menghasilkan arang yang berkualitas tinggi dengan meminimalkan produksi prosuk cair dan gas.

2. *Fast Pyrolysis*

Fast pyrolysis merupakan teknik pirolisis yang memaksimalkan untuk konversi biomassa menjadi produksi minyak cair yang berkualitas tinggi. Minyak yang diperoleh (bio-oil) berupa bahan bakar energi tingkat menengah yang dapat untuk ditingkatkan menjadi suatu hidrokarbon yang ada pada bensin dan diesel (Strahan *et al.*, 2011). Pada teknik ini dilakukan secara termal pada suhu berkisar 600-650 °C tanpa oksigen dengan tingkat pemanasan tinggi sampai 1000 °C/detik, maka menyebabkan biomassa terurai dengan cepat sehingga sebagian besar menghasilkan aerosol dan uap serta sebagian kecil menghasilkan batu bara dan gas. *Fast pyrolysis* dilakukan secara global dalam jangkauan besar untuk memproduksi cairan (bio-minyak) yang berkualitas tinggi sehingga dapat digunakan untuk industri peneliti biofuel. Keuntungan pada *fast pyrolysis* adalah produksi gas yang lebih tinggi dari *slow pyrolysis*, prosesnya yang terukur

sehingga layak secara ekonomi, dan dapat digunakan di berbagai reaktor. Reaktor yang digunakan pada *fast pyrolysis* berupa reaktor vortex, reaktor bubbling, fluidised bed, reaktor putar, dan lain sebagainya.

3. *Flash Pyrolysis*

Flash pyrolysis dikenal sebagai pirolisis yang sangat cepat dan prosesnya bergantung pada pemanasan dan massanya ditransfer melalui bahan baku. *Flash pyrolysis* dilakukan pada suhu berkisar 1000 °C dan tingkat pemanasannya sekitar 700 °C/detik dengan waktu yang sangat rendah. *Flash pyrolysis* menghasilkan minyak pirolisis yang coklat tua setelah melalui dekomposisi bahan baku, pendinginan dan juga kondensasi. *Flash pyrolysis* menghasilkan jumlah besar berupa aerosol dan uap serta jumlah kecil berupa arang. Kelebihan dari *flash pyrolysis* yaitu bisa menghasilkan sampai 75% minyak dari berat produk akan tetapi kelemahannya terletak pada stabilitas termal yang buruk, tidak layak secara ekonomis karena efek yang dihasilkan mengandung residu padat sehingga memerlukan biaya tambahan untuk *upgrade* tingkatan kualitasnya (Zaman *et al.*, 2017). Pada Tabel 1 dibawah ini menunjukkan beberapa parameter operasi dari tiga jenis proses pirolisis :

Tabel 1. Parameter operasi dari proses pirolisis yang berbeda

Proses	Waktu (s)	Kecepatan (K/s)	Ukuran (mm)	Suhu (K)	Hasil Minyak	Hasil Arang	Hasil Gas
<i>Slow</i>	450-550	0,1-1	5-50	550-950	30	35	35
<i>Fast</i>	0,5–10	10-200	<1	850-1250	50	20	30
<i>Flash</i>	<0,5	>1000	<0,2	1050-1300	75	12	13

Sumber: Uddin *et al.* 2018.

2.2.3. Faktor yang Mempengaruhi Pirolisis

Pirolisis merupakan proses yang kompleks dan dipengaruhi oleh sejumlah faktor sebagai berikut :

1. Suhu

Menjadi proses termokimia, suhu pirolisis jelas penting untuk hasil biochar dan sifat fisikokimia, seperti stabilitas, proporsi komponen unsur, luas permukaan, struktur pori, dan gugus fungsi karena masuknya bahan volatil pada suhu tinggi. Sebuah studi oleh (Mahdi *et al.*, 2017) menunjukkan bahwa rendemen biochar tertinggi sebesar 45,18% diperoleh pada suhu 350 °C, 34,92% pada 450 °C dan 26,44% pada 550 °C. Pada penelitian (Uchimiya *et al.*, 2010) telah menunjukkan suhu yang lebih tinggi menghasilkan biochar yang cocok untuk pengolahan tanah dan air karena luas permukaan dan struktur pori yang lebih besar, di tegaskan kembali bahwa penyerapan berbeda dalam mekanismenya berdasarkan suhu pirolisis, tanpa perubahan kemanjuran. Proses pirolisis pada suhu yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 2

Tabel 2. Proses pirolisis pada suhu yang berbeda

Kondisi	Proses	Produk
<350 °C	Pembentukan radikal bebas, eliminasi air, dan depolimerisasi	Pembentukan karbonil dan karboksil, evolusi CO dan CO ₂ , dan terutama residu hangus
350-450 °C	Pemisahan koneksi glikosidik dari polisakarida dengan substitusi	Kombinasi levoglucosan, anhidrida, dan oligosakarida sebagai segmen tar
450-500 °C	Dehidrasi, penataan ulang, dan pembelahan satuan gula	Pembentukan senyawa karbonil
>500 °C	Kombinasi dari semua proses di atas	Kombinasi dari semua produk di atas
Kondensasi	Produk tak jenuh menyusut dan terbelah menjadi karakter	Sisa arang yang sangat reaktif terdiri dari radikal bebas yang terperangkap

Sumber : Uddin *et al.* 2018.

2. Laju Pemanasan

Laju pemanasan mempengaruhi komposisi produk pirolitik. Laju pemanasan yang lebih tinggi menginduksi fragmentasi yang meningkatkan hasil minyak dan

gas, sedangkan laju pemanasan yang lebih rendah menginduksi tahap pirolisis sekunder dan mendukung produksi arang. Laju pemanasan juga mempengaruhi morfologi permukaan biochar, yang mirip dengan efek suhu. Luas permukaan dan volume pori menurun dengan meningkatnya laju pemanasan karena penguapan yang lebih tinggi dari bahan yang mudah menguap, namun, efeknya kurang pada komposisi biochar dan properti lainnya. (Chen *et al.*, 2016) melihat variasi 4-5% dalam hasil biochar pada berbagai suhu dan tidak berpengaruh pada C% dalam biochar untuk pirolisis biomassa. Tingkat pemanasan yang lebih tinggi juga dikaitkan dengan berkurangnya kandungan oksigen dalam biochar.

3. Konfigurasi Reaktan

Reaktor merupakan aspek penting yang menentukan hasil akhir dan komposisi produk pirolisis karena dapat dikonfigurasi sesuai dengan kebutuhan proses. Laju perpindahan panas antara reaktor dan partikel bahan baku adalah salah satu faktor terpenting yang menentukan hasil (Chen *et al.*, 2021).

4. Tekanan

Proses pirolisis biasanya dilakukan pada tekanan atmosfer, meskipun variasi tekanan reaktor selama pirolisis dapat meningkatkan hasil biochar. Produksi zat yang mudah menguap selama proses pirolisis menghasilkan cairan dan gas selama *fast pyrolysis*. Tekanan yang lebih tinggi dalam reaktor dikaitkan dengan konsentrasi karbon yang lebih tinggi dalam hasil biochar, yang menghasilkan peningkatan kepadatan energi biochar. Studi Wang *et al.* (2020) telah melaporkan bahwa menemukan tekanan reaktor yang lebih tinggi terkait dengan konsentrasi karbon yang lebih besar, stabilitas arang yang lebih tinggi, dan konduktivitas listrik yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan potensi perbaikan tanah, penyerapan karbon, KTK, dan produksi energi.

5. Waktu Pirolisis

Waktu pirolisis merupakan faktor penting yang juga menentukan komposisi produk pirolitik. Waktu pirolisis yang singkat mendukung produk cair dan gas sedangkan waktu pirolisis yang lebih lama meningkatkan hasil biochar dengan

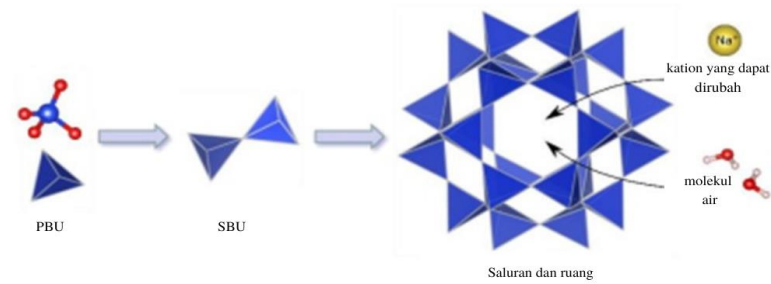
memungkinkan kemungkinan repolimerisasi yang lebih besar. Kim *et al.* (2011) telah melakukan penelitian pada batubara kuning-coklat dan biomassa kayu untuk menyimpulkan bahwa waktu tinggal yang lebih lama menghasilkan jumlah biochar yang lebih besar. Sebagai perbandingan, kombinasi suhu rendah dan waktu tinggal yang lebih lama mengurangi hasil biochar, sehingga menunjukkan kemungkinan bahwa suhu memoderasi pengaruh waktu tinggal pada hasil biochar.

6. Katalis

Katalis dapat dikategorikan sebagai katalis primer atau sekunder tergantung pada efeknya dan fasa penggabungannya dalam proses pirolisis. Dampak dari yang pertama biasanya dicampur dengan bahan baku dalam mode kering atau basah sebelum proses pirolisis, sedangkan yang terakhir ditempatkan di hilir ke ruang utama di mana pirolisis dilakukan. Beberapa katalis yang paling umum digunakan dalam produksi biochar adalah oksida nikel, oksida magnesium, alumina, ZMS-5, dan Al-MCM-41. Dampak berbagai katalis dalam pirolisis plastik ditinjau oleh Al-Salem *et al.* (2017). Sebagian besar garam anorganik ini telah terbukti meningkatkan hasil biochar, sementara menurunkan hasil minyak dan gas, namun, khasiat ZSM-5 dalam meningkatkan hasil biochar bertentangan dengan penelitian lain yang menunjukkan ZSM-5 mengurangi hasil biochar.

2.3. Zeolit

Zeolit merupakan mineral kristal alumina silika terhidrat berpori yang memiliki struktur kerangka tiga dimensi, terbentuk dari tetrahedral $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$ melalui keterkaitan atom oksigen. Masing-masing tetrahedral tersebut di depan oleh atom-atom oksigen sedemikian rupa sehingga terbentuk kerangka tiga dimensi yang di dalam rongga-rongga, yang didalamnya terisi oleh ion-ion logam alkali atau alkali tanah dan molekul udara yang dapat bergerak bebas. Zeolit memiliki sifat sebagai penukar ion, adsorben, katalis dan penyaring molekul sehingga dapat digunakan dalam pengolahan limbah industri pelapis logam (Tran *et al.*, 2019). Skema struktur zeolit dapat dilihat pada Gambar 3.



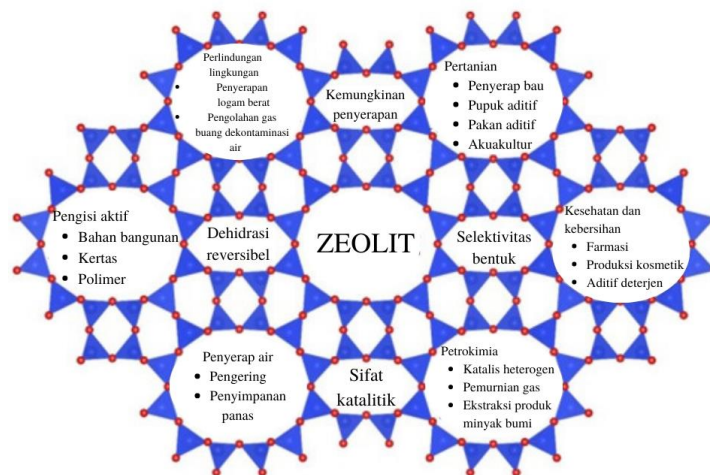
Gambar 3. Gambar skema struktur zeolit (Krol, 2020).

Struktur spesifik zeolit memberi mereka sejumlah sifat unik. yang paling penting mengenai penggunaan potensial termasuk :

- Kepadatan rendah dan volume besar ruang kosong;
- Keberadaan saluran dan ruang dengan dimensi yang ditentukan secara ketat (selektivitas bentuk);
- Tingkat hidrasi yang tinggi dan adanya apa yang disebut "air zeolit";
- Tingkat kristalinitas yang tinggi;
- Kemungkinan penyerapan molekul dan ion;
- kapasitas pertukaran ion; dan
- Sifat katalitik.

Istilah zeolit berasal dari kata Yunani “Zeo” dan Lithos” yang berarti mendidih dan batu, masing-masing zeolit memiliki kemampuan menyerap yang tinggi air dan melepaskannya ketika dipanaskan. Zeolit terdiri dari atom pusat (Al, Si atau P) dan oksigen terminal atom dalam struktur tetrahedral untuk membentuk blok bangunan utama, zeolit juga dapat membentuk blok bangunan sekunder dengan menjembatani melalui oksigen-oksigen atom untuk membentuk cincin, prisma, dan berbagai ukuran. Zeolit terdiri dari struktur dasar kerangka aluminosilikat, yang terdiri 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 yang dibagi antara dua tetrahedron struktur. Hal ini menghasilkan Si elektroneutral tetravalen dalam $\text{SiO}_{4/2}$ dan Al yang bermuatan negatif trivalen dalam $\text{AlO}_{4/2}$. Muatan negatif dan pori-pori zeolit dapat ditempati oleh ion logam golongan IA atau IIA dan molekul

air seperti yang dilambangkan melalui rumus umum, $M_x/n \{(Al_2HAl)_x (SiO_2)_y zH_2O\}$, di mana M mewakili kation alkali atau alkali tanah, n menunjukkan valensi kation, z adalah jumlah molekul air per satuan sel, dan x dan y adalah jumlah total tetrahedral per unit sel (Derbe *et al.*, 2021). Aplikasi zeolit dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Gambar aplikasi zeolit (Krol, 2020).

2.3.1. Jenis-Jenis Zeolit

Zeolit dapat diklasifikasikan menjadi 2 bagian, yaitu zeolit alam dan juga zeolit sintetik.

1. Zeolit Alam

Zeolit alam adalah aluminosilikat kristal terhidrasi yang memiliki sarang lebah struktur 3D yang dibentuk oleh tetrahedral 4 KE unit (T: Si, Al) terkait dengan tetrahedroni lain b berbagi empat atom OF. Zeolit alam bersifat hidrotermal dan sebagian besar berasal dari gunung berapi. Zeolit alam dapat terjadi baik dalam bentuk kristal yang ditemukan di batuan beku dan metamorf, serta dalam butiran berdiameter lebih kecil yang terakumulasi dalam batuan sedimen. Sedimen dasar laut relatif besar dan kaya akan zeolit, tetapi endapan tersebut sejauh ini tidak dapat diakses oleh manusia

Zeolit alam mempunyai beberapa sifat antara lain mudah melepas air akibat pemanasan, tetapi juga mudah mengikat kembali molekul air dalam udara lembap serta mudah melepas kation dan diganti dengan kation lainnya, misal zeolit melepas ion Na^+ dan digantikan dengan mengikat ion Ca^{2+} , atau ion Mg^{2+} . Zeolit juga dikenal sebagai “saringan molekul” yang dapat mengatur masuknya molekul yang lebih besar dari pori-pori dan masuk ke bagian yang lebih kecil.

2. Zeolit Sintetik

Zeolit sintetik merupakan zeolit yang bahan bakunya terbuat dari silika dan alumina, dengan penggunaan senyawa murni. Zeolit sintetik mempunyai kelebihan dari pada zeolit alam seperti struktur yang sangat homogen, komponennya yang dapat dikendalikan dan juga dapat divariasikan sesuai dengan kepentingan, serta kemurniannya yang tinggi (Georgiev *et al.*, 2009).

Zeolit diklasifikasikan berdasarkan rasio Si/Al yaitu, sebagai berikut:

1) Zeolit dengan rasio Si/Al rendah (1-1,5)

Zeolit variasi ini mengandung banyak Al, efektif dalam pemisahan efek besar dan berpori. Volume pori zeolite ini bisa mencapai 5cm^3 dari setiap cm^3 volume zeolitnya. Contoh zeolit sintetik variasi ini adalah zeolit A dan zeolit X.

2) Zeolit dengan rasio Si/Al menengah (2-5)

Zeolit variasi ini menunjukkan karakterisasi yang umum dalam meningkatkan stabilitas dari zeolit rendah. Contoh zeolit sintetik variasi ini adalah zeolit L dan zeolit X.

3) Zeolit dengan rasio Si/Al tinggi (10 sampai beberapa ribu)

Zeolit variasi ini sangat mudah menyerap molekul non polar dan higroskopis hingga baik untuk dimanfaatkan sebagai katalisator asam untuk hidrokarbon. Contoh zeolit sintetik variasi ini adalah zeolit ZSM-5 (Ramesh and Reddy, 2011).

2.3.2. Zeolit-A

Zeolit-A merupakan tipe zeolit sintetik dengan rumus kimia $[\text{Na}_{12}(\text{H}_2\text{O})_{27}]_8[\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}]_8$. Zeolit sintetik juga disebut sebagai NaA atau LTA (*Linde Type A*). Struktur jaringan tiga dimensi zeolit-A terbentuk dari cincin beranggotakan empat ganda yang terhubung oleh kerangka sodalite (Indira and Abhitha, 2022).

Contoh penggunaan zeolit-A atau pengaplikasiannya seperti katalisis, pervaporasi, pemurnian air, membran zeolit dan aplikasi antibakteri. Zeolit terbentuk dari struktur kerangka dengan TO_4 (T = Si atau Al) tetrahedral yang dihubungkan dari jenis zeolit sintetik dan juga oleh atom oksigen yang digunakan untuk memperoleh karbon dioksida termasuk zeolit-A. Sintesis zeolit-A terbuat dari berbagai bahan baku yang hingga saat ini terus dikembangkan, seperti zeolit alam Lampung (Ginting *et al.*, 2019), silika sekam padi dan aluminium foil (Simanjuntak *et al.*, 2019), bubuk batu dan abu aluminium (Kuroki *et al.*, 2019), dan batu apung (Manurung *et al.*, 2022).

1. Preparasi Zeolit-A

Sintesis zeolit-A terbuat dari berbagai bahan baku yang hingga saat ini terus dikembangkan, seperti zeolit alam Lampung (Ginting *et al.*, 2019), silika sekam padi dan aluminium foil (Simanjuntak *et al.*, 2019), bubuk batu dan abu aluminium (Kuroki *et al.*, 2019), dan batu apung (Manurung *et al.*, 2022).

a. Aluminium Foil *Food Grade*

Penelitian Pangesti *et al.* (2021) telah melaporkan bahwa aluminium foil digunakan sebagai sumber alumina karena mudah diperoleh dengan biaya yang relatif murah dengan kemurnian 98,35-99,2% dan memiliki kelarutan yang tinggi dalam larutan basa. Penelitian Simanjuntak *et al.* (2021) menunjukkan kesesuaian antara pola XRD sampel dengan standar *International Zeolite Association (IZA)* menegaskan bahwa zeolit-A telah berhasil disintesis, menunjukkan bahwa aluminium foil dapat digunakan sebagai alternatif untuk prekursor alumina yang lebih mahal yang biasa digunakan. Mengenai bahan baku yang digunakan, perlu

diperhatikan waktu kristalisasi untuk pembentukan zeolit-A yang optimum adalah 72 jam. Perpanjangan waktu kristalisasi hingga 96 jam menunjukkan transformasi kristal zeolit-A menjadi fasa sodalit, yang sesuai dengan temuan bahwa zeolit X dan zeolit A dapat diubah menjadi sodalit murni dengan memperpanjang waktu kristalisasi atau meningkatkan suhu kristalisasi yang dilaporkan oleh orang lain (Tsujiguchi *et al.*, 2014).

b. Silika Batu Apung

Batu apung adalah bahan yang berpori tinggi diketahui memiliki porositas rata-rata 90%, batu apung juga mengapung di atas air dan gugus-OH yang terkandung didalam batu apung penting dalam aktivitas permukaan air. Sifat amorf dan berpori batu apung menimbulkan area permukaan besar dan pada struktur kerangkanya mengandung saluran bagi ion dan air untuk keluar dan masuk dari struktur kristalnya. Hal ini terbentuk saat gelembung nukleat magma kental keluar dari gas vulkanik dan sebelum didinginkan menjadi kaca tidak bisa dengan mudah terlepas dari magma kental (Çifçi and Meriç, 2016).

Salah satu sifat ringan dari material batu apung diakibatkan oleh pendinginan yang cepat dari massa vulkanik yang telah mencair. Menurut Muralitharan and Ramasamy (2015) batu apung mempunyai kandungan kimia silika sebesar 68,56%, alumina sebesar 21,93%, loss on ignition (LOI) sebesar 4,40%, magnesium oksida sebesar 2,31%, natrium sebesar 1,01%, kalium sebesar 0,83%, besi sebesar 0,96% dan lainnya dalam jumlah kecil. Tingkat silika yang tinggi mewujudkan bahan ini menjadi abrasif. Komposisi kimia pada batu apung yang tepat yaitu bervariasi antara sampel dan tergantung pada lokasi deposit (Manurung *et al.*, 2022).

Dalam penelitian ini zeolit-A disintesis dari silika batu apung yang berperan sebagai sumber Si dan aluminium foil sebagai sumber Al. Penggunaan batu apung untuk bahan utama pembuatan silika lebih menguntungkan karena sangat ekonomis, mudah dijangkau dan juga bersifat amorf sehingga mudah untuk dibentuk (Çifçi and Meriç, 2016).

2. Aplikasi Zeolit-A

Zeolit-A diketahui memiliki aplikasi yang bervariasi, dimana dua diantaranya adalah sebagai adsorben dan katalis. Zeolit-A sebagai adsorben telah dimanfaatkan untuk menghilangkan beberapa logam berat dari air limbah (Meng *et al.*, 2017). Zeolit-A sebagai katalis telah digunakan untuk transesterifikasi untuk mengubah minyak nabati menjadi biodiesel, yang dikenal sebagai bahan bakar cair terbarukan yang semakin penting. Pemanfaatan yang bervariasi ini menjadikan zeolit-A sebagai bahan yang menarik minat untuk terus menurus di eksplorasi, sebagai teknik preparasi, serta penggunaan bahan baku yang bervariasi.

2.4. Minyak Kelapa

Minyak kelapa adalah salah satu produk dari olahan daging buah kelapa yang dimanfaatkan untuk produk pangan dan produk non pangan. Minyak kelapa mempunyai keunikan tersendiri dibandingkan dengan minyak nabati yang lain, karena sebagian besar asam lemak yang terkandung di dalam minyak kelapa yaitu asam lemak rantai medium. Asam lemak rantai medium memiliki 6 sampai 12 atom karbon. Asam laurat (C₁₂) merupakan komponen utama yang terkandung dalam minyak kelapa, yaitu sekitar 46,64 - 48,80 % (Karouw *et al.*, 2013). Tabel 3 menjelaskan komposisi yang terkandung dalam minyak kelapa.

Tabel 3. Komposisi asam lemak dalam minyak kelapa

Asam Lemak	Komposisi (%)
Asam Heksanoat	0,0067
Asam Oktanoat	7,548
Asam Laurat	4,914
Asam Miristat	22,026
Asam Palmiat	13,6246
Asam Oleat	9,491
Asam Linoleat	5,083
Asam Stearat	0,637

Sumber : Hidayanti *et al.* 2015.

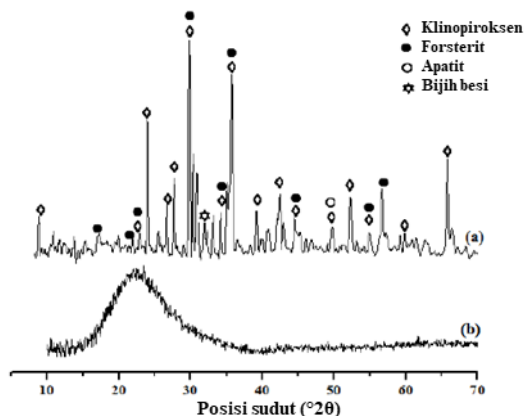
2.5. Karakterisasi

Penelitian ini dilakukan karakterisasi *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk menentukan unsur-unsur dan senyawa yang terkandung di dalam silika batu apung dan zeolit-A. Karakterisasi XRD dilakukan untuk menentukan fasa amorf pada silika serta fasa kristalin atau amorf pada zeolit-A. Karakterisasi SEM untuk mengetahui morfologi permukaan zeolit pada zeolit-A.

2.5.1. *X-Ray Diffraction* (XRD)

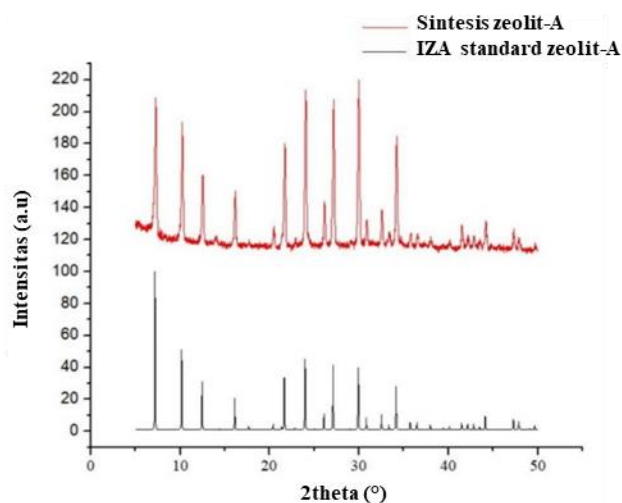
Karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) memiliki tujuan untuk mengidentifikasi fasa kuantitatif serta menentukan struktur kristalinitas atau Kristal dari suatu katalis dengan menggunakan radiasi gelombang elektromagnetik sinar X.

Pada penelitian Mourhly *et al.* (2015) menyelidiki dan memeriksa karakteristik bubuk batu apung dan silika yang diekstraksi, data XRD dikumpulkan pada suhu kamar menggunakan difraktometer sinar-X (Siemens D 500) dengan radiasi anti katoda tembaga ($CuK\alpha = 1.541838$) pada 2θ dari $10-90^\circ$. Gambar 5 menampilkan pola difraksi sinar-X dari bahan baku batu apung dan silika yang diekstraksi yang kemudian dikalsinasi pada suhu $80^\circ C$ selama 2 jam. Gambar tersebut menunjukkan bahwa batu apung yang tidak diolah mengandung mineral kristal (Gambar 5 (a)), seperti klinopiroksen (jenis diopside, augit atau basanit), forsterit dan mineral lainnya dalam jumlah kecil, seperti apatit dan hematit. Puncak lebar yang kuat, antara 15 dan 30° (2θ) (Gambar 5 (b)) menunjukkan bahwa silika SiO_2 yang diekstraksi dari bubuk batu apung adalah amorf dan tidak ada struktur kristal yang muncul. Kemurnian yang tinggi dari silika diindikasikan dengan tidak adanya puncak yang menunjukkan kemungkinan pengotor, seperti natrium sulfat dan logam alkali tanah lainnya.



Gambar 5. Difraktogram sinar-X (a) batu apung dan (b) silika amorf (Mourhly *et al.*, 2015).

Pada penelitian Pandiangan *et al.* (2023) melaporkan bahwa difraktogram dari sampel yang disintesis dicirikan oleh adanya puncak difraksi yang tajam, membenarkan sampel sebagai bahan kristal, meskipun keberadaan fasa amorf juga harus diakui, seperti yang ditunjukkan oleh adanya tonjolan kecil yang terdistribusi dalam rentang 2θ yang luas pada seluruh difraktogram. Untuk konfirmasi pembentukan zeolit-A, difraktogram sampel yang disintesis dibandingkan dengan zeolit-A standar yang tersedia di database International Zeolite Association (IZA), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Difraktogram XRD zeolit-A hasil sintesis dan zeolit-A standar IZA (Pandiangan *et al.*, 2023).

Seperti yang dapat diamati di Gambar 6, pola XRD dari sampel yang disintesis sangat mirip dengan zeolit-A standar IZA, menunjukkan bahwa FGAF adalah bahan baku alternatif yang menjanjikan untuk menggantikan prekursor alumina yang lebih mahal yang umumnya digunakan untuk pembuatan zeolit sintetik.

2.5.2. X-Ray Fluorescence (XRF)

X-Ray Fluorescence (XRF) adalah salah satu alat karakterisasi yang dimanfaatkan sebagai analisis komposisi senyawa kimia serta konsentrasi unsur-unsur yang terkandung dalam sampel secara kuantitatif atau kualitatif. Prinsip dasar dari analisis karakterisasi XRF yaitu berdasarkan pada terjadinya tumbukan atom-atom pada setiap permukaan bahan oleh sinar-X dari sumber sinar-X (Shen and shen, 2011).

Penelitian Mourhly *et al.* (2015) sampel silika didispersikan dalam etanol, yang kemudian diendapkan ke jaringan tembaga dan didehidrasi di bawah vakum. XRF diterapkan untuk menentukan komposisi bahan baku kimia. Komposisi kimia dan fasa dari bubuk batu apung mentah diberikan pada Tabel 4. Sebagai hasil analisis kimia, komponen utama yang ditemukan adalah SiO_2 dan Al_2O_3 dengan jumlah rata-rata masing-masing 48% dan 14,9%. Kandungan oksida besi yang cukup besar (6,71%) diamati, yang kompatibel dengan warnabatu apung yaitu abu-abu. Oksida lain juga telah terdeteksi, seperti MgO , Na_2O , CaO dan K_2HAI .

Tabel 4. Komposisi kimia batu apung ditentukan oleh XRF

Oksida	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Na_2O	CaO	Fe_2O_3	K_2O	Komponen Lainnya
Batu Apung (Berat %)	48	14,9	8,34	8,18	5,70	6,71	1,84	6,33

Sumber : Mourhly *et al.* 2015.

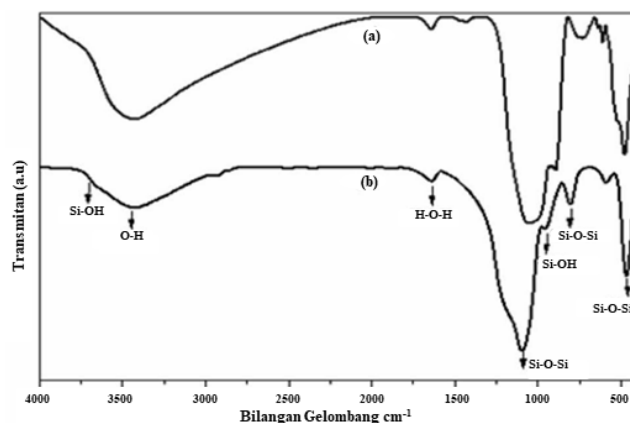
2.5.3. Fourier Transform Infra-Red (FTIR)

Spektroskopi FTIR merupakan salah satu teknik analisis yang digunakan untuk menganalisis suatu senyawa dengan momen dipol secara selektif menyerap radiasi infra merah (IR) sesuai dengan karakteristik gugus fungsi hidroksil, nitirle, amida.

Spektrum IR memplot absorbansi dengan panjang gelombang bervariasi dari 700-400.000 nm dan bilangan gelombang dari $14.000-25\text{ cm}^{-1}$). Frekuensi penyerapan IR tergantung pada mode getaran, sedangkan intensitasnya tergantung pada:

- Seberapa efektif energi ditransfer ke molekul, yang bergantung pada perubahan momen dipol yang terjadi selama getaran molekul,
- Berapa banyak yang ditransmisikan (atau dipantulkan), dan
- Detektor.

Semua senyawa kovalen, kecuali gas diatomik seperti N_2 , H_2 , dan O_2 , memiliki spektrum IR yang khas (Guerrero-Pérez and Patience, 2020).



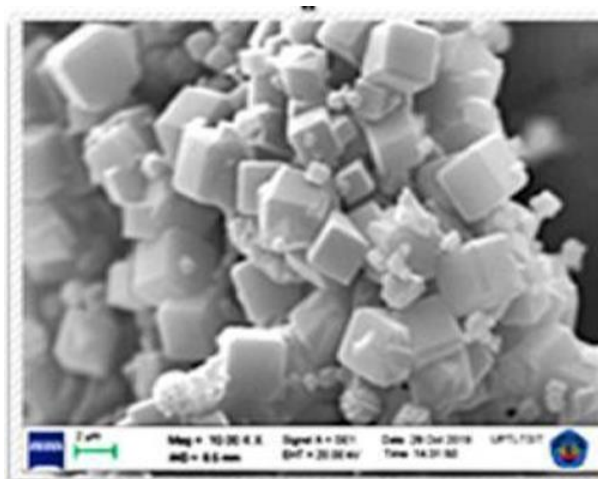
Gambar 7. Spektrum FTIR (a) batu apung dan (b) silika amorf (Mourhly *et al.*, 2015).

Gambar 7 pada penelitian Mourhly *et al.* (2015) menunjukkan spektrum FTIR batu apung dan silika amorf yang diekstraksi hasil setelah dikalsinasi pada suhu $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama dua jam. Gambar 7 (a), pita pelebaran yang dapat diamati antara 1.300 dan 820 cm^{-1} yang ditetapkan untuk oksida mineral yang berbeda dalam bahan batu apung. Pita sempit berpusat di 1.039 cm^{-1} , hal ini dapat disebabkan oleh adanya silika. Pita ini ditetapkan persentase silika tertinggi di batu apung, yang selanjutnya dikonfirmasi oleh analisis kimia. Pita dominan pada 1.101 cm^{-1} dan pada 1.193 cm^{-1} pada Gambar 7 (b) diasosiasikan dengan vibrasi regangan asimetris dari siloksan sebagai (Si-O-Si). Adanya pita pada 470 cm^{-1} dan 810 cm^{-1} disebabkan oleh adanya gugus siloksan simetris (Si-O-Si). Keberadaan pita pada 950 cm^{-1} berasosiasi dengan gugus Si-OH. Keberadaan pita ini disebabkan

oleh konsentrasi gugus silanol yang tinggi dengan ukuran partikel yang lebih kecil. Puncak muncul di 3750 cm^{-1} , menunjukkan adanya ikatan hidrogen yang dihasilkan dari interaksi antara gugus silanol (Si-OH) yang terletak pada permukaan bahan nanosilika. Pita terletak di kedua material, pada 1640 cm^{-1} dikaitkan dengan vibrasi tekuk OH dari air molekuler yang teradsorpsi dan vibrasi regangan yang sesuai pada 3456 cm^{-1} . Adanya molekul air pada Gambar 7 (b) menunjukkan bahwa rumus kimia silika amorf mendekati rumus kimia $\text{SiO}_x \cdot y\text{H}_2\text{O}$. Data ini memberikan bukti yang jelas bahwa silika amorf yang diekstraksi dari batu apung dengan perlakuan basa-asam bisa menjadi metode kimia reaktif yang cocok untuk persiapan katalis.

2.5.4. Scanning Electron Microscopy (SEM)

Analisis SEM dimaksudkan untuk mengetahui morfologi permukaan sample meliputi bentuk partikel, ukuran partikel, dan distribusi partikel pada permukaan. Dari tiga karakteristik permukaan di atas, bentuk partikel merupakan keunikan dari masing-masing zeolit, sehingga dapat digunakan untuk memastikan apakah zeolit tertentu sudah berhasil disintesis. Untuk zeolit-A, bentuk partikel adalah berbentuk kubus. Simanjuntak *et al.* (2021) telah berhasil mensintesis zeolit-A dari silika sekam padi dan aluminium foil *food grade* menunjukkan kristal kubus yang dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Morfologi SEM zeolit-A (Simanjuntak *et al.*, 2021).

2.5.5. *Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS)*

Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS) adalah kombinasi suatu instrument dari GC dan MS yang dihubungkan oleh satu interfase. Dalam metode ini kromatografi GC berperan untuk pemisahan komponen-komponen sampel, sementara MS berfungsi sebagai detektor. Pada hasil MS komponen BCO dikelompokkan menjadi menjadi 5 kategori yaitu hidrokarbon, keton, ester, asam, dan alkohol. Penggunaan metode ini dalam analisis BCO memiliki dua tujuan utama, yakni identifikasi komponen penyusun BCO dan penentuan komposisi relatif sampel, yang dihitung berdasarkan luas puncak komonen pada kromatogram GC. Pada kromatogram banyak puncak yang ditemukan memiliki intensitas yang sangat rendah, sehingga tidak teridentifikasi. Setiap puncak dari setiap komponen memiliki luas puncak yang berbeda, menunjukkan persentase relatif yang terkait dengannya berbeda. Persentase relatif dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\% i = \frac{A_i}{A_t} \times 100$$

Keterangan :

$\% i$ = Persentase relatif komponen i

A_i = Puncak area komponen i

A_t = Puncak total dari semua komponen yang teridentifikasi

III. METODE PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan yang bertempat di Laboratorium Anorganik/Fisik Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Analisis XRD dilakukan di Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) Surabaya, analisis XRF dilakukan di Universitas Negeri Padang, analisis FTIR dilakukan di Universitas Diponegoro Semarang, analisis SEM dilakukan di UPT LTSIT Universitas Lampung, serta analisis GC-MS dilakukan di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta dan Poltekkes Bandung, pada Oktober 2022 sampai April 2023.

3.2. Alat dan Bahan

3.2.1. Alat-Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain *hotplate stirrer*, *magnetic stirrer*, neraca analitik, pisau, oven Jisico J-300S, pengaduk magnet, *lock and lock*, pipet tetes, peralatan gelas, spatula, perangkat pirolisis, botol polipropilen, teflon, gelas porselen, statif dan klem, corong pisah, saringan mesh 200 dan 300, mortar dan alu, dan autoklaf. Analisis karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) PANalytical type XPert MPD *diffractometer*, *X-Ray Fluorescence* (XRF) PANalytical Epsilon 3, *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR) PerkinElmer Spectrum IR Version 10.6.1, *Scanning Electron Microscope* (SEM) tipe ZEISS EVO MA 10, dan *Gas Chromatography-Mass Spectrofotometry* (GC-MS) tipe QP2010S SHIMADZU dan Agilent *Technologies* 7890A.

3.2.2. Bahan-Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah minyak kelapa, batu apung, larutan HNO₃, larutan NaOH, larutan NaOH, larutan HCl, akuades, kertas saring, aluminium foil *food grade*, kertas TBA 0,8 mm, dan indikator pH universal.

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Preparasi Batu Apung

Batu apung yang digunakan untuk penelitian berasal dari pantai Suak, Kalianda, Lampung Selatan. Langkah pertama yang dilakukan adalah persiapan batu apung. Batu apung dibersihkan dari kotoran dengan cara direndam dengan air, kemudian dicuci berulang kali menggunakan air dan disikat pada beberapa bagian untuk menghilangkan kotoran yang masih menempel pada permukaan batu apung. Batu apung yang telah dibersihkan dari kotoran kemudian dijemur di bawah sinar matahari selama 12 jam dan dikeringkan kembali menggunakan oven pada suhu 100 °C selama satu malam. Batu apung yang sudah kering lalu dihaluskan dan diayak, selanjutnya direndam dengan menggunakan HCl 1 M sebanyak 1 L selama 24 jam untuk pemurnian, yang dibuat dari HCl 11 M sebanyak 91 mL yang ditambahkan dengan 909 mL akuades. Dicuci kembali setelah 24 jam dengan akuades hingga pH netral, dan dikeringkan pada suhu 100 °C selama semalam kemudian serbuk batu apung siap untuk diekstraksi.

3.3.2. Ekstraksi Silika Batu Apung

Sebanyak 40 gram batu apung yang telah dimurnikan, dilarutkan dalam 600 mL larutan NaOH 2,5 M dan 4 M di atas *hotplate stirrer* pada suhu 100 °C selama 24 jam untuk membentuk natrium silikat. Ekstrak yang terbentuk kemudian disaring dan diambil filtratnya. Larutan HNO₃ 3 M ditambahkan ke dalam filtrat hingga terbentuk silika gel atau hingga pH 7. Gel silika kemudian didiamkan selama 4 jam dan dicuci dengan akuades yang dipanaskan sebanyak 1 L pada mesh 300 mm. Silika yang diperoleh kemudian dikeringkan dalam oven selama satu malam pada suhu 100 °C dan kemudian dihaluskan. Serbuk silika yang diperoleh kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan XRD, XRF, dan FTIR.

3.3.3. Sintesis Zeolit-A dengan Metode Hidrotermal

Pada sintesis zeolit-A dilakukan variasi terhadap volume akuades yang digunakan, yaitu 150 mL, 200 mL, 250 mL, 300 mL, dan 430 mL. Sintesis zeolit-A diawali dengan menimbang NaOH pa sekitar 22,32 g, aluminium foil *food grade* sebanyak 33,31 g, dan silika batu apung sebanyak 20 g. Selanjutnya NaOH pa dilarutkan dengan variasi volume akuades yang digunakan dan dibagi menjadi dua bagian. Larutan NaOH ditambahkan silika sekam padi secara perlahan. Campuran dipanaskan dengan *hotplate stirrer* pada suhu 70 °C selama 3 jam. Setelah semua silika terlarut, larutan natrium silikat disaring dengan menggunakan kertas saring untuk memisahkan dari pengotor yang masih terdapat dalam larutan. Aluminium foil *food grade* yang telah dipotong kecil-kecil, dilarutkan ke dalam larutan NaOH lainnya dengan cara disebarakan secara merata lalu *distirrer* hingga larut dan tanpa panas, didapatkan larutan natrium aluminat. Kedua larutan tersebut, kemudian dicampurkan secara perlahan dan diaduk selama 3 jam dengan *stirrer* hingga membentuk gel homogen.

Gel kemudian dimasukkan ke dalam botol polipropilen dan dimasukkan ke dalam autoklaf, lalu dilakukan penuaan (*aging*) selama 24 jam dalam keadaan tertutup untuk menumbuhkan inti kristal zeolit, dan kemudian dikristalkan selama 72 jam dalam oven pada suhu 100 °C. Setelah proses kristalisasi selesai, zeolit yang terbentuk dicuci dengan akuades sampai mencapai pH 7-8. Sampel kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C hingga kering. Tahap terakhir, sampel yang sudah kering dikalsinasi pada suhu yang bervariasi, yaitu 600, 700, dan 800 °C selama 6 jam.

3.3.4. Karakterisasi Katalis Zeolit-A

Karakterisasi zeolit dilakukan dengan menggunakan XRD untuk menganalisis pengaruh silika batu apung terhadap struktur kristalografi sampel zeolit. Analisis SEM digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan sampel zeolit.

3.3.5. Uji Aktivitas Zeolit-A Sebagai Katalis

Pirolisis BCO dilakukan dengan 2 variasi, yaitu pirolisis minyak kelapa tanpa pasir dan pirolisis minyak kelapa dengan pasir. Pirolisis minyak kelapa tanpa pasir dilakukan dengan cara 250 mL minyak kelapa dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis yang telah dirakit pada alat pirolisis. Pirolisis minyak kelapa dengan pasir dilakukan dengan cara 250 mL minyak kelapa ditambahkan dengan 12,5 g pasir silika dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis yang telah dirakit pada alat pirolisis. Uap yang terbentuk dialirkan dari reaktor kemudian didinginkan di kondensor untuk menghasilkan distilat berupa BCO. Proses pirolisis dilakukan selama 1 jam.

BCO yang diperoleh kemudian dilakukan *catalytic upgrading* dengan katalis zeolit-A kalsinasi 600, 700, dan 800 °C untuk menghasilkan *biogasoline*. Sebanyak 100 mL BCO yang terbentuk dicampur dengan 5 gram dari masing-masing katalis zeolit-A untuk memperoleh produk *biogasoline*.

3.3.6. Karakterisasi Produk Pirolisis

Karakterisasi BCO dan *biogasoline* dilakukan dengan menggunakan GC-MS untuk mengidentifikasi komponen penyusun sampel.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

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

1. Sintesis zeolit-A yang bersumber dari silika batu apung dan aluminium foil dengan menggunakan metode hidotremal telah berhasil disintesis, dibuktikan dengan analisis XRD yang dibandingkan dengan standar IZA dan SEM.
2. Hasil karakterisasi dengan menggunakan XRD, menunjukkan bahwa pada variasi konsentrasi NaOH 1,30 M dengan suhu kalsinasi 600 dan 800 °C terbentuk fasa kristalin yang mengandung zeolit-A dan mengandung sodalit serta fasa amorf, sedangkan dengan suhu kalsinasi 700 °C terbentuk fasa kristalin yang mengandung zeolit-A serta fasa amorf yang mendominasi.
3. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan terbentuknya fasa kristalin berbentuk kubus, walaupun masih terdapat gumpalan yang tidak beraturan yaitu fasa amorf dan sodalit yang berbentuk seperti jarum.
4. Proses *catalytic upgrading* dari BCO minyak kelapa yang terbaik dengan menggunakan katalis zeolit-A dengan suhu kalsinasi 600 °C dengan komposisi *biogasoline* yang meningkat dari 8,87% menjadi 34,29% .

5.2. Saran

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

1. Mempelajari proses ekstraksi silika dan mensintesis zeolit-A menggunakan konsentrasi NaOH pada rentang yang mendekati konsentrasi dengan kristalinitas yang baik pada penelitian ini.

2. *Biogasoline* yang dihasilkan mengandung asam yang tinggi dan kemungkinan berasal dari bahan baku yang digunakan, sehingga disarankan menggunakan bahan baku lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., Mckay, G., Mackey, H., and Al-Ansari, T. 2022. A Review of Pyrolysis Technologies and Feedstock: a Blending Approach for Plastic and Biomass Towards Optimum Biochar Yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 167(5). 112715 : 1-16.
- Al-Salem, S. M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., and Dutta, A. 2017. A Review on Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Solid Waste (PSW). *Journal of Environmental Management*. 197(1408) : 177–198.
- Arneli., Solichah, F., Alfiansyah., Suseno, A., dan Astuti, Y. 2017. Sintesis Zeolit dari Abu Sekam Padi Menggunakan Metode Hidrotermal : Variasi Waktu dan Temperatur. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 20(2) : 58-61.
- Bustaman, S. 2009. Strategi Pengembangan Industri Biodiesel Berbasis Kelapa di Maluku. *Jurnal Litbang Pertanian*. 28(2): 46-53.
- Chen, D., Li, Y., Cen, K., Luo, M., Li, H., and Lu, B. 2016. Pyrolysis Polygeneration of Poplar Wood: Effect of Heating Rate and Pyrolysis Temperature. *Bioresour. Technol.* 218 : 780–788.
- Chen, D., Wang, Y., Liu, Y., Cen, K., Cao, X., Ma, Z., and Li, Y. 2019. Comparative Study on the Pyrolysis Behaviors of Rice Straw Under Different Washing Pretreatments of Water, Acid Solution, and Aqueous Phase Bio-Oil by Using TG-FTIR and Py-GC/MS. *Fuel*. 252(04): 1–9.
- Chen, T., Wu, C., Liu, R., Fei, W., and Liu, S. 2011. Effect of Hot Vapor Filtration on the Characterization of Bio-Oil from Rice Husks with Fast Pyrolysis in a Fluidized-Bed Reactor. *Bioresour. Tech.* 102(10) : 6178-6185.
- Chen, W. H., Farooq, W., Shahbaz, M., Naqvi, S. R., Ali, I., Al-Ansari, T., and

- Saidina, A. N. A. 2021. Current Status of Biohydrogen Production from Lignocellulosic Biomass, Technical Challenges and Commercial Potential Through Pyrolysis Process. *Energy*. 226. 120433 : 1-15.
- Çifçi, D. İ., and Meriç, S. 2016. A Review on Pumice for Water and Wastewater Treatment. *Desalination and Water Treatment*. 57(39) : 18131–18143.
- Deviani, S. S., Mahatmanti, F. W., dan Widiarti, N. 2018. Sintesis dan Karakterisasi Zeolit dari Abu Sekam Padi Menggunakan Metode Hidrotermal. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 7(1) : 1-8.
- Devita, L. 2015. Biodiesel sebagai Bioenergi Alternatif dan Prospektif. *Agrica Ekstensia*. 9(2) : 23-26.
- Derbe, T., Temesgen, S., and Bitew, M. 2021. A Short Review on Synthesis, Characterization, and Applications of Zeolites. *Advances in Materials Science and Engineering*. 1-17.
- Dhyani, V., and Bhaskar, T. 2019. Pyrolysis of Biomass In Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels. Academic Press. Oxford. 217-244.
- 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).
- Georgiev, D., Bogdan, B., Angelova, K., Markovska, I., and Hristov, Y. 2009. Synthetic Zeolite-structure, Classification, Current Trends in Zeolite Synthesis. *Economics and Society Development on the Base of Knowledge*. 1 : 1–6.
- Gerpen, V. J. 2005. Biodiesel Processing and Production. *Fuel Process Technology*. 1(86): 1097–1107.
- Ginting, S. B., Sari, D. P., Iryani, D. A., Hanif, M., and Wardono, H. 2019. Synthesis of Lynde Type-A Zeolite (LTA) from Lampung Natural Zeolite (Zal) Using Step Change Temperature Of Hydrothermal Method with SiO₂/Al₂O₃ Variations Applied for Ethanol Dehydration. *Journal of*

Chemical Process Engineering. 4(2655) : 32–44.

Goyal, H. B., Seal, D., and Saxena, R. C. 2008. Bio-Fuels from ThermoChemical Conversion of Renewable Resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12(2) : 504–517.

Guerrero-Pérez, M. O., and Patience, G. S. 2020. Experimental Methods in Chemical Engineering: Fourier Transform Infrared Spectroscopy—FTIR. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 98(1) : 25–33.

Hargono, H., Jos, B., Purwanto, P., Sumardiono, S., and Zakaria, M. F. 2021. Fuel Grade Bioetanol Production from Suweg Starch Through Distillation-Adsorption Process Using Natural Zeolite. *International Conference on Chemical and Material Engineering*. 1053 : 1-7.

Haryanto, B. 2002. *Bahan Bakar Alternatif Biodiesel*. Jurusan Teknik Kimia. Medan.

Hidayanti, N., Arifah, N., Jazilah, R., Suryanto, A., dan Mahfud. 2015. Produksi Biodiesel dari Minyak Kelapa dengan Katalis Basa Melalui Proses Transesterifikasi Menggunakan Gelombang Mikro (Microwave). *Jurnal Teknik Kimia*. 10(1) : 13–18.

Hums, E. 2017. Synthesis of Phase-Pure Zeolit Sodalite from Clear Solution Extracted from Coal Fly Ash. *Journal of Thermodynamics and Catalysis*. 08(02): 1–6.

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.

Jumaeri., Jananti, P. D., dan Kusumastuti, E. 2013. Sintesis Zeolit A dari Abu Layang Batubara melalui Modifikasi Proses Hidrotermal. *Jurnal Sain dan Teknologi*. 11(2) : 1-12.

Karouw, S., Suparmo, S., Hastuti, P., dan Utami, T. 2013. Sintesis Ester Metil Rantai Medium dari Minyak Kelapa dengan Cara Metanolisis Kimiawi. *agriTECH*. 33(2) : 182–188.

- Krol, M. 2020. Natural vs. Synthetic Zeolites. *Crystals*. 10(622) : 1–8.
- Kuroki, S., Hashishin, T., Morikawa, T., Yamashita, K., and Matsuda, M. (2019). Selective Synthesis of Zeolites A and X from Two Industrial Wastes: Crushed Stone Powder and Aluminum Ash. *Journal of Environmental Management*. 231 : 749–756.
- Liu, S., Wu, G., Gao, Y., Li, B., Feng, Y., Zhou, J., and Hu, X. 2021. Understanding the Catalytic Upgrading of Bio-Oil from Pine Pyrolysis Over CO₂-Activated Biochar. *Renewable Energy*. 174 : 538–546.
- Mahdi, Z., Hanandeh, A. El, and Yu, Q. 2017. Influence of Pyrolysis Conditions on Surface Characteristics and Methylene Blue Adsorption of Biochar Derived from Date Seed Biomass. *Waste and Biomass Valorization*. 8(6) : 2061–2073.
- Manurung, P., Ginting, E. S., Ginting, E., and Suprihatin. 2022. Synthesis and Characterisation of Nano-silica Based on Pumice Using NaOH. *Journal of Physical Science*. 33(1) : 17–28.
- Meng, Q., Chen, H., Lin, J., Lin, Z., and Sun, J. 2017. Zeolite A Synthesized from Alkaline Assisted Pre-Activated Halloysite for Efficient Heavy Metal Removal in Polluted River Water and Industrial Wastewater. *Journal of Environmental Sciences (China)*. 56 : 254–262.
- Mourhly, A., Khachani, M., El Hamidi, A., Kacimi, M., Halim, M., and Arsalane, S. 2015. The Synthesis and Characterization of Low-Cost Mesoporous Silica SiO₂ from Local Pumice Rock. *Nanomaterials and Nanotechnology*. 5(35) : 1-7.
- Muralitharan, R. S., and Ramasamy, V. 2015. Basic Properties of Pumice Aggregate. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. 8(4) : 1845–1852.
- Muttaqi, A. M., Firman, K., Danawati, H. P., and Achmad, R. 2019. Hydrocracking of Coconut Oil Over Ni-Fe/HZSM-5 Catalyst to Produce Hydrocarbon Biofuel Indones. *J. Chem.* 19 (2) : 319-327.
- Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Pratiwi, E., and Rilyanti, M. 2019.

Characteristics and Catalytic Activity of Zeolite-A Synthesized from Rice Husk Silica and Aluminium Metal by Sol-Gel Method. *Journal of Physics: Conference Series*. 1338(1).

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).

Pangesti, G. G., Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Sascori, S., and Rilyanti, M. 2021. Synthesis of Zeolite-Y From Rice Husk Silica and Food Grade Aluminum Foil Using Modified Hydrothermal Method. *Journal of Physics: Conference Series*. 1751(1) : 1-9.

Pujiati., Dewi, N. K., dan Setiawan, D. 2020. Produksi Biogas Berbasis Biomassa. UNIPMA Press. Madiun.

Ramesh, K., and Reddy, D. D. 2011. Zeolites and Their Potential Uses in Agriculture. *Advances in Agronomy*. 113 : 219–241.

Rios, C. A., Williams, C. D., and Fullen, M. A. 2009. Nucleation and Growth History of Zeolite LTA Synthesized from Kaolinite by Two Different Methods. *Applied Clay Science*. 42 : 446-454.

Sharma, B. K., Moser, B. R., Vermillion, K. E., Doll, K. M., and Rajagopalan, N. 2014. Production, Characterization and Fuel Properties of Alternative Diesel Fuel from Pyrolysis of Waste Plastic Grocery Bags. *Fuel Processing Technology*. 122 : 79–90.

Setiawati, D. R., Sinaga, A. R., dan Dewi, T. K. 2013. Proses Pembuatan Bioetanol dari Kulit Pisang Kapok. *Jurnal Teknik Kimia*. 9(1) : 9-15.

Shen, W., and Shen, B. 2011. Synthesis and Characterization of Composite Structure Zeolite Y. *Advanced Materials Research*. 233–235(1) : 1790–1793.

Simanjuntak, A., Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., and Sembiring, Z. 2019. The Effect of Sugarcane Bagasse to Rubber Seed Oil Ratios on the Composition of Liquid Fuels Produced by Zeolite-y Catalyzed Pyrolysis. *Journal of Physics: Conference Series*. 1338(1) : 1-9.

- Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., 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., Sembiring, Z., Simanjuntak, A., and Hadi, S. 2021. The Effect of Crystallization Time on Structure, Microstructure, and Catalytic Activity of Zeolite-A Synthesized from Rice Husk Silica and Food-Grade Aluminum Foil. *Biomass and Bioenergy*. 148 : 1-7.
- Siti, J., Rahayu, A., Yano, S. P., Budhijanto, Rochmadi, and Arief, B. 2020. Bio-Oil Characterizations of *Spirulina Platensis* Residue (Spr) Pyrolysis Products for Renewable Energy Development. *Key Engineering Materials*. 849 : 47–52.
- Strahan, G. D., Mullen, C. A., and Boateng, A. A. 2011. Characterizing biomass fast pyrolysis oils by ¹³C NMR and chemometric analysis. *Energy and Fuels*. 25(11) : 5452–5461.
- Supriyanto, R., Simanjuntak, W., Pandiangan, K. D., Situmeang, R. T. M., and Ahmadhani, M. Y. 2018. Chemical Composition of Liquid Fuel Produced by Co-pyrolysis of Sugarcane Bagasse and Sludge Palm Oil Using Zeolite-Y as Catalyst. *Orient J Chem*. 34 (3) : 1533-1540.
- Tran, Y. T., Lee, J., Kumar, P., Kim, K. H., and Lee, S. S. 2019. Natural Zeolite and its Application in Concrete Composite Production. *Composites Part B: Engineering*. 165 : 354–364.
- Trianasari., Manurung, P., dan Karo-Karo, P. 2017. Analisis dan Karakterisasi Kandungan Silika (SiO₂) sebagai Hasil Ekstraksi Batu Apung (Pumice). *Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika*. 05(1) : 9–14.
- Tsujiguchi, M., Kobashi, T., Oki, M., Utsumi, Y., Kakimori, N., and Nakahira, A. 2014. Synthesis and Characterization of Zeolite A from Crushed Particles of Aluminoborosilicate Glass Used in LCD Panels. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2(1) : 27–32.
- Uchimiya, M., Wartelle, L. H., Lima, I. M., and Klasson, K. T. 2010. Sorption of deisopropylatrazine on broiler litter biochars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*/ 58(23) :12350–12356.

- Uddin, M. N., Techato, K., Taweekun, J., Rahman, M. M., Rasul, M. G., Mahlia, T. M. I., and Ashrafur, S. M. 2018. An Overview of Recent Developments in Biomass Pyrolysis Technologies. *Energies*. 11 : 1-24.
- Van de Velden, M., Baeyens, J., Brems, A., Janssens, B., and Dewil, R. 2010. Fundamentals, Kinetics and Endothermicity of the Biomass Pyrolysis Reaction. *Renewable Energy*. 35(1) : 232–242.
- Wang, K., Peng, N., Lu, G., and Dang, Z. 2020. Effects of Pyrolysis Temperature and Holding Time on Physicochemical Properties of Swine-Manure-Derived Biochar. *Waste and Biomass Valorization*. 11(2) : 613–624.
- Yusan, S., Gok, C., Erenturk, S., and Aytas, S. 2012. Adsorptive Removal of Thorium (IV) Using Calcined and Flux Calcined Diatomite from Turkey: Evaluation of Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Data. *Applied Clay Science*. 67-68 : 106-116.
- Zaman, C. Z., Pal, K., Yehye, W. A., Sagadevan, S., Shah, S. T., Adebisi, G. A., Marlina, E., Rafique, R. F., and Johan, R. Bin. 2017. Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste. *Pyrolysis*. 3–36.
- Zhan, Y., Li, X., Zhang, Y., Han, L., and Chen, Y. 2013. Phase And Morphology Control Of LTA/FAU Zeolites By Adding Trace Amounts Of Inorganic Ions. *Ceramics International*. 39(5) : 5997–6003.