

**UJI AKTIVITAS KATALITIK KATALIS H-ZSM-5 PORI HIRARKI
TERIMPREGNASI LOGAM Co BERBASIS SILIKA *SUGARCANE*
BAGASSE ASH (SCBA) DALAM REAKSI DEHIDRASI METANOL
MENJADI DIMETIL ETER**

(Skripsi)

Oleh

**RAMANDHIKA ABI KARAMI
2117011098**



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

ABSTRAK

UJI AKTIVITAS KATALITIK KATALIS H-ZSM-5 PORI HIRARKI TERIMPREGNASI LOGAM Co BERBASIS SILIKA *SUGARCANE BAGASSE ASH* (SCBA) DALAM REAKSI DEHIDRASI METANOL MENJADI DIMETIL ETHER

Oleh

Ramandhika Abi Karami

Ampas tebu menjadi salah satu limbah biomassa yang banyak dihasilkan di Provinsi Lampung. Dalam penelitian ini, memanfaatkan potensi limbah biomassa berupa abu ampas tebu (*Sugarcane Bagasse Ash*/SCBA) sebagai sumber silika dan metanol sebagai prekursor untuk dehidrasi metanol menjadi dimetil eter dalam penentuan aktivitas katalitik ZSM-5 pori hirarki.

Silika diekstraksi dari SCBA melalui proses alkali kemudian disintesis menjadi ZSM-5 pori hirarki menggunakan pati sebagai bio-mesoporogen dan penambahan benih ZSM-5 (*seed assisted*) secara hidrotermal pada suhu 180 °C selama 144 jam, pertukaran ion menjadi bentuk H-ZSM-5 pori hirarki dan impregnasi menggunakan logam Co, serta uji aktivitas katalitik pada reaksi dehidrasi metanol menjadi dimetil eter.

Silika SCBA memiliki rendemen 2,94% berfasa dominan *amorf* dari hasil XRD, rasio Si/Al setelah perlakuan dealuminasi 6,072, dan terkonfirmasi gugus silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si). ZSM-5 pori hirarki berbasis silika SCBA dan Ludox telah berhasil disintesis dengan kristalinitas masing masing 62,68 dan 76,45%, rasio Si/Al 12,646 dan 3,896, morfologi berbentuk kristal heksagonal tidak seragam dengan permukaan partikel kasar pada karakterisasi SEM, serta diameter ukuran pori berukuran 3,38 nm pada ZSM-5 pori hirarki SCBA. Impregnasi Co pada ZSM-5 pori hirarki SCBA dan Ludox menghasilkan rasio Si/Al 9,898 dan 2,628, menunjukkan logam Co yang teremban dalam ZSM-5 pori hirarki SCBA dan Ludox sebesar 4,005 dan 6,005% pada karakterisasi XRF, serta diameter pori berukuran 9,51 nm pada Co/H-ZSM-5 pori hirarki SCBA. Penggunaan katalis Co/H-ZSM-5 pori hirarki Ludox memperoleh konversi DME dari dehidrasi metanol. Hasil ini lebih baik dibandingkan Co/H-ZSM-5 pori hirarki SCBA yang tidak menghasilkan konversi DME.

Kata Kunci: Silika SCBA, H-ZSM-5, impregnasi, dehidrasi, DME

ABSTRACT

CATALYTIC ACTIVITY TEST OF H-ZSM-5 HIERARCHICAL PORE CATALYST IMPREGNATED WITH METAL Co BASED ON SILICA SUGARCANE BAGASSE ASH (SCBA) IN THE DEHYDRATION REACTION OF METHANOL TO DIMETHYL ETHER

By

Ramandhika Abi Karami

Sugarcane bagasse is one of the biomasses wastes widely produced in Lampung Province. In this study, the potential of biomass waste in the form of sugarcane bagasse ash (SCBA) as a silica source and methanol as a precursor for methanol dehydration to dimethyl ether was utilized to determine the catalytic activity of hierarchical pore ZSM-5. Silica was extracted from SCBA through an alkali process and synthesized into ZSM-5 hierarchical pore using starch as a bio-mesopore and ZSM-5 seeds (seed assisted) hydrothermally at 180 °C for 144 hours, ion-exchanged into H-ZSM-5 hierarchical pore, and impregnated with Co metal, followed by catalytic activity testing in methanol dehydration. SCBA silica had a yield of 2,94% with a dominant amorphous phase from XRD results, Si/Al ratio of 6,072 after dealumination, and confirmed silanol (Si-OH) and siloxane (Si-O-Si) groups. ZSM-5 hierarchical pore from SCBA and Ludox silica were successfully synthesized with crystallinity of 62,68 and 76,45%, respectively, Si/Al ratios of 12,646 and 3,896, and non-uniform hexagonal crystal morphology with rough surfaces by SEM characterization, with a pore diameter of 3,38 nm in SCBA-based ZSM-5. Co impregnation on SCBA and Ludox-based ZSM-5 resulted in Si/Al ratios of 9,898 and 2,628, with Co contents of 4,005 and 6,005% by XRF, and a pore diameter of 9,51 nm in Co/H-ZSM-5 SCBA. The use of Co/H-ZSM-5 hierarchical pores Ludox catalyst produced DME conversion from methanol dehydration, which was better than Co/H-ZSM-5 hierarchical pores SCBA that showed no conversion.

Keywords: SCBA silica, H-ZSM-5, impregnation, dehydration, DME

**UJI AKTIVITAS KATALITIK KATALIS H-ZSM-5 PORI HIRARKI
TERIMPREGNASI LOGAM Co BERBASIS SILIKA *SUGARCANE*
BAGASSE ASH (SCBA) DALAM REAKSI DEHIDRASI METANOL
MENJADI DIMETIL ETER**

Oleh

RAMANDHIKA ABI KARAMI

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
2025**

Judul Skripsi

**: UJI AKTIVITAS KATALITIK KATALIS
H-ZSM-5 PORI HIRARKI TERIMPREGNASI
LOGAM Co BERBASIS SILIKA
SUGARCANE BAGASSE ASH (SCBA)
DALAM REAKSI DEHIDRASI METANOL
MENJADI DIMETIL ETER**

Nama Mahasiswa

: Ramandhika Abi Karami

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2117011098

Program Studi

: Kimia

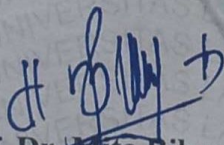
Fakultas

: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

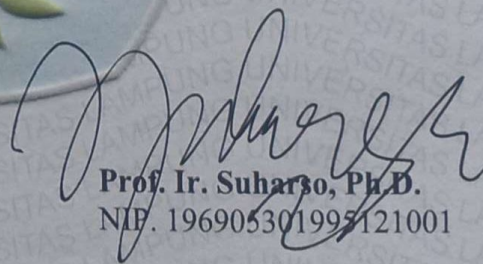


MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

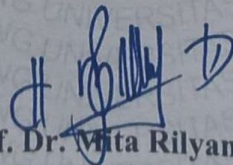


Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.
NIP. 197205302000032001



Prof. Ir. Suharto, Ph.D.
NIP. 196905301995121001

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA

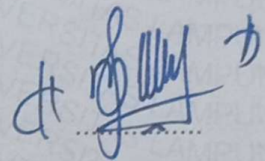


Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.
NIP. 197205302000032001

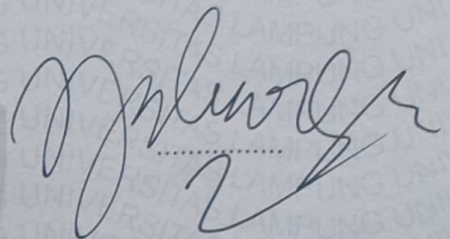
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.

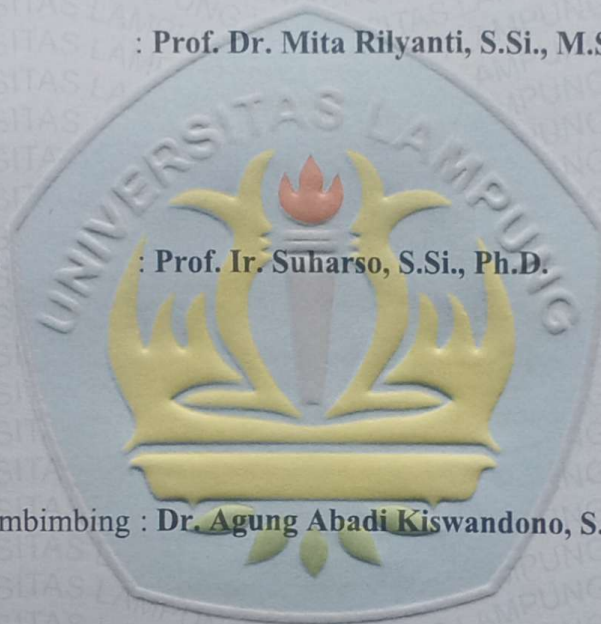
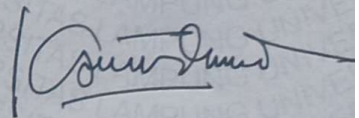


Sekretaris : Prof. Ir. Suharso, S.Si., Ph.D.



Penguji

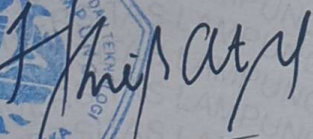
Bukan Pembimbing : Dr. Agung Abadi Kiswandono, S.Si., M.Sc.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 27 November 2025

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ramandhika Abi Karami
NPM : 2117011098
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul **“Uji Aktivitas Katalitik Katalis H-ZSM-5 Pori Hirarki Terimpregnasi Logam Co Berbasis Silika *Sugarcane Bagasse Ash* (SCBA) dalam Reaksi Dehidrasi Metanol Menjadi Dimetil Eter”** adalah benar karya saya sendiri baik gagasan, hasil, dan analisisnya. Selanjutnya saya juga tidak keberatan jika sebagian atau seluruh data dalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi, sepanjang nama saya disebutkan dan terdapat kesepakatan sebelum dilakukan publikasi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sadar dan sebenar-benarnya untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 4 Desember 2025

Yang menyatakan,



Ramandhika Abi Karami
NPM. 2117011098

RIWAYAT HIDUP

Ramandhika Abi Karami lahir di Bandar Lampung, 27 Maret 2003. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Dedi Lesmono dan Ibu Yuni Hayati. Penulis menyelesaikan pendidikan sekolah dasar di SDN 1 Sidodadi pada tahun 2015. Pendidikan sekolah menengah pertama diselesaikan pada tahun 2018 di SMPN 22 Bandar Lampung. Pendidikan sekolah menengah atas diselesaikan pada tahun 2021 di SMAN 9 Bandar Lampung. Penulis mengikuti organisasi Karya Ilmiah Remaja (KIR) dan Rohani Islam (Rohis) ketika di bangku SMA. Penulis terdaftar menjadi mahasiswa Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung pada tahun 2021 melalui jalur tertulis Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa kimia, penulis pernah menjadi asisten praktikum mata kuliah Kimia Anorganik I – Kimia Fisik II tahun 2024. Selain itu, penulis aktif mengikuti beberapa kegiatan mahasiswa di lingkungan Fakultas MIPA. Penulis memulai aktivitas organisasi sebagai Kader Muda Himaki (KAMI) tahun 2021. Penulis juga mengikuti kegiatan Karya Wisata Ilmiah yang diadakan oleh BEM FMIPA Unila tahun 2021 dan pernah menjabat sebagai anggota bidang Sosial Masyarakat (SOSMAS) Himaki FMIPA Unila Periode 2022 dan 2023. Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Rejomulyo, Kecamatan Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan pada Januari - Februari 2024. Penulis telah menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) dengan judul “Sintesis dan Karakterisasi ZSM-5 Pori Hirarki Terimpregnasi Logam Co Berbasis Silika Ludox dan SCBA” di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik FMIPA Universitas Lampung.

MOTTO

**“Yang bertuhan pasti bertahan”
(Habib Husein bin Ja'far Al Hadar)**

**“Jangan bilang tidak mungkin kepadaku sebelum kamu mati mencobanya”
(Sultan Muhammad Al-Fatih)**

**“The person you have to spend the most time listening to in your life is
yourself, try not to lose their respect”
(Mark Manson)**

**“Trying to do better”
(Tobey Maguire)**

**“Hidup santai dan bahagia”
(Ramandhika Abi Karami)**

PERSEMBAHAN



Alhamdulillah rabbil'alam, segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, shalawat semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW yang senantiasa diharapkan syafaatnya. Kupersembahkan karya sederhana ini sebagai bentuk terima kasih dan tanggung jawab kepada:

Kedua orang tua, yang selalu memberikan doa dan dukungan. Atas setiap usaha, doa, dan materi menjadi dukungan dan sumber motivasi terbesar. Semoga karya sederhana ini dapat menjadi kebanggaan dan kebahagiaan untuk kalian.

Diri sendiri yang memiliki kesadaran akan rasa tanggung jawab untuk menyelesaikan sesuatu yang telah dimulai sebelumnya.

Dengan rasa hormat, kepada Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si., Bapak Prof. Ir. Suharso, Ph.D., Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, S.Si., M.Sc., serta seluruh dosen Jurusan Kimia FMIPA Unila yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan ilmunya.

Sahabat dan teman-teman yang telah memberikan kebahagiaan, pengalaman, dan pelajaran yang telah menjadi bagian tidak terpisahkan dari perjalanan.

Dan almamater tercinta, Universitas Lampung.

SANWANCANA

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah Subhanahu wa Ta'ala yang melimpahkan rahmat, hidayah, nikmat, dan keridhoan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan judul **“Uji Aktivitas Katalitik Katalis H-ZSM-5 Pori Hirarki Terimpregnasi Logam Co Berbasis Silika *Sugarcane Bagasse Ash* (SCBA) dalam Reaksi Dehidrasi Metanol Menjadi Dimetil Eter”** sebagai syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Sains (S.Si) di Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Shalawat serta salam penulis haturkan kepada baginda Rasullallah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, serta seluruh umatnya yang selalu taat menjalankan ajaran-Nya.

Skripsi ini diselesaikan berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan di Laboratorium Kimia Anorganik-Fisik. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis maupun pembaca. Banyak bantuan, bimbingan, serta dukungan yang penulis dapat dari berbagai pihak sehingga skripsi dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Allah Subhanahu wa Ta'ala yang telah memberikan kemudahan dan mendengarkan doa penulis, serta senantiasa melimpahkan rahmat dan karunia sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
2. Kedua orang tua yang selalu memberikan dukungan berupa doa maupun materi untuk penulis. Terima kasih banyak Abi dan Umi yang sudah memberikan kesempatan kepada penulis untuk merasakan bangku perkuliahan ini. Semoga senantiasa Abi dan Umi diberikan kesehatan serta kebahagiaan agar kelak penulis dapat memberikan kebahagiaan.

3. Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, arahan, nasehat, semangat, motivasi, serta waktu luang kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan skripsi ini. Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan ibu dan senantiasa diberikan keberkahan.
4. Bapak Prof. Ir. Suharso, Ph.D. selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan bimbingan, nasihat, saran, kritik, dan ilmu yang bermanfaat kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi.
5. Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, S.Si., M.Sc. selaku dosen pembahas yang telah memberikan bimbingan, saran, dan ilmu yang bermanfaat kepada penulis hingga skripsi ini selesai.
6. Ibu Devi Nur Anisa, M.Sc. selaku dosen pembimbing akademik, penulis mengucapkan terima kasih atas ketersediaan ibu dalam memberikan bimbingan perkuliahan, nasihat, waktu, serta motivasi kepada penulis.
7. Seluruh civitas akademika Jurusan Kimia FMIPA Unila yang telah membantu penyelesaian masa studi penulis.
8. Mbak Liza selaku PLP Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik atas penyediaan alat laboratorium, kemudahan dalam mengurus berkas, dan bantuan dalam proses penelitian.
9. Kakak-kakak senior di *Mita's Research*, Kak Azizah, Kak Arip, Kak Cuya, Kak Buya, dan Kak Valen yang sudah berbagi ilmu dan pengalaman serta membantu penulis.
10. Sahabat seperjuangan di perkuliahan penulis Az zahra Joanda, Nadira Anjani, Amalia Triananda, Abdurachman, Andra Fahreza Dwi Saputra, Hafiz Sadewa Utama, Raditya Adam Narendra, Aditya Anugrah Sahyani, yang mendukung dan membantu penulis hingga lulus.
11. Rekan seperbimbingan *Mita's 21 Research*: Annis, Alya, April, dan Camel yang memberikan bantuan selama jalannya penelitian.
12. Sahabat 'Bintang' Reja, Kipli, Alip, Jojo, Meta, Hisbi, Sasa, Chita, Pakom, dan Haidar.
13. Sahabat seperjuangan hidup Rakhasena Ibnu Afkary yang masih menjadi teman penulis selama hampir 10 tahun.

14. Rekan seperjuangan PKL Alya Ambaryani Putri atas segala kebaikan dan bantuannya selama menjalani PKL di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik.
15. Keluarga besar mahasiswa Jurusan Kimia angkatan 2021 atas kebersamaan, dukungan, dan semangatnya.
16. Teman KKN Rejomulyo: Amal, Iqbal, Firman, Safina, Febri, Nisa, dan Agnes untuk kebersamaan dan pengalaman selama 40 harinya.
17. Seluruh pihak yang terlibat dan tidak bisa penulis sebutkan satu persatu. Terima kasih atas segala dukungan serta doa yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini.

Bandar Lampung, 4 Desember 2025

Ramandhika Abi Karami

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR.....	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	4
1.3 Manfaat Penelitian.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Abu Ampas Tebu.....	6
2.2 Silika.....	7
2.3 Zeolit	9
2.4 <i>Zeolite Socony Mobile-5 (ZSM-5)</i>	11
2.5 Metode Sintesis Hidrotermal.....	14
2.6 Sintesis Benih ZSM-5	14
2.7 Zeolit Pori Hirarki	16
2.8 Sintesis Zeolit Pori Hirarki.....	17
2.9 Impregnasi Logam Co	19
2.10 Katalis.....	20
2.11 Reaksi Dehidrasi.....	22
2.12 Dimetil Eter	23
2.13 Karakterisasi	23
2.13.1 <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	23
2.13.2 <i>X-Ray Fluoresence (XRF)</i>	26
2.13.3 <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	27
2.13.4 <i>Fourier Transform Infrared (FTIR)</i>	28
2.13.5 <i>Brunauer-Emmett-Teller (BET)</i>	29
2.13.6 <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)</i>	32
III. METODE PENELITIAN	33
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	33
3.2 Alat dan Bahan	33
3.3 Prosedur Penelitian	34

3.3.1 Ekstraksi Silika dari Abu Ampas Tebu (SCBA)	34
3.3.2 Karakterisasi Silika Hasil Ekstraksi Abu Ampas Tebu.....	35
3.3.3 Sintesis <i>Zeolite Socony Mobile-5</i> (ZSM-5) Pori Hirarki.....	35
3.3.4 Karakterisasi Zeolit Hasil Sintesis	39
3.3.5 Preparasi Katalis.....	39
3.3.6 Karakterisasi Co/H-ZSM-5 Pori Hirarki	40
3.3.7 Uji Aktivitas Katalitik	40
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	41
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	42
4.1 Ekstraksi Silika dari Abu Ampas Tebu (SCBA)	42
4.1.1 Preparasi Abu Ampas Tebu.....	42
4.1.2 Ekstraksi Silika.....	44
4.2 Karakterisasi Silika SCBA Hasil Ekstraksi.....	46
4.2.1 Hasil <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) Silika SCBA.....	46
4.2.2 Hasil <i>X-Ray Fluoresence</i> (XRF) Silika SCBA	48
4.2.3 Hasil <i>Fourier Transform Infra Red</i> (FTIR) Silika SCBA.....	49
4.3 Sintesis ZSM-5	50
4.3.1 Sintesis Benih ZSM-5	50
4.3.2 Sintesis ZSM-5 Pori Hirarki Berbasis Silika Ludox	51
4.3.3 Sintesis ZSM-5 Pori Hirarki Berbasis Silika SCBA	52
4.4 Karakterisasi ZSM-5 Pori Hirarki	54
4.4.1 Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	54
4.4.2 Karakterisasi <i>X-Ray Fluoresence</i> (XRF).....	55
4.4.3 Karakterisasi <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) ZSM-5 Pori Hirarki Berbasis Silika SCBA	56
4.4.4 Karakterisasi <i>Brunauer-Emmet-Teller</i> (BET) ZSM-5 Pori Hirarki Berbasis Silika SCBA	58
4.5 Persiapan Katalis	60
4.5.1 Persiapan H-ZSM-5 Pori Hirarki	60
4.5.2 Impregnasi Logam Co	61
4.6 Karakterisasi Katalis Co/H-ZSM-5 Pori Hirarki.....	62
4.6.1 Karakterisasi <i>X-Ray Fluoresence</i> Co/H-ZSM-5 Pori Hirarki	62
4.6.2 Karakterisasi <i>Brunauer-Emmet-Teller</i> Co/H-ZSM-5 Pori Hirarki Berbasi Silika SCBA	63
4.7 Uji Aktivitas Katalitik	64
4.7.1 Dehidrasi Metanol Dengan Bantuan Katalis Co/H-ZSM-5 Pori Hirarki Berbasis Silika Ludox	65
4.7.2 Dehidrasi Metanol Dengan Bantuan Katalis Co/H-ZSM-5 Pori Hirarki Berbasis Silika SCBA	67
V. SIMPULAN DAN SARAN	69
5.1 Simpulan.....	69
5.2 Saran.....	70
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN.....	81

1. Data Hasil Analisis dan Perhitungan Silika SCBA.....	82
2. Data Hasil Analisis dan Perhitungan ZSM-5 Hasil Sintesis	84
3. Data Hasil Co/H-ZSM-5 pori hirarki	89
4. Data Hasil analisis dan Perhitungan Konversi DME	92

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Berat jenis silika kristal dan silika <i>amorf</i> pada suhu kamar.....	8
2. <i>Template</i> sintesis zeolit ZSM-5.....	13
3. Metode <i>bottom-up</i> zeolit hirarki.....	18
4. Komposisi kimia SCBA.....	26
5. Komposisi molar pereaksi benih ZSM-5	36
6. Perhitungan komposisi molar pereaksi benih ZSM-5.....	36
7. Komposisi molar pereaksi untuk sintesis ZSM-5 pori hirarki	38
8. Perhitungan komposisi molar pereaksi sintesis ZSM-5 pori hirarki.....	38
9. Komponen senyawa silika SCBA	48
10. Komposisi senyawa ZSM-5 hasil sintesis.....	56
11. Sifat struktur ZSM-5 pori hirarki SCBA.....	59
12. Komponen hasil impregnasi Co/H-ZSM-5 pori hirarki	62
13. Sifat struktur Co/H-ZSM-5 pori hirarki SCBA.....	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Ampas tebu.	6
2. <i>Sugarcane bagasse ash</i> (SCBA).	7
3. Unit bangunan struktural tetrahedral silika (a) dan jaringan unit tetrahedral silika (b).	8
4. Situs aktif zeolit.	10
5. Struktur dan saluran ZSM-5.	12
6. Skema sintesis ZSM-5 tanpa cetakan organik menggunakan <i>seed-assisted</i>	16
7. Model struktur ZSM-5 pori hirarki	17
8. Difraktogram silika SCBA.	24
9. Difraktogram standar ZSM-5.	25
10. SEM dari ZSM-5.	28
11. Pola FTIR silika dari abu ampas tebu	29
12. Tipe-tipe adsorpsi isotherm.	31
13. Diagram Alir Penelitian	41
14. Preparasi ampas tebu: (a) sebelum pencucian; (b) proses pencucian dengan HNO_3 ; dan (c) ampas tebu setelah dicuci bersih dan kering	43
15. Abu ampas tebu (SCBA).	44
16. Tahapan ekstraksi silika SCBA: hasil ekstraksi SCBA (a); natrium silikat (b); hidrogel silika SCBA (c); dan padatan silika SCBA (d).	45
17. Silika SCBA setelah dealuminasi.	46
18. Difraktogram silika SCBA hasil ekstraksi.	47
19. Spektra FTIR silika SCBA.	49
20. Tahapan sintesis benih ZSM-5: Homogenisasi prekursor (a); setelah proses hidrotermal (b); pembilasan dengan aquades hingga pH netral (c); benih ZSM-5 hasil sintesis (d).	51

21. Tahapan sintesis ZSM-5 Ludox pori hirarki: pencampuran prekursor (a); hasil sintesis setelah hidrotermal (b); kristal ZSM-5 benih dicuci dengan akuades (c); ZSM-5 Ludox pori hirarki hasil sintesis (d)	52
22. Proses sintesis ZSM-5 pori hirarki: homogenisasi prekursor (a); homogenisasi bio-mesoporogen (b); setelah proses hidrotermal (c); dan ZSM-5 pori hirarki hasil sintesis (d)	53
23. Difraktogram Zeolit: (a) ZSM-5 standar; (b) ZSM-5 <i>seed</i> ; (c) ZSM-5 pori hirarki Ludox; dan (d) ZSM-5 pori hirarki SCBA.....	54
24. Morfologi kristal ZSM-5 pori hirarki SCBA perbesaran 20.000x	57
25. Grafik isoterm adsorpsi-desorpsi N ₂ ZSM-5 pori hirarki SCBA	58
26. Distribusi ukuran pori ZSM-5 pori hirarki SCBA	59
27. Campuran larutan Co(NO ₃) ₂ .6H ₂ O dan H-ZSM-5 pori hirarki (a); Co/H-ZSM-5 pori hirarki hasil impregnasi (b)	61
28. Grafik isoterm adsorpsi-desorpsi N ₂ Co/H-ZSM-5 pori hirarki SCBA	63
29. Distribusi ukuran pori Co/H-ZSM-5 pori hirarki SCBA	63
30. Tahapan sintesis DME: pengukuran volume awal metanol (a); pencampuran katalis dan prekursor ke dalam autoklaf (b); penyaringan dan pengukuran produk reaksi dari katalis (c); dan filtrat hasil sintesis DME (d)	65
31. Kromatogram reaksi dehidrasi metanol dengan bantuan katalis Co/H-ZSM-5 pori hirarki Ludox	65
32. Spektrum massa DME hasil reaksi dehidrasi metanol dengan bantuan katalis Co/H-ZSM-5 pori hirarki Ludox	66
33. Spektrum massa DMM hasil reaksi dehidrasi metanol dengan bantuan katalis Co/H-ZSM-5 pori hirarki Ludox	66
34. Kromatogram reaksi dehidrasi metanol dengan bantuan katalis Co/H-ZSM-5 pori hirarki SCBA	67
35. Difraktogram XRD silika SCBA	82
36. Hasil XRF silika SCBA sebelum dealuminasi.....	82
37. Hasil XRF silika SCBA setelah dealuminasi	83
38. Hasil analisis FTIR silika SCBA	83
39. Difraktogram XRD benih ZSM-5	84
40. Difraktogram XRD ZSM-5 pori hirarki SCBA	84
41. Difraktogram XRD pori hirarki Ludox	84
42. Hasil XRF benih ZSM-5	85
43. Hasil XRF ZSM-5 pori hirarki SCBA	85
44. Hasil XRF ZSM-5 pori hirarki Ludox	86
45. Data isoterm adsorpsi-desorpsi N ₂ ZSM-5 pori hirarki SCBA.....	87

46. Grafik isoterm adsorpsi-desorpsi N ₂ ZSM-5 pori hirarki SCBA.....	87
47. Data adsorpsi ZSM-5 pori hirarki SCBA.....	88
48. Grafik adsorpsi ukuran pori ZSM-5 pori hirarki SCBA	88
49. Hasil XRF Co/H-ZSM-5 pori hirarki SCBA	89
51. Hasil XRF Co/H-ZSM-5 pori hirarki Ludox	89
51. Data isoterm adsorpsi-desorpsi N ₂ Co/H-ZSM-5 pori hirarki SCBA.....	90
52. Grafik isoterm adsorpsi-desorpsi N ₂ Co/H-ZSM-5 pori hirarki SCBA.....	90
53. Data adsorpsi Co/H-ZSM-5 pori hirarki SCBA.....	91
54. Grafik adsorpsi ukuran pori Co/H-ZSM-5 pori hirarki SCBA	91
55. Kromatogram hasil dehidrasi metanol dengan katalis Co/H-ZSM-5 pori hirarki Ludox	92
56. Spektrum Massa puncak pertama.....	92
57. Spektrum Massa puncak kedua.....	93
58. Spektrum Massa puncak ketiga.....	93
59. Kromatogram hasil dehidrasi metanol dengan katalis Co/H-ZSM-5 pori hirarki SCBA	94

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi yang terjadi cukup cepat dalam beberapa tahun terakhir mendorong kemajuan di berbagai bidang terutama dalam bidang industri. Seiring perkembangan teknologi tersebut sumber energi yang digunakan mulai beragam, termasuk batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Penggunaan energi fosil ini membawa banyak manfaat bagi kehidupan manusia, namun dampak negatif paling signifikan dari penggunaan energi fosil adalah pencemaran lingkungan. Indonesia mengalami peningkatan kebutuhan energi dalam beberapa dekade terakhir dengan meningkatnya pertumbuhan populasi dan perkembangan ekonomi. Kebutuhan energi yang tinggi ini masih didominasi oleh energi fosil sebagai sumber energi primer (Kasmaniar dkk, 2023). Menyadari berbagai dampak negatif tersebut, dunia mulai beralih ke sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan. Dimetil Eter (DME) adalah salah satu sumber energi alternatif yang potensial digunakan dalam industri seperti sebagai bahan bakar mesin diesel, bahan bakar kompor gas, serta sebagai bahan baku untuk berbagai produk kimia, seperti formaldehida, metanol, dan aseton (Derbe *et al.*, 2021).

Dimetil eter (DME) adalah suatu senyawa organik dengan rumus kimia CH_3OCH_3 yang dapat dihasilkan dari pengolahan gas bumi, hasil olahan, dan hidrokarbon lain. DME dapat digunakan sebagai bahan bakar, yang mana dapat dimanfaatkan secara langsung ataupun sebagai campuran. DME memiliki sifat yang hampir sama dengan *Liquid Petroleum Gas* (LPG), yaitu berwujud gas pada kondisi ruang dan mempunyai titik didih yang berdekatan. Bahan baku DME dapat berupa sintesis gas (*one step process*) atau metanol (*two step*

process) (Kurina dkk., 2021). DME sebagai bahan bakar alternatif memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan bahan bakar fosil, yaitu DME yang terbakar dengan cara yang sangat bersih karena tidak mengandung partikulat, sulfur dioksida (SO_2), dan nitrogen oksida (NO_x) yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Awalnya, dehidrasi metanol menggunakan katalis asam padat menjadi metode utama, namun metode ini memiliki keterbatasan dalam hal selektivitas dan konversi, sehingga mendorong penelitian untuk mengembangkan metode alternatif. Salah satu katalis yang dapat digunakan adalah zeolit.

Saat ini, produksi metanol skala besar hampir secara keseluruhan berasal dari gas sintesis yang menggunakan katalis heterogen (misalnya Cu/ZnO). Zeolit menjadi salah satu katalis heterogen yang banyak digunakan karena memiliki stabilitas hidrotermal yang baik. Zeolit didefinisikan sebagai bahan kristal berpori mikro yang strukturnya terdiri dari jaringan reguler tetrahedral SiO_4^{4-} dan AlO_4^{5-} . Berdasarkan proses terbentuknya zeolit dibedakan menjadi zeolit alam dan zeolit sintesis. Zeolit sintetis mempunyai aktivitas yang tinggi karena kristalinitasnya yang baik dengan kemurnian tinggi, dan hanya kation tertentu saja yang terdapat dalam situs permukaannya seperti H^+ dan Na^+ (Wang *et al.*, 2009). Zeolit sintetis dapat dihasilkan dengan berbagai macam metode seperti solvothermal, hidrotermal, konversi gel kering (DGC, *Dry-Gel-Conversion*), dan teknik ionothermal. Dari berbagai metode tersebut, sintesis hidrotermal menjadi salah satu metode yang sering digunakan dengan melibatkan sejumlah besar pelarut air.

Katalis *Zeolite Socony Mobile-5* (ZSM-5) termasuk salah satu jenis zeolit sintesis yang sering dimanfaatkan dalam proses katalis. Zeolit ZSM-5 merupakan kristal aluminosilikat dengan struktur mikropori berdiameter antara 0,54-0,56 nm dan rasio Si/Al yang bervariasi dari 10 hingga 100 (Nandiyanto *et al.*, 2016). ZSM-5 banyak digunakan dalam berbagai reaksi karena sifatnya yang unggul dibanding jenis katalis lainnya seperti: jenis kerangka MFI (*mobile five instructure*), rasio silika-aluminium tinggi, sifat hidrofobik yang baik, stabilitas hidrotermal tinggi, struktur pori unik, dan memiliki selektivitas yang baik (Liu *et*

al., 2019). Pada umumnya, ZSM- 5 disintesis menggunakan metode hidrotermal dengan prekursor silika dan alumina.

Tebu merupakan salah satu komoditas utama pertanian di Lampung. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), pada tahun 2023 produksi tebu di Provinsi Lampung mencapai 802.400 ton. *Bagasse* (ampas tebu) yang dihasilkan dari pertanian tebu dapat dimanfaatkan sebagai prekursor sintesis ZSM-5 melalui metode hidrotermal. Abu ampas tebu (*Sugarcane Bagasse Ash*) didominasi silika sebagai komponen utamanya dengan senyawa oksida lainnya seperti Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , K_2O (Paramitha dkk., 2019). Rilyanti *et al.* (2016) berhasil mengekstraksi silika yang berasal dari limbah ampas tebu yang memiliki kandungan silika sekitar 85,55% dan aluminium 12,16%. Dengan demikian, limbah ampas tebu yang dihasilkan dapat berpotensi untuk dimanfaatkan kembali dan mengurangi limbah ampas tebu pabrik serta meningkatkan nilai ekonominya.

Dalam beberapa kasus, katalis ZSM-5 dapat menyebabkan terbentuknya hasil samping yang tidak diinginkan yang dapat menyebabkan penurunan aktivitas katalisisnya. Oleh karena itu, banyak peneliti mencoba menggabungkan logam dengan zeolit menggunakan metode *ion-exchange* ataupun impregnanasi untuk mendapatkan peningkatan aktivitas katalitiknya (Xue *et al.*, 2021). Logam logam yang sering digunakan dalam metode impregnasi, antara lain logam yang berasal dari golongan logam transisi seperti Ti, Pd, Ni, dan Co (Vichaphund *et al.*, 2015). Logam transisi memiliki kemampuan dalam mengkatalisis reaksi yang berhubungan dengan adanya orbital d yang belum sepenuhnya terisi oleh elektron, sehingga dapat menyediakan situs asam Lewis yang mampu mengadsorpsi reaktan pada permukaan katalis (Razzaq *et al.*, 2019).

Selain penambahan logam, penambahan ukuran pori juga memberikan efektifitas yang cukup besar. Penambahan porositas yang lebih besar pada kerangka zeolit meningkatkan transfer massa dan meningkatkan aktivitas katalitik (Nurani *et al.*, 2019). Karena ukuran pori yang lebih besar menyediakan akses bagi molekul reaktan yang lebih besar untuk mencapai situs aktif pada mikropori. Penambahan pori-pori yang lebih besar dapat berupa mesopori intrakristalin,

atau kombinasi jenis mesopori dan mikropori yang disebut pori hirarki. Berdasarkan laporan beberapa penelitian, porositas hirarki dapat mendorong penggunaan yang lebih efisien dalam berbagai aktivitas katalitik.

Studi literatur logam/H-ZSM-5 dalam uji aktivitas katalitik telah banyak dilaporkan, logam Co yang diimbaskan pada ZSM-5 mengubah sifat-sifat asam katalis dan memengaruhi selektivitas produk dengan mendukung pembentukan hidrokarbon serta mengurangi jumlah kokas/arang yang dihasilkan (Zheng *et al.*, 2017). Modifikasi ZSM-5 pori hirarki dengan pengemban logam Co telah dilaporkan oleh Kantarelis *et al.* (2019) bahwa logam Co yang terdispersi pada zeolit mampu mengurangi situs asam Bronsted namun secara signifikan meningkatkan konsentrasi asam Lewis, hal ini terjadi karena Co^{3+} melakukan pertukaran beberapa proton dalam zeolit. Penyesuaian ukuran pori dan modifikasi logam dibutuhkan dalam reaksi dehidrasi metanol menjadi dimetil eter.

Berdasarkan uraian tersebut, maka pada penelitian ini telah dilakukan sintesis ZSM-5 pori hirarki termodifikasi Co yang berasal dari silika hasil ekstraksi abu ampas tebu (*Sugarcane Bagasse Ash/SCBA*) dengan menggunakan metode hidrotermal. Selanjutnya, dilakukan karakterisasi silika hasil ekstraksi dengan *X-Ray Fluorescence* (XRF), *X-Ray Diffraction* (XRD), dan *Fourier Transform Fluorescence* (FTIR). Katalis yang diperoleh kemudian dikarakterisasi dengan *X-Ray Fluorescence* (XRF), *X-Ray Diffraction* (XRD), *Brunauer-Emmet-Teller* (BET), dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Katalis yang diperoleh digunakan dalam uji aktivitas katalitik pada reaksi dehidrasi metanol menjadi dimetil eter dan produknya dikarakterisasi dengan GC-MS.

1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dipaparkan di atas, penelitian ini dilakukan dengan tujuan:

1. Memperoleh silika dari abu ampas tebu (SCBA) sebagai prekursor sintesis ZSM-5 pori hirarki.

2. Memperoleh katalis H-ZSM-5 pori hirarki dan Co/H-ZSM-5 pori hirarki dari silika SCBA dengan penambahan logam kobalt melalui metode impregnasi dengan bantuan penambahan benih ZSM-5 dan pati sebagai bio mesoporogen.
3. Mempelajari aktivitas katalitik Co/H-ZSM-5 pori hirarki pada reaksi dehidrasi metanol menjadi DME.

1.3 Manfaat Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan tujuan yang telah dijelaskan penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pemanfaatan lebih lanjut berkaitan limbah biomassa yang tersedia seperti ampas tebu untuk menghasilkan silika sebagai prekursor sintesis ZSM-5 dan informasi tentang konversi metanol menjadi dimetil eter melalui reaksi dehidrasi menggunakan katalis Co/H-ZSM-5 pori hirarki.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Abu Ampas Tebu

Tebu (*Saccharum officinarum L.*) merupakan tumbuhan yang tangkainya berisi nira yang biasa dimanfaatkan dalam pembuatan gula. Provinsi Lampung menjadi salah satu penghasil ketersediaan gula nasional yang memiliki luas lahan tebu sekitar 136.224 ha dengan jumlah produksi tebu sebesar 781.085 ton/tahun (BPS, 2021). Gambar 1 menunjukkan limbah hasil pengolahan tebu berupa ampas tebu merupakan hasil samping dari proses penggilingan dan pemerahan sarinya.



Gambar 1. Ampas tebu.

Pengolahan satu ton tebu dapat dihasilkan 350 kg ampas tebu basah dengan tingkat kelembapan sekitar 60% atau sekitar 210 kg adalah air (kelembapan), sementara 140 kg merupakan berat ampas tebu yang kering (Woytiuk, 2006). Ampas tebu banyak dimanfaatkan sebagai bahan bakar ketel, pakan ternak, bahan baku pembuatan pupuk dan kertas, serta media pertumbuhan jamur merang. Sisa pengolahan ampas tebu yang menumpuk dapat berakibat buruk bagi lingkungan, menimbulkan aroma tidak sedap serta berpotensi mencemarkan sumber air tanah. Hasil samping dari pengolahan ampas tebu, yaitu abu ampas tebu (*Sugarcane Bagasse Ash/SCBA*) seperti pada Gambar 2 tidak memiliki kandungan mineral

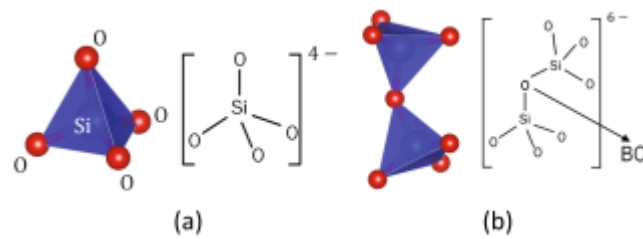
memadai untuk digunakan sebagai pupuk (Xu *et al.*, 2018), namun diketahui memiliki kandungan silika sekitar 55,6-70% (Kristianingrum dkk, 2011). Komposisi kimiawi abu ampas tebu tergantung pada kondisi pembakaran, yaitu suhu, waktu, dan pasokan udara. Abu ampas tebu memiliki kandungan karbon akibat dari pembakaran yang tidak sempurna (Chindaprasirt *and* Rattanasak, 2020). Beberapa penelitian telah melaporkan dengan kandungan silika yang cukup tinggi dalam SCBA dapat dimanfaatkan untuk material berbasis silika.



Gambar 2. *Sugarcane bagasse ash (SCBA).*

2.2 Silika

Silika adalah salah satu mineral yang terdiri dari unsur silikon dan oksigen dengan bentuk yang sangat luas, diantaranya silika dioksida (SiO_2) yang memiliki struktur kristal seperti kuarsa, kristobalit, *tridymite*, *coesite*, atau bentuk *amorf* (Varshney *and* Naithani, 2011). Struktur silika dan silikat adalah tetrahedron SiO_4 di mana ion silikon di pusat ruang dan empat atom oksigen terletak di sudut-sudut tetrahedron yang ditunjukkan pada Gambar 3. Silika memiliki beberapa sifat unik yang tidak dimiliki oleh senyawa anorganik lainnya seperti, sifat adsorpsi dan pertukaran ion yang baik, kestabilan mekanik dan termal tinggi, mudah dimodifikasi dengan senyawa kimia tertentu untuk meningkatkan kinerjanya (Sriyanti dkk., 2005).



Gambar 3. Unit bangunan struktural tetrahedral silika (a) dan jaringan unit tetrahedral silika (b) (Dizaji *et al.*, 2021).

Polimorfisme silika berdasarkan jenis dan ikatan tetrahedral $[\text{SiO}_4]^{4-}$ yaitu struktur kristal kuarsa adalah yang paling padat diantara struktur kristal lainnya. Ketiga struktur kristal silika ini memiliki fase α pada suhu rendah dan fase β pada suhu tinggi. Sementara itu, struktur silika *amorf* memiliki tata letak atom-atomnya yang tidak teratur sehingga menghasilkan struktur yang tidak berulang. Perbedaan dalam struktur silika kristal dan *amorf* menyebabkan keduanya memiliki berat jenis yang berbeda seperti tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Berat jenis silika kristal dan silika *amorf* pada suhu kamar

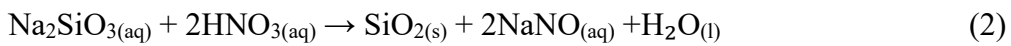
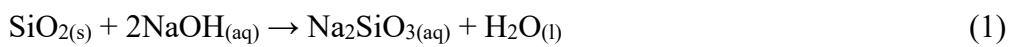
Silika	Berat Jenis (g/mL)
<i>Coesite</i>	3,01
α -Kuarsa	2,65
β -Kuarsa	2,53
β - <i>Tridymite</i>	2,26
β -Kristobalit	2,21
<i>Amorf</i>	2,20

(Pabst *and* Gregorova, 2013).

Beberapa penelitian telah melaporkan berbagai metode yang digunakan untuk mengekstraksi silika dari abu ampas tebu (SCBA) serta hasil kandungan silika yang diperoleh dari berbagai metode tersebut. Farirai *et al.* (2021) berhasil menghasilkan silika murni dari SCBA dengan kandungan sebesar 98,92% melalui metode sol-gel dan kolom adsorpsi berisi karbon aktif. Norsuraya *et al.* (2016) juga melaporkan bahwa ekstraksi dengan alkali menghasilkan silika sekitar 97%. Penelitian lain menggunakan metode ekstraksi alkali seperti yang

dilakukan oleh Channoy *et al.* (2018) menghasilkan kandungan silika sebesar 81% Silika yang diekstraksi dari SCBA dapat digunakan sebagai prekursor untuk sintesis silika gel.

Komposisi silika dan alumina yang dominan dapat diperoleh dengan mengolah abu ampas tebu menggunakan perlakuan asam dan ekstraksi dengan larutan NaOH. Proses ini melibatkan pembentukan natrium silikat (Na_2SiO_3) sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 1. Selanjutnya, silika diendapkan dari larutan natrium silikat dengan penambahan HNO_3 sesuai dengan Persamaan 2.



(Chindaprasirt *and* Rattanasak, 2020)

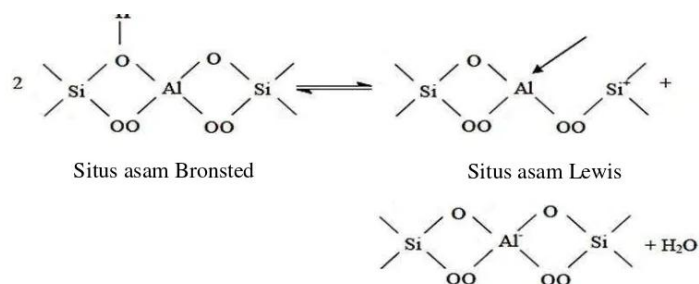
Ekstraksi silika dari ampas tebu yang dilakukan dengan metode alkali yaitu NaOH menghasilkan SiO lebih tinggi, hal ini karena silika larut dalam larutan alkali. Penggunaan NaOH dipilih karena memiliki alkalinitas yang tinggi, sehingga dapat meningkatkan kelarutan silika (Moisés *et al.*, 2013).

2.3 Zeolit

Zeolit adalah material aluminosilikat hidrat yang terbentuk dari alumina tetrahedral (AlO_4)⁵⁻ dan silika (SiO_4)⁴⁻ dengan ikatan atom oksigen. Struktur kristalnya memiliki rongga terbuka dalam tiga dimensi yang mengandung aluminium, silikon, dan oksigen dengan logam-logam aktif. Zeolit terdiri dari struktur dasar kerangka aluminosilikat, yang terdiri dari susunan tetrahedron dari ion silikon (Si) dan ion aluminium (Al^{3+}) yang dikelilingi oleh empat anion oksigen (O^{2-}) (Moshoeshoe *et al.*, 2017). Setiap ion oksigen dalam ikatan Si-O dan Al-O terhubung dengan dua kation dan berbagi antara dua struktur tetrahedron. Hal ini menghasilkan Si tetravalen netral secara elektro dalam SiO_2 dan Al trivalen bermuatan negatif dalam AlO_4 (Petranovskii *et al.*, 2016).

Zeolit dapat diklasifikasikan ke dalam dua kelompok utama, yaitu zeolit alami dan zeolit sintetis. Zeolit alam sebagian besar terbentuk dari batuan vulkanik dan sedimen seperti *chabazite*, *clinoptilolite*, dan *mordenite* (Chunfeng *et al.*, 2009). Sebaliknya, zeolit sintetis dapat disiapkan dari berbagai sumber alami, seperti tanah liat, batu bara, oksida alami, feldspar, karbon aktif, dan sumber silika lainnya (Roth *et al.*, 2014). Karakteristik dari zeolit alam pada umumnya yakni memiliki stabilitas termal yang rendah, ukuran pori yang kurang seragam karena terdapat banyak pengotor seperti K, Na, Fe, Mg, Ca, dan Al yang menutupi pori serta memiliki kristalinitas dan aktivitas katalitik yang rendah (Georgiev *et al.*, 2009). Oleh karena itu, perlu diaktivasi dan dimodifikasi terlebih dahulu sebelum dapat digunakan.

Zeolit sintetis lebih sering digunakan untuk kepentingan komersial karena memiliki tingkat kemurnian yang tinggi dibandingkan zeolit alam. Ukuran pori yang seragam dan terdistribusi merata juga menghasilkan selektivitas zeolit yang tinggi terhadap suatu molekul berdasarkan bentuk dan ukuran molekul (Fitriyana dkk, 2018). Pori pada zeolit sintetis dapat direkayasa melalui penggunaan bahan kimia saat sintesis sehingga porositasnya beragam. Selain itu, stabilitas termal yang baik dan luas permukaan yang tinggi menjadi kelebihan lainnya. Oleh karena itu, banyak dikembangkan zeolit sintetis secara luas dalam berbagai bidang seperti katalis, pemisahan, dan pertukaran ion. Karakteristik dan spesifikasi khusus menjadikannya berguna untuk aplikasi tertentu seperti katalis dalam industri petrokimia (Hartati dkk., 2019).



Gambar 4. Situs aktif zeolit (Mangesh *et al.*, 2021).

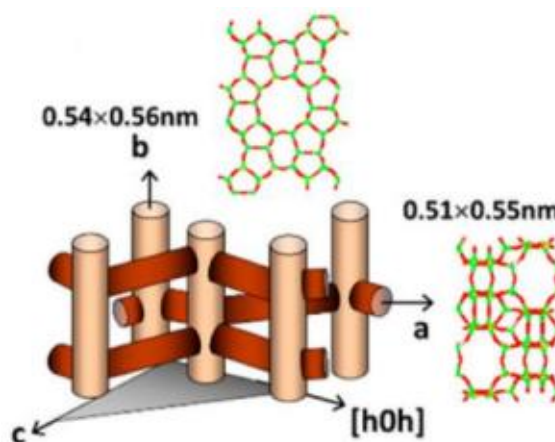
Secara umum zeolit memiliki sifat dua jenis keasaman, yaitu asam Brønsted sebagai donor proton dan asam Lewis berlaku sebagai akseptor proton (Gambar

4). Pada asam Bronsted terjadi pertukaran ion penyeimbang dengan ion H^+ dalam kerangka zeolit. Asam Bronsted dapat diubah menjadi asam Lewis pada suhu tinggi dalam proses dehidroksilasi. Ion H^+ sebagai pusat aktif atau disebut inti asam yang berhubungan dengan atom Al tetrahedral secara katalitik (Wang *et al.*, 2017). Situs asam Bronsted dihasilkan ketika silikon, yang memiliki valensi formal empat, digantikan oleh atom logam dengan valensi yang lebih rendah. Paling umum adalah penggantian silikon oleh aluminium dengan valensi formal tiga. Sebuah proton terikat pada atom oksigen yang menghubungkan atom silikon dan atom aluminium tetangga, menghasilkan situasi yang stabil secara kimia (Jansen *et al.*, 1995). Kekuatan situs asam menentukan aktivitas katalitik zeolit. Secara umum, semakin besar keasaman Brønsted yang terkait, semakin tinggi konsentrasi aluminium dalam zeolit atau semakin rendah rasio Si/Al.

2.4 Zeolite Socony Mobile-5 (ZSM-5)

Zeolite Socony Mobile-5 (ZSM-5) merupakan salah satu jenis zeolit sintetik dengan tipe kerangka MFI yang memiliki rumus kimia $[Na_n(H_2O)_{16} Al_x Si_{96-n} O_{192}]$ -MFI, dengan $n < 27$, dan dapat disintesis dengan variasi rasio Si/Al 10-100. Secara umum dapat ditulis sebagai zeolit ZSM-5, namun secara spesifik dapat ditulis sebagai Na-ZSM-5, NH_4 -ZSM-5, TPA-ZSM-5, H-ZSM-5 atau logam lainnya untuk menunjukkan situs aktif asamnya (Dai *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2007). ZSM-5 mempunyai medium pori (5,1-5,6 Å) dengan struktur tiga dimensi yang mempunyai 10 rantai atau ikatan. Ukuran kristal ZSM-5 umumnya mempengaruhi sifat katalitik dan sifat adsorpsi yang dimilikinya. ZSM-5 dimanfaatkan sebagai katalis karena memiliki sifat keasaman dan struktur pori yang efektif dalam proses reaksi katalitik (Prasetyoko *et al.*, 2012) ZSM-5 memiliki beberapa keunggulan, seperti ketahanan terhadap suhu tinggi, stabilitas asam, selektivitas dan aktivitas dalam reaksi kimia yang sangat penting dalam dunia industri (Pan *et al.*, 2014). Zeolit ZSM-5 memiliki sistem pori seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 5 dengan terdiri dari sistem saluran lurus dan sinusoidal yang saling berpotongan. Volume hampa ZSM-5 adalah 0,17 ml/g, sehingga ZSM-5 memiliki kerapatan

struktural yang lebih tinggi daripada zeolit A. Saluran dalam ZSM-5 memiliki diameter 0,50 hingga 0,56 nm (Zhang *et al.*, 2021).



Gambar 5. Struktur dan saluran ZSM-5 (Zhang *et al.*, 2021).

ZSM-5 memiliki cincin oksigen beranggota 10 dan dua jenis sistem saluran dengan ukuran yang sama yaitu, saluran lurus (5,3: 5,6 Å) dan saluran sinusoidal (5,1:5,5 Å). Kedua saluran yang berbeda ini saling tegak lurus dan menghasilkan perpotongan dengan diameter 8,9 Å (Alotibi *et al.*, 2020). Karena adanya bukaan pori 10 cincin ini, menyebabkan ZSM-5 memiliki selektivitas untuk penyerapan dan katalisis, sehingga zeolit ini banyak diaplikasikan di industri kilang dan petrokimia, termasuk untuk isomerisasi hidrokarbon dan alkilasi hidrokarbon.

Sintesis zeolit biasanya dilakukan dalam kondisi hidrotermal dengan prekursor berupa sumber silika, sumber alumina, dan kation yang dapat dipertukarkan dengan cara dilarutkan dalam air, dan kristalisasi zeolit dilakukan dengan memanaskan gel yang dihasilkan (80-200 °C) selama jangka waktu tertentu. Untuk mendapatkan pelarutan yang baik dari semua bahan kimia, pH yang tinggi diterapkan dengan menambahkan basa (misalnya NaOH). Zeolit dengan kadar silika rendah seperti zeolit A, X, dan Y dapat disintesis seperti yang dijelaskan di atas. Namun, sintesis zeolit dengan kadar silika tinggi seperti ZSM-5 lebih sulit, dibutuhkan agen pengarah struktur organik yang harus ditambahkan untuk mendapatkan produk yang diinginkan. Untuk sintesis zeolit tipe ZSM-5, berbagai template telah diketahui seperti yang dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. *Template* sintesis zeolit ZSM-5

Agen Pengarah Struktur ZSM-5	
<i>Tetrapropylammonium halide</i>	<i>Methyloquimuclidene</i>
<i>Tetraethylamonium halide</i>	<i>Morpholine</i>
<i>Tripropylamine</i>	<i>Ethylenediamine</i>
<i>Dipropylamine</i>	<i>Diethylenetriamine</i>
<i>Propylamine</i>	<i>Triethylenetetraamine</i>
<i>1,6-diaramohexane</i>	<i>Dipropylenetriamine</i>
<i>1,6-hexanediol</i>	<i>Dihexamethylenetriamine</i>
<i>1,5-diaminopentane</i>	<i>Ethanol</i>
<i>Ethanolamine</i>	<i>Ethanol + ammonia</i>
<i>Propanolamine</i>	<i>Glycerol</i>
<i>Pentaerythritol</i>	

(Lok *et al.*, 1983).

Template yang digunakan memiliki dua peran dalam mengarahkan sintesis zeolit: pertama, dengan mempromosikan pembentukan blok bangunan yang diinginkan dalam gel (Boxhoom *et al.*, 1993), dan kedua, dengan bertindak sebagai pengisi pori hidrofobik untuk mencegah pelarutan dan pengkristalan kembali kristal yang sudah terbentuk (Santen *et al.*, 1986). Beberapa dari *template* yang ditunjukkan dalam Tabel 2 akan terperangkap di dalam pori-pori zeolit setelah sintesis. Dalam kasus-kasus ini, zeolit yang disintesis harus diaktivasi sebelum digunakan. Aktivasi memerlukan perlakuan suhu tinggi (misalnya, 550 °C) untuk membuka pori dan menghilangkan cetakan organik.

ZSM-5 banyak digunakan sebagai katalis, adsorben, pemisahan cairan dan gas, produksi kimiawi dan dalam proses induksi petrokimia karena struktur salurannya yang khas, keasaman, selektivitas bentuk dan stabilitas termal yang tinggi sehingga cocok menjadi katalis H-ZSM-5 (Alotibi *et al.*, 2020). Kinerja ZSM-5 sebagai katalis bergantung pada tiga faktor utama yaitu, keasaman (sifat, kekuatan dan kepadatan), ukuran kristal, yang mempengaruhi difusi intra-kristal molekul reaktan, dan morfologi kristal (Mohammadparast *et al.*, 2015).

2.5 Metode Sintesis Hidrotermal

Zeolit dapat disintesis dan dibentuk sedemikian rupa yang memungkinkan modifikasi sesuai kebutuhan dan memiliki karakteristik yang lebih baik. Prinsip dasar dalam sintesis zeolit adalah silika dan alumina yang menjadi komponen utamanya, sehingga zeolit dapat disintesis dengan bahan baku yang mengandung kedua komponen tersebut sesuai perbandingan molarnya (Rini, 2010). Menurut Cejka *et al.* (2007), ada beberapa faktor yang memengaruhi proses pembentukan kristal dalam sintesis zeolit, termasuk komposisi molar reaktan, sumber Si dan Al, rasio Si/Al, kebasaan (alkalinitas), jumlah air, kation anorganik, dan cetakan organik. Salah satu metode sintesis zeolit adalah metode hidrotermal.

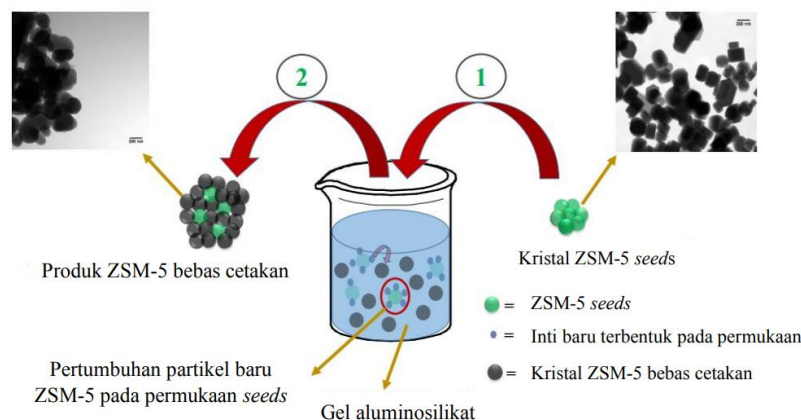
Secara umum, metode hidrotermal melibatkan kristalisasi gel aluminosilikat (campuran larutan alumina dan silika dalam kehadiran alkali hidroksida dan basa organik) (Luo *et al.*, 2016). Namun, jenis dan sifat zeolit yang disintesis sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti komposisi silika dan alumina, prekursor dan *pretreatment* yang dilakukan, suhu, waktu reaksi, dan pH campuran reaksi (Pandiangan *et al.*, 2021). Metode hidrotermal biasanya terjadi dalam pelarut air dengan kondisi suhu dan tekanan yang tinggi ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $> 1\text{ bar}$). Reaksi hidrotermal dilakukan pada suhu tinggi dalam autoklaf yang berfungsi menjaga laju penguapan sama dengan laju kondensasi. Sintesis ZSM-5 dari silika hasil ekstraksi abu ampas tebu telah berhasil dilakukan oleh Widiarto *et al.* (2017), dengan tanpa adanya penambahan benih zeolit ZSM-5 pada suhu reaksi rendah dan waktu yang singkat serta tanpa menggunakan template organik dengan ditunjukkan adanya puncak sekitar $2\theta = 7, 8, 9, 23, 24^{\circ}$ pada hasil karakterisasi XRD.

2.6 Sintesis Benih ZSM-5

Penelitian tentang sintesis zeolit telah banyak mengalami perkembangan. Agen pengarah struktur (SDA), atau sering disebut juga *template* biasanya digunakan untuk mengarahkan pembentukan dan menstabilkan kerangka zeolit contohnya

seperti, kation tetrapropilamonium, baik dalam bentuk hidroksida (TPAOH) atau dalam bentuk garam bromida (TPABr), penggunaan cetakan organik sebagai agen pengarah struktur membutuhkan biaya produksi yang relatif mahal, menyebabkan emisi gas berbahaya seperti NO_x dan CO_2 sebagai akibat dari penghapusan cetakan organik pada proses kalsinasi (Javdani *et al.*, 2019). Sebaliknya, sintesis zeolit tanpa menggunakan *template* memiliki beberapa keuntungan seperti, mengurangi secara signifikan bahan baku yang digunakan, menghemat energi karena menghilangkan proses kalsinasi suhu tinggi, tidak ada polutan NO_x yang terlepas dalam proses sintesis yang membuatnya menjadi sintesis yang bersih, dan produk ZSM-5 yang dihasilkan memiliki kristalinitas yang lebih tinggi (Yue *et al.*, 2017).

Banyak penelitian saat ini yang berhubungan dengan sintesis ZSM-5 menggunakan metode *seed-assisted* dan salah satunya penelitian yang dilakukan oleh Javdani *et al.* (2019). Dalam penelitiannya, ZSM-5 disintesis dengan menambahkan biji zeolit silika tinggi, atau disebut benih, tanpa menggunakan cetakan tambahan. Metode ini dinilai hemat biaya dan ramah lingkungan serta dapat digunakan untuk menghasilkan zeolit dengan ukuran, bentuk, komposisi, dan struktur yang terkontrol dengan baik. Selain itu, penambahan kristal benih ke dalam campuran prekursor, laju kristalisasi akan meningkat dan mempersingkat waktu kristalisasi (Yu *et al.*, 2020). Dalam melakukan metode benih, kristal benih ditambahkan ke campuran reaksi zeolit, sehingga memiliki pengaruh diantaranya, pengurangan waktu sintesis, arah sintesis menuju fase yang diinginkan dengan lebih sedikit pengotor dan ukuran partikel zeolit dapat dikendalikan (Javdani *et al.*, 2019). Skema sintesis ZSM-5 tanpa cetakan organik menggunakan metode *seed-assisted* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Skema sintesis ZSM-5 tanpa cetakan organik menggunakan *seed-assisted* (Nada and Larsen, 2016).

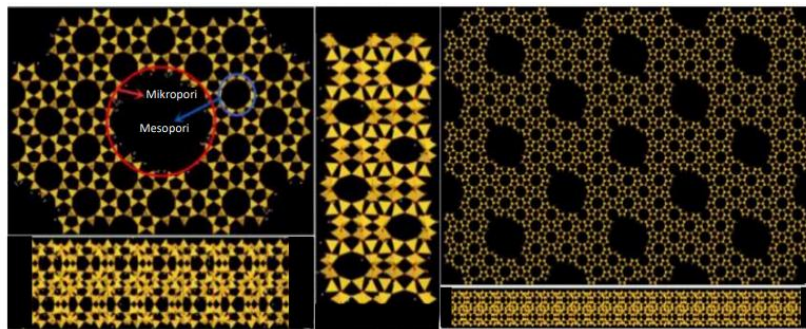
Syarat keberhasilan dalam sintesis zeolit dengan metode benih, yaitu benih zeolit tidak boleh larut sepenuhnya sebelum terjadi pertumbuhan kristal selama pengolahan hidrotermal, tidak boleh terjadi nukleasi spontan dari fase kristal lainnya sebelum pertumbuhan kristal zeolit target selesai, permukaan kristal benih harus terkena fase cair dan prekursor harus berinteraksi dengan permukaan kristal benih, dan komposisi kimia dari gel reaktan dan benihnya harus dioptimalkan (Iyoki *et al.*, 2014). Umumnya, sintesis berbantuan benih ZSM-5 dapat dilakukan dengan dua jenis SDA yang berbeda contohnya, dengan SDA organik seperti TPAOH atau TPABr dan sintesis dengan sumber alkalinitas seperti NaOH dan/atau surfaktan seperti CTAB (Javdani *et al.*, 2019).

2.7 Zeolit Pori Hirarki

Zeolit pori hirarki merupakan zeolit yang mempunyai dua tingkat porositas. Tingkat porositas sendiri dibedakan menjadi tiga, yaitu mikropori (2 nm), mesopori (2- 50 nm), dan makropori (50 nm) (Kadja dkk., 2013). Material zeolit hirarki ditandai oleh mikroporositas bawaan yang ditentukan oleh struktur kristalin zeolit dan sistem pori hirarki tambahan yang dapat berupa interkristalin atau intrakristalin, atau kombinasi keduanya. Sintesis zeolit hirarki dapat dilakukan dengan metode *bottom-up*, di mana porositas tambahan dibuat selama

kristalisasi kristal zeolit atau dengan penggabungan sengaja dari kristal zeolit individu Selain itu, metode top-down juga dapat dilakukan, seperti ekstraksi selektif dari komponen kerangka tertentu dari zeolit mikropori yang sudah disintesis (misalnya, melalui desilikasi), Struktur zeolit hirarki dapat dibedakan menjadi (i) kristal tunggal zeolit hirarki, (ii) zeolit monolitik hirarki, (iii) pori hirarki seperti nanokristal zeolit (Schwieger *et al.*, 2016).

Porositas zeolit berupa mesopori dan mikropori pada zeolit hirarki mampu menyediakan ruang besar untuk mempromosikan pembentukan aromatik dan difusi spesies keluar dari saluran pori menguntungkan. Pemodelan struktur ZSM-5 pori hirarki dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Model struktur ZSM-5 pori hirarki (Ma *et al.*, 2019).

2.8 Sintesis Zeolit Pori Hirarki

Porositas pada umumnya terjadi disebabkan oleh kombinasi susunan elemen dalam bentuk kompleks, subunit, blok bangunan, kristal, atau partikel itu sendiri. Untuk saat ini ada berbagai strategi berbeda di mana hampir setiap unsur kimia dapat berkontribusi dalam sistem berpori Strategi-strategi ini tidak terbatas pada metode *bottom-up*, tetapi juga dapat melibatkan metode *top-down* atau kombinasi keduanya (Na *et al.*, 2011). Tinjauan kompeherensif dalam metode sintesis zeolit hirarki dilaporkan dalam beberapa literatur seperti, (i) kristalisasi hidrotermal (atau solvothermal) seperti dalam sintesis zeolit, AIPOS, atau MOFs, (ii) metode sol-gel, dan (iii) metode pengendapan seperti dalam persiapan gel silika dan silika

yang terendap, (iv) templating dengan susunan supramolekular seperti dalam persiapan silika mesopori teratur (OMS) MCM-41 dan SBA-15, dan (v) metode pencetakan (nano) (Goltner *and* Antonietti, 1997).

Pembentukan material zeolit hirarki pada umumnya sistem pori tambahan dikaitkan dengan sistem pori mikro yang melekat pada struktur kerangka zeolit. Sistem pori tambahan tersebut dapat dilakukan secara langsung dan pasca sintesis. Secara langsung dapat dilakukan selama kristalisasi zeolit dalam kehadiran atau ketiadaan *template* keras atau lembut (pendekatan *bottom-up*) seperti yang dijelaskan dalam Tabel 3. Istilah *templating* mengacu pada penggunaan meso- atau makroporogen untuk mengarahkan pembentukan poros tambahan. Porositas tambahan dapat juga dilakukan melalui metode pasca-sintesis seperti, ekstraksi logam (pendekatan *top-down*), agregasi partikel zeolit yang sudah ada (pendekatan *bottom-up*), atau pengaturan ulang (*rearrangement*), misalnya dealuminasi zeolit berlapis (Schwieger *et al.*, 2016).

Tabel 3. Metode *bottom-up* zeolit hirarki

Rute	Template	Tipe Pori
<i>Hard Templating</i>	<i>Carbonaceous template</i>	
	▪ <i>Carbon paricles</i>	<i>Mesopores</i>
	▪ <i>Carbon fiber</i>	<i>Mesopores</i>
	▪ <i>Carbon nanotube</i>	<i>Meso- or macropores</i>
	▪ <i>Colloidal</i>	<i>Meso- or macropores</i>
	<i>Aerogel/polymer</i>	
	▪ <i>Polystyrene</i>	<i>Meso- or macropores</i>
	▪ <i>Polyurethane</i>	<i>Meso- or macropores</i>
	▪ <i>Carbon aerogel</i>	<i>Mesopores</i>
	<i>Biological</i>	
<i>Soft Templating</i>	▪ <i>Starch, bacteria, wood</i>	<i>Meso/macro</i>
	<i>Inorganic</i>	
	▪ <i>Silica</i>	<i>Meso- or macropores</i>
	▪ <i>CaCO₃</i>	<i>Mesopores</i>
	<i>Dual Templating</i>	
	▪ <i>Surfactants</i>	<i>Mesopores</i>
	▪ <i>Organosilanes</i>	<i>Mesopores</i>

(Schwieger *et al.*, 2016).

2.9 Impregnasi Logam Co

Pengembangan logam pada zeolit menjadi salah satu cara untuk memperbaiki dan mengatasi kelemahan katalis logam murni, karena penggunaannya memiliki beberapa kekurangan seperti, stabilitas termal yang rendah, mudah mengalami penurunan luas permukaan akibat pemanasan dan mudah mengalami sintering (penggumpalan) serta harganya yang tinggi. Pemakaian zeolit sebagai pengembangan memberikan dasar yang stabil sehingga dapat memperbesar luas permukaan katalis dan memperpanjang waktu pakai katalis (Hassan *et al*, 2020).

Pengembangan logam pada zeolit juga mampu meningkatkan jumlah situs asam total (keasaman) katalis. Jumlah situs ini penting karena menjadi salah satu penentu aktivitas katalis. Sampai dengan saat ini telah banyak penelitian yang dilakukan untuk memodifikasi zeolit menjadi logam-zeolit dengan cara memasukkan logam dengan metode impregnasi (Gorzin *and* Yaripour, 2018).

Impregnasi dapat didefinisikan sebagai salah satu metode dalam preparasi katalis yang paling sederhana, mudah dan langsung. Metode impregnasi dilakukan dengan cara mengadsorpsikan komponen aktif logam dalam larutan kepada padatan pengembangan, dalam hal ini digunakan zeolit. Impregnasi dilakukan dengan tujuan untuk memenuhi pori zeolit dengan larutan garam logam dengan konsentrasi tertentu. Metode impregnasi juga sangat cocok untuk katalis dengan persen berat komponen aktif katalis yang kecil, yaitu komponen aktif yang termasuk logam transisi seperti cobalt namun diharapkan terdistribusi sempurna sehingga didapatkan luas permukaan komponen aktif yang besar (Dewi dkk., 2016).

Kajian mengenai impregnasi logam Co pada H-ZSM-5 telah dilaporkan oleh beberapa peneliti, salah satunya oleh Kantarelis *et al*. (2019). Dalam penelitiannya, modifikasi logam Co mampu mengurangi situs asam Bronsted dengan meningkatkan konsentrasi asam Lewis karena adanya logam Co yang terdispersi pada zeolit yang menukar beberapa proton di zeolit. Impregnasi Co (terutama di dalam mesopori) menghasilkan peningkatan keasaman Lewis pada katalis. Peningkatan keasaman Lewis mendukung reaksi dekarboksilasi,

sementara kandungan olefin dan senyawa polisiklik aromatik (PAH) yang lebih tinggi menunjukkan adanya difusi yang lebih mudah dalam dan dari jaringan berpori serta interaksi dalam mesopori. Pengendapan karbon terjadi di dalam pori-pori lebih dalam pada katalis yang telah mengalami desilikasi karena ukuran pori yang lebih besar.

Deposisi logam mengakibatkan penurunan luas permukaan dan volume mesopori. Volume mikropori setelah modifikasi logam tidak mengalami perubahan yang menunjukkan bahwa Co terutama terdeposisi dalam rongga mesopori. Impregnasi Co mengakibatkan penurunan lebih lanjut dalam kristalinitas zeolit. Kristalinitas relatif sebesar 66,1 dan 69,4% untuk Co/H-ZSM-5 dan Co/Ds-H-ZSM-5 secara berturut-turut. Namun, perlakuan desilasi dan modifikasi cobalt sebagai katalis dalam reaksi pirolisis biomassa memiliki aktivitas 2,2 kali lebih tinggi terhadap reaksi deoksigenasi uap pirolisis, dengan mengurangi penumpukan kokas sebanyak 25% dibandingkan dengan zeolit H-ZSM-5 mikropori konvensional (Kantarelis *et al.*, 2019).

Penelitian lain yang dilakukan oleh Alotibi *et al.* (2020) juga menunjukkan modifikasi H-ZSM-5 dengan logam Co memiliki kinerja katalis yang cukup baik, Impregnasi logam Co pada H-ZSM-5 yang dilakukan menjadi katalis bifungsi karena adanya dua komponen situs aktif. Keterkaitan antara logam dan situs asam menjadi parameter penting yang menentukan kinerja katalis dalam mengatur selektivitas produk.

2.10 Katalis

Katalis merupakan zat yang dapat mempengaruhi kecepatan reaksi tetapi zat tersebut tidak mengalami perubahan kimia pada akhir reaksi, sehingga katalis ikut dalam reaksi tetapi pada akhir reaksi diperoleh kembali. Katalis dapat menyediakan situs aktif yang berfungsi untuk mempertemukan reaktan dan menyumbangkan energi dalam bentuk panas sehingga molekul pereaktan mampu melewati energi aktivasi secara lebih mudah. Sifat-sifat katalis yang menarik untuk diteliti, yaitu aktivitas, stabilitas, selektivitas, regenerasi umur dan kekuatan

mekanik yang cukup baik. Secara umum, katalis mempunyai dua fungsi, yaitu mempercepat reaksi menuju kesetimbangan atau fungsi aktivitas dan meningkatkan hasil reaksi yang dikehendaki atau fungsi selektivitas (Nasikin dan Susanto, 2010).

Katalis bekerja dengan cara meningkatkan frekuensi tumbukan antar reaktan, mengubah orientasi reaktan sehingga memperbanyak tumbukan efektif dan menurunkan ikatan intermolekuler antar molekul reaktan. Adanya katalis juga dinilai mampu mempercepat reaksi menuju kesetimbangan. Beberapa faktor yang mempengaruhi laju reaksi kimia seperti pH, konsentrasi reaktan, suhu, dan lainnya. Umumnya kenaikan konsentrasi katalis juga menaikkan kecepatan reaksi (Sukardjo, 2002).

Katalis terbagi menjadi dua jenis, yaitu katalis homogen dan katalis heterogen. Katalis heterogen adalah katalis yang memiliki fasa yang berbeda antara produk dengan reaktan. Umumnya katalis berfasa padat yang akan berinteraksi dengan reaktan dengan fasa berbeda sehingga interaksi yang mungkin terjadi dapat berupa padat-gas atau padat-cair. Hal ini yang menyebabkan katalis heterogen mudah dipisahkan dari produk yang dihasilkan, dan dapat digunakan kembali yang secara otomatis pula tidak langsung terbuang ke lingkungan sehingga aman, serta tidak mencemari lingkungan. Di samping itu, katalis heterogen pun mampu digunakan dalam berbagai media, aktivitas dan selektivitas yang tinggi, tidak korosif, relatif murah, dan dapat dengan mudah diaktifkan untuk memperoleh sifat katalitik yang diinginkan. Oleh karena itu, katalis jenis ini dinilai lebih efektif dan efisien untuk berbagai reaksi (Endalew *et al.*, 2011). Katalis heterogen mempunyai sifat kimia yang spesifik pada permukaan seperti struktur dan reaktifitas permukaannya. Dengan mengetahui struktur dan reaktifitas permukaan padatan maka kemampuan katalitiknya dapat diketahui. Beberapa contoh katalis heterogen, yaitu logam oksida seperti ZnO, NiO, TiO₂, MgO, dan zeolit seperti zeolit Y, zeolit B, zeolit mordenit, dan ZSM-5.

Zeolit menjadi salah satu contoh katalis heterogen dengan ciri khusus adanya ruang kosong yang membentuk saluran di dalamnya. Bila zeolit digunakan pada

proses katalisis maka akan terjadi difusi molekul ke dalam ruang bebas antara kristal dan reaksi kimia juga terjadi di permukaan saluran tersebut.

2.11 Reaksi Dehidrasi

Reaksi dehidrasi metanol menjadi dimetil eter (DME) merupakan salah satu proses kimia yang penting dalam industri. DME, dengan rumus kimia CH_3OCH_3 , adalah senyawa organik yang memiliki berbagai aplikasi, mulai dari bahan bakar alternatif hingga propelan aerosol. Proses produksi DME ini melibatkan penghilangan molekul air (dehidrasi) dari dua molekul metanol (CH_3OH).

Secara sederhana, reaksi dehidrasi metanol digambarkan seperti Persamaan 3.



Reaksi ini umumnya terjadi pada suhu tinggi dan dengan bantuan katalis asam atau basa. Katalis berperan dalam mempercepat laju reaksi dengan menurunkan energi aktivasi. Beberapa katalis yang sering digunakan antara lain γ -alumina, zeolit, dan asam fosfat (Bernardi *et al.*, 2019). Umumnya mekanisme reaksi melibatkan beberapa tahap, termasuk adsorpsi molekul metanol pada permukaan katalis, pembentukan ikatan antara molekul metanol, eliminasi molekul air, dan desorpsi molekul DME. Mekanisme yang tepat dapat bervariasi tergantung pada jenis katalis yang digunakan.

Beberapa faktor yang dapat memengaruhi hasil reaksi dehidrasi metanol antara lain:

1. Katalis yang berbeda memiliki aktivitas dan selektivitas yang berbeda pula.
2. Suhu yang terlalu rendah dapat menyebabkan laju reaksi yang lambat, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan dekomposisi produk.
3. Tekanan yang tinggi dapat menggeser kesetimbangan reaksi ke arah pembentukan DME.
4. Rasio mol metanol terhadap air dapat mempengaruhi konversi metanol menjadi DME.

5. Ukuran partikel katalis yang lebih kecil umumnya memiliki luas permukaan yang lebih besar, sehingga dapat meningkatkan aktivitas katalis

(Ateka *et al.*, 2022).

2.12 Dimetil Eter

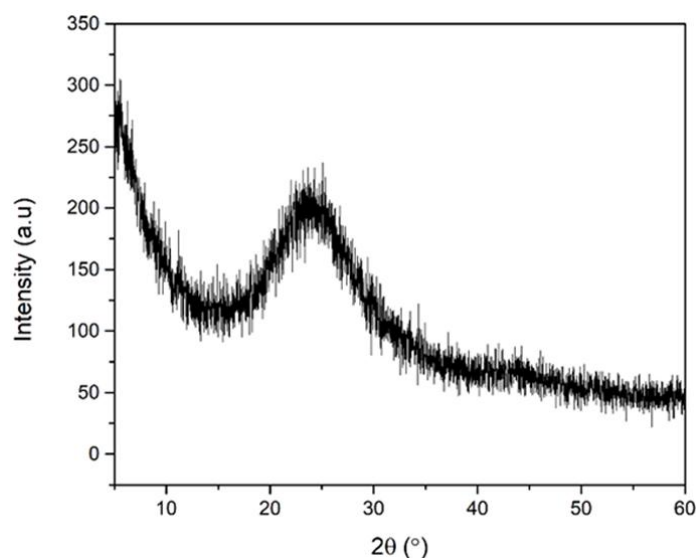
Dimetil Eter (DME) adalah senyawa organik dengan rumus molekul CH_3OCH_3 . DME umumnya digunakan sebagai propelan semprot, pelarut dan bahan bakar. Proses pembuatan DME dengan bahan baku metanol memiliki beberapa teknologi yang dapat digunakan diantaranya proses *syngas*, dehidrasi metanol dengan bantuan katalis asam sulfat dan dehidrasi metanol dengan bantuan katalis silika alumina (Ateka *et al.*, 2022). Proses *syngas* merupakan proses yang paling rumit dibandingkan kedua metode lainnya karena proses *syngas* membutuhkan dua reaktor dimana reaktor pertama digunakan untuk memproduksi metanol dan reaktor kedua digunakan untuk mendehidrasi metanol untuk mendapatkan DME. Teknologi selanjutnya adalah pembuatan DME dari metanol terdehidrasi dengan asam sulfat sebagai katalis. Teknologi ini berlangsung dalam fase gas dan hanya menggunakan satu reaktor. Namun kelemahan dari teknologi ini adalah konversi methanol terlalu rendah yaitu 45%. Teknologi ketiga adalah dehidrasi metanol menggunakan katalis alumina silika. Teknologi ini berlangsung dalam fase gas dan menggunakan reaktor. Keunggulan dari teknologi ini adalah konversi metanol diperoleh sebesar 80% dan proses yang digunakan sangat sederhana (Khandan *et al.*, 2017).

2.13 Karakterisasi

2.13.1 X-Ray Diffraction (XRD)

XRD adalah metode karakterisasi material padat yang berguna untuk mengetahui kemurnian, perubahan parameter kisi suatu kristal, struktur kristal dan fasa

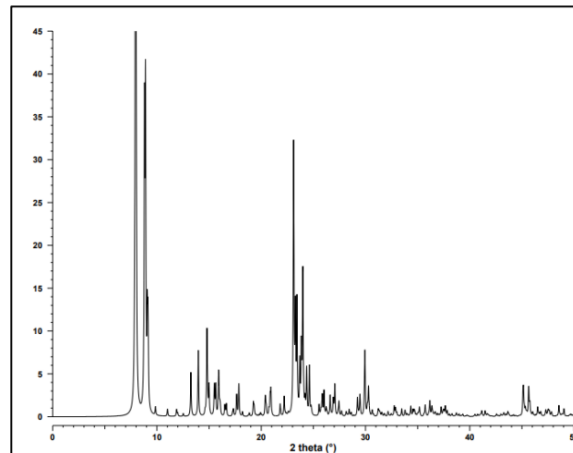
kristalin. Analisis ini didasarkan pada interaksi antara materi dengan radiasi elektromagnetik sinar-X yaitu pengukuran radiasi sinar-X yang terdifraksi oleh bidang kristal. Penghamburan sinar-X oleh unit-unit pada kristal akan menghasilkan pola difraksi yang digunakan untuk menentukan susunan partikel pada pola padatan. Gambaran tiga dimensi suatu bahan material yang bukan *amorf* akan diperlihatkan dengan jelas dan teratur berdasarkan pengulangan lapisan permukaan atom yang membentuk kisi kristal. Ketika berkas sinar-X berinteraksi dengan lapisan permukaan atom yang membentuk kisi kristal, sinar-X sebagian akan ditransmisikan, diserap, direfleksikan, sebagian lagi dihamburkan dan didifraksikan. Sinar-X yang didifraksikan oleh setiap kristal bersifat spesifik dan bergantung pada atom penyusun kisi kristal dan penyusun atom sejenis (West, 1984).



Gambar 8. Difraktogram silika SCBA (Rilyanti *et al.*, 2025)

Puncak yang dihasilkan pada difraktogram dapat memberikan informasi mengenai fasa kristal, tingkat kristalinitas dan ukuran kristal (crystallite size) suatu material. Fase dan struktur silika SCBA ditentukan oleh XRD pada $2\theta = 5-60^\circ$. Fase amorf ditandai dengan puncak yang memanjang sekitar $20-30^\circ$. Difraktogram pada Gambar 8 menegaskan bahwa fase silika SCBA yang terbentuk dominan amorf. Karena silika bersifat amorf, maka mudah untuk diubah bentuknya menjadi kerangka zeolit (Rilyanti *et al.*, 2025).

Menurut *International Zeolite Association* (IZA), ZSM-5 memiliki difraktogram standar yang digunakan sebagai acuan atau baku. ZSM-5 memiliki puncak-puncak karakteristik pada 2θ seperti ditunjukkan pada Gambar 9 dan dijadikan sebagai acuan, yaitu 7,96; 8,86; 9,08; 23,16; dan 23,98°.



Gambar 9. Difraktogram standar ZSM-5 (Sumber: <http://izase-mirror.la.asu.edu/fmi/xsl/IZA-SC>).

Puncak-puncak yang dihasilkan pada difraktogram dapat memuat informasi mengenai fasa kristal, ukuran kristal, dan tingkat kristalinitas suatu material. Semakin tinggi puncak yang muncul pada difraktogram, maka fasa kristal tersebut semakin bersifat kristalin. Untuk menghitung tingkat kristalinitas suatu material dapat ditentukan melalui perhitungan dengan metode *Gaussian Peaks* berdasarkan Persamaan 4 (Ahvenainen *et al.*, 2016).

$$\text{Kristalinitas} = \frac{A_{cr}}{A_{cr} + A_m} \times 100\% \quad (4)$$

Keterangan:

A_{cr} = Luas area kristalin hasil analisis sampel

A_{am} = Luas area *amorf* hasil analisis sampel

2.13.2 X-Ray Fluorescence (XRF)

X-Ray Fluorescence (XRF) adalah teknik analisis unsur yang memberikan informasi kimia kuantitatif XRF bertujuan untuk mengetahui komposisi (kimia) unsur penyusun suatu bahan atau material. Analisis ini menghasilkan jenis-jenis unsur dan konsentrasi dari masing-masing unsur tersebut melalui pengukuran fluoresensi sinar-X (sekunder yang dipancarkan oleh sampel ketika dieksitasi oleh sumber sinar-X primer (Lestari, 2018) Prinsip kerja XRF adalah foton yang memiliki energi tinggi menyebabkan elektron tersebut berpindah ke lapisan kulit luarnya. Pada saat yang bersamaan, kulit dalam terjadi kekosongan elektron dan menyebabkan keadaan yang tidak stabil sehingga elektron dari kulit di atasnya berpindah mengisi kekosongan dengan mengemisikan sinar (*fluoresence*) yang memiliki perbedaan energi dari kedua keadaan dan panjang gelombang sinar yang diemisikan sebanding dengan karakteristik dan konsentrasi dari tiap elemen (Suryanarayana and Norton, 1998)

Hasil analisis kandungan sampel menggunakan XRF yang dilakukan oleh Channoy *et al* (2018) untuk sampel SCBA disajikan pada Tabel 4. Komposisi kimia penyusun SCBA terbesar berupa silika (SiO_2) yang memiliki fasa *amorf* sebesar 80,81% Selain itu, terdapat juga komposisi lain seperti alumina yang relatif kecil sebesar 4,29% dan oksida-oksida lainnya.

Tabel 4. Komposisi kimia SCBA

Komposisi Kimia	Berat (wt%)
SiO_2	80,81
Al_2O_3	4,29
MgO	2,17
P_2O_5	1,84
SO_3	1,69
K_2O	2,54
CaO	3,39
Fe_2O_3	2,4

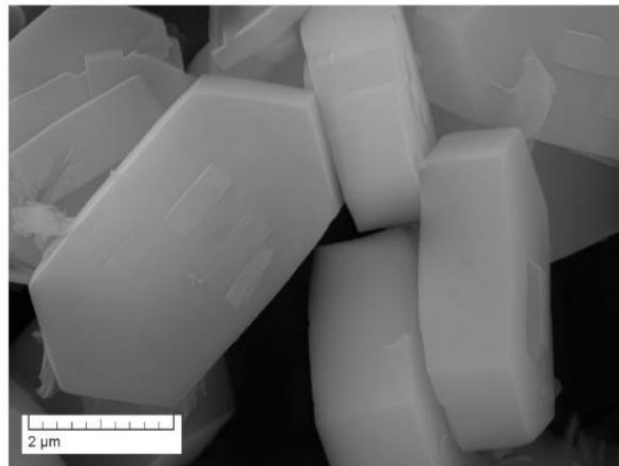
(Channoy *et al.*, 2018).

2.13.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

SEM merupakan jenis mikroskop elektron yang menggunakan berkas elektron berenergi tinggi untuk melihat struktur topografi permukaan, ukuran butiran, cacat struktural, dan komposisi pencemaran suatu bahan. Hasil SEM berupa *scanning electron micrograph* yang menyajikan bentuk tiga dimensi berupa gambar atau foto dengan berbagai lekukan dan tonjolan. Mikroskop ini digunakan untuk mempelajari struktur permukaan objek yang dapat diperbesar antara 1.000-40.000 kali (Smallman dan Bishop, 2000).

Prinsip kerja dari SEM yaitu gelombang elektron yang dipancarkan *electron gun* terkondensasi di lensa kondensor dan terfokus sebagai titik jelas oleh lensa objektif. *Scanning coil* yang diberi energi menyediakan medan magnet bagi sinar elektron. Berkas sinar elektron mengenai cuplikan menghasilkan elektron sekunder dan dikumpulkan oleh detektor sekunder (*backscatter*). Gambar yang dihasilkan meliputi ribuan titik intensitas di permukaan *Cathode Ray Tube* (CRT) sebagai topografi.

Berbagai detektor digunakan untuk menarik berbagai jenis elektron yang tersebar, termasuk sekunder dan *backscattered electron* dan sinar-x. Hamburan balik elektron merupakan insidental yang dipantulkan ke belakang gambar memberikan data komposisi berkaitan dengan deteksi unsur dan senyawa. Pembesaran gambar hingga 10 nanometer dan meskipun tidak sekuat TEM, interaksi intens yang terjadi pada permukaan spesimen memberikan kedalaman pandang yang lebih besar, resolusi lebih tinggi dan gambar permukaan lebih rinci (Choudhary and Priyanka, 2017). Mikrograf SEM ZSM-5 dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. SEM dari ZSM-5 (Qin *et al.*, 2013).

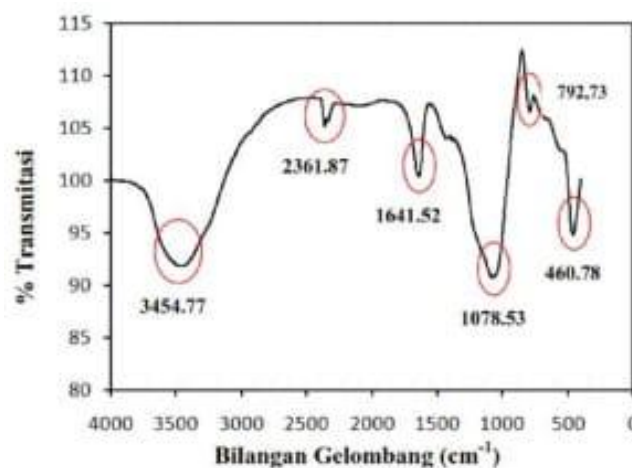
2.13.4 *Fourier Transform Infrared (FTIR)*

Fourier Transform-Infra Red (FT-IR) merupakan alat yang digunakan untuk analisis material yang didasarkan pada penggunaan spektroskopi sinar infra merah yang dilakukan secara kuantitatif dan kualitatif. Analisa metode kuantitatif didasarkan pada keberadaan gugus fungsi dengan menggunakan standar acuan. Pada umumnya, sampel yang dianalisis dapat berupa sampel padat, cair ataupun gas, yang masing-masing menggunakan sel yang berbeda yang berguna untuk mengetahui gugus fungsional dari suatu senyawa yang belum diketahui identitasnya.

Penyerapan gelombang elektromagnetik dapat menyebabkan terjadinya eksitasi tingkat-tingkat energi dalam molekul berupa eksitasi elektronik, vibrasi atau rotasi. Daerah radiasi pada spektroskopi inframerah berkisar pada frekuensi (ν) $12800\text{-}10\text{ cm}^{-1}$. Umumnya daerah radiasi inframerah terbagi dalam daerah inframerah dekat ($12800\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$), daerah inframerah tengah ($4000\text{-}200\text{ cm}^{-1}$) dan daerah inframerah jauh ($200\text{-}10\text{ cm}^{-1}$), pada daerah tengah merupakan daerah yang paling banyak digunakan untuk keperluan yakni sekitar $4000\text{-}690\text{ cm}^{-1}$ (Khopkar, 2008). Spektroskopi FTIR menggunakan sistem optik dengan laser yang berfungsi sebagai sumber radiasi yang kemudian diinterferensikan oleh sinar

inframerah agar sinyal radiasi yang diterima oleh detektor memiliki kualitas yang baik dan bersifat utuh. Spektroskopi FTIR bergantung pada transmisi radiasi melalui sampel yang terlihat di daerah inframerah dari spektrum elektromagnetik memungkinkan untuk mendeteksi keadaan vibrasi molekul, yang memberikan informasi tentang struktur kimia dan ikatan (Dyamenahalli *et al*, 2015).

Karakterisasi menggunakan FTIR pada penelitian Rilyanti dkk. (2020) menghasilkan pola FTIR silika seperti yang ditampilkan pada Gambar 11. Pita serapan yang dihasilkan mengkonfirmasi adanya gugus silanol (Si-OH) pada bilangan gelombang $3454,77\text{ cm}^{-1}$ dan siloksan (Si-O-Si) ditunjukkan pada bilangan gelombang $1641,52$ hingga 1100 cm^{-1} , sedangkan pita serapan yang muncul pada bilangan gelombang $792,73\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya vibrasi simetri -OSi-O dan -OAl-O serta vibrasi tekuk dari O-Si-O yang ditunjukkan pada bilangan gelombang $460,78\text{ cm}^{-1}$.



Gambar 11. Pola FTIR silika dari abu ampas tebu (Rilyanti dkk., 2020).

2.13.5 Brunauer-Emmett-Teller (BET)

Isoterm BET merupakan salah satu metode penentuan luas permukaan zat padat dengan prinsip adsorpsi molekul gas pada permukaan padatan berdasarkan fisisorpsi (*physisorption*). Isoterm BET menyediakan informasi dasar untuk teknik analisis penentuan luas permukaan spesifik suatu material (Affandi *et al.*, 2009).

Luas permukaan, volume total pori, dan rata-rata jari-jari pori merupakan faktor penentu kerja suatu adsorben. Suatu bahan padatan seperti adsorben, memiliki luas permukaan yang dapat dibedakan menjadi luas permukaan eksternal (makroskopik) yang meliputi permukaan luar bahan dan internal (mikroskopik) yang meliputi semua pori-pori kecil, celah, dan rongga pada padatan (Schlumber and Thommes, 2021).

BET digunakan untuk karakterisasi permukaan suatu material yang meliputi surface area (SA, m²/g), diameter pori (d_{pori}/cm), dan volume pori (V_{pori}, cm³/g) (Abdullah dan Khairurrijal, 2009). Teori BET digunakan berdasarkan prinsip adsorpsi-desorpsi gas adsorbat. Mekanisme adsorpsi gas tersebut berupa penyerapan gas (nitrogen, argon, dan helium) pada permukaan suatu bahan padat yang akan dikarakterisasi pada suhu tetap. Luas permukaan total padatan dapat dihitung, jika diketahui volume gas (nitrogen, argon, dan helium) yang diserap oleh suatu permukaan padatan pada suhu dan tekanan tertentu serta diketahui secara teoritis luas permukaan dari suatu molekul gas yang diserap. Luas permukaan spesifik adalah luas permukaan per satuan gram. Sedangkan, luas permukaan merupakan jumlah pori pada setiap satuan luas dari sampel. Teori BET digunakan untuk menghitung luas padatan tersebut ditunjukkan dalam Persamaan 5:

$$S = \frac{X_m L_{av} A_m}{M_v} \quad (5)$$

di mana:

S : Luas permukaan total.

X_m : Kapasitas monolayer

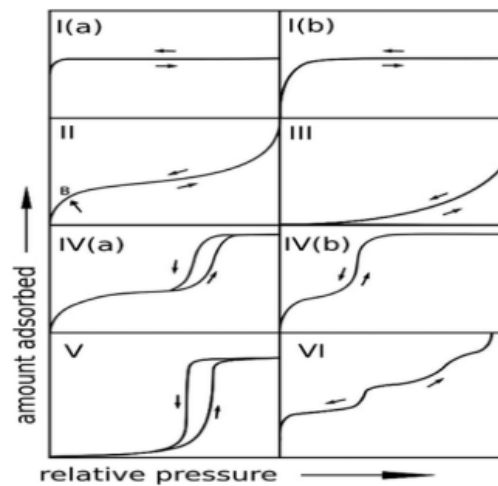
L_{av} : Bilangan Avogadro (6,023 x 10²³ molekul/mol)

A_m : Luas penampang adsorbat dengan nilai 0,162 nm² menggunakan adsorbat nitrogen

M_v : Volume molar gas ideal sebesar 22,4 liter/mol

Gas yang sering digunakan pada uji *surface area analyzer* (SAA) yaitu nitrogen. Hal ini disebabkan oleh tersedianya gas nitrogen dengan kemurnian yang tinggi dan dapat berinteraksi dengan kuat dengan kebanyakan padatan. Biasanya,

interaksi antara fasa gas dan padat lemah, maka dari itu permukaan didinginkan dengan menggunakan nitrogen cair untuk memperoleh jumlah adsorpsi yang terdeteksi. Selanjutnya, tekanan relatif yang lebih rendah dibandingkan dengan tekanan atmosfer didapatkan dalam kondisi setengah vakum. Setelah lapisan adsorpsi terbentuk, gas nitrogen kemudian dihilangkan atau dibebaskan dari sampel dengan cara dipanaskan (Hwang *and* Barron, 2011). Tipe-tipe pola adsorpsi isoterm ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Tipe-tipe adsorpsi isoterm (Schlumberger *and* Thommes, 2021).

Isoterm tipe I khas untuk adsorben mikropori, misalnya zeolit dan beberapa karbon aktif. Isoterm tipe I(a) terjadi pada keadaan penyerapan tinggi pada pori-pori mikro sedangkan isoterm tipe I(b) untuk menunjukkan distribusi ukuran pori yang lebih luas termasuk supermikropori dan mesopori ($\leq 2,5$ nm). Isoterm tipe II pisorpsi pada material tidak berpori dan makropori dengan permukaan heterogen. Pembentukan monolayer-multilayer yang tidak terbatas dimungkinkan hingga tekanan relatif tinggi selama proses adsorpsi. Isoterm tipe III terjadi jika interaksi fluida-dinding relatif lemah dan adsorbat tidak sepenuhnya membasahi permukaan. Karena interaksi yang lebih kuat antara molekul-molekul fluida dibandingkan dengan interaksi fluida-dinding, molekul-molekul membangun kelompok disekitar lokasi adsorpsi. Isoterm tipe IV khas untuk mesopori akibat pembentukan lapisan tunggal-multilapis diikuti oleh kondensasi pori dengan adanya histeresis menghasilkan isoterm tipe IV(a), sedangkan isoterm tipe IV(b) tanpa

histeresis. Isoterm Tipe V mirip dengan bentuk isoterm Tipe III pada rentang tekanan relatif rendah. Hal ini juga disebabkan oleh interaksi fluida-dinding yang relatif lemah. Isoterm Tipe VI terjadi dalam keadaan material tidak berpori yang sangat seragam menunjukkan adsorpsi lapisan (Schlumberger *and* Thommes, 2021).

2.13.6 Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

GC-MS merupakan teknik analisis yang mengombinasikan kromatografi gas (GC) dengan spektrometri massa (MS). Instrumen ini terdiri atas empat bagian utama, yaitu injektor, kolom kromatografi, detektor, dan rekorder (Stashenko *and* Martínez, 2014). Prinsip kerjanya didasarkan pada pemisahan senyawa menurut waktu retensi relatif dalam kromatografi gas dan pola elusi komponen campuran, yang kemudian dipadukan dengan pola fragmentasi spektrum massa untuk memberikan informasi karakteristik struktur senyawa kimia. Saat senyawa organik keluar dari kolom GC, senyawa tersebut masuk ke spektrometer massa dan dikenai bombardir elektron sehingga terfragmentasi menjadi ion-ion. Nilai rasio massa terhadap muatan (m/z) menunjukkan perbandingan massa fragmen dengan muatannya, yang merepresentasikan bobot molekul fragmen tersebut. Umumnya, spektrometer massa dilengkapi dengan kuadropol sebagai penganalisis massa dari suatu senyawa (Mani *et al.*, 2017). Karena detektor spektrometer massa bersifat universal, GC-MS dapat diaplikasikan untuk menganalisis beragam jenis senyawa, sehingga menjadikannya salah satu instrumen analisis yang paling banyak digunakan (Torres, 2005).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini telah dilakukan pada bulan Oktober 2024 sampai Agustus 2025 di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Karakterisasi silika dan sampel menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) merek PANalytical tipe Epsilon 3 dan *X-Ray Diffraction* (XRD) merek PANalytical tipe E'Xpert Pro dilakukan di Laboratorium Instrumen Universitas Negeri Padang, Spektrofotometer *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) merek Perkin Elmer tipe Frontier dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan di Unit Penunjang Akademik Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi Universitas Lampung, *Surface Area Analyzer* (SAA) dengan metode *Brunauer-Emmet-Teller* (BET) dilakukan di Unit Penunjang Akademik Laboratorium Terpadu Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta. Analisis hasil produk dehidrasi menggunakan *Gas Chromatograph-Mass Spectrometer* (GC-MS) di Laboratorium Terpadu Universitas Islam Indonesia.

3.2 Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini, yaitu neraca analitik, oven, gelas kimia 250, 1000, dan 2000 mL, gelas ukur 100 dan 250 mL, labu ukur 1000 mL, erlenmeyer 250, 500, dan 1000 mL, spatula, termometer, corong pisah, corong kaca, loyang, seperangkat autoklaf, tanur, pH meter, mortar dan alu, batang pengaduk, saringan ukuran 250 μm , *spinbar* besar dan kecil, *hotplate stirrer*, statif dan klem, dan kaca arloji.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu ampas tebu, silika komersil (Ludox), aluminium hidroksida $\text{Al}(\text{OH})_3$ (merck), asam nitrat teknis (HNO_3) 2,5% dan 10%, natrium hidroksida (NaOH) 2 M, kertas saring, indikator universal, ammonium nitrat (NH_4NO_3) 1 M, larutan natrium hidroksida sintetis (NaOH) 50% (w/w), TPA-Br (Tetrapropilammonium bromida), $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$, pati PA, metanol, *oil bath*, dan akuades.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Ekstraksi Silika dari Abu Ampas Tebu (SCBA)

Dalam upaya memperoleh silika dari abu ampas tebu, maka ampas tebu yang telah diperoleh dari PT. Sweet Indo Lampung (SIL) di Tulang Bawang, Lampung dilakukan proses pencucian, pengeringan, dan pembakaran untuk mendapatkan abu ampas tebu. Sebanyak 10 g serat ampas tebu kering yang telah diayak dan dipisahkan dari pasir, dicuci dengan cara direndam dalam 250 mL larutan HNO_3 2,5% sambil diaduk dan dipanaskan menggunakan *hotplate* hingga mendidih. Setelah itu, ampas tebu dibilas dengan akuades hingga pH netral, kemudian disaring dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 80 °C. Ampas tebu yang telah dikeringkan kemudian dibakar dalam tanur pada suhu 550 °C selama ± 5 menit hingga diperoleh abu ampas tebu (SCBA).

Proses ekstraksi silika dari abu ampas tebu dilakukan dengan cara mencampurkan 70 g abu ampas tebu (SCBA) yang diperoleh dari hasil pembakaran dengan larutan NaOH 2 M (perbandingan 1:25). Selanjutnya, campuran dipanaskan menggunakan *hotplate* pada suhu 80 °C sambil diaduk hingga mendidih selama ± 1 jam. Dalam memaksimalkan proses pengekstraksian, campuran dibiarkan pada suhu ruang selama 24 jam dan kemudian filtratnya disaring menggunakan kertas saring. Filtrat yang didapatkan kemudian ditambahkan dengan larutan HNO_3 10% tetes demi tetes hingga terbentuk hidrogel silika pada pH 7. Hidrogel yang terbentuk dibiarkan selama 48 jam untuk memaksimalkan pembentukan gel. Gel

kemudian didekantasi menggunakan kertas saring lalu dicuci dengan akuades panas dan selanjutnya dikeringkan dengan oven pada suhu 80°C selama 24 jam. Padatan yang diperoleh berupa silika tersebut digerus dengan mortar sampai halus. Padatan silika selanjutnya dikarakterisasi dan dijadikan prekursor utama untuk sintesis ZSM-5 pori hirarki dengan metode hidrotermal.

3.3.2 Karakterisasi Silika Hasil Ekstraksi Abu Ampas Tebu

Karakterisasi silika menggunakan analisis *X-Ray Fluoresence* (XRF) untuk mengetahui komposisi senyawa pada silika SCBA hasil ekstraksi, analisis *Fourier Transform InfraRed* (FTIR) untuk mengetahui gugus fungsi penyusun silika SCBA (gugus silanol Si-OH dan siloksan Si-O-Si), dan analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui jenis fasa dan tingkat kristalinitas dari silika SCBA.

3.3.3 Sintesis Zeolite Socony Mobile-5 (ZSM-5) Pori Hirarki

Pada penelitian ini ZSM-5 pori hirarki disintesis secara hidrotermal dengan penambahan benih (*seed assisted*) yang bertujuan sebagai pemicu pertumbuhan kristal dengan mengarahkan pembentukan struktur kristal zeolit yang diinginkan serta menggantikan fungsi cetakan organik (*template*). Selain itu, penambahan pati juga dilakukan sebagai agen pengarah mesopori (mesoporogen) yang bertujuan mencetak porositas tambahan dengan ukuran meso pada kristal zeolit.

3.3.3.1 Sintesis Benih ZSM-5

Pada penelitian ini sintesis benih ZSM-5 dilakukan dengan metode hidrotermal menggunakan silika komersil yaitu Ludox dengan penambahan sumber alumina $\text{Al}(\text{OH})_3$. Benih ZSM-5 disintesis dengan perbandingan molar pereaksi berikut: 1 SiO_2 :0,248 $\text{Al}(\text{OH})_3$:0,229 NaOH :0,240 TPABr :30,000 H_2O (Rilyanti *et al*, 2023).

Seluruh prekursor dipersiapkan dalam bentuk gel dan kemudian diubah menjadi kristal zeolit melalui proses hidrotermal. Sintesis ZSM-5 ini dilakukan pada suhu 170 °C selama 120 jam. Informasi lebih lengkap tentang komposisi molar dari setiap pereaksi dapat dilihat pada Tabel 5 dan 6.

Tabel 5. Komposisi molar pereaksi benih ZSM-5

Komposisi	SiO ₂	NaOH	H ₂ O	Al ₂ O ₃	TPABr
Molar	1	0,229	30	0,248	0,240
M/W (g/mol)	60	40	18	78	266,260
ρ (g/mL)	-	-	-	-	-
W (g)	60	9,17	540	19,344	63,90

Tabel 6. Perhitungan komposisi molar pereaksi benih ZSM-5

Bahan Massa untuk 1 Autoklaf	ρ (g/mL)	Kemurnian (%)	M/W (g/mol)	Massa (g)	(g)*
SiO ₂ (Ludox)	-	100	60,08	150,00	7,656
Al(OH) ₃	-	100	78	9,672	0,493
NaOH 50% (w/v)	1,515	50	40	18,35	0,936
TPABr	-	100	266,26	63,902	3,262
H ₂ O dari NaOH	-	-	18	9,173	-
H ₂ O ditambahkan	-	-	18	530,83	27,093

*massa yang dihitung merupakan massa untuk 1 teflon ukuran 50 mL

Dalam melakukan sintesis benih ZSM-5 tahap pertama yang dilakukan membuat larutan A dengan cara melarutkan 0,4937 g Al(OH)₃ dan 0,936 g NaOH 50% dalam 9,031 g H₂O yang diaduk secara konstan selama 1 jam. Disamping itu, dilakukan pembuatan larutan B dengan cara melarutkan 7,656 g Ludox dalam 9,031 g H₂O yang diaduk konstan selama 1 jam. Setelah itu, dilakukan pencampuran larutan A dan B dengan pengadukan selama 30 menit dan diperoleh larutan C. Setelah homogen, larutan C di tambahkan 3,262 g TPABr yang sebelumnya telah dilarutkan dengan 9,031 g H₂O dan dilanjutkan pengadukan selama 90 menit pada suhu ruang. Selanjutnya campuran dipindahkan ke dalam teflon-autoklaf untuk disintesis secara hidrotermal dengan suhu 180 °C selama 120 jam. Produk kasar yang terbentuk kemudian disaring dan dicuci dengan akuades, untuk selanjutnya dikeringkan dengan oven pada suhu 80 °C.

Berdasarkan penelitian Lestari (2018) padatan hasil sintesis dikalsinasi menggunakan tanur pada suhu 550 °C selama 6 jam untuk menghilangkan *template* organik dan membuka pori yang terdapat dalam benih ZSM-5.

3.3.3.2 Sintesis ZSM-5 Pori Hirarki Berbasis Silika Ludox

Sintesis ZSM-5 pori hirarki dari silika Ludox dilakukan dengan prosedur yang sama dengan sintesis benih ZSM-5, di mana semua prekursor dihomogenkan dan didinginkan hingga suhu ruang dilakukan penambahan pati sebagai bio-mesoporogen sebanyak 10% dari jumlah silika SCBA yang digunakan. Selanjutnya, campuran dihomogenkan dengan *magnetic stirrer* selama 24 jam pada suhu ruang. Campuran berbentuk gel tersebut dipindahkan ke dalam teflon autoklaf untuk disintesis secara hidrotermal pada suhu 180 °C selama 120 jam. Produk yang terbentuk disaring dan dicuci dengan akuades hingga bersih, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 80 °C selama 2 jam. Selanjutnya dilakukan kalsinasi pada suhu 550 °C selama 6 jam.

3.3.3.3 Sintesis ZSM-5 Pori Hirarki Berbasis Silika SCBA

Pada penelitian ini ZSM-5 pori hirarki disintesis menggunakan prekursor dari ekstraksi silika SCBA melalui metode hidrotermal dengan penambahan pati sebanyak 10% sebagai mesoporogen. Perbandingan molar sintesis ZSM-5 pori hirarki adalah sebagai berikut:

1 SiO₂ : 0,067 Al₂O₃ : 0,250 NaOH : 30,00 H₂O (Rilyanti *et al*, 2023)

Sesuai penelitian Rilyanti *et al.* (2023) semua prekursor dipersiapkan dengan metode preparasi gel dan kemudian diubah menjadi kristal zeolit melalui proses hidrotermal. Informasi rinci tentang komposisi molar dari setiap pereaksi dapat dilihat pada Tabel 7 dan 8.

Tabel 7. Komposisi molar pereaksi untuk sintesis ZSM-5 pori hirarki

Komposisi	SiO ₂	NaOH	H ₂ O	Al ₂ O ₃
Molar	1	0,250	30	0,067
M/W (g/mol)	60	40	18	102
ρ (g/mL)	-	-	-	-
W (g)	60	9,170	540	6,803

Tabel 8. Perhitungan komposisi molar pereaksi sintesis ZSM-5 pori hirarki

Bahan Massa untuk 1 Autoklaf	ρ (g/mL)	Kemurnia n (%)	M/W (g/mol)	Massa (g)	(g)*
SiO ₂ (dari SCBA)	-	80	60	115,07	3,875
Al ₂ O ₃ (dari SCBA)	-	100	102		
NaOH 50% (w/v)	1,515	50	40	18,35	1,153
TPABr	-	100	266,26	63,90	0
Benih	-	100	-	-	0,581
H ₂ O dari NaOH	-	-	18	9,17	-
H ₂ O ditambahkan	-	-	18	530,83	30,54

*massa yang dihitung merupakan massa untuk 1 teflon ukuran 50 mL

Dalam melakukan sintesis ZSM-5 pori hirarki sebanyak 1,153 g NaOH 50% dimasukkan ke dalam botol polipropilen dan ditambahkan 3,875 g silika SCBA yang telah dilarutkan terlebih dahulu dengan H₂O hasil pengukuran. Silika SCBA yang telah larut dimasukkan ke dalam botol polipropilen yang berisi NaOH 50%, dilakukan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* selama 1 jam pada suhu 80 °C. Setelah itu, gel yang terbentuk ditambahkan benih ZSM-5 sebanyak 15% dari berat silika SCBA yang digunakan, kemudian dilanjutkan pengadukan selama 1 jam pada suhu 80 °C. Gel didinginkan hingga suhu ruang untuk dilakukan penambahan pati sebanyak 10% (0,387 g) dari silika SCBA yang digunakan. Selanjutnya, campuran dihomogenkan dibawah pengadukan selama 24 jam pada suhu ruang. Gel yang dihasilkan dipindahkan ke dalam teflon-autoklaf untuk selanjutnya disintesis secara hidrotermal pada suhu 180 °C selama 144 jam. Produk yang terbentuk disaring dan dicuci dengan akuades. Padatan hasil sintesis dikeringkan dengan oven pada suhu 90 °C selama 2 jam dan selanjutnya dikalsinasi dengan menggunakan tanur pada suhu 550 °C selama 6 jam.

3.3.4 Karakterisasi Zeolit Hasil Sintesis

Produk ZSM-5 pori hirarki hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengonfirmasi fasa dan kristalinitas kristal zeolit yang dihasilkan, *X-Ray Floresonce* (XRF) untuk mengetahui komposisi ZSM-5 pori hirarki dan menghitung rasio Si/Al ZSM-5 pori hirarki, *Brunauer Emmet and Teller* (BET) digunakan untuk menganalisis luas permukaan kristal dan ukuran pori zeolit hasil sintesis, dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk melihat morfologi kristal ZSM-5.

3.3.5 Preparasi Katalis

3.3.5.1 Preparasi H-ZSM-5 Pori Hirarki

Sebelum dilakukan uji katalitik ZSM-5 pori hirarki yang telah disintesis dari silika SCBA dan silika Ludox, dilakukan proses *ion exchange* menggunakan NH_4NO_3 1 M untuk mengaktifkan situs asam lewis dan Bronsted-Lowry pada ZSM-5. Sebanyak 2 g ZSM-5 pori hirarki hasil sintesis dicampurkan dengan 20 ml larutan NH_4NO_3 1 M, kemudian diaduk dan dipanaskan pada suhu 80 °C selama 48 jam dengan penggantian larutan setiap 24 jam. Campuran yang terbentuk kemudian dicuci dengan akuades hingga netral. Selanjutnya, dikeringkan menggunakan oven pada suhu 80 °C selama 3 jam sebelum dikalsinasi pada suhu 550 °C selama 6 jam. Hasil *ion exchange* ZSM-5 selanjutnya disebut katalis H-ZSM-5 pori hirarki.

3.3.5.2 Impregnasi Logam Co pada H-ZSM-5 Pori Hirarki

Katalis ZSM-5 pori hirarki yang telah dilakukan ion exchange menjadi katalis H-ZSM-5 pori hirarki kemudian diimpregnasi basah. Sebanyak 1 g H-ZSM-5 pori hirarki dicampurkan ke dalam 50 mL larutan hidrat $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ sambil diaduk pada

suhu 80 °C selama 8 jam. Serbuk Co/H-ZSM-5 pori hirarki yang terbentuk selanjutnya disaring dan dicuci dengan akuades sampai pH netral untuk menghilangkan sisa garam. Setelah dicuci padatan putih dikeringkan pada 80 °C dan dikalsinasi pada suhu 550 °C selama 6 jam (Krisnandi *et al*, 2014). Katalis Co/H-ZSM-5 pori hirarki yang mengandung kobalt selanjutnya dikarakterisasi dan diuji aktivitas katalitiknya dalam reaksi dehidrasi metanol untuk konversi dimetil eter.

3.3.6 Karakterisasi Co/H-ZSM-5 Pori Hirarki

Katalis Co/H-ZSM-5 pori hirarki yang telah disintesis kemudian dianalisis menggunakan teknik *X-Ray Floresonce* (XRF) untuk mengidentifikasi komposisi senyawa serta jumlah unsur kobalt (Co) dalam struktur ZSM-5 yang dimodifikasi, *Brunauer Emmet Teller* (BET) untuk mengetahui luas permukaan kristal dan ukuran pori zeolit setelah impregnasi logam Co.

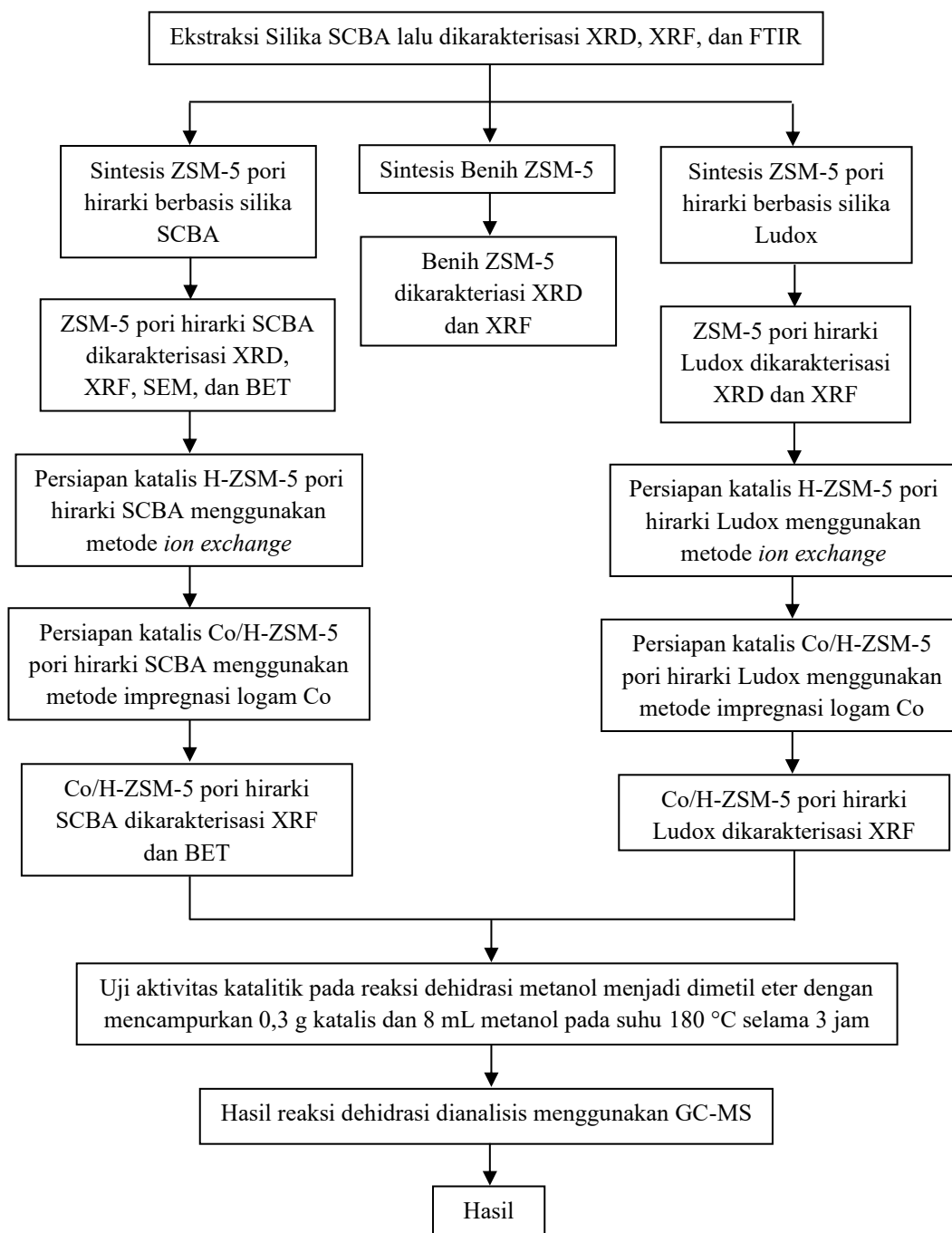
3.3.7 Uji Aktivitas Katalitik

3.3.7.1 Dehidrasi Metanol dan Analisis GC-MS

Pengujian aktivitas katalitik dari hasil sintesis Co/H-ZSM-5 pori hirarki pada penelitian ini dilakukan pada reaksi dehidrasi metanol menjadi dimetil eter (DME) dengan mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Kriprasertkul *et al.* (2022) menggunakan teflon autoklaf. Katalis hasil sintesis sebanyak 0,3 g dicampurkan dengan 8 mL metanol ke dalam teflon autoklaf berukuran 100 mL dan dimasukkan dalam oven dengan suhu 180 °C selama 3 jam. Kemudian setelah proses dehidrasi selesai, autoklaf dikeluarkan dari oven untuk didinginkan dalam air yang berisi es batu selama ± 20 menit. Setelah itu teflon dikeluarkan dan dipisahkan larutan hasil reaksi dari endapan katalis menggunakan kertas saring. Filtrat yang didapat kemudian dianalisis menggunakan GC-MS untuk mengetahui senyawa yang terbentuk dari hasil proses dehidrasi.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Secara menyeluruh alur penelitian ini dapat digambarkan dalam diagram penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Diagram Alir Penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Silika SCBA telah berhasil diekstraksi secara alkali dengan rendemen sebesar 2,942% dan terkonfirmasi berfasa dominan *amorf*, diperoleh rasio Si/Al 6,072 setelah perlakuan asam serta memiliki gugus fungsi khas seperti silanol dan siloksan.
2. H-ZSM-5 pori hirarki dengan silika SCBA dan silika Ludox telah berhasil disintesis menggunakan metode hidrotermal ditandai dengan kemiripan dengan difraktogram ZSM-5 standar, serta memiliki kristalinitas yang cukup baik yaitu sebesar 62,68% dan 76,45%.
3. Co/H-ZSM-5 pori hirarki Ludox memiliki rasio Si/Al lebih rendah dibandingkan Co/H-ZSM-5 pori hirarki SCBA yaitu 2,628 sehingga terkonfirmasi memiliki asam Brønsted yang lebih baik.
4. Luas permukaan Co/H-ZSM-5 pori hirarki SCBA lebih kecil dibandingkan ZSM-5 pori hirarki SCBA yaitu sebesar 123,890 m²/g dan 130,467 m²/g, namun memiliki ukuran pori yang lebih besar yaitu 9,51 nm dan 3,38 nm.
5. Hasil analisis GC-MS memperlihatkan hanya Co/H-ZSM-5 Ludox yang berhasil menghasilkan produk akhir DME. Sementara itu, Co/H-ZSM-5 SCBA menghasilkan senyawa yang tidak dapat dideteksi oleh GC-MS.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dan hasil yang diperoleh, maka disarankan untuk meningkatkan aktivitas katalitik dan selektivitas ZSM-5 hasil sintesis melalui modifikasi zeolit yang lain dan dianalisis pengaruhnya terhadap keasaman zeolit. Selain itu, perlu dilakukannya optimasi kondisi reaksi yang meliputi suhu dan waktu reaksi serta jumlah katalis yang digunakan untuk mendapatkan informasi kondisi optimum pada reaksi dehidrasi metanol menjadi dimetil eter menggunakan katalis hasil sintesis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M. dan Khairurrijal, K. 2009. Review: Karakterisasi Nanomaterial. *Jurnal Nanosains dan Nanoteknologi*. 2(1): 1-9.
- Adebisi, J. A., Agunsoye, J. O., Bello, S. A., Kolawole, F. O., Ramakokovhu, M. M., Daramola, M. O., and Hassan, S. B. 2019. Extraction of Silica from Sugarcane Bagasse, Cassava Periderm and Maize Stalk: Proximate Analysis and Physico-Chemical Properties of Wastes. *Waste and Biomass Valorization*. 10(3): 617-629.
- Affandi, S., Setyawan, H., Winardi, S., Purwanto, A., and Balgis, R. 2009. A Facile Method for Production of High-Purity Silica Xerogels from Bagasse Ash. *Advanced Powder Technology*. 20(5): 468–72.
- Aghakhani, M., Ghiaci, M., and Zanjanchi, M. A. 2016. Hierarchically Structured ZSM-5 as an Active Catalyst for Methanol to Dimethyl Ether Conversion. *Catalysis Science and Technology*. 6(12): 4470–4479.
- Ahvenainen, P., Kontro, L., and Svedström, K. 2016. Comparison of Sample Crystallinity Determination Methods by X-Ray Diffraction for Challenging Cellulose Materials. *Cellulose*. 23(2): 1073-1086.
- Alotibi, M. F., Alshammari, B. A., Alotaibi, M. H., Alotaibi, F. M., Alshihri, S., Navarro, R. M., and Fierro, J. L. G. 2020. ZSM-5 Zeolite Based Additive in FCC Process: A Review on Modifications for Improving Propylene Production. *Catalysis Surveys from Asia*. 24(1): 1-10.
- Ateka, A., Vega, P. R., Erena, J., Aguayo, A. T., and Bilbao, J. 2022. A Review on The Valorization of CO₂ Focusing on The Thermodynamics and Catalyst Design Studies of The Direct Synthesis of Dimethyl Ether. *Fuel Processing Technology*. 223: 107310.
- Batool, F., Masood, A., and Ali, M. 2020. Characterization of Sugarcane Bagasse Ash as Pozzolan and Influence on Concrete Properties. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 1: 1-10.
- Bernardi, A., Gomoescu, L., Wang, J., Pantelides, C. C., Chadwick, D., and Cachuat, B. 2019. Kinetic Model Discrimination for Methanol and DME Synthesis using Bayesian Estimation. *IFAC Papers Online*. 52(1): 335-340.

- Boxhoom, G., Sudmeijer, O., and Kasteren, P. H. G. 1993. Identification of a Double Five-Ring Silicate, a Possible Precursor in The Synthesis of ZSM-5. *Journal of The Chemical Society, Chemical Communications*. 23: 1416-1418.
- Cejka, J., Bekkum, H. V., Corma, A., and Schuth, F. 2007. *Introduction to Zeolite Science and Practice 3rd Revised Edition*. Elsevier Science. Amsterdam.
- Channoy, C., Maneewan, S., Punlek, C., and Chirarattananon, S. 2018. Preparation and Characterization of Silica Gel from Bagasse Ash. *Advanced Materials Research*. 1145: 44-48.
- Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U. 2020. Eco-Production of Silica from Sugarcane Bagasse Ash for Use as A Photochromic Pigment Filler. *Scientific Reports*. 10(1): 1-8.
- Che, Q., Yang, M., Wang, X., Yang, Q., Chen, Y., Chen, X., Chen, W., Hu, J., Zeng, K., Yang, H., and Chen, H. 2019. Preparation of mesoporous ZSM-5 catalysts using green templates and their performance in biomass catalytic pyrolysis. *Bioresource Technology*. 289: 121-729.
- Choudhary, O. P. and Priyanka. 2017. Scanning Electron Microscope: Advantages and Disadvantages in Imaging Components. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 6(5): 1877-1882.
- Chunfeng, W., Jiansheng, L., Lianjun, W., Xiuyun, S., and Jiajia, H. 2009. Adsorption of Dye from Wastewater by Zeolites Synthesized from Fly Ash: Kinetic and Equilibrium Studies. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 17(3): 513-521.
- Dai, G., Wang, S., Huang, S., and Zou, Q. 2018. Enhancement of Aromatics Production from Catalytic Pyrolysis of Biomass Over H-ZSM-5 Modified by Chemical Liquid Deposition. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 134: 439-445.
- Derbe, T., Temesgen, S., and Bitew, M. 2021. A Short Review on Synthesis, Characterization, and Applications of Zeolites. In *Advances in Materials Science and Engineering*. Hindawi Limited.
- Dewi, T. K., Mahdi, M., dan Novriyansyah, T. 2016. Pengaruh Rasio Reaktan Pada Impregnasi dan Suhu Reduksi Terhadap Karakter Katalis Kobalt/Zeolit Alam Aktif. *Jurnal Teknik Kimia*. 22(3): 9-18.
- Ding, Y. L., Wang, H. Q., Xiang, M., Yu, P., Li, R. Q., and Ke, Q. P. 2020. The Effect of Ni-ZSM-5 Catalysts on Catalytic Pyrolysis and Hydro-Pyrolysis of Biomass. *Frontiers in Chemistry*. 8(2):1-11.

- Dizaji, B. H., Zeng, T., Hölzig, H., Bauer, J., Kloess, G., and Enke, D. 2021. Ash Transformation Mechanism During Combustion of Rice Husk and Rice Straw. *Fuel*. 307: 121768.
- Dyamenahalli, K., Famili, A., and Shandas, R. 2015. *Shape Memory Polymers for Biomedical Applications*. Woodhead Publishing. Boulder.
- Endalew, A. K., Kiros, Y., and Zanzi, R. 2011. Heterogeneous Catalysis for Biodiesel Production from Jatropha Curcas Oil (ICO). *Energy*. 36(5): 2693-2700.
- Farirai, F., Mupa, M., and Daramola, M. O. 2021. An Improved Method for The Production of High Purity Silica from Sugarcane Bagasse Ash Obtained from a Bioethanol Plant Boiler. *Particulate Science and Technology*. 39(2): 252-259.
- Fitriyana, D. F., Iskandar, N., dan Dzulfikar, M. 2018. Pengaruh Konsentrasi NaOH Terhadap Ukuran Kristal Zeolit A yang Disintesis dari Limbah. *Geothermal Momentum*. 14(2): 29-33.
- Fu, S., Fang, Q., Li, A., Li, Z., Han, J., Dang, X., and Han, W. 2021. Accurate characterization of full pore size distribution of tight sandstones by low-temperature nitrogen gas adsorption and high-pressure mercury intrusion combination method. *Energy Science and Engineering*. 9(1): 80-100.
- Gao, S., Zhang, M., Xu, S., Wei, Y., Li, Wang, J., Zhang, W., and Liu, Z. 2016. Changing the balance of the MTO reaction dual-cycle mechanism: Reactions over ZSM-5 with varying contact times. *Chinese Journal of Catalysis*. 37: 1413-1422.
- Georgiev, D., Bogdanov, B., Histov, Y., Markovska, I., and Angelova, K. 2009. Synthesis of NaA Zeolite. *International Science Conference*. 22-24.
- Goltner, C. G. and Antonietti, M. 1997. *Mesoporous Materials by Templating of Liquid Crystalline Phases*. Wiley Online Library.
- Gorzin, F. and Yaripour, F. 2018. Production of Light Olefins from Methanol Over Modified H-ZSM-5: Effect of Metal Impregnation in High-Silica Zeolite on Product Distribution. *Research on Chemical Intermediates*. 45: 261-285.
- Hartati, H., Widiati, A. A., dan Lutfiah, K. 2019. Sintesis Zeolit ZSM-5 dari Metakaolin Terdealuminasi Tanpa Cetakan Organik dengan Metode Desilikasi. *Akta Kimia Indonesia*. 4(1): 63-74.
- Hassan, N. S., Jalil, A. A., Hitam, C. N. C., Vo, D. V. N., and Nabgan, W. 2020. Biofuels and renewable chemicals production by catalytic pyrolysis of cellulose: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 18(5): 1625-1648.

- Hoang, P. H., and Thu Thao, N. T. 2022. Dry gel synthesis of hierarchical ZSM-5 zeolite using hydroxyl propyl methyl cellulose (HPMC) as a mesopore and its catalytic activity in alkylation reactions. *RSC Advances*. 12(38): 24511-24517.
- Hwang, N. and Barron, A. R. 2011. BET Surface Area Analysis of Nanoparticles. *Journal of Connex*. 1-11.
- Iyoki, K., Itabashi, K., and Okubo, T. 2014. Progress in seed-assisted synthesis of zeolites without using organic structure-directing agents. *Microporous and Mesoporous Materials*. 189: 22-30.
- Jansen, H., Boer, M., Legtenberg, R., and Elwenspoek, M. 1995. The Black Silicon Method: A universal Method for Determining The Parameter Setting of A Fluorine-Based Reactive Ion Etcher in Deep Silicon Trench Etching with Profile Control. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 5(2): 115-120.
- Javdani, A., Ahmadpour, J., and Yaripour, F. 2019. Nano-Sized ZSM-5 Zeolite Synthesized Via Seeding Technique for Methanol Conversions: A review. *Microporous and Mesoporous Materials*. 284: 443-458.
- Kadja, T., Rilyanti, M., Rino, R. M., dan Nyoman, I. M. 2013. Strategi Sintesis Zeolit Hirarkis Kajian: Metode Cetak Lunak dan Cetak Keras Synthesis Strategy of Hierarchical Zeolites: Soft-and Hard Templating Method. *Jurnal Matematika and Sains*. 18(3): 103-114.
- Kantarelis, E., Javed, R., Stefanidis, S., Psarras, A., Iliopoulou, E., and Lappas, A. 2019. Engineering the Catalytic Properties of H-ZSM5 by Cobalt Modification and Post-synthetic Hierarchical Porosity Development. *Topics in Catalysis*. 62(7-11): 773-785.
- Kasmaniar, K., Syaifuddin, Y., Fitriliana, N., Filia, S., dan Hanum, A. R. 2023. Pengembangan Energi Terbarukan Biomassa dari Sumber Pertanian, Perkebunan, dan Hasil Hutan: Kajian Pengembangan dan Kendalanya. *Jurnal Serambi Engineering*. 8(1): 4957-4964.
- Khandan, N., Kazemeini, M., and Aghaziarati, M. 2017. Dehydration of Methanol to Dimethyl Ether Employing Modified H-ZSM-5 Catalysts. *Iranian Journal of Chemical Engineering*. 6(1): 3-11.
- Khopkar, K. 2008. *Konsep Dasar Kimia Analitik*. Universitas Indonesia. Jakarta.
- Kriprasertkul, W., Witoon, T., and Lohsoontorn, P. K. 2022. Dimethyl ether (DME) synthesis from CO₂ and H₂ through ethanol-assisted methanol synthesis and methanol dehydration. *International Journal of Hydrogen Energy*. 47: 33338-33351.

- Krisnandi, Y., Ary, B., Putra, P., Bahtiar, M., Abdullah, I., and Howe, R. 2014. Partial Oxidation of Methane to Methanol over Heterogeneous Catalyst Co/ZSM-5. *In Procedia Chemistry*. 14: 508-515.
- Kurina, L., Muhammad, A. L., Rahmawati, Y., dan Nurkhamidah, S. 2021. Pra Desain Pabrik Dimetil Eter (DME) dari Gas Alam Menggunakan Metode Indirect Process. *Jurnal Teknik ITS*. 10(1): 19-24.
- Kristianingrum, S., Siswani, D., dan Fillaeli, A. 2020. Pengaruh Jenis Asam Pada Sintesis Silika Gel dari Abu Bagasse dan Uji Sifat Adsorptifnya Terhadap Ion Logam Tembaga (II). *Jurnal Pendidikan Kimia*. 5(1): 281-291.
- Lestari, D. T. 2018. Sintesis ZSM-5 (Zeolite Socony Mobile-5) Pori Hirarki dari Silika Abu Ampas Tebu (Sugarcane Bagasse Ash) Menggunakan Metode Solid-State Conversion dengan Penambahan Benih ZSM-5. *Skripsi*. Universitas Lampung. Lampung.
- Liu, Z., He, M., Ma, G., Yang, G., and Chen, J. 2019. Preparation and Characterization of Cellulose Nanocrystals from Wheat Straw and Corn Stalk. *Journal of Korea Technical Association of the Pulp and Paper Industry*. 51: 40-48.
- Lok, B. M., Cannan, T., and Messina, C. A. 1983. The Role of Organic Molecules in Molecular Sieve Synthesis. *Zeolites*. 3(4): 282-291.
- Luo, Y., Wang, Z., Jin, S., Zhang, B., Sun, H., Yuan, X., and Yang, W. 2016. Synthesis and crystal growth mechanism of ZSM-22 zeolite nanosheet. *CrystEngComm*. 30: 1-4.
- Luyza, B., Moraes, E. G., Shinhe, G. P., Falk, G., and Oliveira, A. P. N. 2021. Obtaining Biogenic Silica from Sugarcane Bagasse and Leaf Ash. *Waste and Biomass Valorization*. 12(6): 21-32.
- Ma, T., Zhang, L., Song, Y., Shang, Y., Zhai, Y. and Gong, Y. 2019. A Comparative Synthesis of ZSM-5 with Ethanol or TPABr Template: Distinction of Brønsted/Lewis Acidity Ratio and Its Impact On: N –Hexane Cracking. *Catalysis Science and Technology*. 8(7): 1923-1935.
- Mangesh, V. L., Perumal, T., Perumal, S. K., Rajendran, K., Subramanian, N., Govindasamy, M., Ghafar, A. A., Al-Anazy, M., and Ouladsmame, M. 2021. Effect of Modified Zeolite β in the Hydrogenation of Anisole and Acetophenone Reaction. *ACS Publications*.
- Mani, D., Kalpana, M. S., Patil, D. J., and Dayal, A. M. 2017. *Organic Matter in Gas Shales: Origin, Evolution, and Characterization. Origin, Evolution, and Characterization. In Shale Gas: Exploration and Environmental and Economic Impacts*. Elsevier Inc. Amsterdam.

- Megawati, F. D. S., Putri, A. R. D., Fianti, O., Simalango, A. F., and Akhir, A. E. 2018. Synthesis of Silica Powder from Sugar Cane Bagasse Ash and Its Application as Adsorbent in Adsorptive-distillation of Ethanol-water Solution. *MATEC Web of Conferences*. 237: 1-6.
- Migliori, M., Condello, A., Dalena, F., Catizzzone, E., and Giordano, G. 2020. CuZnZr-Zeolite Hybrid Grains for DME Synthesis: New Evidence on the Role of Metal-Acidic Features on the Methanol Conversion Step. *Catalysts*. 10(6): 671.
- Mohammadparast, F., Halladj, R., and Askari, S. 2015. The Crystal Size Effect of Nano-Sized ZSM-5 in The Catalytic Performance of Petrochemical Processes: A Review. *Chemical Engineering Communications*. 202(4): 542-556.
- Mohd, N. K., Wee, N. N. A. N., and Azmi, A. A. 2017. Green synthesis of silica nanoparticles using sugarcane bagasse. *AIP Conference Proceedings*. 1885.
- Moisés, M. P., Da Silva, C. T. P., Meneguín, J. G., Girotto, E. M., and Radovanovic, E. 2013. Synthesis of Zeolite NaA from Sugarcane Bagasse Ash. *Materials Letters*. 108: 243-246.
- Moshoeshoe, M., Tabbiruka, N. S. M., and Obuseng, V. 2017. A Review of the Chemistry, Structure, Properties and Applications of Zeolites. *American Journal of Materials Science*. 20(5): 196-221.
- Na, K., Jo, C., Kim, J., Cho, K., Jung, I., Seo, Y., Messinger, R. J., Chmelka, B. F., and Ryoo, R. 2011. Directing Zeolite Structures into Hierarchically Nanoporous. *Architectures Science*. 333(6040): 328-332.
- Nada, M. H. and Larsen, S. C. 2016. Insight Into Seed-Assisted Template Free Synthesis of ZSM-5 Zeolites. *Microporous and Mesoporous Materials*. 80: 444-452.
- Nandiyanto, A. B. D., Rahman, T., Fadhlulloh, M. A., Abdullah, A. G., Hamidah, I., and Mulyanti, B. 2016. Synthesis Of Silica Particles from Rice Straw Waste Using a Simple Extraction Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 128. 12040.
- Nasikin, M. dan Susanto, B. H. 2010. *Katalis Heterogen*. Universitas Indonesia. Jakarta.
- Norsuraya, S., Fazlena, H., and Norhasyimi, R. 2016. Sugarcane Bagasse as A Renewable Source of Silica to Synthesize Santa Barbara Amorphous-15 (SBA-15). *Procedia Engineering*, 148: 839-846.

- Nurani, D. A., Rahayu, K. F., Prayudha, D. U. C., and Krisnandi, Y. K. 2019. The Extraction of Methanol via The Partial Oxidation of Methane Over A Hierarchical Co/ZSM-5 Catalyst. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 496(1): 6-11.
- Pabst, W. and Gregorová, E. 2013. Elastic Properties of Silica Polymorphs: A Review. *Ceramics-Silikaty*. 57(3): 167-184.
- Pan, T., Wu, Z., and Yip, A. C. K. 2014. Advances in The Green Synthesis of Microporous and Hierarchical Zeolites: A Short Review. *Catalysts*. 9(3): 1-18.
- Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Hadi, S., Ilim., and Amrulloh, H. 2021. Physical Characteristics and Utilization of ZSM-5 Prepared from Rice Husk Silica and Aluminum Hydroxide as Catalyst for Transesterification of Ricinus Communis Oil. *Materials Research Express*. 8(6): 1-11.
- Paramitha, T., Saputra, T. R., Aliah, A. N., Tarigan, A. V., dan Ghazali, M. 2019. Karakterisasi Silika dari Abu Ampas Tebu. *Jurnal Riset Kimia*. 5(3) 290-298.
- Petranovskii, V., Chaves-Rivas, F., Espinoza, M. A., Pestryakov, A., and Kolobova, E. 2016. Potential Uses of Natural Zeolites for the Development of New Materials Short Review. *MATEC Web of Conferences*. 85.
- Prasetyoko, D., Ayunanda, N., Fansuri, H., Hartanto, D., and Ramli, Z. 2012. Phase Transformation of Rice Husk Ash in The Synthesis of ZSM-5 Without Organic Template. *ITB Journal of Science*. 44(3): 250-262.
- Qin, Z., Lakiss, L., Gilson, J. P., Thomas, K., Goupil, J. M., Fernandez, C., and Valtchev, V. 2013. Chemical Equilibrium Controlled Etching of MFI Type Zeolite and its Influence on Zeolite Structure, Acidity and Catalytic Activity. *Chemistry of Material*. 25(14): 2759-2766.
- Qoyyima, D. and Jumaeri, J. 2021. Modification of Magnesium Oxide from Bittern Waste with Strontium Oxide for Palm Oil Transesterification Process. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 10(2): 140-144.
- Radoor, S. and Unnikrishnan, G. 2019. Synthesis, characterization and evaluations of micro/mesoporous ZSM-5 zeolite using starch as bio template. *SN Applied Sciences*. 1: 1-13.
- Razzaq, M., Zeeshan, M., Qaisar, S., Iftikhar, H., and Muneer, B. 2019. Investigating Use of Metal-Modified HZSM-5 Catalyst to Upgrade Liquid Yield in Co-Pyrolysis of Wheat Straw and Polystyrene. *Fuel*. 257(August):116119.

- Rilyanti, M., Mukti, R. R., Kadja, G. T., Ogura, M., Nur, H., and Ng, E. 2016. On the drastic reduction of organic structure directing agent in the steam-assisted crystallization of zeolite with hierarchical porosity. *Microporous and Mesoporous Materials*. 230: 30-38.
- Rilyanti, M., Ningrum, A. D. W., Ilim, I., Suharso, S., Mulyono, M., Ayoub, M., and Simanjuntak, W. 2025. Green Synthesis of Hierarchical H-ZSM-5 from Sugarcane Bagasse Silica and Application as Catalyst for Conversion of Cellulose into Glucose. *Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science*. 5(1): 305-319.
- Rilyanti, M., Ningrum, A. D. W., Zahra, Z. A., Suharso, S., Buhani, B., Yandri, Y., and Hadi, S. 2023. Hierarchical ZSM-5 Based on Silica Bagasse and Mesopore Template from Starch as Catalyst for Glucose Production. *Asian Journal of Chemistry*. 35(2): 441-446.
- Rilyanti, M., Silviana, G. E., Buhani, B., Pandiangan, D. K., dan Juliasih, N. L. G. R. 2020. Sintesis Dan Karakterisasi Zeolit Mordenit (MOR) Pori Hirarki Berbasis Silika Abu Ampas Tebu. *Analit Analytical and Environmental Chemistry*. 5(2): 178-191.
- Rini, D. K. 2010. Optimasi Aktivasi Zeolit Alam untuk Dehumidifikasi. *Skripsi*. Universitas Diponegoro. Semarang.
- Roth, W. J., Nachtigall, P., Morris, R. E, and Čejka, J. 2014. Two-Dimensional Zeolites: Current Status and Perspectives. *Chemical Reviews*. 114(9): 4807-4837.
- Santen, R. A., Keijsper, J., Ooms, G., and Kortbeek, A. G. T. G. 1986. The Role of Interfacial Energy in Zeolite Synthesis. *Studies in Surface Science and Catalysis*. 28: 169-175.
- Schlumberger, C and Thommes, M. 2021. Characterization of Hierarchically Ordered Porous Materials by Physisorption and Mercury Porosimetry A Tutorial Review. *Advanced Materials Interfaces*. 8(4): 1-25.
- Schwieger, W., Machoke, A. G., Weissenberger, T., Inayat, A., Selvam, T., Klumpp, M., and Inayat, A. 2016. Hierarchy Concepts: Classification and Preparation Strategies for Zeolite Containing Materials with Hierarchical Porosity. *Chemical Society Reviews*. 45(12): 3353-3376.
- Smallman, R. E. dan Bishop, R. 2000. *Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material*. Erlangga. Jakarta.
- Sriyanti, S., Taslimah, T., dan Narsito, N. 2005. Sintesis Bahan Hibrida Amino-Silika dari Abu Sekam Padi Melalui Proses Sol-Gel. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 8(1): 1-8.

- Stashenko, E. and Martínez, J. R. 2014. *Advances in Gas Chromatography - Chapter 1: Gas Chromatography-Mass Spectrometry*.
- Stevens, S., Restiawaty, E., and Bindar, Y. 2021. Routes for energy and bio-silica production from rice husk: A comprehensive review and emerging prospect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 149: 111-329.
- Sukardjo. 2002. *Kimia Fisika*. Bineka Cipta. Bekasi.
- Sun, R., Delidovich, I., and Palkovits, R. 2019. Dimethoxymethane as a Cleaner Synthetic Fuel: Synthetic Methods, Catalysts, and Reaction Mechanism. *ACS Catalysis*. 9(2): 1298–1318.
- Suryanarayana, C. and Norton, M. G. 1998. *X-Rays and Diffraction: A Practical Approach*. Springer. Boston.
- Torres, S. N. C. 2005. Improved Detection of TNT using SPME-TEEM-GC/MD Mode Immersion in Water dan Soil. *Thesis*. University of Puerto Rico. San Juan.
- Varshney, V. K. and Naithani, S. 2011. Chemical Functionalization of Cellulose Derived from Non-conventional Sources BT-Cellulose Fibers Bio-and Nano-Polymer Composites: Green Chemistry and Technology. Springer. Heidelberg.
- Vichaphund, S., Aht-Ong, D., Sricharoenchaikul, V., and Atong, D. 2015. Production of Aromatic Compounds from Catalytic Fast Pyrolysis of Jatropha Residues Using Metal/HZSM-5 Prepared by Ion-Exchange and Impregnation Methods. *Renewable Energy*. 79(1): 28–37.
- Wang, C., Li, J., Sun, X., Wang, L., and Sun, X. 2009. Evaluation of Zeolites Synthesized from Fly Ash Potential Adsorbents for Wastewater Containing Heavy Metals. *Journal of Environmental Sciences*. 21(1): 127-136.
- Wang, Y., Song, J., Baxter, N. C., Kuo, G. T., and Wang, S. 2017. Synthesis of Hierarchical ZSM-5 Zeolites by Solid-State Crystallization and Their Catalytic Properties. *Journal of Catalysis*. 349: 53-65.
- West, A. R. 1984. *Solid State Chemistry and Its Application*. John Wiley and Sons. New York.
- Widiarto, S., Yuwono, S. D., Rochliadi, A., and Arcana, M. 2017. Preparation and Characterization of Cellulose and Nanocellulose from Agro-Industrial Waste-Cassava Peel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1762017: 12052.
- Woytiuk, K. 2006. Sugarcane Trash Processing for Heat and Power Production. *Thesis*. Lulea University of Technology. Lulea.

- Wu, T., Li, N., Pan, X., and Chen, S. L. 2020. Homogenous hydrolysis of cellulose to glucose in an inorganic ionic liquid catalyzed by zeolites. *Cellulose*. 27(16): 9201-9215.
- Xu, Q. A. T. Gao, S. J., Yang, Z., and Wu, N. 2018. Characteristics and Applications of Sugar Cane Bagasse Ash Waste in Cementitious Materials. *Materials*. 12(1): 1-19.
- Xu, R., Pang, W., Yu, J., Huo, Q., and Chen, J. 2007. *Chemistry of Zeolites and Related Porous Materials Synthesis and Structure in Chemistry of Zeolites and Related Porous Materials Synthesis and Structure*. John Wiley and Sons Ltd. New York.
- Xue, H., Guo, X., Meng, T., Guo, Q., Mao, D., and Wang, S. 2021. Cu-ZSM-5 Catalyst Impregnated with Mn-Co Oxide for the Selected Catalytic Reduction of NO: Physicochemical Property Catalytic Activity Relationship and In Situ DRIFTS Study for the Reaction Mechanism. *ACS Catalysis*. 11(13): 7702-7718.
- Yu, H., Li, F., He, W., Song, C., Zhang, Y., Li, Z., and Lin, H. 2020. Synthesis of Micro-mesoporous ZSM-5 Zeolite with Microcrystalline Cellulose as Co-template and Catalytic Cracking of Polyolefin Plastics. *RSC Advances*. 10(37): 120-139.
- Yue, Y., Gu, L., Zhou, Y., Liu, H., Yuan, P., Zhu, H., Bai, Z., and Bao, X. 2017. Template-Free Synthesis and Catalytic Applications of Microporous and Hierarchical ZSM-5 Zeolites from Natural Aluminosilicate Minerals. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 56(36): 10069-10077.
- Zang, Y., Dong, X., Ping, D., Geng, J., and Dang, H. 2018. Green routes for the synthesis of hierarchical HZSM-5 zeolites with low SiO₂/Al₂O₃ ratios for enhanced catalytic performance. *Catalysis Communications*. 113(1):51-54.
- Zhang, C., Fan, K., Ma, G., Lei, C., Xu, W., Jiang, J., Sun, B., Zhang, H., Zhu, Y., and Wen, S. 2021. Efficient Synthesis of Mesoporous Nano Zsm-5 Zeolite Crystals Without a Mesoscale Template. *Crystals*. 11: 1247.
- Zheng, Y., Wang, F., Yang, X., Huang, Y., Liu, C., Zheng, Z., and Gu, J. 2017. Study on Aromatics Production via The Catalytic Pyrolysis Vapor Upgrading of Biomass Using Metal-loaded Modified H-ZSM-5. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 126: 169-179.
- Zhou, L., Wang, M., Yang, S., Guo, W., Pu, X., He, Y., Zhu, J., Wang, B., Zheng, M., Liu, S., and Zhang, Y. 2022. Ultrasonics Sonochemistry Facile Synthesis of Mesoporous ZSM-5 Aided by Sonication and Its Application for VOCs Capture. *Ultrasonics Sonochemistry*. 88(May): 106098.