

**SINTESIS DIMETIL ETER (DME) MELALUI REAKSI DEHIDRASI  
METANOL MENGGUNAKAN KATALIS ZSM-5 BERBASIS SILIKA  
*SUGARCANE BAGASSE ASH (SCBA)* TERMODIFIKASI  
LOGAM KOBALT (Co)**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**ANNISA DISTIANI  
NPM 2117011024**



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

## ABSTRAK

### **SINTESIS DIMETIL ETER (DME) MELALUI REAKSI DEHIDRASI METANOL MENGGUNAKAN KATALIS ZSM-5 BERBASIS SILIKA *SUGARCANE BAGASSE ASH (SCBA)* TERMODIFIKASI LOGAM KOBALT (Co)**

**Oleh**

**ANNISA DISTIANI**

Dimetil eter (DME) merupakan bahan bakar ramah lingkungan yang berpotensi menjadi alternatif pengganti bahan bakar, yang dapat disintesis melalui reaksi dehidrasi metanol. Penelitian ini bertujuan menyintesis DME melalui reaksi dehidrasi metanol menggunakan katalis ZSM-5 berbasis silika LUDOX dan *Sugarcane Bagasse Ash* (SCBA) yang dimodifikasi logam Co.

Silika SCBA diperoleh melalui proses ekstraksi dan dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), *X-Ray Fluorescence* (XRF), dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR). ZSM-5 disintesis secara hidrotermal menggunakan silika LUDOX dan SCBA, lalu dimodifikasi menjadi H-ZSM-5 melalui pertukaran ion. ZSM-5 berbasis LUDOX dikarakterisasi dengan XRD dan XRF, sedangkan ZSM-5 berbasis SCBA dikarakterisasi menggunakan XRD, XRF, dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Impregnasi logam Co dilakukan pada kedua katalis untuk menghasilkan Co/H-ZSM-5, dan aktivitas katalitik diuji pada ketiga katalis, yaitu H-ZSM-5 berbasis LUDOX, Co/H-ZSM-5 berbasis LUDOX, dan Co/H-ZSM-5 berbasis SCBA. Produk reaksi dianalisis dengan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS).

Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa ZSM-5 berbasis SCBA memiliki struktur kristal sesuai dengan tipe *Mobile Five Instructure* (MFI) sedangkan impregnasi logam Co meningkatkan jumlah situs asam katalis. Uji katalitik memperlihatkan bahwa Co/H-ZSM-5 berbasis SCBA menunjukkan selektivitas DME tinggi (95,59%) dengan rendemen 54,60%, sekaligus membuktikan kinerja katalitik yang sebanding dengan LUDOX. Hal ini membuktikan bahwa SCBA dapat dimanfaatkan sebagai sumber silika alternatif yang berpotensi menggantikan bahan komersial.

Kata kunci: Co/H-ZSM-5, dehidrasi metanol, DME, H-ZSM-5, impregnasi, kobalt, silika SCBA

## ABSTRACT

### **SYNTHESIS OF DIMETHYL ETHER (DME) VIA METHANOL DEHYDRATION USING ZSM-5 CATALYSTS BASED ON SUGARCANE BAGASSE ASH (SCBA) SILICA MODIFIED WITH COBALT (Co)**

By

**ANNISA DISTIANI**

Dimethyl ether (DME) is an environmentally friendly fuel with the potential to serve as an alternative to conventional fuels, which can be synthesized through methanol dehydration. This study aimed to synthesize DME via methanol dehydration employing ZSM-5 catalysts derived from LUDOX silica and Sugarcane Bagasse Ash (SCBA) silica modified with Co metal. SCBA silica was obtained through an extraction process and characterized using X-Ray Diffraction (XRD), X-Ray Fluorescence (XRF), and Fourier Transform Infrared (FTIR). ZSM-5 was synthesized hydrothermally using LUDOX and SCBA silica, and subsequently converted into H-ZSM-5 through ion exchange. LUDOX-based ZSM-5 was characterized using XRD and XRF, while SCBA-based ZSM-5 was characterized using XRD, XRF, and Scanning Electron Microscopy (SEM). Co impregnation was performed on both catalysts to obtain Co/H-ZSM-5, and the catalytic activity was tested on three catalysts: LUDOX-based H-ZSM-5, LUDOX-based Co/H-ZSM-5, and SCBA-based Co/H-ZSM-5. The reaction products were analyzed by Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). Characterization results showed that SCBA-based ZSM-5 exhibited a crystalline structure consistent with the Mobile Five Instructure (MFI) type while Co impregnation increased the number of acid sites on the catalysts. Catalytic tests demonstrated that SCBA-based Co/H-ZSM-5 achieved high DME selectivity (95.59%) with a yield of 54.60%, confirming its catalytic performance comparable to LUDOX. These findings indicate that SCBA can be utilized as a promising alternative silica source to replace commercial materials.

**Keywords:** Co/H-ZSM-5, methanol dehydration, DME, H-ZSM-5, impregnation, cobalt, SCBA silica

**SINTESIS DIMETIL ETER (DME) MELALUI REAKSI DEHIDRASI  
METANOL MENGGUNAKAN KATALIS ZSM-5 BERBASIS SILIKA  
*SUGARCANE BAGASSE ASH (SCBA)* TERMODIFIKASI  
LOGAM KOBALT (Co)**

**Oleh**

**Annisa Distiani**

**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 Penelitian

: SINTESIS DIMETIL ETER (DME) MELALUI  
REAKSI DEHIDRASI METANOL  
MENGGUNAKAN KATALIS ZSM-5  
BERBASIS SILIKA SUGARCANE BAGASSE  
ASH (SCBA) TERMODIFIKASI LOGAM  
KOBALT (Co)

Nama

: Annisa Distiani

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2117011024

Jurusan

: Kimia

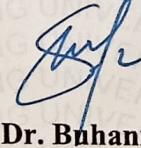
Fakultas

: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



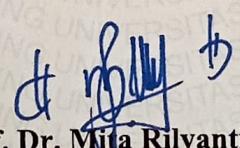
 Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.

NIP. 197205302000032001

 Prof. Dr. Buhani, M.Si.

NIP. 196904161994032003

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung

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

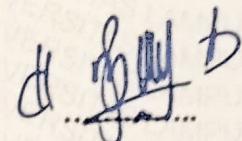
NIP. 197205302000032001

**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

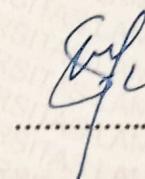
Ketua

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



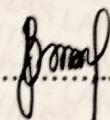
Sekretaris

: Prof. Dr. Buhani, M.Si.



Penguji

Bukan Pembimbing : Prof. Dr. Kamisah D. Pandiangan, M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

NIP 197110012005011002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **24 November 2025**

## SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Annisa Distiani  
NPM : 2117011024  
Jurusan : Kimia  
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul **“Sintesis Dimetil Eter (DME) melalui Reaksi Dehidrasi Metanol menggunakan Katalis ZSM-5 Berbasis Silika Sugarcane Bagasse Ash (SCBA) Termodifikasi Logam Kobalt (Co)”** adalah benar karya sendiri dan tidak keberatan jika sebagian atau seluruh data dalam skripsi tersebut digunakan oleh pihak Universitas Lampung untuk kepentingan akademik, pengembangan ilmu pengetahuan, dan penelitian lanjutan, selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/penyusun karya ilmiah ini.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya, untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 28 November 2025  
Yang menyatakan,



Annisa Distiani  
NPM 2117011024

## RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Annisa Distiani, lahir di Sridadi, 8 Desember 2003. Penulis merupakan putri pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Yandi Oktavia dan Ibu Siti Amanah. Perjalanan pendidikan penulis dimulai pada tingkat Sekolah Dasar di SD Negeri 1 Sridadi (2009-2015). Penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang Sekolah Menengah Pertama di MTs Negeri 1 Tanggamus (2015-2018). Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang Sekolah Menengah Atas di SMA Muhammadiyah 1 Kotaagung (2018-2021). Setelah menyelesaikan pendidikan formal, penulis melanjutkan studi ke jenjang Sarjana pada tahun 2021 melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) dan diterima di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung.

Selama menjalani perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai kegiatan akademik maupun organisasi. Pada tahun 2022, penulis mengikuti Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) FMIPA Universitas Lampung sebagai anggota Bidang Sains dan Penalaran Ilmu Kimia (SPIK) serta bergabung pada Unit Kegiatan Mahasiswa Fakultas (UKMF) Rohani Islam (Rois) FMIPA Universitas Lampung sebagai anggota Bidang Kajian Keumatan (KAUM). Pada tahun 2023, penulis mengikuti Program Kreativitas Mahasiswa Kewirausahaan (PKM-K) dan berhasil memperoleh pendanaan. Pada tahun 2024, penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Sidodadi, Kecamatan Teluk Pandan, Kabupaten Pesawaran dan menjadi Asisten Praktikum Kimia Anorganik di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung, serta menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Balai Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri (BSPJI) Bandar Lampung.

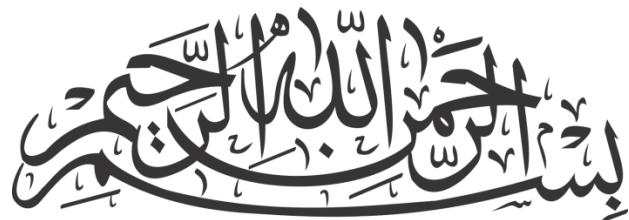
## MOTTO

*"Everything you can imagine is real."  
(Pablo Picasso)*

*"There are two ways to live: You can live as if nothing is a miracle, or you can live as if everything is a miracle."  
(Walter Bagehot)*

*"Keberhasilan bukanlah milik orang yang pintar. Keberhasilan adalah kepunyaan mereka yang senantiasa berusaha."  
(B.J. Habibie)*

## PERSEMBAHAN



*Alhamdulillahirabbil 'alamin* dengan segala rasa syukur kupersembahkan karya kecil ini sebagai wujud bakti dan tanggung jawab kepada:

**Kedua orang tuaku,**

Bapak Yandi Oktavia dan Ibu Siti Amanah yang telah menyayangi, merawat, mendukung, dan mendoakanku dalam setiap sujud.

Adikku yang selalu memberikan dukungan dan doa yang terbaik

Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si., Ibu Prof. Dr. Buhani, M.Si., Ibu Prof. Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, M.Si., serta seluruh Dosen Pengajar yang selalu membimbing dan mendidik saya hingga mencapai gelar Sarjana.

Seluruh sahabat dan rekan penelitianku yang telah membersamai, mendukung, dan memberikan semangat.

Almamater Universitas Lampung

Diriku yang tetap bertahan dalam setiap kesulitan

## SANWACANA

*Alhamdulillahi Robbil 'Alamiin*, puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "**Sintesis Dimetil Eter (DME) melalui Reaksi Dehidrasi Metanol menggunakan Katalis ZSM-5 Berbasis Silika Sugarcane Bagasse Ash (SCBA) Termodifikasi Logam Kobalt (Co)**". Sholawat berserta salam semoga selalu tercurah kepada baginda Rasulullah Muhammad SAW yang kita nantikan syafaatnya di yaumul akhir kelak.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam terselesaikannya penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing I sekaligus Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung, yang dengan kesabaran telah menyediakan waktu untuk membimbing, memberikan arahan, masukan, kritik, serta motivasi kepada penulis, baik selama pelaksanaan penelitian maupun dalam proses penyusunan skripsi ini. Berkat bimbingan beliau, skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Semoga Allah senantiasa melimpahkan kesehatan dan kebaikan dimanapun Ibu berada. *Aamiin ya rabbal'alamin.*
2. Prof. Dr. Buhani, M.Si selaku Dosen Pembimbing II, yang dengan penuh kesabaran telah meluangkan waktu untuk membimbing, memberikan saran, motivasi, dan semangat selama proses penyusunan skripsi, sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Semoga Allah senantiasa melimpahkan kebaikan dan keberkahan bagi Ibu. *Aamiin ya rabbal'alamin.*

3. Prof. Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, M.Si., selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan bantuan, masukan, kritik, dan saran yang membangun kepada penulis sehingga skripsi ini selesai dan menjadi lebih baik. Semoga Allah senantiasa melimpahkan kebaikan dan keberkahan bagi Ibu. *Aamiin ya rabbal'alamin.*
4. Prof. Dr. Noviany, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan ilmu, semangat, dan motivasi bagi penulis, sehingga dapat sampai pada titik ini. Semoga Allah senantiasa melimpahkan kesehatan dan kebaikan bagi Ibu di setiap langkahnya. *Aamiin ya rabbal'alamin.*
5. Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
6. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung atas seluruh ilmu, pengalaman, bimbingan, dan nasihat kepada penulis selama menjalani perkuliahan.
7. Kedua orang tua penulis yang selalu memberikan dukungan serta kasih sayang di setiap langkahnya dan tidak henti mendoakan kebaikan bagi penulis. Semoga Allah senantiasa memberikan kesehatan dan umur yang panjang agar dapat menemani setiap langkah penulis. *Aamiin ya rabbal'alamin.*
8. Anisah Isti Roqhmah yang senantiasa menemani penulis dalam setiap kondisi, memberikan dukungan, motivasi, serta banyak membantu dalam proses belajar selama perkuliahan, sehingga penulis dapat melalui proses perkuliahan dengan baik. Semoga segala urusannya dimudahkan oleh Allah.
9. Jati Lukman Hakim, Isna Rahmawati, dan Sri Oktavia yang tidak pernah lupa memberikan dukungannya walaupun terpisah jarak dan juga kesibukan masing-masing. Semoga selalu dipermudah segala urusannya.
10. Tim *Research DME'21* dan kakak-kakak (Kak Azizah, Kak Arip, Kak Putri, Kak Surya, Kak Valen) yang telah membagi ilmunya selama penulis melaksanakan penelitian.
11. Rekan-rekan penelitian di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan saran dan bantuan kepada penulis.

12. Teman-teman dan pembimbing PKL BSPJI Bandar Lampung yang telah memberikan penulis pengalaman dan kenangan yang berharga.
13. Teman-teman KKN Desa Sidodadi yang telah memberikan penulis kenangan dan pengalaman.
14. Teman-teman Himaki 2022 khususnya Bidang SPIK yang telah banyak memberikan pengalaman kepada penulis.
15. Keluarga besar Jurusan Kimia Angkatan 2021 terimakasih sudah menyertai dan mengisi kehidupan penulis selama perkuliahan ini.
16. Almamater tercinta Universitas Lampung.
17. Staf jurusan kimia dan dekanat FMIPA Universitas Lampung
18. Seluruh pihak yang terlibat dalam penyusuanan skripsi ini dan tidak bisa tersebutkan satu persatu. Terimakasih atas seluruh doa, dukungan serta bantuannya.

Bandar Lampung, November 2025  
Penulis,

Annisa Distiani

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>ix</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	5
1.3. Manfaat Penelitian.....	5
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>6</b>
2.1. Katalis.....	6
2.2. Abu Ampas Tebu ( <i>Sugarcane Bagasse Ash/ SCBA</i> ).....	6
2.3. Silika.....	8
2.4. Dealuminasi .....	9
2.5. Zeolit.....	10
2.6. Zeolit Socony Mobile-5 (ZSM-5 ) .....	11
2.7. Metode Hidrotermal .....	13
2.8. Impregnasi Logam Co .....	15
2.9. Dehidrasi Metanol .....	17
2.10. Sintesis Dimetil Eter (DME) .....	19
2.11. Instrumen Karakterisasi.....	20
2.11.1. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	20
2.11.2. <i>X-Ray Fluorescene</i> (XRF) .....	22
2.11.3. <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) .....	23
2.11.4. <i>Fourier Transform Infra Red</i> (FTIR).....	25
2.11.5. <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i> (GC-MS) .....	27
<b>III. METODE PENELITIAN</b> .....	<b>29</b>
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian .....	29
3.2. Alat dan Bahan .....	29
3.3. Prosedur Penelitian .....	30
3.3.1. Ekstraksi Silika dari Ampas Tebu.....	30
3.3.2. Karakterisasi Silika dari Hasil Ekstraksi.....	31
3.3.3. Sintesis ZSM-5.....	31
3.3.4. Karakterisasi ZSM-5 .....	34
3.3.5. Persiapan Katalis .....	35

3.3.6. Karakterisasi Co/H-ZSM-5 .....	36
3.4. Uji Aktivitas Katalitik .....	36
3.4.1. Dehidrasi Metanol menjadi DME.....	36
<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>37</b>
4.1. Ekstraksi Silika dari Ampas Tebu .....	37
4.1.1. Preparasi Ampas Tebu .....	37
4.1.2. Ekstraksi Silika .....	39
4.2. Karakterisasi Silika SCBA .....	41
4.2.1. <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i> .....	41
4.2.2. <i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i> .....	42
4.2.3. <i>Fourier Transform Infra Red (FTIR)</i> .....	43
4.3. Sintesis ZSM-5 .....	45
4.3.1. Sintesis Benih ZSM-5 .....	45
4.3.2. Sintesis ZSM-5 Berbasis Silika LUDOX.....	46
4.3.3. Sintesis ZSM-5 Berbasis Silika SCBA .....	47
4.4. Karakterisasi ZSM-5 Hasil Sintesis.....	49
4.4.1. <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i> .....	49
4.4.2. <i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i> .....	50
4.4.3. <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i> .....	52
4.5. Persiapan Katalis .....	53
4.5.1. Katalis H-ZSM-5.....	53
4.5.2. Impregnasi Logam Kobalt (Co) .....	54
4.6. Karakterisasi Co/H-ZSM-5.....	56
4.7. Uji Aktivitas Katalitik .....	57
4.7.1. Dehidrasi Metanol menjadi DME .....	57
4.7.2. Analisis Produk Hasil Sintesis menggunakan <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)</i> .....	58
<b>V. SIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>63</b>
5.1. Simpulan.....	63
5.2. Saran .....	64
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>65</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>72</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Ampas tebu .....	7
2. Abu ampas tebu.....	7
3. Struktur atom silika amorf a) jarak antara atom Si-O dan O-O, b) struktur silika amorf dengan susunan tetrahedral yang tidak beraturan .....	8
4. Pembentukan asam Brønsted dan Lewis pada silika-alumina .....	9
5. Struktur zeolit.....	10
6. Situs asam Brønsted dan Lewis pada zeolit.....	11
7. Struktur dan saluran ZSM-5.....	12
8. Alat autoklaf.....	15
9. Jalur asosiatif dan disosiatif untuk dehidrasi metanol ke DME.....	18
10. Visualisasi persamaan Bragg dan skema peralatan XRD .....	20
11. Difraktogram silika SCBA.....	21
12. Difraktogram XRD ZSM-5.....	21
13. Prinsip Metode XRF .....	23
14. Skema interaksi antara berkas elektron dengan material .....	24
15. Skema peralatan SEM.....	24
16. Mikrograf ZSM-5 berbasis SCBA .....	25
17. Skema peralatan FTIR .....	26
18. Spektra FTIR dari silika abu ampas tebu .....	26
19. Kromatogram GC-MS konversi metanol menggunakan katalis ZSM-5 .....	28
20. Ampas tebu kering (a), proses pencucian dengan $\text{HNO}_3$ 2,5 % (b), dan ampas tebu setelah proses pengeringan (c) .....	38
21. Abu ampas tebu.....	38

22. Proses ekstraksi silika dari meliputi perendaman dalam larutan NaOH 2 M (a), pemisahan larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ dari residu abu ampas tebu (b), pembentukan hidrogel silika (c), dan silika SCBA (d).....	40
23. Silika hasil dealuminasi .....	40
24. Perbandingan difraktogram silika SCBA Rilyanti <i>et al.</i> (2025) (a) dan yang diperoleh dalam penelitian ini (b) .....	42
25. Spektrum FTIR silika SCBA .....	44
26. Alur sintesis benih ZSM-5 meliputi pencampuran prekursor (a), hasil sintesis setelah hidrotermal (b), dan benih ZSM-5 (c) .....	46
27. Alur sintesis ZSM-5 berbasis LUDOX meliputi pencampuran prekursor (a), hasil sintesis setelah hidrotermal (b), dan ZSM-5 berbasis LUDOX (c) .....	47
28. Alur sintesis ZSM-5 berbasis SCBA meliputi pencampuran prekursor (a), hasil sintesis setelah hidrotermal (b), dan ZSM-5 berbasis SCBA (c).....	48
29. Difraktogram ZSM-5 hasil sintesis .....	50
30. Mikrograf ZSM-5 berbasis SCBA .....	52
31. Plot distribusi ukuran partikel ZSM-5 berbasis SCBA yang diperoleh menggunakan perangkat lunak ImageJ versi 1.54k .....	53
32. Co/H-ZSM-5 berbasis LUDOX (a) dan Co/H-ZSM-5 berbasis SCBA (b) ...	55
33. Hasil reaksi dehidrasi metanol menggunakan H-ZSM-5 berbasis LUDOX (a), Co/H-ZSM-5 berbasis LUDOX (b), dan Co/H-ZSM-5 berbasis SCBA (c) ..	58
34. Kromatogram hasil dehidrasi metanol menggunakan H-ZSM-5 berbasis LUDOX (a), Co/H-ZSM-5 berbasis LUDOX (b), dan Co/H-ZSM berbasis SCBA (c) ..	59
35. Spektrum MS pola khas DME berdasarkan <i>database</i> WILEY7.LIB (a), hasil dehidrasi metanol pada katalis H-ZSM-5 berbasis LUDOX (b), Co/H-ZSM-5 berbasis LUDOX (c), dan Co/H-ZSM-5 berbasis SCBA (d) .....	60
36. Perbandingan selektivitas hasil dehidrasi metanol pada katalis H-ZSM-5 berbasis LUDOX, Co/H-ZSM-5 berbasis LUDOX, dan Co/H-ZSM-5 berbasis SCBA .....	61
37. Perbandingan rendemen hasil dehidrasi metanol pada katalis H-ZSM-5 berbasis LUDOX, Co/H-ZSM-5 berbasis LUDOX, dan Co/H-ZSM-5 berbasis SCBA .....	62

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi senyawa silika SCBA.....	23
2. Komposisi molar pereaksi benih ZSM-5.....	32
3. Perhitungan komposisi molar pereaksi benih ZSM-5 .....	32
4. Komposisi molar pereaksi ZSM-5 berbasis LUDOX .....	33
5. Perhitungan komposisi molar pereaksi ZSM-5 berbasis LUDOX .....	33
6. Komposisi molar pereaksi untuk sintesis ZSM-5 berbasis SCBA .....	34
7. Perhitungan molar pereaksi untuk sintesis ZSM-5 berbasis SCBA .....	34
8. Perbandingan komposisi silika SCBA sebelum dan sesudah dealuminasi .....	43
9. Perbandingan komposisi ZSM-5 hasil sintesis.....	51
10. Perbandingan komposisi ZSM-5 setelah impregnasi.....	56
11. Komposisi hasil dehidrasi metanol .....	60

## I. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Ketergantungan masyarakat modern yang berlebihan terhadap bahan bakar fosil menyebabkan emisi karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) yang sangat besar. Hal ini berdampak pada peningkatan efek rumah kaca sehingga terjadi pemanasan global (Liu *et al.*, 2021). Emisi  $\text{CO}_2$  terus meningkat sejak tahun 1990 dan mengalami sedikit penurunan pada tahun 2020 saat terjadinya Covid-19. Namun, pada tahun 2021, emisi tersebut meningkat kembali seiring dengan pemulihan ekonomi (Climate Transparency, 2022). Berdasarkan data dari *European Commission*, pada tahun 2022 Indonesia menjadi negara dengan tingkat emisi gas rumah kaca tertinggi di Asia Tenggara, dengan total emisi mencapai 1.240,8 juta ton setara karbon dioksida (Mt  $\text{CO}_2$ ) atau 1,24 gigaton setara karbon dioksida (Gt  $\text{CO}_2$ ). Kondisi tersebut menjadikan pengurangan emisi gas rumah kaca terutama  $\text{CO}_2$  menjadi penting. Pengurangan emisi melalui pemanfaatan  $\text{CO}_2$  diklasifikasikan menjadi dua kategori yakni pemanfaatan langsung dan pemanfaatan tidak langsung melalui konversi  $\text{CO}_2$  menjadi bahan kimia atau bahan bakar yang bernilai lebih tinggi. Gas buang seperti  $\text{CO}_2$  yang dilepaskan dari bahan bakar fosil atau pembakaran biomassa dapat diubah menjadi molekul berharga melalui proses katalitik seperti bahan bakar sintetis, metana, metanol, dan dimetil eter (DME) (Kripasertkul *et al.*, 2022). Konversi gas  $\text{CO}_2$  menjadi DME menjadi salah satu upaya dalam memenuhi kebutuhan penggunaan bahan bakar dan pengurangan emisi gas  $\text{CO}_2$ .

Dimetil eter (DME) adalah bahan bakar yang ramah lingkungan, rendah emisi  $\text{NO}_x$  dan  $\text{CO}$ , bebas belerang, dan tidak ada jelaga saat dibakar (Kripasertkul *et al.*, 2022). DME dengan rumus kimia  $(\text{CH}_3)_2\text{O}$  merupakan salah satu senyawa dari

golongan eter yang memiliki sifat mudah menguap, non-karsinogenik, non-mutagenik, non-korosif dan tidak beracun. DME dapat diaplikasikan sebagai aerosol dan pelarut serta telah banyak direkomendasikan sebagai pengganti solar, bensin, dan aditif yang cocok untuk dicampur dengan bahan bakar gas cair (LPG) (Liu *et al.*, 2021). Menurut Moghaddam *and* Hazlett (2023) DME memiliki kandungan oksigen yang tinggi yakni 34,8% massa. Kandungan oksigen yang tinggi tersebut akan berkontribusi signifikan terhadap pengurangan emisi partikel. Oksigen dalam DME membuatnya relatif lebih mudah terbakar dibandingkan bahan bakar konvensional lain tanpa kandungan oksigen. Hal ini disebabkan oleh energi ikatan C–O yang lebih rendah dibandingkan dengan ikatan C–H, sehingga senyawa yang mengandung ikatan C–O cenderung lebih mudah terbakar. DME dapat disintesis melalui proses dehidrasi metanol dengan berbagai katalis asam padat (Kripasertkul *et al.*, 2022).

Katalis adalah suatu zat yang berfungsi mempercepat laju reaksi kimia menjadi produk tanpa mengubah atau memengaruhi komposisi produk reaksi (Purnami *et al.*, 2015). Berdasarkan perbedaan fasanya terhadap reaktan, katalis diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu katalis homogen dan katalis heterogen. Katalis homogen memiliki fasa yang sama dengan reaktan, sedangkan katalis heterogen memiliki fasa yang berbeda (Trisunaryati, 2015). Katalis heterogen lebih banyak digunakan dibandingkan dengan katalis homogen karena lebih mudah dipisahkan dari produk reaksi (Sootchiewcharn *et al.*, 2015). Katalis heterogen umumnya berada dalam fasa padat, sedangkan reaktan berada dalam fasa cair atau gas. Berdasarkan sifat situs aktifnya, katalis heterogen dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu katalis asam padat dan katalis basa padat. Katalis asam padat memiliki situs aktif berupa gugus asam, sedangkan katalis basa padat memiliki situs aktif berupa gugus basa. Salah satu contoh katalis asam padat yang banyak diaplikasikan dalam proses reaksi kimia adalah zeolit (Ikhsan dan Nizar, 2020).

Zeolit merupakan katalis heterogen yang paling penting dalam industri kimia karena karakteristik strukturalnya yang unik seperti selektivitas ukuran/bentuk skala molekul, dan stabilitas yang sangat baik dalam proses industri yang keras.

Ukuran pori merupakan parameter penting yang mempengaruhi, seperti sifat fisiko-kimia material dan sifat molekul di dalam pori-pori (Zhang *et al.*, 2022). Zeolit banyak digunakan dalam industri petrokimia dan berbagai aplikasi katalisis heterogen, seperti adsorpsi, pemisahan, dan sintesis kimia halus. Selain untuk proses petrokimia, katalis juga memiliki aplikasi yang berkaitan dengan sintesis bahan kimia, konversi biomassa dan pemanfaatan CO<sub>2</sub>. Dalam sintesis DME, penggunaan katalis zeolit harus dikontrol keasaman dan strukturnya dengan hati-hati untuk mengurangi atau menghambat reaksi yang tidak diinginkan yang disebabkan oleh situs asam kuat (Catizzone *et al.*, 2019). Sintesis zeolit pada umumnya memerlukan sumber silika dan alumina sebagai bahan utama, dengan perbandingan molar tertentu untuk memperoleh struktur zeolit yang sesuai. Meskipun bahan baku tersebut tersedia secara komersial, harganya relatif tinggi sehingga dapat menjadi kendala dalam proses produksi (Putri *et al.*, 2023). Salah satu alternatif ramah lingkungan dalam memperoleh silika dan alumina adalah dari bahan alam, salah satunya melalui pemanfaatan limbah biomassa seperti ampas tebu.

Menurut Jagadesh *et al.* (2018) abu ampas tebu (*Sugarcane Bagasse Ash /SCBA*) adalah abu yang berasal dari proses pembakaran ampas tebu yang mengandung 30% karbon dan 70% material anorganik yang sebagian besar terdiri atas silika dan oksida logam lain seperti Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, serta CaO. Berdasarkan penelitian Rilyanti *et al.* (2020) SCBA mengandung silika amorf dalam jumlah tinggi, dengan kadar silika 85,55% dan alumina 12,16% melalui metode alkali. Kandungan silika yang tinggi tersebut menunjukkan potensi besar SCBA sebagai sumber silika berkelanjutan seperti dalam sintesis ZSM-5. Sebagai pembanding, penelitian ini juga menggunakan silika komersial LUDOX yang telah banyak digunakan dalam sintesis zeolit, sehingga ZSM-5 berbasis SCBA dapat dibandingkan secara langsung dengan ZSM-5 berbasis LUDOX.

*Zeolit Socony Mobile-5* (ZSM-5) adalah zeolit berpori sedang yang memiliki kandungan silika tinggi dengan rasio molar Si/Al 10-100 dan diameter pori sekitar 0,54-0,56 nm (Narayanan *et al.*, 2014). Menurut Hoang and Dat (2021) zeolit ZSM-5 telah digunakan secara luas dan populer serta merupakan salah satu katalis

paling efektif untuk sintesis organik serta penukar ion yang penting. Hal ini dikarenakan memiliki selektivitas yang tinggi, dan aktivitas katalitik yang baik, luas permukaannya yang besar. Penelitian yang dilakukan Ramos *et al.*, (2005) menunjukkan bahwa H-ZSM-5 memberikan selektivitas DME tertinggi karena situs asam Brønsted dan luas permukaan tertinggi. Namun, pada beberapa kasus katalis ZSM-5 dapat menyebabkan terbentuknya hasil samping yang tidak diinginkan sehingga mengalami penurunan aktivitas katalisnya (Xue *et al.*, 2021). Oleh sebab itu, untuk mengubah situs asam, sifat tekstur, dan meningkatkan stabilitas termal serta aktivitas katalis dapat dilakukan penambahan logam (Razzaq *et al.*, 2019).

Penambahan logam aktif pada material katalis dapat dilakukan melalui berbagai metode, seperti impregnasi dan pertukaran ion. Pemilihan metode sintesis tersebut berpengaruh terhadap karakteristik fisikokimia serta aktivitas katalis yang dihasilkan. Perbedaan utama terletak pada posisi logam aktif dalam struktur katalis. Metode impregnasi cenderung menghasilkan distribusi logam aktif di permukaan katalis, sedangkan metode pertukaran ion memungkinkan logam aktif menggantikan kation pada situs aktif katalis (Anggoro dan Buchori, 2018). Metode impregnasi merupakan salah satu teknik yang sering digunakan dalam preparasi katalis, karena sintesisnya lebih sederhana, tingkat keberhasilannya tinggi, dan limbah yang dihasilkan relatif sedikit. Keunggulan utama dari impregnasi basah terletak pada kemampuannya dalam mengontrol jumlah logam yang akan dimasukkan ke dalam struktur katalis (Munnik *et al.*, 2015). Metode impregnasi basah pada katalis ZSM-5 dapat menggunakan logam dari golongan transisi seperti Co, Ni, Mo, Ga, dan Pd (Vichaphund *et al.*, 2015). Berdasarkan penelitian Krisnandi *et al.* (2015) ZSM-5 termodifikasi logam Co telah berhasil disiapkan melalui impregnasi basah. Hal ini menjadikan ZSM-5 dengan impregnasi logam Co cocok digunakan sebagai katalis asam.

Pada penelitian yang telah dilakukan, ZSM-5 disintesis menggunakan silika hasil ekstraksi abu ampas tebu dan silika komersial LUDOX. Proses sintesis dilakukan melalui metode hidrotermal yang dilanjutkan dengan impregnasi logam Co. Silika hasil ekstraksi dikarakterisasi dengan *X-Ray Fluorescence* (XRF), *Fourier*

*Transform Infrared* (FTIR), dan *X-Ray Diffraction* (XRD). ZSM-5 berbasis SCBA dikarakterisasi menggunakan XRD, XRF, dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), sedangkan ZSM-5 berbasis LUDOX dikarakterisasi dengan XRD dan XRF. ZSM-5 berbasis SCBA dan LUDOX kemudian dimodifikasi dengan logam Co menjadi Co/H-ZSM-5, dikarakterisasi menggunakan XRF, serta bersama H-ZSM-5 diuji aktivitas katalitiknya pada reaksi dehidrasi metanol untuk sintesis DME yang dianalisis menggunakan *Gas Chromatography–Mass Spectrometry* (GC-MS).

## 1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan silika dari hasil ekstraksi abu ampas tebu dan karakteristiknya.
2. Memperoleh data karakteristik ZSM-5 menggunakan silika SCBA sebagai alternatif biomassa berkelanjutan dan silika komersial LUDOX sebagai pembanding.
3. Memperoleh H-ZSM-5 dan Co/H-ZSM-5 dengan penambahan logam Co melalui metode impregnasi.
4. Menguji aktivitas katalitik H-ZSM-5 berbasis LUDOX, Co/H-ZSM-5 berbasis LUDOX, dan Co/H-ZSM-5 berbasis SCBA pada reaksi dehidrasi metanol untuk menghasilkan DME.

## 1.3. Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman tentang potensi SCBA sebagai sumber silika alternatif dalam sintesis ZSM-5, sehingga mendukung upaya pemanfaatan limbah agroindustri secara berkelanjutan.
2. Menyajikan perbandingan mengenai aktivitas katalitik Co/H-ZSM-5 berbasis SCBA dan LUDOX dalam reaksi dehidrasi metanol untuk sintesis DME.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Katalis

Katalis adalah zat yang mempercepat reaksi kimia pada suhu tertentu tanpa mengalami perubahan. Zat ini berperan dalam mempercepat reaksi, tetapi tidak termasuk sebagai pereaksi maupun produk akhir. Percepatan reaksi oleh katalis terjadi karena zat tersebut menyediakan jalur reaksi alternatif dengan energi aktivasi yang lebih rendah, sehingga reaksi dapat berlangsung lebih cepat atau pada suhu yang lebih rendah. Secara umum, katalis diklasifikasikan ke dalam dua kelompok utama, yaitu katalis homogen dan katalis heterogen (Purnami *et al.*, 2015). Klasifikasi material katalis menurut Trisunaryati (2015) yakni:

1. Katalis homogen merupakan material katalitik yang terdiri atas satu jenis komponen penyusun. Contohnya meliputi katalis amorf seperti silika, alumina, dan alumina-silika; katalis kristalin seperti zeolit dan lempung; serta logam dan oksidanya.
2. Katalis heterogen merupakan material katalitik yang tersusun dari dua atau lebih komponen, atau yang berbasis sistem logam melalui metode impregnasi. Contohnya mencakup sistem logam dan oksidanya yang diimpregnasi ke dalam material amorf seperti Ni/alumina-silika dan Pd/alumina-silika, serta ke dalam material kristalin seperti Pd/zeolit.

### 2.2. Abu Ampas Tebu (*Sugarcane Bagasse Ash/ SCBA*)

Tebu (*Saccharum officinarum Linn*) adalah tanaman yang ditanam untuk membuat gula. Tanaman ini termasuk jenis rumput-rumputan dan berumur kurang lebih satu tahun dari saat ditanam hingga saat dipanen. Ampas tebu atau *bagasse*

merupakan residu berserat yang berasal dari tebu dengan proses ekstraksi. Limbah ampas tebu diperoleh dari industri pengolahan tebu menjadi gula. Pada proses tersebut akan menghasilkan 5% molases atau tetes tebu, 5% air dan 90% ampas tebu. Ampas tebu yang dihasilkan di Indonesia mencapai 35-40% dari berat tebu yang giling. Berdasarkan data yang diperoleh dari Pusat Penelitian Perkebunan Gula Indonesia (P3GI), pengolahan tebu sebanyak 10,2 juta ton per tahun atau per musim giling nasional dapat menghasilkan ampas tebu sebesar 32% dari total berat tebu (Fauziyah, 2021). Ampas tebu ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ampas tebu

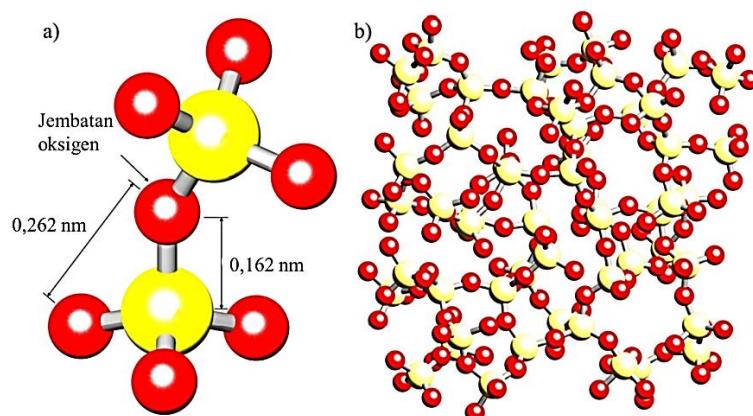
Abu ampas tebu (*Sugarcane Bagasse Ash /SCBA*) adalah abu yang berasal dari proses pembakaran ampas tebu yang mengandung 30% karbon dan 70% material anorganik yang sebagian besar terdiri atas silika dan oksida logam lain seperti  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$ , serta  $CaO$  (Jagadesh *et al.*, 2018). Berdasarkan penelitian Rilyanti *et al.* (2020) SCBA mengandung silika amorf dalam jumlah tinggi melalui metode alkali, dengan kadar silika 85,55% dan alumina 12,16%. Menurut Jagadesh *et al.* (2018) abu dari ampas tebu dapat digunakan sebagai sumber prospektif silika dan alumina yang ramah lingkungan. Abu ampas tebu ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Abu ampas tebu

### 2.3. Silika

Silika merupakan oksida asam lemah yang terdapat dalam kaolin, kuarsa, dan kristobalit. Silika yang sering diaplikasikan sebagai katalis adalah silika amorf (Hartati dan Prasetyoko, 2023). Selain itu, silika juga banyak dimanfaatkan dalam berbagai sektor, termasuk sebagai bahan dasar peralatan rumah tangga, industri otomotif, serta isolator panas dan listrik. Senyawa ini memiliki rumus molekul  $\text{SiO}_2$  yang tersusun atas atom silikon dan oksigen. Silikon (Si) adalah salah satu unsur paling melimpah di kerak bumi, yang banyak dijumpai dalam bentuk senyawa silika (Sembiring dan Simanjuntak, 2015). Menurut Lunt *et al.* (2018) Silika terikat secara kovalen dengan sistem tetrahedral ( $\text{SiO}_4$ ) dengan atom silikon sebagai pusat dan dikelilingi oleh atom oksigen. Silika terdapat dua jenis, yakni silika kristal dan amorf. Pada silika kristal, empat atom oksigen tersusun secara teratur dan berdekatan secara tetrahedral, sedangkan pada silika amorf memiliki susunan tetrahedral yang acak. Struktur atom silika amorf ditunjukkan pada Gambar 3.

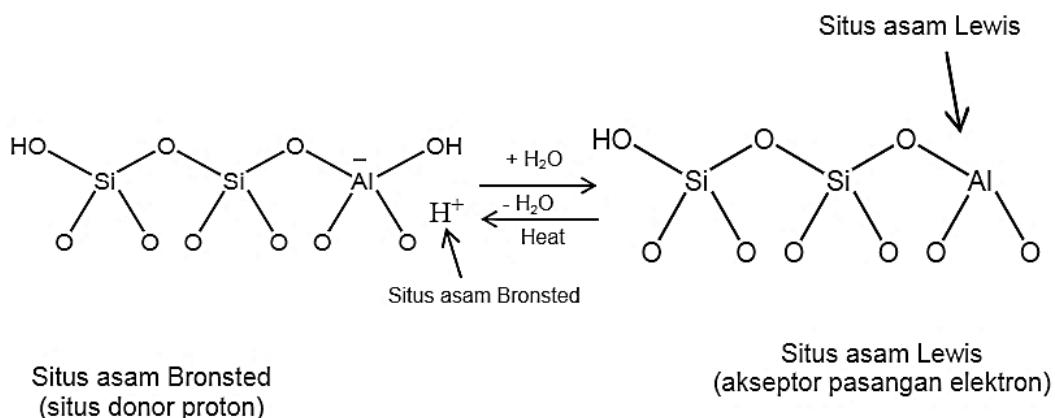


Gambar 3. Struktur atom silika amorf a) jarak antara atom Si-O dan O-O, b) struktur silika amorf dengan susunan tetrahedral yang tidak beraturan (Lunt *et al.*, 2018)

Sumber silika alumina yang digunakan yakni natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dan tetraetil ortosilikat (TEOS) sebagai prekursor silika, serta natrium aluminat ( $\text{NaAlO}_2$ ) sebagai sumber alumina (Hartati dan Prasetyoko, 2023). Menurut Trisunaryanti (2015) alumina ataupun silika saja tidak bisa digunakan sebagai katalis karena sifatnya yang cenderung *inert* dan situs asam atau basa yang tidak

cukup kuat. Silika-alumina merupakan suatu material amorf berpori dengan situs asam Brønsted dan Lewis yang merupakan situs aktif katalis. Silika gel atau silika amorf banyak sintesis dengan berbagai metode dari bahan alam. Salah satu metode yang konvensional adalah melalui pembakaran pada suhu yang tinggi. Jika permukaan silika-alumina didehidrasi dengan pemanasan pada temperatur yang tinggi, maka air akan terlepas dari situs Brønsted dan meninggalkan ion alumina dengan sifat penerima pasangan elektron sebagai situs asam lewis .

Proses tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Pembentukan asam Brønsted dan Lewis pada silika-alumina (Hartati dan Prasetyoko, 2023)

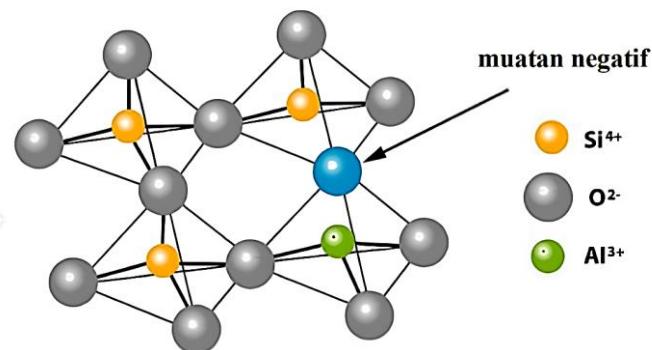
## 2.4. Dealuminasi

Silika dengan rasio silikon terhadap aluminium (Si/Al) yang rendah memerlukan perlakuan khusus agar memenuhi persyaratan dalam proses sintesis. Peningkatan rasio Si/Al dapat dilakukan melalui penambahan sumber silika atau pengurangan kandungan aluminium. Penambahan silika umumnya menggunakan silika koloid seperti LUDOX, sedangkan pengurangan aluminium dilakukan melalui proses dealuminasi. Proses dealuminasi dapat dilakukan dengan pencucian menggunakan larutan asam, seperti  $H_2SO_4$ ,  $HCl$ , dan  $HNO_3$ . Larutan asam dengan konsentrasi tinggi mampu menghidrolisis aluminium dari kerangka silika. Pengurangan kandungan alumina ini diharapkan dapat meningkatkan rasio Si/Al pada silika (Hartati dan Prasetyoko, 2023). Pada proses dealuminasi, jumlah molekul air dapat berkurang karena atom Al yang terlepas dari kerangka akan berikatan dengan

gugus hidroksil ( $-\text{OH}$ ), membentuk gugus aluminol ( $\text{Al}-\text{OH}$ ) yang seragam. Peningkatan rasio Si/Al dapat meningkatkan sifat hidrofobik material serta memperbaiki stabilitas termalnya (Trisunaryanti, 2015).

## 2.5. Zeolit

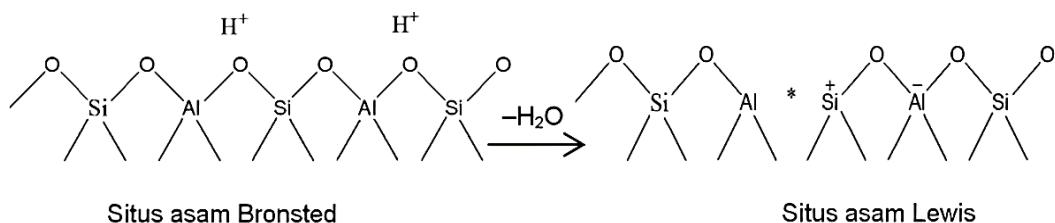
Zeolit merupakan katalis heterogen yang paling penting dalam industri kimia karena karakteristik strukturalnya yang unik seperti selektivitas ukuran/bentuk skala molekul, dan stabilitas yang sangat baik dalam proses industri yang keras. Zeolit banyak digunakan dalam industri petrokimia dan berbagai aplikasi katalisis heterogen, seperti adsorpsi, pemisahan, dan sintesis kimia halus. Selain untuk proses petrokimia, katalis juga memiliki aplikasi yang berkaitan dengan sintesis bahan kimia, konversi biomassa dan pemanfaatan  $\text{CO}_2$ . Ukuran pori merupakan parameter penting yang mempengaruhi, tidak hanya sifat fisiko-kimia material tetapi juga sifat molekul di dalam pori-pori. Zeolit adalah bahan kristal mikropori dengan geometri pori tertentu (Rilyanti *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2022).



Gambar 5. Struktur zeolit (El Bojaddayni *et al.*, 2023)

Menurut Trisunaryanti (2015) zeolit merupakan kristal aluminosilikat yang memiliki struktur berpori berupa saluran dan rongga. Rongga-rongga ini mengandung kation logam yang dapat ditukar, seperti  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  dan lainnya. Rumus umum zeolit dinyatakan sebagai:  $\text{M}_{x/m} [(\text{SiO}_2)_y (\text{AlO}_2)_x].\text{mH}_2\text{O}$  dengan M sebagai kation penyeimbang bermuatan  $n^+$  yang berfungsi menetralkan muatan kerangka aluminosilikat. Zeolit mengandung situs asam Brønsted yang berasal dari gugus silanol pada permukaannya. Struktur zeolit tidak memiliki

gugus silanol terminal karena unit tetrahedral silika dan alumina saling berikatan membentuk kerangka tiga dimensi, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5. Situs asam Brønsted terbentuk ketika kation penyeimbang dalam kerangka aluminosilikat digantikan oleh proton ( $H^+$ ), yang kemudian berinteraksi dengan atom oksigen membentuk gugus  $-OH$ , sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.

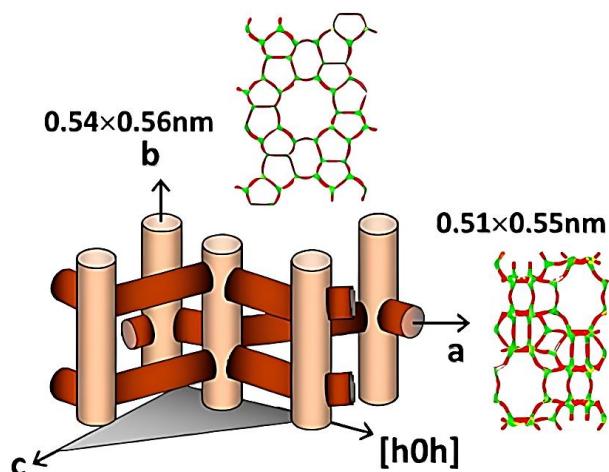


Gambar 6. Situs asam Brønsted dan Lewis pada zeolit (Hartati dan Prasetyoko, 2023)

## 2.6. Zeolit Socony Mobile-5 (ZSM-5)

ZSM-5 merupakan jenis zeolit berpori sedang dengan kandungan silika yang tinggi dengan rasio molar Si/Al 10–100 dan diameter pori 0,54–0,56 nm (Narayanan *et al.*, 2014). Ukuran ZSM-5 < 2 nm termasuk dalam struktur mikropori yang menjadikan katalis ini bersifat asam (Sihotang *et al.*, 2022). Material dengan yang memiliki luas permukaan tinggi dan ukuran pori kecil memiliki kekurangan dan kelebihan. Katalis ZSM-5 dengan ukuran mikro memiliki kelebihan yakni selektivitas yang tinggi, sedangkan kekurangannya yaitu kecepatan akses molekul yang teradsorpsi ke dalam material ZSM-5 menjadi rendah dikarenakan ukurannya yang terlalu kecil (Krisnandi *et al.*, 2012). ZSM-5 memiliki struktur kristalin tipe *Mobile Five Instructure* (MFI) dengan rumus kimia  $Na_n(AlO_2)_n(SiO_2)_{96-n} \cdot 16H_2O$  (Petushkov *et al.*, 2011). Rasio Si/Al dalam struktur zeolit berperan penting dalam menentukan kerapatan muatan kerangka kristalnya. Semakin besar rasio Si/Al, maka kerapatan muatan dalam kerangka meningkat yang akan menghasilkan sifat kepolaran molekul yang lebih tinggi serta meningkatkan kemampuan zeolit dalam mengadsorpsi molekul berukuran besar. Dengan demikian, kapasitas pertukaran ionnya pun menjadi lebih tinggi (Emelda dkk., 2013).

ZSM-5 telah digunakan secara luas dan populer serta merupakan salah satu katalis paling efektif untuk sintesis organik serta penukar ion yang penting. Keunggulan ini berkaitan dengan luas permukaan yang tinggi, selektivitas reaksi yang baik, serta aktivitas katalitik yang optimal (Hoang and Dat, 2021). Tingkat keasaman ZSM-5 meningkat seiring dengan naiknya rasio molar Si/Al selama proses sintesis. Selain itu, keberadaan pori-pori dalam struktur zeolit memberikan keuntungan fungsional bagi ZSM-5, antara lain kemampuannya bertindak sebagai katalis dengan kestabilan termal dan kimia yang baik sehingga lebih efektif dalam reaksi yang membutuhkan katalis asam kuat. TPABr atau TPAOH secara luas dikenal sebagai *template* yang baik untuk sintesis zeolit ZSM-5 dengan kristalinitas tinggi. Sintesis zeolit yang menggunakan TPABr memiliki rasio  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , dimana rasio tersebut memiliki kristalinitas lebih tinggi dibandingkan dengan TPAOH (Hartati dan Prasetyoko, 2023).



Gambar 7. Struktur dan saluran ZSM-5 (Zhang *et al.*, 2021)

ZSM-5 memiliki unit penyusun sekunder yang dikenal sebagai unit 5-1 atau pentasil. Unit ini bergabung membentuk rantai pentasil, yang selanjutnya menyusun kerangka tiga dimensi ZSM-5. ZSM-5 termasuk jenis berpori sedang dengan ukuran pori berkisar antara 5,1–5,5 Å serta sistem saluran tiga dimensi yang teratur. Struktur pori yang seragam menjadikan ZSM-5 sangat sesuai untuk aplikasi katalisis selektif bentuk dan cocok untuk pembentukan senyawa aromatik dan olefin seperti pada Gambar 7 (Zhang *et al.*, 2021). Selain itu, ZSM-5 memiliki selektivitas yang khas, keasaman aktif, serta stabilitas termal yang

tinggi. Kombinasi sifat-sifat tersebut menjadikan ZSM-5 banyak dimanfaatkan sebagai katalis dalam industri perminyakan dan petrokimia. Aplikasi katalitik ZSM-5 mencakup isomerisasi parafin, isomerisasi glukosa menjadi fruktosa, konversi metanol menjadi bensin dan olefin, *hydrocracking*, produksi etil benzena, alkilasi benzena, reduksi  $\text{NO}_x$ , dan oksidasi parsial metana (Hartati dan Prasetyoko, 2023).

## 2.7. Metode Hidrotermal

Salah satu metode yang paling umum digunakan dalam sintesis zeolit adalah metode hidrotermal, yang memanfaatkan air sebagai pelarut selama tahap kristalisasi (Rilyanti dkk., 2020). Proses ini dilakukan di dalam autoklaf pada suhu tinggi (di atas 100 °C), sehingga keseimbangan antara laju penguapan dan kondensasi dapat dipertahankan. Hidrotermal berasal dari dua kata hidro yang berarti air dan termal yang berarti panas. Metode hidrotermal merupakan pembentukan mineral atau kristal di sekitar sumber panas yang memiliki sifat merubah larutan menjadi padatan. Prinsip dari hidrotermal ini yaitu pemanasan reaktan dalam wadah tertutup, sehingga dapat memecahkan ikatan senyawa amorf pada material dengan temperatur tertentu dan terjadi peningkatan ukuran kristal. Metode hidrotermal memungkinkan peningkatan kelarutan reaktan, mempercepat proses nukleasi, serta mempercepat laju kristalisasi (Putri *et al.*, 2023). Pada proses ini, semua prekursor dalam bentuk gel dimasukkan ke dalam autoklaf dan dipanaskan pada suhu antara 100 hingga 180 °C hingga terbentuk kristal zeolit. Peralatan yang digunakan untuk autoklaf ditunjukkan pada Gambar 8. Menurut Cejka *et al.* (2007), terdapat beberapa faktor yang memengaruhi hasil sintesis ZSM-5, antara lain sebagai berikut.

### 1. Komposisi molar pereaksi

Komposisi molar reaktan memegang peran penting dalam menentukan tingkat kristalinitas zeolit. Faktor ini mencakup jenis prekursor yang digunakan dalam sintesis, rasio Si/Al, tingkat alkalinitas,  $\text{H}_2\text{O}$ , keberadaan kation anorganik, serta pemakaian agen templating.

## 2. Sumber Si dan Al

Beberapa sumber silika yang umum digunakan dalam sintesis zeolit antara lain silika koloid (LUDOX HS-40), TEOS, silika asap (Cab-O-Sil), TMOS, dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Setiap jenis sumber silika memiliki karakteristik berbeda yang akan memengaruhi proses nukleasi dan kristalisasi zeolit. Variasi ini dapat berdampak pada laju kristalisasi, ukuran kristal, serta distribusi partikel. Selain itu, sumber alumina juga berpengaruh terhadap kecepatan pembentukan kristal zeolit. Sedangkan sumber alumina yang digunakan adalah  $\text{NaAlO}_2$ ,  $\text{AlOH}$ , alumunium foil, alumunium sulfat ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), pseudo-boehmite ( $\text{AlO(OH)}$ ), dan logam alumunium.

## 3. Rasio Si/Al

Rasio ini berperan penting dalam menentukan struktur kristal dan komposisi akhir zeolit yang dihasilkan. Zeolit dengan rasio Si/Al rendah ( $\leq 5$ ) cenderung membentuk struktur seperti zeolit X (FAU), zeolit A (LTA), atau hidroksisodalit (SOD). Sementara itu, zeolit yang disintesis dengan rasio Si/Al tinggi ( $> 5$ ) membentuk struktur ZSM-11 (MEL), zeolit- $\beta$  (BEA), dan ZSM-5 (MFI).

## 4. Alkalinitas

tingkat kebasaan (alkalinitas) memengaruhi rasio  $\text{OH}^-/\text{Si}$  serta rasio  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ . Alkalinitas yang tinggi dapat meningkatkan kelarutan silika dan alumina, mempercepat proses polimerisasi ion polisilikat dan alumina, serta mempercepat tahap induksi, pembentukan inti (nukleasi), dan kristalisasi. Selain itu, tingkat kebasaan turut memengaruhi ukuran partikel dan morfologi zeolit yang dihasilkan.

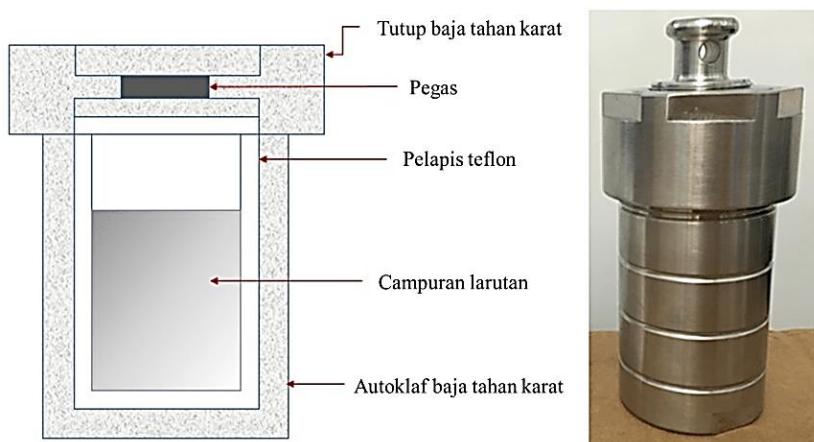
## 5. Jumlah molekul $\text{H}_2\text{O}$

Dalam metode hidrotermal, jumlah air yang digunakan sebagai pelarut memiliki peran krusial dalam menentukan keberhasilan pembentukan struktur zeolit. Volume air yang ditambahkan ke dalam larutan atau campuran reaksi akan memengaruhi konsentrasi masing-masing reaktan, viskositas sistem, serta mobilitas ion-ion yang terlibat dalam proses nukleasi dan pertumbuhan kristal. Apabila jumlah air terlalu sedikit, reaktan menjadi terlalu pekat dan dapat menghambat proses difusi serta pembentukan kristal yang teratur.

Sebaliknya, jika jumlah air terlalu banyak, konsentrasi reaktan menjadi terlalu rendah, sehingga memperlambat proses nukleasi dan mengurangi efisiensi kristalisasi.

#### 6. Penggunaan kation anorganik

Kation anorganik biasanya diperoleh dari basa alkali seperti NaOH atau KOH. Jenis basa yang digunakan dapat memengaruhi pembentukan unit kerangka penyusun zeolit, yang pada akhirnya menentukan jenis zeolit yang terbentuk.



Gambar 8. Alat autoklaf

#### 2.8. Impregnasi Logam Co

Pembuatan katalis yang ditambahkan dengan logam aktif dapat dilakukan menggunakan metode impregnasi, karena teknik ini tergolong praktis, memiliki tingkat keberhasilan yang tinggi, serta menghasilkan limbah yang relatif sedikit. Variasi dalam metode pembuatan katalis dapat berpengaruh terhadap hasil karakterisasi maupun performa katalis, terutama karena perbedaan lokasi penempatan logam aktif. Dalam metode impregnasi, logam aktif umumnya terdistribusi di permukaan material pendukung (Anggoro dan Buchori, 2018). Proses impregnasi logam pada zeolit merupakan salah satu upaya untuk mengatasi keterbatasan katalis logam murni yang memiliki beberapa kelemahan, yakni stabilitas termal yang rendah, kecenderungan terjadinya penurunan luas permukaan akibat pemanasan, mudah mengalami *sintering* (penggumpalan partikel), serta biaya yang relatif tinggi. Penambahan logam ke dalam struktur

zeolit juga diketahui dapat meningkatkan jumlah situs asam total pada katalis, yang merupakan faktor penting dalam menentukan aktivitas katalitik. Hingga saat ini, berbagai penelitian telah dilakukan untuk memodifikasi zeolit menjadi logam-zeolit melalui teknik impregnasi logam ke dalam material pendukung tersebut. (Hassan *et al.*, 2020).

Penambahan logam ke katalis ZSM-5 membantu pembentukan reaksi dengan cara mendorong reaksi dehidrogenasi, mengurangi jumlah situs asam Brønsted, dan meningkatkan jumlah situs asam Lewis yang terbentuk. Situs-situs asam ini terbentuk pada cacat struktur kristalin dan secara alami berada di permukaan material agar dapat berinteraksi dengan reaktan. Situs asam Brønsted adalah situs asam kuat yang terbentuk ketika jembatan Si–O–Si dalam zeolit diubah melalui substitusi salah satu atom silikon oleh atom aluminium. Perubahan ini menghasilkan muatan tidak merata pada atom oksigen jembatan yang kemudian distabilkan sebagai –OH. Gugus ini dapat kehilangan protonnya dengan mudah, sambil mempertahankan stabilitas muatan negatif pada oksigen (Dyer *et al.*, 2022).

Metode impregnasi terdapat dua jenis, yakni impregnasi basah (*wet impregnation*) dan impregnasi kering (*dry impregnation*). Pemilihan metode impregnasi umumnya mempertimbangkan efisiensi biaya. Jika larutan garam logam yang digunakan relatif mahal, maka metode impregnasi kering lebih disarankan. Sebaliknya, untuk larutan garam yang lebih ekonomis, impregnasi basah dapat menjadi pilihan. Salah satu keunggulan dari metode impregnasi basah adalah kemampuannya dalam mengendalikan jumlah logam yang diimpregnasi ke dalam material pendukung. (Munnik *et al.*, 2015) Metode impregnasi basah pada katalis ZSM-5 dapat menggunakan logam dari golongan transisi seperti Co, Ni, Mo, Ga, dan Pd (Vichaphund *et al.*, 2015). Pada penelitian yang dilakukan Krisnandi *et al.* (2015) ZSM-5 termodifikasi logam Co telah berhasil disiapkan melalui impregnasi basah. Pemilihan logam Co dilakukan karena logam ini mampu membentuk senyawa oksida seperti  $\text{Co}_3\text{O}_4$  dan  $\text{CoO}$  selama proses kalsinasi. Spesies oksida tersebut dapat terdispersi secara merata pada permukaan ZSM-5, sehingga meningkatkan luas permukaan aktif dan mendukung selektivitas

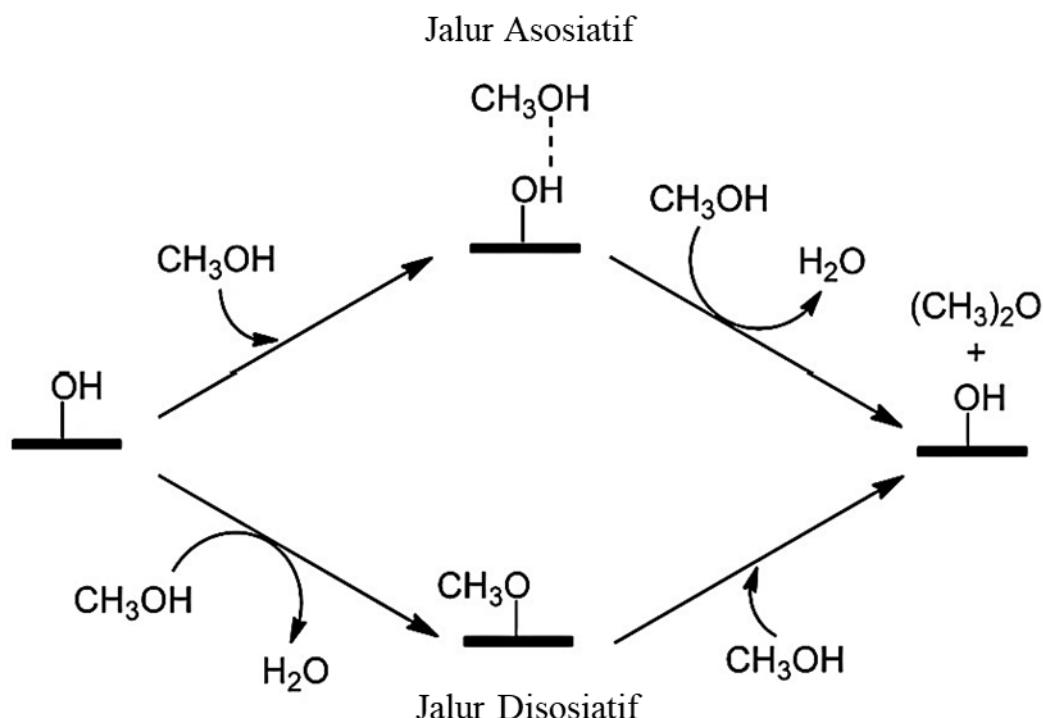
katalis terhadap reaksi konversi metanol (Sihotang *et al.*, 2022). Hal ini menjadikan ZSM-5 dengan impregnasi logam Co cocok digunakan sebagai katalis asam.

## 2.9. Dehidrasi Metanol

Dehidrasi merupakan tahap awal dalam proses pemanasan yang ditandai dengan terjadinya reaksi endoterm. Material yang telah kehilangan air mengalami transisi polimorfik yang juga bersifat endotermis pada suhu yang lebih tinggi. Sampel akan mengalami peleahan yang ditandai dengan puncak endoterm ketiga. Pada proses pendinginan, fasa cair tersebut mengalami kristalisasi kembali. Dalam proses ini, partikel-partikel dalam fasa cair mulai tersusun kembali secara teratur membentuk struktur kristalin padat. Selain itu, selama pendinginan ini juga terjadi transisi polimorfik, yaitu perubahan bentuk kristal dari satu struktur ke struktur lainnya yang lebih stabil pada temperatur rendah. (Trisunaryanti, 2015). Metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) secara luas dimanfaatkan dalam industri kimia, baik sebagai pelarut (*solvent*), pelarut tambahan (*co-solvent*), bahan baku produksi berbagai senyawa kimia, maupun sebagai alternatif bahan bakar. Peran metanol sebagai bahan bakar alternatif dinilai penting karena potensinya dalam menurunkan emisi karbon yang terus meningkat. Oleh karena itu, metanol sering dikategorikan sebagai senyawa antara (intermediet) dalam berbagai proses kimia. Dalam bentuk cair, metanol memiliki karakteristik fisik berupa tidak berwarna, mudah menguap, mudah terbakar, serta memiliki aroma yang khas. (Erlinawati *et al.*, 2023). Metanol memiliki titik didih  $64,7^\circ\text{C}$  namun senyawa ini mulai mengalami penguapan sebelum mencapai titik didih tersebut. Metanol juga relatif mudah untuk dipulihkan (*recovery*) dan didaur ulang (*recycle*) karena tidak berikatan secara kuat dengan molekul air, sehingga memungkinkan diperolehnya kembali metanol dalam bentuk yang relatif murni dan dapat digunakan ulang. (Daryono *et al.*, 2022).

Dehidrasi metanol adalah suatu proses dalam memperoleh dimethyl eter (DME). Pembentukan DME dari metanol dapat direpresentasikan oleh dua jalur berbeda

yang disebut jalur asosiatif dan jalur disosiatif yang dapat dilihat pada Gambar 9. Kedua jalur tersebut diperkirakan terjadi di situs asam Brønsted. Jalur asosiatif (terpadu) melibatkan penyerapan dua molekul metanol, yang bereaksi dan membentuk DME secara langsung. Jalur disosiatif (bertahap) melibatkan penyerapan metanol awal, diikuti oleh eliminasi air, yang menghasilkan gugus metil dan air yang diserap. Gugus metil bereaksi dengan molekul metanol kedua untuk membentuk DME (Park *et al.*, 2020). Proses dalam memperoleh DME akan melibatkan penghilangan air dari metanol atau disebut sebagai jalur tidak langsung pada sintesis DME. Kesetimbangan saat reaksi akan menyebabkan metanol yang tidak bereaksi kembali ke saluran reaktor konversi (Ortega *et al.*, 2018). Reaksi dehidrasi metanol telah diuji dengan berbagai jenis katalis asam padat seperti ZSM-5 untuk menemukan katalis terbaik untuk reaksi ini ditunjukkan pada Persamaan 1 (Kripasertkul *et al.*, 2022).



Gambar 9. Jalur asosiatif dan disosiatif untuk dehidrasi metanol ke DME (Park *et al.*, 2020)

## 2.10. Sintesis Dimetil Eter (DME)

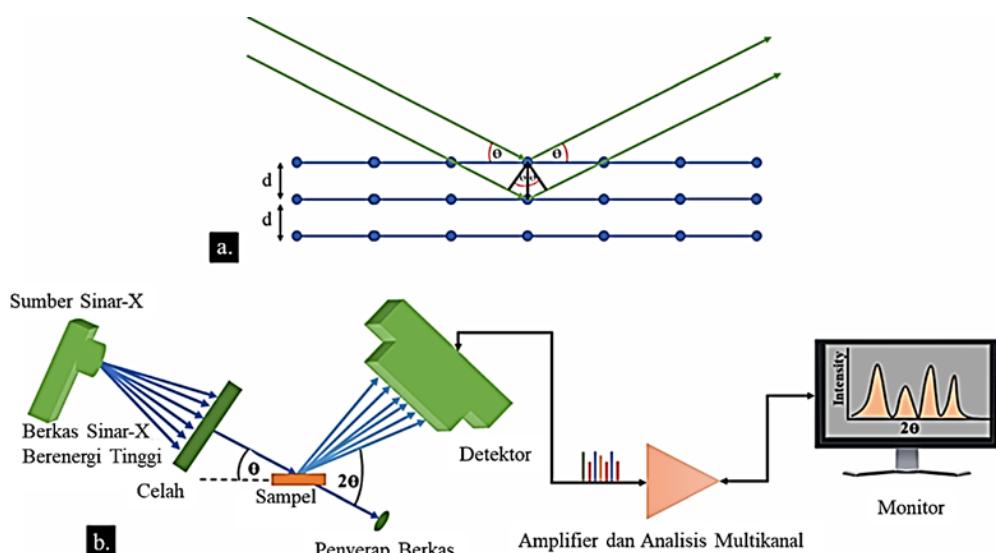
Dimetil eter (DME) adalah bahan bakar yang ramah lingkungan, rendah emisi  $\text{NO}_x$  dan CO, bebas belerang, dan tidak ada jelaga saat dibakar (Kripasertkul *et al.*, 2022). DME merupakan eter paling sederhana dengan rumus kimia  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ , gas tak berwarna dengan sedikit aroma seperti eter pada tekanan dan suhu kamar. DME memiliki sifat termofisika yang khas, dengan titik didih sebesar  $-24,2\text{ }^\circ\text{C}$ , suhu kritis mencapai  $128\text{ }^\circ\text{C}$ , serta tekanan kritis sebesar 5,4 MPa. Rasio panas spesifik  $\gamma = \text{C}_p/\text{C}_v$  DME pada suhu normal adalah sekitar 1,1-1,2 dan energi yang dilepaskan dari kompresi tidak meningkatkan suhu, tapi sebagian besar energi dihabiskan untuk meningkatkan tekanan. Pada suhu kamar, DME dapat melarutkan air sebanyak 7–8% berdasarkan berat, dan densitas DME cair adalah  $0,667\text{ g/cm}^3$  (Zheng *and* Watanabe, 2022).

DME dapat diaplikasikan sebagai aerosol dan pelarut serta telah banyak direkomendasikan sebagai pengganti solar, bensin, dan aditif yang cocok untuk dicampur dengan bahan bakar gas cair (Liu *et al.*, 2021). Menurut Moghaddam *and* Hazlett (2023) DME memiliki kandungan oksigen yang tinggi (34,8% massa) dan merupakan senyawa tidak beracun, non-karsinogenik, non-mutagenik, dan non-korosif. Kandungan oksigen yang tinggi tersebut akan berkontribusi signifikan terhadap pengurangan emisi partikel. Oksigen dalam DME membuatnya relatif lebih mudah terbakar dibandingkan bahan bakar konvensional lain tanpa kandungan oksigen. Hal ini disebabkan oleh energi ikatan C–O yang lebih rendah dibandingkan dengan ikatan C–H, sehingga ikatan tersebut lebih mudah terurai selama proses pembakaran. DME dapat disintesis melalui proses dehidrasi metanol. Reaksi dehidrasi metanol telah diuji dengan berbagai jenis katalis asam padat untuk menemukan katalis terbaik untuk reaksi ini (Kripasertkul *et al.*, 2022). Penggunaan zeolit pada sintesis DME harus dikontrol dengan hati-hati keasaman dan strukturnya untuk mengurangi atau menghambat reaksi yang tidak diinginkan yang dipromosikan oleh situs asam kuat (Catizzone *et al.*, 2019). Hasilnya menunjukkan bahwa H-ZSM-5 memberikan selektivitas DME tertinggi karena situs asam Brønsted dan luas permukaan tertinggi (Ramos *et al.*, 2005).

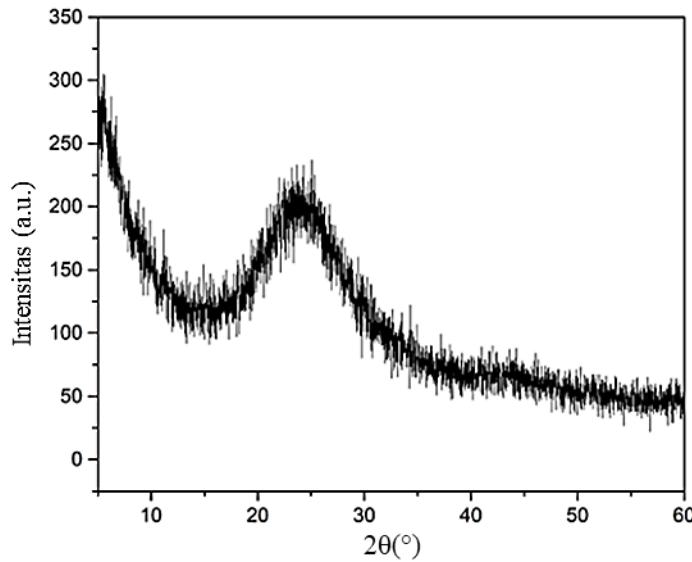
## 2.11. Instrumen Karakterisasi

### 2.11.1. X-Ray Diffraction (XRD)

XRD merupakan teknik karakterisasi yang umum digunakan untuk mengidentifikasi sifat kristalin suatu material, termasuk parameter kisi (*lattice parameters*) dan tipe struktur kristalnya. Prinsip kerja XRD didasarkan pada interaksi antara sinar-X dan bidang-bidang kristal dalam suatu padatan. Sistem XRD umumnya terdiri atas tiga komponen utama, yaitu sumber sinar-X, tempat objek yang diteliti, dan detektor sinar-X. Saat sinar-X dengan panjang gelombang tertentu diarahkan ke permukaan kristal, sebagian dari sinar tersebut akan mengalami difraksi oleh bidang-bidang kristal yang sejajar (Masruroh dkk, 2013). Fenomena ini dijelaskan oleh Persamaan Bragg, yang menyatakan bahwa difraksi maksimum terjadi apabila perbedaan lintasan sinar-X antarbidang kristal merupakan kelipatan panjang gelombangnya. Visualisasi persamaan Bragg ( $n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta$ ) dan skema peralatan XRD dapat dilihat pada Gambar 10. Pada persamaan tersebut,  $n$  menyatakan bilangan bulat yang disebut orde refleksi,  $\lambda$  adalah panjang gelombang sinar-X yang digunakan,  $d_{hkl}$  merupakan jarak karakteristik antara bidang kristal dari spesimen tertentu dan  $\theta$  adalah sudut datang berkas sinar-X (Salem *et al.*, 2023).

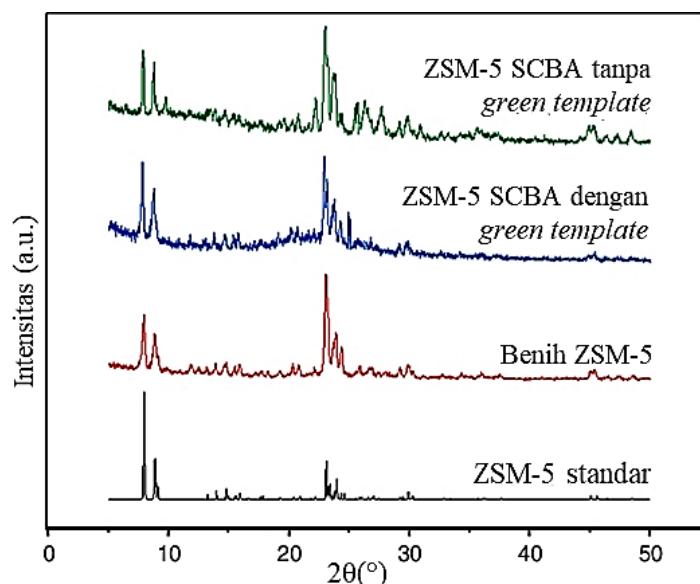


Gambar 10. Visualisasi persamaan Bragg dan skema peralatan XRD (Salem *et al.*, 2023)



Gambar 11. Diffraktogram silika SCBA (Rilyanti *et al.*, 2025)

Pola difraksi yang terbentuk direkam oleh detektor dan ditampilkan sebagai puncak-puncak difraksi (*diffractogram*). Setiap puncak menunjukkan keberadaan bidang kristal tertentu dengan orientasi spesifik dalam kisi tiga dimensi. Semakin banyak bidang kristal yang aktif dalam proses difraksi, maka semakin tinggi intensitas puncak yang dihasilkan. Pola difraksi yang diperoleh selanjutnya dianalisis dengan membandingkannya terhadap database standar difraksi sinar-X untuk menentukan jenis dan struktur material yang dikarakterisasi (Masruroh dkk, 2013).

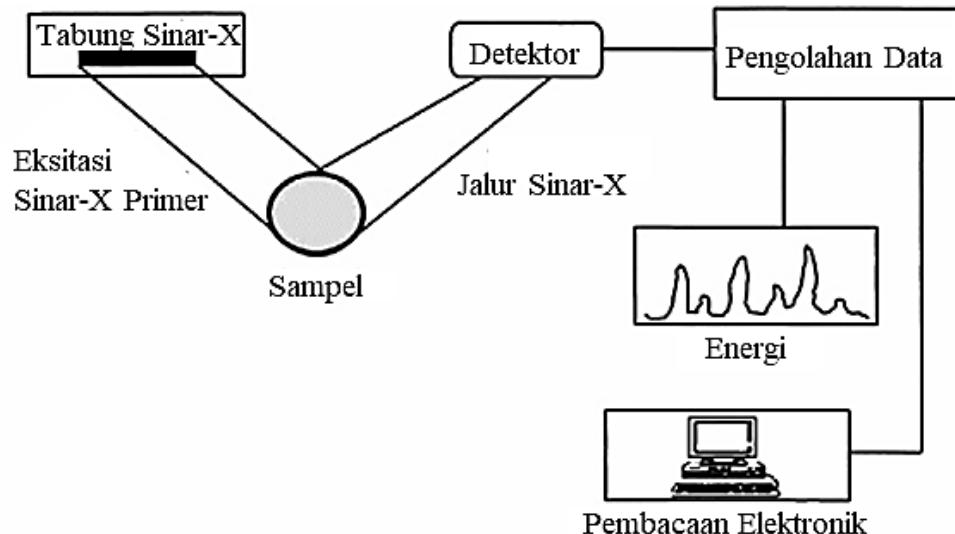


Gambar 12. Diffraktogram XRD ZSM-5 (Rilyanti *et al.*, 2023)

Menurut Rilyanti dkk. (2020) ampas tebu dengan perlakuan pembakaran dapat menyebabkan penurunan kandungan senyawa organik dan senyawa volatil lainnya, sehingga membentuk struktur kristalin dalam bentuk fasa amorf. Keberadaan fasa amorf ini dapat diamati pada Gambar 11. Struktur dan fasa silika SCBA ditentukan dengan XRD pada  $2\theta = 5^\circ - 60^\circ$ . Fasa amorf ditandai dengan puncak yang memanjang di sekitar  $2\theta = 22^\circ$  (Rilyanti *et al.*, 2021). Menurut Chen *et al.* (2019) struktur amorf dari silika memudahkan pembentukan kerangka zeolit. Selain itu, ZSM-5 dianalisis menggunakan XRD untuk mengidentifikasi fasa kristalin dan amorf baik secara kualitatif maupun kuantitatif, menentukan persentase kristalinitas, serta memahami struktur kristalnya. Difraktogram ZSM-5 dapat dilihat pada Gambar 12.

#### 2.11.2. *X-Ray Fluorescence* (XRF)

XRF merupakan metode analisis non-destruktif yang digunakan untuk menentukan komposisi kimia serta konsentrasi unsur-unsur dalam suatu sampel, terutama dalam material seperti mineral atau batuan, dengan menggunakan teknik spektrometri. Prinsip dasar dari XRF melibatkan proses eksitasi sinar-X primer yang dihasilkan dari tabung sinar-X atau sumber radioaktif, yang kemudian diarahkan ke permukaan sampel (Gambar 13). Ketika sinar-X mengenai atom dalam sampel, sebagian energinya dapat diabsorpsi atau dihamburkan oleh material. Penyerapan sinar-X oleh atom terjadi melalui mekanisme efek fotolistrik, yaitu ketika energi sinar-X cukup besar untuk melepaskan elektron dari kulit dalam atom, sehingga menciptakan kekosongan dan membuat atom berada dalam kondisi tidak stabil. Untuk mencapai kestabilan kembali, elektron dari kulit luar akan berpindah ke kulit dalam dan perpindahan ini disertai dengan pelepasan energi dalam bentuk sinar-X sekunder (fluoresensi), yang memiliki karakteristik unik tergantung pada perbedaan energi antara kedua kulit tersebut. Proses ini menjadi dasar dalam analisis XRF (Patty, 2013). Analisis XRF digunakan untuk mengetahui komposisi kimia dari SCBA yang dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 13. Prinsip Metode XRF (Nakhaei *et al.*, 2012)

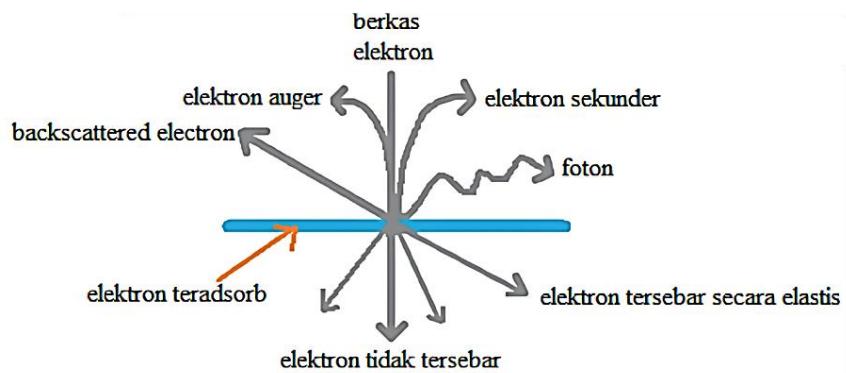
Tabel 1. Komposisi senyawa silika SCBA

Komposisi	Berat (wt %)
SiO <sub>2</sub>	89,245
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,831
K <sub>2</sub> O	0,135
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4,083
CaO	0,796
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,625
TiO <sub>2</sub>	0,010

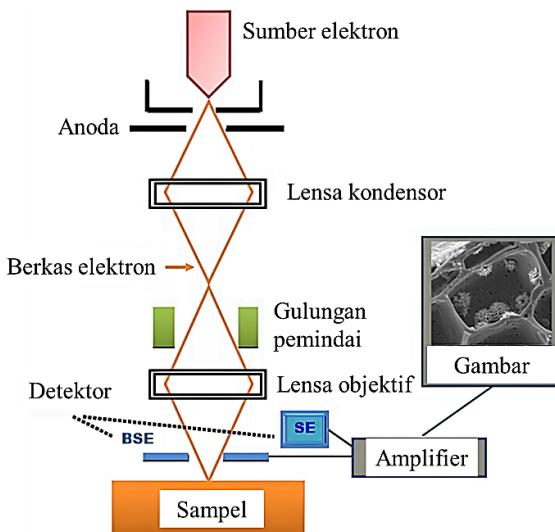
(Rilyanti *et al.*, 2025)

### 2.11.3. Scanning Electron Microscope (SEM)

Morfologi permukaan dan struktur kristal dari material zeolit dapat diamati menggunakan SEM. Metode ini merupakan metode untuk mengamati sampel atau objek mikroskopis menggunakan mikroskop yang dalam pembentukan gambarnya tidak menggunakan cahaya melainkan elektron. SEM memiliki fokus yang sangat baik, dengan kisaran perbesarannya 15 hingga 200.000 kali dan resolusi 50 Å. Pembentukan gambar diawali dari interaksi elektron dan inti atom penyusun spesimen dengan berkas elektron yang ditembakkan oleh pistol elektron. Interaksi antara berkas elektron dengan materi secara umum ditunjukkan pada Gambar 14. Selain itu, skema peralatan SEM dapat dilihat pada Gambar 15 (Kwiecińska *et al.*, 2019).



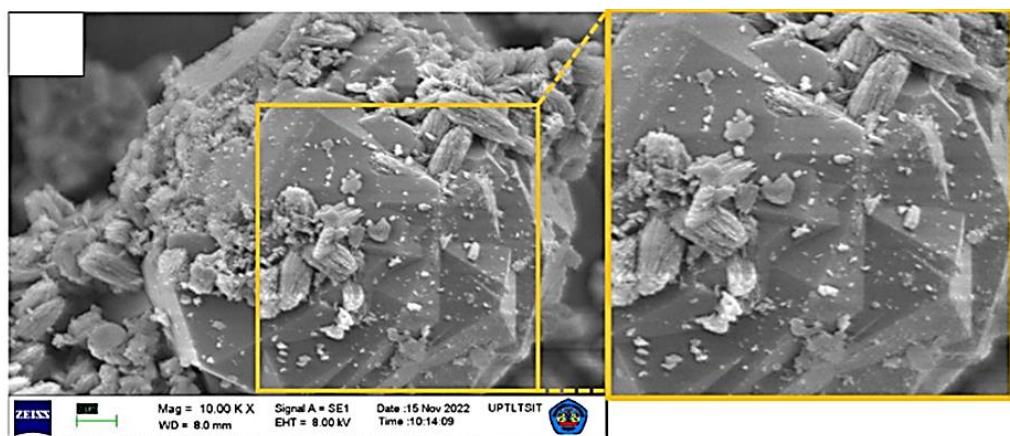
Gambar 14. Skema interaksi antara berkas elektron dengan material (Kwiecińska *et al.*, 2019)



Gambar 15. Skema peralatan SEM (Kwiecińska *et al.*, 2019)

Interaksi tidak elastis berlangsung saat berkas elektron mengenai dan berinteraksi dengan elektron yang terdapat dalam atom spesimen yang menyebabkan terjadinya transfer energi dari berkas ke atom. Proses ini dapat mengakibatkan terlepasnya elektron dari kulit atom (*Auger electron*), sehingga menciptakan kekosongan elektron dalam struktur atom tersebut. Kekosongan tersebut kemudian diisi oleh elektron dari orbital dengan level energi yang lebih tinggi, maka transisi elektron menghasilkan emisi berupa X-ray. Elektron yang terusir ini disebut sebagai elektron sekunder. Interaksi elastis terjadi ketika berkas elektron berinteraksi dengan inti atom spesimen, menghasilkan pembelokan berkas elektron tanpa perubahan energi yang signifikan. Berkas elektron yang dibelokkan kembali dari spesimen ke arah datangnya berkas elektron disebut *backscattered*

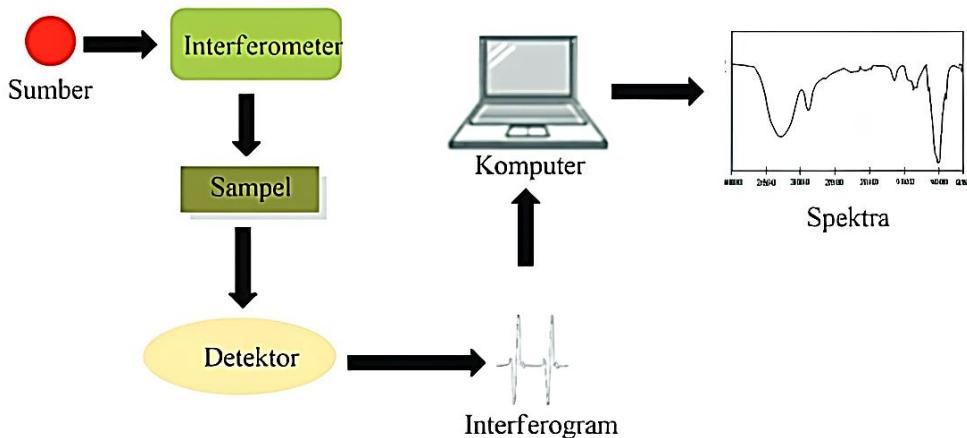
*electron*. Elektron sekunder atau *backscattered electron* inilah yang dideteksi dan digunakan untuk membentuk gambar tiga dimensi dari permukaan spesimen (Amziane and Collet, 2017). Hasil analisis morfologi permukaan ZSM-5 menggunakan SEM dapat dilihat pada Gambar 16. Menurut Rilyanti *et al.* (2025) ZSM-5 yang disintesis tanpa templat organik memiliki ukuran partikel 2–15  $\mu\text{m}$  dengan morfologi yang tidak homogen. Selain itu, ZSM-5 tersebut cenderung membentuk kristal berukuran besar dan tidak beraturan.



Gambar 16. Mikrograf ZSM-5 berbasis SCBA (Rilyanti *et al.*, 2025)

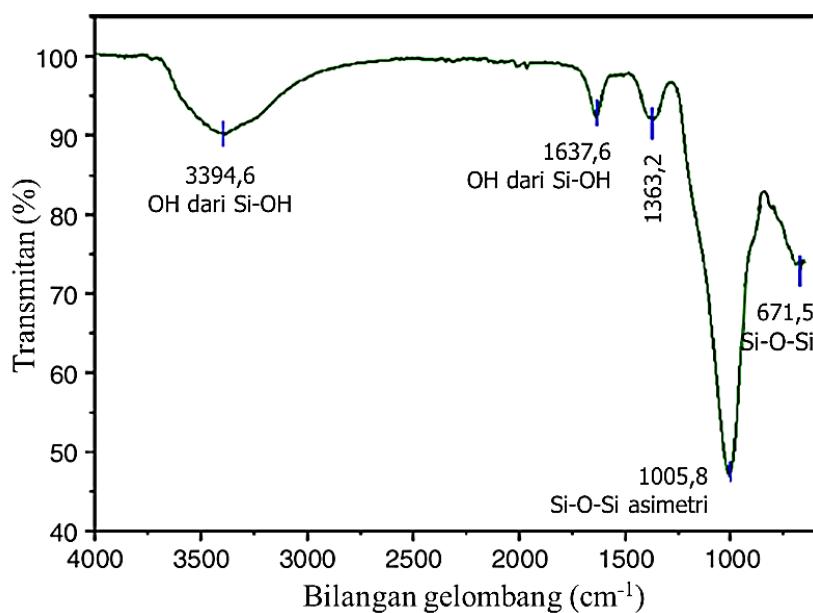
#### 2.11.4. Fourier Transform Infra Red (FTIR)

Spektrum fotometer FTIR dapat digunakan untuk mengidentifikasi senyawa organik dan anorganik secara kuantitatif dan kualitatif. Gugus fungsional seperti OH, C=O, C=C, dan Si-OH adalah contoh dari gugus fungsional yang dimaksud dalam analisis ini. Dalam karakterisasi ini, sampel yang diuji terkontak dengan permukaan cuplikan ketika sinar infra merah melalui tempat kristal. Infra merah dapat dengan cepat mengubah atau menginduksi oksidasi, panas, dan cahaya. Resolusi yang lebih tinggi menyebabkan sensitivitas FTIR antara 80 dan 200 kali lebih tinggi dari instrumen dispersi biasa. Interferometer Michelson, yang bertugas menguraikan (mendispersi) radiasi inframerah menjadi bagian-bagian frekuensi, merupakan komponen utama spektroskopi FTIR. Keuntungan FTIR adalah dapat digunakan untuk menemukan sampel dalam berbagai fasa seperti gas, padat atau cair (Kristianingrum, 2014).



Gambar 17. Skema peralatan FTIR (Hartati dan Prasetyoko, 2023)

Menurut Hartati dan Prasetyoko (2023) spektrometer FTIR pada dasarnya menggunakan interferometer untuk mengukur energi yang ditransmisikan ke sampel. Radiasi inframerah yang dipancarkan dari benda hitam mencapai interferometer, tempat pengkodean spektra dari sinyal terjadi. Sinyal interferogram yang dihasilkan ditransmisikan melalui atau memantul dari permukaan sampel, tempat panjang gelombang energi tertentu diserap. Sinar akhirnya melewati detektor dan selanjutnya diteruskan ke komputer pemrosesan untuk transformasi *Fourier* sinyal energi. Skema peralatan FTIR ditunjukkan oleh Gambar 17.

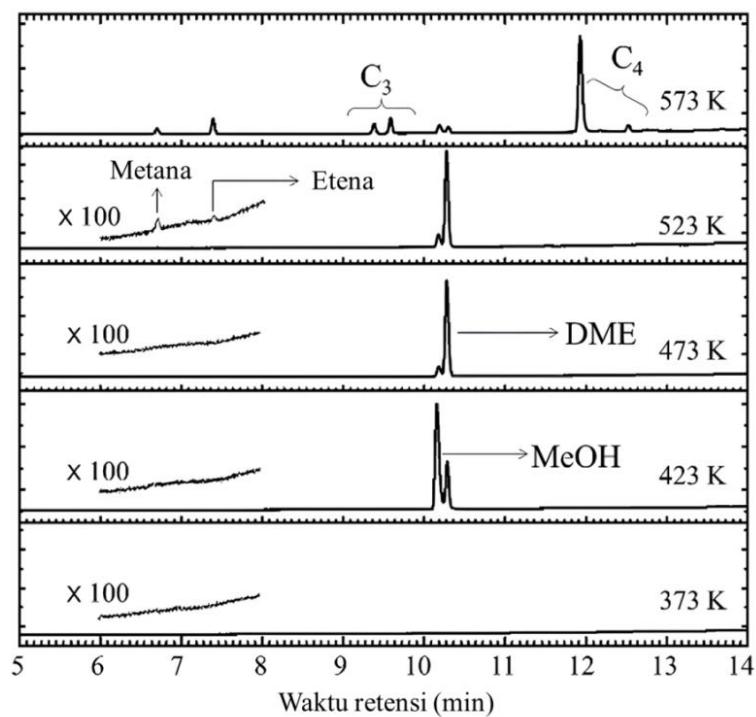


Gambar 18. Spektra FTIR dari silika abu ampas tebu (Rilyanti *et al.*, 2023)

Batool *et al.* (2020) melaporkan hasil FTIR dari silika abu ampas tebu yang ditunjukkan pada Gambar 18. Gugus fungsi silanol (Si–OH) dan siloksan (Si–O–Si) merupakan gugus fungsi utama silika SCBA. Gugus –OH dari Si–OH muncul pada bilangan gelombang  $3394,6\text{ cm}^{-1}$ , sedangkan puncak pada bilangan gelombang  $1363,2\text{ cm}^{-1}$  sesuai dengan gugus Si–O–Si. Vibrasi ulur asimetris Si–O–Si teramati pada  $1005,8\text{ cm}^{-1}$ , sedangkan bilangan gelombang  $671,5\text{ cm}^{-1}$  teridentifikasi sebagai Si–O–Si simetris.

#### 2.11.5. *Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)*

GC-MS adalah perpaduan antara metode analisis kromatografi gas dengan spektroskopi massa sebagai detektornya. Pada umumnya GC-MS digunakan untuk mengidentifikasi senyawa yang berbeda dalam satu sampel (kualitatif), namun dapat juga digunakan untuk analisis kuantitatif (Hartati dan Prasetyoko, 2023). Tujuan kualitatif dapat diperoleh dengan pemisahan campuran kompleks dengan spektrum massa senyawa individu yang menunjukkan pola fragmentasi karakteristik atau sidik jari “kimiawi”; informasi kuantitatif senyawa yang dikumpulkan dalam waktu yang sama dari massa nominalnya (Wu *et al.*, 2013). Gabungan dari kedua instrumen ini menghasilkan data yang lebih akurat untuk mengidentifikasi suatu senyawa karena dilengkapi dengan fragmen-fragmen molekulnya. Pada kromatografi gas, sampel diubah dalam bentuk gas kemudian diinjeksikan ke kolom kromatografi. Selanjutnya komponen sampel dipisahkan dengan cara didistribusikan antara fase gerak berbentuk gas inert dan fasa diam berbentuk cair atau padat dalam sebuah kolom. Fasa gerak dari kromatografi gas tidak bereaksi dengan molekul analit tetapi hanya membantu transfer analit melewati kolom. Efluen dari GC melewati inlet menuju spektrometer massa. Pada spektrometer massa, molekul analit diubah menjadi ion. Ion-ion yang terbentuk dipisahkan berdasarkan perbandingan *mass-to-charge* (*m/z*) dan diarahkan ke *transducer* yang kemudian mengubah kelebihan jumlah ion ke sinyal listrik sehingga menghasilkan spektrum massa (Hartati dan Prasetyoko, 2023).



Gambar 19. Kromatogram GC-MS konversi metanol menggunakan katalis ZSM-5 (Wu *et al.*, 2021)

Menurut Abbas dkk. (2006) produk reaksi DME yang berupa gas diuji dengan alat untuk menganalisis CO dan H<sub>2</sub>. GC untuk menganalisis DME, metana dan penyusun lain yang terbentuk. Hasil analisis kedua kolom GC ditunjukkan dalam kromatogram, dan ini digunakan untuk menghitung komposisi baik umpan maupun produk reaksi serta konversi reaksi. Kromatogram GC-MS untuk konversi metanol ditunjukkan pada Gambar 19. Pada kromatogram tersebut menunjukkan pada suhu 373-573 K dapat diamati terbentuknya metanol dan DME. Selain itu, tidak ada hidrokarbon atau zat antara khusus yang terdeteksi di antara efluen. Sehingga dehidrasi metanol menjadi DME mudah diwujudkan pada kisaran suhu ini, tetapi transformasi lebih lanjut menjadi produk yang mengandung ikatan C-C tersebut mungkin memerlukan kondisi suhu reaksi yang lebih tinggi (Wu *et al.*, 2021).

### **III. METODE PENELITIAN**

#### **3.1. Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian ini telah dilaksanakan pada bulan Oktober 2024 sampai Agustus 2025 yang berlokasi di Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Karakterisasi katalis dan silika menggunakan XRF di Laboratorium Terpadu Instrumen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Negeri Padang, XRD dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Negeri Padang. FTIR dan SEM dilakukan di UPA Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi Universitas Lampung. Analisis produk menggunakan GC-MS yang dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Islam Indonesia.

#### **3.2. Alat dan Bahan**

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini meliputi kaca arloji, gelas kimia, gelas ukur, pipet tetes, labu ukur, corong pisah, corong kaca, Erlenmeyer, neraca analitik, termometer, pH meter, *hotplate stirrer*, *magnetic stirrer*, *magnetic stir bar*, oven, tanur, dan seperangkat teflon autoklaf. Selain itu digunakan pula statif dan klem, batang pengaduk, spatula, cawan penguap, loyang, mortar dan alu, botol polipropilen, dan botol semprot. Instrumen karakterisasi yang digunakan yaitu XRF PANalytical Epsilon 3, XRD PANalytical X'Pert Pro PW3040/60, FTIR Aglient Cary 360 Thermoscientific Nicolet iS-10 Japan, SEM ZEISS EVO MA 10, dan GC-MS Simadzu QP 2010 SE. Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu ampas tebu,  $\text{HNO}_3$  dan  $\text{Al(OH)}_3$ , larutan  $\text{NaOH}$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Co(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , LUDOX,  $\text{HCl}$ , *oil bath*, akuades, dan metanol.

### 3.3. Prosedur Penelitian

#### 3.3.1. Ekstraksi Silika dari Ampas Tebu

Ampas tebu yang diperoleh dilakukan pencucian, pengeringan, dan pembakaran terlebih dahulu untuk mendapatkan abu ampas tebu atau disebut *Sugarcane Bagasse Ash* (SCBA). Pencucian dilakukan dengan cara yakni ampas tebu kering yang telah diayak sebanyak 70 g direndam dalam larutan  $\text{HNO}_3$  2,5% 1750 mL dan dipanaskan di atas *hotplate* sampai mendidih serta dilakukan pengadukan secara berkala. Pencucian menggunakan  $\text{HNO}_3$  2,5% dilakukan untuk menghilangkan pengotor-pengotor ataupun logam yang ada diampas tebu. Kemudian, ampas tebu disaring dan dibilas dengan aquades hingga pH netral. Ampas tebu yang telah dicuci, dikeringkan di dalam oven sampai kering. Ampas tebu yang telah kering kemudian dibakar menggunakan tanur pada suhu 550°C selama  $\pm$  5 menit.

Abu ampas tebu sebanyak 10 g diekstraksi dengan menggunakan 250 mL  $\text{NaOH}$  2 M dan dipanaskan di atas *hotplate* pada suhu  $\pm$  80 °C disertai pengadukan selama 1 jam. Selanjutnya, campuran dibiarkan pada suhu ruang selama 24 jam untuk mengoptimalkan terbentuknya  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Setelah didiamkan selama 24 jam, disaring dengan menggunakan kertas saring dan didapat filtrat yang berwarna kuning transparan. Filtrat yang didapat ditambahkan  $\text{HNO}_3$  10% tetes demi tetes sampai terbentuk hidrogel pada pH 7 hingga pH 8. Hidrogel yang diperoleh didiamkan selama 48 jam pada suhu ruang untuk memaksimalkan pembentukan gel. Gel kemudian didekantasi menggunakan kertas saring dan dibilas dengan aquades yang telah dipanaskan. Selanjutnya, dikeringkan selama 24 jam pada suhu 100 °C. Padatan silika yang diperoleh digerus dengan mortar hingga halus. Sebanyak 1 gram silika dicuci menggunakan 10 mL larutan  $\text{HCl}$  1 M dalam wadah polipropilena. Campuran dipanaskan dalam *oil bath* pada suhu 60–85 °C selama 3 jam dengan pengadukan konstan sebagai bagian dari proses dealuminasi untuk mengurangi kandungan aluminium dalam struktur silika. Setelah proses pemanasan, pelarut diuapkan menggunakan oven pada suhu 60 °C. Serbuk yang diperoleh dicuci dengan aquades hingga mencapai pH netral, lalu dikeringkan

dalam oven pada suhu 60 °C selama 12 jam. Silika yang didapatkan selanjutnya dikarakterisasi dan dijadikan prekursor silika-alumina untuk sintesis ZSM-5.

### 3.3.2. Karakterisasi Silika dari Hasil Ekstraksi

Silika yang diperoleh dari hasil ekstraksi dikarakterisasi dengan XRF untuk mengetahui persen komposisi senyawa pada silika SCBA. Gugus fungsi penyusun kerangka silika dapat diketahui dengan melakukan analisis dengan FTIR. Analisis menggunakan XRD untuk melihat jenis fasa dan tingkat kristalinitas silika SCBA.

### 3.3.3. Sintesis ZSM-5

#### 3.3.3.1. Sintesis Benih ZSM-5

Sintesis ZSM-5 dilakukan dengan penambahan benih ZSM-5 sebagai pengganti pengarah struktur. Sintesis dilakukan dengan menggunakan metode hidrotermal melalui sumber silika komersial (LUDOX) dan sumber alumina  $\text{Al(OH)}_3$ . Benih ZSM-5 pada penelitian ini disintesis dengan menggunakan perbandingan molar pereaksi yaitu  $1\text{SiO}_2$ : 0,248 $\text{Al(OH)}_3$ : 0,299 $\text{NaOH}$ : 0,240TPABr: 30,00 $\text{H}_2\text{O}$ .

Penggunaan TPABr bertujuan untuk mengarahkan pembentukan kerangka kristal MFI, yang dapat dihilangkan pasca benih terbentuk dan melalui proses kalsinasi. Komposisi molar dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Sintesis benih ZSM-5 dilakukan dengan membuat larutan A dan B. Larutan A dibuat dengan melarutkan 0,4937 g  $\text{Al(OH)}_3$  dan 0,936 g  $\text{NaOH}$  50% dalam  $\text{H}_2\text{O}$ , sedangkan larutan B dibuat dengan penambahan 7,656 g LUDOX dalam 9,031 g  $\text{H}_2\text{O}$  disertai dengan pengadukan secara konstan selama 1 jam. Larutan A dan B dicampur dan diaduk selama 30 menit untuk membentuk larutan C. Larutan C ditambahkan TPABr sebanyak 3,262 g dengan pengadukan selama 90 menit dan dimasukkan ke dalam teflon autoklaf untuk dikristalisasi secara hidrotermal selama 120 jam pada suhu 170 °C. Kristal yang telah diperoleh dibersihkan dengan akuades dan dikeringkan pada suhu 60 °C hingga kering. Produk kristal

yang dihasilkan berupa padatan yakni benih ZSM-5. Benih ZSM-5 yang telah disintesis dilakukan kalsinasi terlebih dahulu dengan dipanaskan dalam tanur pada suhu 550°C selama 6 jam. Proses kalsinasi bertujuan untuk menghilangkan sisa-sisa templat organik TPABr dan membuka pori pada benih ZSM-5.

Tabel 2. Komposisi molar pereaksi benih ZSM-5

<b>Komposisi</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>NaOH</b>	<b>H<sub>2</sub>O</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>TPABr</b>
Molar	1	0,229	30	0,248	0,240
MW(g/mol)	60	40	18	78	266,260
$\rho$ (g/mL)	-	-	-	-	-
W(g)	60	9,17	540	19,344	63,90

Tabel 3. Perhitungan komposisi molar pereaksi benih ZSM-5

<b>Bahan massa untuk 1 autoclaf</b>	<b><math>\rho</math> (g/mL)</b>	<b>Kemurnian (%)</b>	<b>M/W (g/mol)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Massa untuk 1 autoclaf (g)*</b>
SiO <sub>2</sub> LUDOX	-	100	60,08	150	7,656
Al(OH) <sub>3</sub>	-	100	78	9,679	0,493
NaOH 50% (w/w)	1,515	50	40	18,347	0,936
TPABr	-	100	266,26	63,902	3,261
H <sub>2</sub> O dari NaOH	-	-	18	9,173	-
H <sub>2</sub> O ditambahkan	-	-	18	530	27,093

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

### 3.3.3.2. Sintesis ZSM-5 Berbasis Silika LUDOX

Sintesis ZSM-5 berbasis silika LUDOX dilakukan melalui metode hidrotermal dengan memanfaatkan sumber silika komersial (LUDOX) dan sumber alumina berupa Al(OH)<sub>3</sub>. Proses ini menggunakan TPABr sebagai templat organik yang berfungsi mengarahkan terbentuknya kerangka kristal MFI. Setelah proses kristalisasi, TPABr dihilangkan melalui tahap kalsinasi untuk membuka struktur pori. Perbandingan molar pereaksi yang digunakan adalah 1SiO<sub>2</sub>: 0,248Al(OH)<sub>3</sub>: 0,299NaOH: 0,240TPABr: 30,00H<sub>2</sub>O. Komposisi molar detail dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5. Dalam penelitian ini, ZSM-5 berbasis LUDOX digunakan sebagai katalis pembanding untuk mengevaluasi efektivitas ZSM-5 berbasis SCBA dalam sintesis DME.

Sintesis ZSM-5 berbasis LUDOX dilakukan melalui tahapan pembuatan dua larutan awal. Larutan pertama diperoleh dengan melarutkan 0,4937 g Al(OH)<sub>3</sub> bersama 0,936 g NaOH 50% ke dalam akuades hingga homogen. Larutan kedua disiapkan dengan mencampurkan 7,656 g LUDOX ke dalam 9,031 g akuades, kemudian diaduk secara konstan selama 1 jam. Kedua larutan kemudian digabungkan dan diaduk kembali selama 30 menit, lalu ditambahkan 3,262 g TPABr dengan pengadukan lanjutan selama 90 menit. Larutan tersebut kemudian dimasukkan ke dalam teflon autoklaf untuk proses kristalisasi hidrotermal selama 120 jam pada suhu 170 °C. Kristal yang terbentuk dipisahkan, dicuci menggunakan akuades, lalu dikeringkan pada suhu 60 °C hingga diperoleh padatan ZSM-5. Produk padatan ini kemudian dikalsinasi pada suhu 550 °C selama 6 jam di dalam tanur untuk menghilangkan sisa templat organik TPABr dan membuka struktur pori, sehingga dihasilkan ZSM-5 berbasis LUDOX dengan struktur kerangka zeolit yang terbentuk dengan baik.

Tabel 4. Komposisi molar pereaksi ZSM-5 berbasis LUDOX

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

Tabel 5. Perhitungan komposisi molar pereaksi ZSM-5 berbasis LUDOX

<b>Bahan massa untuk 1 autoklaf</b>	<b>ρ (g/mL)</b>	<b>Kemurnian (%)</b>	<b>M/W (g/mol)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Massa untuk 1 autoklaf (g)*</b>
SiO <sub>2</sub> LUDOX	-	100	60,08	150,00	7,656
Al(OH) <sub>3</sub>	-	100	78	9,679	0,493
NaOH 50% (w/w)	1,515	50	40	18,347	0,936
TPABr	-	100	266,26	63,902	3,261
H <sub>2</sub> O dari NaOH	-	-	18	9,173	-
H <sub>2</sub> O ditambahkan	-	-	18	530	27,093

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

### 3.3.3.3. Sintesis ZSM-5 Berbasis Silika SCBA

Pada penelitian ini, sintesis ZSM-5 berbasis silika SCBA dilakukan dengan silika yang berasal dari SCBA. Perbandingan molar dari sintesis ZSM-5 ini adalah

$1\text{SiO}_2: 0,250\text{NaOH}: 0,067\text{Al(OH)}_3: 30\text{H}_2\text{O}$ . Komposisi molar dapat dilihat pada Tabel 6 dan Tabel 7. Sintesis ZSM-5 dimulai dengan mencampurkan 1,153 g NaOH sebanyak 50% dan 3,877 g silika SCBA yang telah dilarutkan dengan  $\text{H}_2\text{O}$  ke dalam botol polipropilen dengan dilakukan pengadukan konstan dengan *magnet stirrer* selama 1 jam pada suhu 80 °C. Setelah itu, gel berwarna putih terbentuk dan benih ZSM-5 ditambahkan sebanyak 15% dari berat silika SCBA yang digunakan. Kemudian, pengadukan kembali dilakukan pada suhu ruang. Hasil dimasukkan ke dalam *telfon* autoklaf dan disintesis secara hidrotermal selama 144 jam pada suhu 180 °C. Hasil sintesis ZSM-5 dibersihkan dengan akuades sampai pH netral. Setelah itu, produk dikeringkan menggunakan oven selama 2 jam pada suhu 90 °C. Sebelum digunakan sebagai katalis, produk yang berupa padatan putih dikalsinasi selama 6 jam pada suhu 550 °C sehingga diperoleh ZSM-5 berbasis SCBA.

Tabel 6. Komposisi molar pereaksi untuk sintesis ZSM-5 berbasis SCBA

<b>Komposisi</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>NaOH</b>	<b>H<sub>2</sub>O</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
Molar	1	0,250	30,0	0,067
MW(g/mol)	60	40	18	102
$\rho$ (g/ml)	-	-	-	-
W(g)	60	10	540	6,803

Tabel 7. Perhitungan molar pereaksi untuk sintesis ZSM-5 berbasis SCBA

<b>Bahan massa untuk 1 Autoklaf</b>	<b><math>\rho</math> (g/mL)</b>	<b>Kemurnian (%)</b>	<b>M/W (g/mol)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Massa untuk 1 autoklaf (g)*</b>
SiO <sub>2</sub> LUDOX	-	80	60	115,07	3,877
Al(OH) <sub>3</sub>	-	18	108		
NaOH 50% (w/w)	1,515	50	40	18,35	1,153
TPABr	-	100	266,26	63,9	0
H <sub>2</sub> O dari NaOH	-	-	18	9,17	-
H <sub>2</sub> O ditambahkan	-	-	18	530,83	30,547

\* massa yang dihitung merupakan massa untuk 1 *telfon* ukuran 50 mL

### 3.3.4. Karakterisasi ZSM-5

Hasil sintesis ZSM-5 kemudian dikarakterisasi menggunakan XRD untuk mengetahui jenis fasa dan kristalinitas kristal zeolit yang dihasilkan dari proses

sintesis, XRF untuk melihat kandungan dan menentukan rasio Si/Al ZSM-5, serta SEM untuk melihat morfologi kristal zeolit hasil sintesis.

### 3.3.5. Persiapan Katalis

#### 3.3.5.1. Katalis H-ZSM-5

ZSM-5 yang telah disintesis dari silika LUDOX dan SCBA terlebih dahulu dilakukan proses pertukaran ion (*ion exchange*) menggunakan  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  1 M sebelum dilakukan uji katalitik zeolit. Hal ini dilakukan untuk mengaktifkan situs asam Lewis dan Brönsted-Lowry pada ZMS-5. Katalis ZSM-5 sebanyak 1 g dicampur dengan 10 mL larutan  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  1 M disertai pengadukan dan dipanaskan pada suhu 80 °C selama 2 hari. Larutan campuran tersebut mengalami proses pertukaran ion dengan larutan  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  1 M, yang diganti setiap 24 jam . Setelah proses *ion exchange* selesai, campuran disaring dan padatan hasil penyaringan dicuci berulang kali menggunakan akuades hingga bebas dari sisa ion yang tidak berikatan. Padatan yang diperoleh kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C selama 24 jam untuk menghilangkan kandungan air tersisa. Selanjutnya, material dikalsinasi pada suhu 550 °C selama 6 jam sehingga diperoleh hasil *ion exchange* ZSM-5 yang disebut H-ZSM-5.

#### 3.3.5.2. Katalis Co/H-ZSM-5

Katalis H-ZSM-5 berbasis LUDOX dan H-ZSM-5 berbasis SCBA yang diperoleh dari proses *ion exchange* dilakukan impregnasi basah dengan logam Co mengacu pada (Razzaq *et al.*, 2019). H-ZSM-5 sebanyak 1 g dimasukkan ke dalam 10 mL larutan garam  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  dengan konsentrasi 5% kemudian dipanaskan pada suhu 80 °C sambil diaduk selama 4 jam agar proses impregnasi berlangsung secara optimal. Setelah itu, larutan disaring dan padatan hasil penyaringan dicuci dengan akuades guna menghilangkan sisa garam. Padatan putih yang diperoleh selanjutnya dikeringkan di dalam oven pada suhu 100 °C selama 24 jam untuk menghilangkan kandungan air yang tersisa. Setelah proses pengeringan, padatan

tersebut dikalsinasi pada suhu 550 °C selama 4 jam. Dengan demikian, diperoleh hasil impregnasi berupa material katalis Co/H-ZSM-5.

### 3.3.6. Karakterisasi Co/H-ZSM-5

Katalis Co/H-ZSM-5 yang diperoleh dari *ion exchange* dan impregnasi dengan logam Co dikarakterisasi menggunakan XRF untuk mengetahui komposisi dan kadar logam Co pada Co/H-ZSM-5.

## 3.4. Uji Aktivitas Katalitik

### 3.4.1. Dehidrasi Metanol menjadi DME

Katalis H-ZSM-5 berbasis LUDOX, Co/H-ZSM-5 berbasis LUDOX, dan Co/H-ZSM-5 berbasis SCBA hasil sintesis diuji aktivitas katalitiknya pada reaksi dehidrasi metanol menjadi DME menggunakan reaktor autoklaf dengan prosedur mengacu pada penelitian Kripasertkul *et al.* (2022). Penggunaan ketiga jenis katalis tersebut dimaksudkan sebagai pembanding, sehingga dapat diketahui pengaruh perbedaan sumber silika serta pengaruh penambahan logam Co melalui metode impregnasi terhadap kinerja katalis dalam reaksi pembentukan DME. Katalis hasil sintesis sebanyak 0,3 g dicampurkan dengan 8 mL metanol pada teflon autoklaf 100 mL dan dimasukkan dalam oven. Reaksi dehidrasi dilakukan selama 3 jam pada suhu 180 °C. Setelah proses dehidrasi selesai, maka larutan didinginkan dan pisahkan filtrat dengan katalis menggunakan kertas saring. Filtrat yang diperoleh kemudian dianalisis dengan GC-MS untuk mengidentifikasi dan menentukan komposisi produk.

## **V. SIMPULAN DAN SARAN**

### **5.1. Simpulan**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Silika berhasil diekstrasi dari SCBA dan didominasi oleh fasa amorf dengan rasio Si/Al 7,37, serta menunjukkan gugus fungsi silanol dan siloksan berdasarkan spektrum FTIR.
2. ZSM-5 berbasis SCBA dan LUDOX berhasil disintesis ditandai oleh kesesuaian difraktogram dengan standar ZSM-5 tipe MFI. Kristalinitas ZSM-5 SCBA (68,86%) sedikit lebih rendah dibandingkan ZSM-5 LUDOX (77,81%), dengan rasio Si/Al masing-masing 12,22 dan 13,24.
3. Morfologi ZSM-5 berbasis SCBA menunjukkan permukaan relatif homogen dengan sedikit heterogenitas akibat keberadaan partikel berukuran lebih besar. Meskipun demikian, material tetap mempertahankan bentuk heksagonal khas dari ZSM-5 dengan ukuran partikel rata-rata  $4,5 \mu\text{m}$ , di mana sebagian besar partikel berada pada rentang  $2\text{--}6 \mu\text{m}$ .
4. Logam Co berhasil diimpregnasi pada ZSM-5 berbasis LUDOX dan SCBA masing-masing sebesar 5,01% dan 4,00%.
5. Katalis H-ZSM-5 berbasis LUDOX menghasilkan rendemen DME tertinggi sebesar 73,21% dengan selektivitas 100%, sedangkan Co/H-ZSM-5 berbasis LUDOX menunjukkan rendemen 66,50% dengan selektivitas 92,64%. Sementara itu, Co/H-ZSM-5 berbasis SCBA mencapai selektivitas yang tinggi sebesar 95,59% dengan rendemen 54,60%.

## 5.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, katalis Co/H-ZSM-5 berbasis SCBA berhasil disintesis dan mampu menghasilkan DME melalui reaksi dehidrasi metanol hingga 95,59% dengan rendemen 54,60%. Walaupun menunjukkan aktivitas katalitik yang baik, penelitian ini belum melibatkan tahap optimasi parameter reaksi. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk fokus pada penentuan kondisi optimum, khususnya melalui pengkajian variasi suhu sintesis, waktu reaksi, serta jumlah katalis yang digunakan. Optimasi ini penting karena setiap parameter berpengaruh terhadap kinetika reaksi, kestabilan katalis, dan selektivitas produk.

## DAFTAR PUSTAKA

- 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: 617-629.
- Adriati, M., Suseno, A., and Taslimah, T. 2013. Modifikasi Zeolit Alam Menggunakan Besi (Fe) dan Kobalt (Co) untuk Katalis Degradasi Fenol. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 16(1): 1-5.
- Amziane, S., and Collet, F. 2017. *Bio-aggregates Based Building Materials*. RILEM State-of-the-Art Reports. Springer Netherlands. Dordrecht.
- Anbalagan, G., Prabakaran, A. R., and Gunasekaran, S. 2010. Spectroscopic Characterization of Indian Standard Sand. *Journal of Applied Spectroscopy*. 77(1): 86-94.
- Anggoro, D.D., dan Buchori, L. 2018. Pengaruh Metode Pembuatan Katalis Metal/Zeolit Y Terhadap Karakterisasi dan Aktivitasi Katalis. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan"*. 1-6.
- Antony, J., Meera, V., and Raphael, V. P. 2021. Investigations on the Capacity and Mechanism of Iron Uptake by Nano Zero-Valent Iron Particles. *Bulletin of Materials Science*. 44(3): 1-11.
- 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*. 45(5): 3891–3900.
- El Bojaddayni, I., Emin Küçük, M., El Ouardi, Y., Jilal, I., El Barkany, S., Moradi, K., Repo, E., Laatikainen, K., and Ouammou, A. 2023. A Review on Synthesis of Zeolites from Natural Clay Resources and Waste Ash: Recent Approaches and Progress. *Minerals Engineering*. 198: 108086.
- Catizzone, E., Daele, S. Van, Bianco, M., Michele, A. Di, Aloise, A., Migliori, M., Valtchev, V., and Giordano, G. 2019. Catalytic Application of Ferrierite Nanocrystals in Vapour-phase Dehydration of Methanol to Dimethyl Ether. *Applied Catalysis B: Environmental*. 243: 273–282.

- Cejka, J., Bekkum, H., Corma, A., and Schuth, F. 2007. *Introduction to Zeolite Molecular Sieves*. 3rd revise ed. Elsevier. Amsterdam.
- Chen, Y.H., Han, D.M., Cui, H.X., and Zhang, Q. 2019. Synthesis of ZSM-5 via Organotemplate-free and Dry Gel Conversion Method: Investigating the Effects of Experimental Parameters. *Journal of Solid State Chemistry*. 279: 120969.
- Climate Transparency 2022. *Climate Transparency Report: Comparing G20 Climate Action*.
- Daryono, E.D., Fassa, F., and Rahman, A. 2022. Penggunaan Metanol Sisa Reaksi Sebagai Reaktan pada Proses Transesterifikasi Minyak Kelapa Sawit Menjadi Biodiesel. *Jurnal Teknologi*. 14(2): 155–162.
- Dyer, A. C., Nahil, M. A., and Williams, P. T. 2022. Biomass: Polystyrene Co-Pyrolysis Coupled with Metal-Modified Zeolite Catalysis for Liquid Fuel and Chemical Production. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 24(2): 477-490.
- Emelda, L., Putri, S.M., dan Ginting, S. 2013. Pemanfaatan Zeolit Alam Teraktivasi untuk Adsorpsi Logam Krom ( $\text{Cr}^{3+}$ ). *Jurnal Rekayasa Kimia and Lingkungan*. 9(4): 166–172.
- Erlinawati, Rahman, M., Zikri, A., dan Aditya, M.R. 2023. Pengaruh Jumlah Tray dan Refluks Kolom Distilasi pada Proses Purifikasi Metanol. *Journal of Chemical Engineering*. 4(2): 19.
- Fabiani, V. A., Silalahi, I.H., dan Sayekti, E. 2017. Pengaruh Variasi Garam Ammonium terhadap Keasaman Zeolit Alam pada Reaksi Perengkahan Minyak Jelantah. *Indonesian Journal of Chemical Research*. 5(1): 1–6.
- Fauziyah, B. 2021. *Potensi Ampas Tebu di Bidang Farmasi*. PT Literasi Nusantara Abadi Group. Malang.
- Hamid, A., Prasetyoko, D., Esti, T., Rohmah, F. dan Dayi, I. 2020. Pengaruh Tahap Kristalisasi pada Sintesis ZSM-5 Mesopori dari Kaolin Alam. *Indonesian Journal of Chemical Analysis*. 3(2): 40–49.
- Hartati, dan Prasetyoko, D. 2023. *Katalis Berbasis Aluminosilikat*. Airlangga University Press. Jawa Timur.
- 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.
- He, M., Zhang, J., Liu, R., Sun, X., and Chen, B. 2017. The Distribution and Strength of Brönsted Acid Sites on the Multi-aluminum Model of FER Zeolite: a Theoretical Study. *Catalysts*. 7(1): 11.

- Hoang, P.H., and Dat, N.M. 2021. Study on Using Cellulose Derivatives as Pore Directing Agent for Preparation of Hierarchical ZSM-5 Zeolite Catalyst. *Advanced Powder Technology*. 32(10): 3927–3933.
- Ikhsan, M.H., dan Nizar, U.K. 2020. Katalis Asam Padat Berbasis Karbon Tersulfonasi Pada Proses Pembuatan Biodiesel. *Chemistry Journal of State University of Padang*. 9(1): 51–54.
- Jagadesh, N., Ramachandramurthy, A., and Murugesan, R. 2018. . *Indian J. Geo Marine Sci.* 47: 1934.
- Kriprasertkul, W., Witoon, T., and Kim-Lohsoontorn, P. 2022. Dimethyl Ether (DME) Synthesis From CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> Through Ethanol-assisted Methanol Synthesis and Methanol Dehydration. *International Journal of Hydrogen Energy*. 47(78): 33338–33351.
- Krisnandi, Y.K., Samodro, B.A., Sihombing, R., and Howe, R.F. 2015. Direct Synthesis of Methanol by Partial Oxidation of Methane with Oxygen over Cobalt Modified Mesoporous H-ZSM-5 Catalyst. *Indonesian Journal of Chemistry*. 15(3): 263–268.
- Krisnandi, Y.K., Yusri, S., Gotama, H.S., Octaviani, S., and Sihombing, R. 2012. Synthesis and Characterization of Hierarchical Co/ZSM-5 as Catalyst for Methane Partial Oxidation. *International Journal of Environment and Bioenergy*. 3(2): 121–131.
- Kristianingrum, S. 2014. *Handout Spektroskopi Inframerah*. Universitas Negeri Yogyakarta. Yogyakarta.
- Kwiecińska, B., Pusz, S., and Valentine, B.J. 2019. Application of Electron Microscopy TEM and SEM for Analysis of Coals, Organic-rich Shales and Carbonaceous Matter. *International Journal of Coal Geology*. 211: 103203.
- Liu, C., Kang, J., Huang, Z.Q., Song, Y.H., Xiao, Y.S., Song, J., He, J.X., Chang, C.R., Ge, H.Q., Wang, Y., Liu, Z.T., and Liu, Z.W. 2021. Gallium Nitride Catalyzed the Direct Hydrogenation of Carbon Dioxide to Dimethyl Ether as Primary Product. *Nature Communications*. 12(1): 1–10.
- Lunt, A.J.G., Chater, P., and Korsunsky, A.M. 2018. On the Origins of Strain Inhomogeneity in Amorphous Materials. *Scientific Reports*. 8(1): 1574
- Machala, L., Zboril, R., and Gedanken, A. 2007. Amorphous Iron (III) Oxide a Review. *The Journal of Physical Chemistry B*. 111(16): 4003-4018.
- Maseko, P., Cele, M. N., and Mdleleni, M. M. 2025. Olefin Selectivity of K–Mn Promoters on CoFe-ZSM-5-Based Catalyst in CO<sub>2</sub> Hydrogenation. *Frontiers in Chemistry*. 13: 1562436.

- Masruroh, Manggara, A.B., Lapailaka, T., dan Triandi, R. 2013. Penentuan Ukuran Kristal (*Crystallite Size*) Lapisan Tipis PZT dengan Metode XRD Melalui Pendekatan Persamaan Debye Scherrer. *Erudio Journal of Educational Innovation*. 1(2): 24–29.
- Mi, X., Hoa, Z., Li, X., Liu, H., and Guo, X. 2020. Synergistic Effect Between Organic Structure-Directing Agent and Crystal Seed Toward Controlled Morphology and Bimodal Pore Structure of Aggregated Nanosized ZSM-5. *Microporous and Mesoporous Materials*. 302: 110255.
- Migliori, M., Condello, A., Dalena, F., Catizzone, 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.
- Moghaddam, A.L. and Hazlett, M.J. 2023. Journal of Environmental Chemical Engineering Methanol Dehydration Catalysts in Direct and Indirect Dimethyl Ether (DME) Production and The Beneficial Role of DME in Energy Supply and Environmental Pollution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 11(3): 110307.
- Mugisidi, D., Fajar, A., dan Heriyani, O. 2022. Peningkatan Efisiensi dan Efektivitas Kondensor pada Solar Still. *Jurnal Teknosains*, 12(1):19–31.
- Munnik, P., de Jongh, P.E., and de Jong, K.P. 2015. Recent Developments in the Synthesis of Supported Catalysts. *Chemical Reviews*. 115(14): 6687–6718.
- Narayanan, S., Vijaya, J.J., Sivasanker, S., Yang, S., and Kennedy, L.J. 2014. Hierarchical ZSM-5 Catalyst Synthesized by a Triton X - 100 Assisted Hydrothermal Method. *Chinese Journal of Catalysis*. 35(11): 1892–1899.
- Nakhaei, F., Sam, A., Mosavi, M. R., and Nakhaei, A. 2012. Prediction of XRF Analyzers Error for Elements On-Line Assaying Using Kalman Filter. *International Journal of Mining Science and Technology*. 22(4): 595–601.
- Nguyen, D., Dinh, V., Dang, N.T., Khan, D.T., Hung, N.T., Hoa, N. and Tran, T. 2023. Effects of Aging and Hydrothermal Treatment on the Crystallization of ZSM-5 Zeolite Synthesis from Bentonite. *RSC Advances*. 13(30): 20565–20574.
- Ortega, C., Rezaei, M., Hessel, V., and Kolb, G. 2018. Methanol to Dimethyl Ether Conversion over a ZSM-5 Catalyst: Intrinsic Kinetic Study on an External Recycle Reactor. *Chemical Engineering Journal*. 347: 741–753.
- Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Hadi, S., Ilim, I., 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.

- Park, J., Kim, H. S., Lee, W. B., and Park, M.J. 2020. Trends and Outlook of Computational Chemistry and Microkinetic Modeling for Catalytic Synthesis of Methanol and DME. *Catalysts*. 10(6): 655.
- Patty, D.J. 2013. *Penentuan Unsur dalam Rambut Berdasarkan Karakteristik Pola Flourosensi Sinar X (XRF)*. 219–225.
- Petushkov, A., Yoon, S., and Larsen, S.C. 2011. Synthesis of Hierarchical Nanocrystalline ZSM-5 with Controlled Particle Size and Mesoporosity. *Microporous and Mesoporous Materials*. 137(1): 92–100.
- Purnami, Wardana, I.N.G., dan Veronika, K. 2015. Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap Laju dan Efisiensi Pembentukan Hidrogen. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 6(1): 51–59.
- Putri, A.N.R., Fadlilah, I., and Prasadi, O. 2023. Effect of Si/Al Molar Ratio on Zeolite Synthesis from Nipah Leaf and used Canned Aluminium. *KONVERSI*. 12(2): 42–47.
- Ramos, F.S., Farias, A.M.D. De, Borges, L.E.P., Monteiro, J.L., Fraga, M.A., Sousa, E.F.A., and Appel, L.G. 2005. Role of Dehydration Catalyst Acid Properties on one-step DME Synthesis Over Physical Mixtures. *Catalysis Today*. 101: 39–44.
- 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: 116119.
- Rilyanti, M., Faidah, U. N., Suharso, S., Pandiangan, K. D., and Ilim, I. 2021. Utilization of Zeolite H-MOR Based on Bagasse Ash Silica as a Catalyst for the Hydrolysis Reaction of Cassava Peel Cellulose for Glucose Production. *Journal of Physics: Conference Series*. 1751(1): 012103.
- Rilyanti, M., Mukti, R.R., Kadja, G.T.M., Ogura, M. and Nur, H. 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., and Ayoub, M. 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, E.G., Buhani, Pandiangan, K.D., and 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.
- Rutkowska, M., Macina, D., Piwowarska, Z., Gajewska, M., Díaz, U., and Chmielarz, L. 2016. Hierarchically Structured ZSM-5 Obtained by Optimized Mesotemplate-Free Method as Active Catalyst for Methanol to DME Conversion. *Catalysis Science and Technology*. 6(13): 4849-4862.
- Salem, K. S., Kasera, N. K., Rahman, M. A., Jameel, H., Habibi, Y., Eichhorn, S. J., French, A.D., Pal, L., and Lucia, L. A. 2023. Comparison and Assessment of Methods for Cellulose Crystallinity Determination. *Chemical Society Reviews*. 52(18): 6417-6446.
- Sembiring, S. dan Simanjuntak, W. 2015. *Silika Sekam Padi: Potensinya sebagai Bahan Baku Keramikk Industri*. Plantaxia. Yogyakarta.
- September, L. A., Kheswa, N., Seroka, N. S., and Khotseng, L. 2023. Green Synthesis of Silica and Silicon from Agricultural Residue Sugarcane Bagasse Ash – A Mini Review. *RSC advances*. 13(2): 1370-1380.
- Sharifi, M., Halladj, R., and Askari, S. 2024. Production of Eco-Friendly DME Fuel over Sonochemically Synthesized UiO-66 Catalyst. *Scientific Reports*. 14(1): 1755.
- Sihotang, A., Is Heriyanti, S., Djangkung Sumbogo Murti, S., Mirda Yanti, F., Farizt Ichsan, A., Adiningtyas Putri, A., and Riski Gusti, D. 2022. The Effect of Metal Impregnation Of Fe Cu And Co on Surface Area of ZSM-5 Catalyst Analyzed Using Surface Area Analyzer (AAS). *Al-Kimia*. 10(2): 170–179.
- Sofyan, G. G. I., Alauhdin, M., and Susatyo, E. B. 2013. Sintesis dan karakterisasi bahan keramik cordierite dari abu sekam padi. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 2(2): 96-101.
- Sootchiewcharn, N., Attanatho, L., and Reubroycharoen, P. 2015. Biodiesel Production from Refined Palm Oil using Supercritical Ethyl Acetate in A Microreactor. *Energy Procedia*. 79: 697–703.
- Sriwong, C., Boonrungsiman, S., and Sukyai, P. 2023. Industrial Crops and Products Sugarcane Bagasse Cellulose-based Scaffolds Incorporated Hydroxyapatite for Promoting Proliferation , Adhesion and Differentiation of Osteoblasts. *Industrial Crops and Products*. 192: 115979.
- Trisunaryanti, W. 2015. *Material Katalis dan Karakternya*. UGM Press. Yogyakarta.
- 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: 28–37.

- Wu, H., Guo, J., Chen, S., Liu, X., Zhou, Y., Zhang, X., and Xu, X. 2013. Recent Developments in Qualitative and Quantitative Analysis of Phytochemical Constituents and Their Metabolites using Liquid Chromatography–mass Spectrometry. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 72: 267–291.
- Wu, X., Chen, W., Xu, S., Lin, S., Sun, T., Zheng, A., Wei, Y., and Liu, Z. 2021. Dynamic Activation of C1 Molecules Evoked by Zeolite Catalysis. *ACS Central Science*, 7(4): 681–687.
- Xiong, G., Meng, F., Liu, J., Liu, L., and Zhao, L. 2021. Rapid Hydrothermal Synthesis of Hierarchical ZSM-5/Beta Composite Zeolites. *RSC advances*. 11(35): 21235–21247.
- 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: 7702–7718.
- 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(10): 1247.
- Zhang, P., He, M., Huo, S., Li, F., and Li, K. 2022. Recent Progress in Metal-based Composites Toward Adsorptive Removal of phosphate : Mechanisms , Behaviors , and Prospects. *Chemical Engineering Journal*. 446: 137081.
- Zheng, Q., and Watanabe, M. 2022. Advances in Low-temperature Extraction of Natural Resources Using Liquefied Dimethyl Ether. *Resources Chemicals and Materials*. 1(1): 16–26.