

**PENGARUH MODIFIKASI LOGAM Ti TERHADAP KINERJA
KATALITIK ZSM-5 BERBASIS SILIKA AMPAS TEBU PADA REAKSI
DEHIDRASI METANOL MENGHASILKAN DIMETIL ETER**

(Skripsi)

Oleh

**APRILIA SASHYA KIRANA
NPM 2117011015**



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

ABSTRAK

PENGARUH MODIFIKASI LOGAM Ti TERHADAP KINERJA KATALITIK ZSM-5 BERBASIS SILIKA AMPAS TEBU PADA REAKSI DEHIDRASI METANOL MENGHASILKAN DIMETIL ETER

Oleh

APRILIA SASHYA KIRANA

Dimetil eter (DME) merupakan bahan bakar alternatif ramah lingkungan yang dapat disintesis dengan bantuan ZSM-5. Penelitian ini bertujuan mensintesis ZSM-5 berbasis silika dari abu ampas tebu yang dimodifikasi melalui impregnasi logam titanium (Ti) serta mengevaluasi kinerja katalitiknya pada reaksi dehidrasi metanol menghasilkan DME.

Silika diekstraksi dari abu ampas tebu atau dikenal *sugarcane bagasse ash* (SCBA) melalui proses alkali. Analisis XRF menunjukkan rasio Si/Al silika hasil ekstraksi sebesar 7,373, analisis FTIR mengonfirmasi adanya gugus silanol dan siloksan. Silika SCBA kemudian disintesis menjadi ZSM-5 dengan metode hidrotermal, ZSM-5 berbasis LUDOX digunakan sebagai pembanding. Karakterisasi XRD menunjukkan kristalinitas ZSM-5 silika LUDOX 77,81% dan silika SCBA 68,86%, analisis XRF mengonfirmasi keberhasilan impregnasi dengan kandungan Ti 6,028% pada Ti/H-ZSM-5 LUDOX dan 6,179% pada Ti/H-ZSM-5 SCBA. Hasil SEM menunjukkan morfologi kristal *bulky*.

Uji katalitik pada 180 °C selama 3 jam menghasilkan rendemen DME 73,20% pada H-ZSM-5 LUDOX dengan selektivitas 100%, 51,39% pada Ti/H-ZSM-5 LUDOX dengan selektivitas 85,78%, serta 43,92% pada Ti/H-ZSM-5 SCBA dengan selektivitas 97,02%. Analisis GC-MS memperlihatkan puncak DME dominan dan mendeteksi dimetoksimetana dalam jumlah kecil.

Kata Kunci : dehidrasi metanol, DME, impregnasi Ti, silika SCBA, ZSM-5

ABSTRACT

THE EFFECT OF Ti METAL MODIFICATION ON THE CATALYTIC PERFORMANCE OF BAGASSE ASH-BASED SILICA ZSM-5 IN METHANOL DEHYDRATION TO DIMETHYL ETHER

By

APRILIA SASHYA KIRANA

Dimethyl ether (DME) is an environmentally friendly alternative fuel that can be synthesized using ZSM-5. This study aims to synthesize ZSM-5 based on silica derived from sugarcane bagasse ash (SCBA) modified through titanium (Ti) impregnation and to evaluate its catalytic performance in the methanol dehydration reaction to produce DME. Silica was extracted from sugarcane bagasse ash (SCBA) through an alkaline process. XRF analysis showed a Si/Al ratio of 7.373 for the extracted silica, while FTIR analysis confirmed the presence of silanol and siloxane groups. The SCBA-derived silica was then synthesized into ZSM-5 using a hydrothermal method, with LUDOX-based ZSM-5 as a reference. XRD characterization indicated crystallinity values of 77.81% for LUDOX-based ZSM-5 and 68.86% for SCBA-based ZSM-5. XRF confirmed successful impregnation with Ti contents of 6.028% in Ti/H-ZSM-5 LUDOX and 6.179% in Ti/H-ZSM-5 SCBA. SEM analysis revealed bulky crystal morphology. Catalytic testing at 180 °C for 3 hours produced DME yields of 73.20% on H-ZSM-5 LUDOX with 100% selectivity, 51.39% on Ti/H-ZSM-5 LUDOX with 85.78% selectivity, and 43.92% on Ti/H-ZSM-5 SCBA with 97.02% selectivity. GC-MS analysis showed a dominant DME peak and detected small amounts of dimethoxymethane.

Keywords: methanol dehydration, DME, Ti impregnation, SCBA silica, ZSM-5

**PENGARUH MODIFIKASI LOGAM Ti TERHADAP KINERJA
KATALITIK ZSM-5 BERBASIS SILIKA AMPAS TEBU PADA REAKSI
DEHIDRASI METANOL MENGHASILKAN DIMETIL ETER**

Oleh
Aprilia Sashya Kjrana

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 : **PENGARUH MODIFIKASI LOGAM Ti TERHADAP KINERJA KATALITIK ZSM-5 BERBASIS SILIKA AMPAS TEBU PADA REAKSI DEHIDRASI METANOL MENGHASILKAN DIMETIL ETER**

Nama Mahasiswa : **Aprilia Sashya Kirana**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2117011015**

Jurusan : **Kimia**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



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

Prof. Ir. Suharso, S.Si., Ph.D
NIP. 196905301995121001

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA

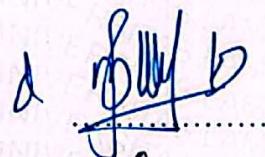
Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.
NIP. 197205302000032001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

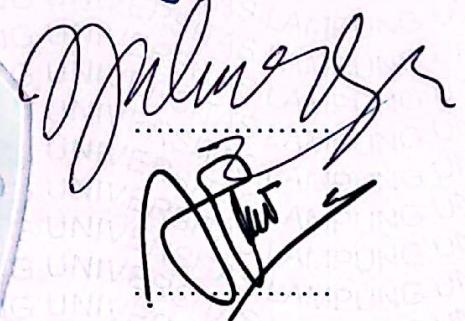
Ketua

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



Sekretaris

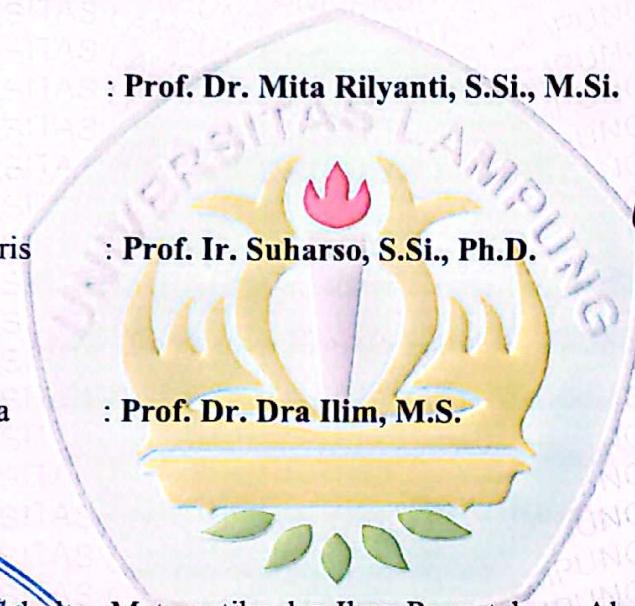
: Prof. Ir. Suharso, S.Si., Ph.D.



Anggota

: Prof. Dr. Dra Ilim, M.S.





2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam




Dr. Eng. Heri Satria, M.Si.

NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 27 November 2025

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Aprilia Sashya Kirana
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117011015
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul **“Pengaruh Modifikasi Logam Ti terhadap Kinerja Katalitik ZSM-5 Berbasis Silika Ampas Tebu pada Reaksi Dehidrasi Metanol Menghasilkan Dimetil Eter”** adalah benar karya sendiri dan saya tidak keberatan jika data dalam skripsi ini digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi sesuai dengan kesepakatan sebelum dilakukan publikasi.

Bandar Lampung, 28 November 2025

Yang Menyatakan



Aprilia Sashya Kirana

NPM. 2117011015

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Aprilia Sashya Kirana, lahir di Sleman pada tanggal 28 April 2003. Penulis merupakan anak kedua dari empat bersaudara dari pasangan Bapak Mugiharto dan Ibu Tri Muryanti. Penulis memiliki tiga saudara kandung bernama Adilla Aulia Puspita, David Wildan Fauzan, dan Dinda Kharisma Putri. Saat ini, penulis berdomisili di Kota Bandar Lampung. Penulis menyelesaikan pendidikan di SMP Negeri 29 Bandar Lampung pada 2015-2018. Pendidikan menengah atas diselesaikan di SMA Negeri 9 Bandar Lampung pada 2018-2021. Pada tahun 2021, penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Program Studi Kimia, Universitas Lampung, dan menyelesaikan studinya pada 2025.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif berorganisasi, di antaranya aktif dalam Kader Muda Himaki pada tahun 2021, kemudian sebagai anggota Biro Kesekretariatan Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) pada tahun 2022, serta anggota Bidang Akademik dan Riset di Rohani Islam (Rois) FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2022. Penulis juga mengikuti program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) Magang Industri di Dinas Lingkungan Hidup Kota Metro pada bulan September–Desember 2023, yang sekaligus menjadi pelaksanaan Praktik Kerja Lapangan (PKL). Pada bulan Juli–Agustus 2024, penulis melaksanakan kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) selama 40 hari di Desa Rajabasa Lama I, Kecamatan Labuhan Ratu, Kabupaten Lampung Timur. Selain itu, penulis pernah menjadi asisten praktikum Kimia Anorganik I dan merupakan penerima Beasiswa Adaro periode 2023–2025.

MOTTO

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.
Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. ”

(QS. Al-Insyirah: 6)

“Tidak ada yang didapatkan manusia kecuali dari apa yang ia
usahaikan. ”

(QS. An-Najm: 39)

“Pressure creates diamonds. ”

(Conon McGregor)

PERSEMBAHAN

Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang.
Dengan penuh rasa syukur, saya panjatkan puji ke hadirat Allah SWT. Berkat limpahan rahmat, petunjuk, dan kekuatan-Nya, saya dapat melalui setiap proses hingga akhirnya menyelesaikan karya tulis ini. Dengan segala kerendahan hati, karya ini saya persembahkan kepada:

Bapak dan Ibu tercinta

yang selalu menjadi cahaya dalam setiap langkah, tempatku kembali, sumber doa yang tak pernah putus, serta alasan terbesarku untuk terus berjuang dan menyelesaikan pendidikan ini.

Keluarga besarku, Mbak dan Adikku

yang selalu memberikan dukungan moral, perhatian, dan dorongan selama proses penyusunan skripsi ini

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

pembimbing yang dengan kebijaksanaan memberikan arahan, ilmu, dan kesabaran sepanjang proses penelitian dan penulisan karya ilmiah ini.

Seluruh Dosen Kimia FMIPA Universitas Lampung

Terima kasih atas segala pembelajaran dan ilmu yang diberikan.

Rekan-rekan perkuliahan

yang telah mengiringi langkahku dengan kebersamaan, dukungan, dan kenangan yang tidak akan terlupakan.

Almamater tercinta, Universitas Lampung

SANWACANA

Alhamdulillahirabbil 'alamin, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, nikmat, karunia, serta kasih sayang-Nya. Berkat izin-Nya, penulis masih diberikan kesehatan dan kekuatan sehingga dapat menyelesaikan skripsi berjudul “Pengaruh Modifikasi Logam Ti terhadap Kinerja Katalitik ZSM-5 Berbasis Silika Ampas Tebu pada Reaksi Dehidrasi Metanol Menghasilkan Dimetil Eter” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Jurusan Kimia Universitas Lampung. Proses penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari berbagai tantangan dan hambatan. Namun, dengan bimbingan, bantuan, serta dukungan dari banyak pihak, penulis mampu melalui setiap tahap dengan baik. Oleh karena itu, dengan penuh hormat dan ketulusan, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Mugiharto dan Ibu Tri Muryanti, yang telah mencintai penulis dengan cara yang membuat penulis tetap berdiri, bahkan saat penulis hampir menyerah. Skripsi ini adalah bukti bahwa dukungan dan cinta kalian lebih kuat dari semua rasa lelah penulis.
2. Keluarga penulis, Adilla Aulia Puspita, David Wildan Fauzan, dan Dinda Kharisma Putri, atas segala kebaikan, motivasi, dan doa. Kehadiran kalian membuat skripsi ini menjadi mungkin untuk penulis selesaikan.
3. Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing I. Terima kasih atas segala dukungan akademik, motivasi, dan bimbingan yang sangat berarti bagi penulis. Semoga segala kebaikan Ibu dibalas keberkahan dan kebaikan yang berlipat oleh Allah SWT.

4. Prof. Ir. Suharso, S.Si. Ph.D. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta ilmu yang begitu bermakna bagi penulis sepanjang proses penyusunan skripsi ini.
5. Prof. Dr. Dra Ilim, M.S. selaku dosen pembahas atas segala ilmu, saran, dan masukan yang diberikan berikan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
6. Dr. Dian Herasari, M.Si. selaku dosen pembahas atas setiap ilmu, nasihat, dan masukan yang telah diberikan yang menjadi bekal berharga bagi penulis.
7. Dr. Eng. Heri Satria, M.Si. selaku dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung yang telah membekali penulis dengan ilmu dan motivasi selama masa studi.
9. Seluruh staf administrasi dan pegawai di Jurusan Kimia, Dekanat Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung atas bantuan dalam berbagai urusan akademik, perkuliahan, penelitian, dan penyusunan skripsi sehingga proses studi ini dapat terselesaikan dengan baik.
10. Mba Liza Aprilia, S.Si. selaku laboran Laboratorium Kimia Anorganik/Fisik Jurusan Kimia FMIPA atas bantuannya selama penelitian.
11. Teman penelitian penulis, Camelia, Annisa Distiani, Alya Ambaryani Putri, dan Ramandhika Abi Karami. Terima kasih atas kerja sama, tawa, dan semangat yang selalu dibagikan sepanjang penelitian ini. Tanpa kalian perjalanan panjang ini tidak akan terasa sekuat dan seasyik ini.
12. Sahabat “SISTAR”, Kartika Fonda Yulius, Tiara Tabitha, dan Vio Marisa yang selalu ada di setiap jatuh bangunnya hidup penulis. Terima kasih selalu hadir dan merayakan setiap langkah kecil penulis.
13. Seorang teman penulis yang telah banyak membantu selama penyusunan skripsi ini. Terima kasih telah mewarnai hari penulis baik itu dengan warna terang maupun kelabu.
14. Kakak-kakak di Mita’s *research*: Kak Azizah, Kak Arip, Kak Putri, Kak Valen, dan Kak Surya atas segala bantuan, saran, dan motivasi untuk penulis.

15. Teman-teman Kimia Angkatan 2021, khususnya kelas C, atas segala pengalaman dan cerita yang mewarnai perjalanan studi ini.
16. Seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan studi dan skripsi ini, yang tidak dapat disebutkan satu per satu.
17. Teruntuk penulis, terima kasih untuk terus berdiri, belajar, dan memperbaiki diri tanpa henti. Skripsi ini adalah hadiah kecil untuk keteguhan dan keberanian. Tetap semangat karena perjalanan ini masih panjang.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sepenuhnya sempurna. Dengan segala kerendahan hati, penulis memohon maaf atas kekurangannya dan mengharapkan kritik serta saran yang bersifat membangun untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga skripsi ini dapat memberi manfaat dan digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 28 November 2025
Penulis,

Aprilia Sashya Kirana

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	x
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	4
1.3 Manfaat Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Abu Ampas Tebu	5
2.2 Silika	6
2.3 Zeolit	7
2.4 Sintesis Zeolit	8
2.5 Metode Hidrotermal	10
2.6 <i>Zeolite Socony Mobile-5 (ZSM-5)</i>	12
2.7 Impregnasi Logam Ti	13
2.8 Katalis Heterogen	15
2.9 Metanol	16
2.10 Reaksi Dehidrasi	17
2.11 Dimetil Eter (DME)	18
2.12 Instrumen Karakterisasi	19
2.12.1 <i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i>	19
2.12.2 <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	20
2.12.3 <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	22
2.12.4 <i>Fourier Transform InfraRed (FTIR)</i>	22
2.12.5 <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)</i>	24
III. METODE PENELITIAN	26
3.1 Waktu dan Tempat	26
3.2 Alat dan Bahan	26
3.3 Prosedur Penelitian	27
3.3.1 Ekstraksi Silika dari Ampas Tebu	27
3.3.2 Karakterisasi Silika Hasil Ekstraksi	28
3.3.3 Sintesis Benih ZSM-5	28
3.3.4 Sintesis ZSM-5	29

3.3.5 Karakterisasi ZSM-5	32
3.3.6 Persiapan Katalis.....	32
3.3.7 Karakterisasi Ti/H-ZSM-5	33
3.3.8 Uji Aktivitas Katalitik.....	33
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	34
4.1 Ekstraksi Silika dari Abu Ampas Tebu	34
4.1.1 Preparasi Ampas Tebu	34
4.1.2 Preparasi Abu Ampas Tebu	35
4.1.3 Ekstraksi Silika	36
4.2 Karakterisasi Silika Hasil Ekstraksi	38
4.2.1 <i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i>	38
4.2.2 <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	39
4.2.3 <i>Fourier Transform Infrared (FTIR)</i>	41
4.3 Sintesis ZSM-5	42
4.3.1 Sintesis Benih ZSM-5	42
4.3.2 Sintesis ZSM-5 Silika LUDOX	43
4.3.2 Sintesis ZSM-5 Berbasis Silika SCBA	44
4.4 Karakterisasi ZSM-5 Hasil Sintesis	46
4.4.1 <i>X-Ray Diffraction (XRD) ZSM-5</i>	46
4.4.2 <i>X-Ray Fluorescence (XRF) ZSM-5</i>	48
4.4.3 <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	49
4.5 Persiapan H-ZSM-5.....	51
4.6 Impregnasi Logam Titanium (Ti)	52
4.7 Karakterisasi Ti/H-ZSM-5.....	53
4.8 Dehidrasi Metanol	54
4.9 Analisis Hasil Sintesis Dimetil Eter	55
V. SIMPULAN DAN SARAN.....	61
5.1 Simpulan	61
5.2 Saran	62
DAFTAR PUSTAKA.....	63
LAMPIRAN.....	73

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi dari SCBA.....	20
2. Komposisi molar pereaksi benih ZSM-5	28
3. Perhitungan komposisi molar pereaksi benih ZSM-5.....	29
4. Komposisi molar pereaksi ZSM-5 sumber silika LUDOX.....	30
5. Perhitungan komposisi molar pereaksi ZSM-5 sumber silika LUDOX	30
6. Komposisi pereaksi molar untuk sintesis ZSM-5 silika SCBA	32
7. Perhitungan molar pereaksi untuk sintesis ZSM-5 silika SCBA	32
8. Perbandingan komponen dalam silika SCBA tanpa dan dengan dealuminasi .	39
9. Komposisi benih ZSM-5, ZSM-5 silika LUDOX, dan ZSM-5 silika SCBA ...	48
10. Komposisi Ti/H-ZSM-5 silika LUDOX dan Ti/H-ZSM-5 silika SCBA.....	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Abu ampas tebu.....	6
2. Struktur silika.....	6
3. Kerangka zeolit tetrahedral TO_4 tiga dimensi.....	8
4. Metode ionotermal, solvotermal, dan hidrotermal sintesis zeolit	11
5. Struktur tiga dimensi ZSM-5	13
6. Struktur DME.....	18
7. Difraktogram silika SCBA.....	21
8. Difraktogram ZSM-5 sintesis	21
9. Spektra FTIR silika SCBA.....	23
10. Spektrum massa DME	25
11. Ampas tebu sebelum dicuci (a), perendaman dengan larutan HNO_3 2,5% (b), dan proses pengeringan (c)	35
12. Abu ampas tebu.....	36
13. Proses ekstraksi silika SCBA, perendaman dengan larutan NaOH 2M (a), pemisahan natrium silikat dari abu ampas tebu (b), pembentukan hidrogel silika (c), padatan silika SCBA (d)	37
14. Silika berbasis SCBA.....	38
15. Difraktogram silika SCBA hasil ekstraksi	40
16. Spektrum FTIR silika SCBA	41
17. Pencampuran prekursor benih ZSM-5 (a), hasil padatan setelah proses hidrotermal (b), proses penyaringan filtrat (c), dan padatan benih ZSM-5 (d)	43
18. Pencampuran prekursor ZSM-5 berbasis silika LUDOX (a), hasil padatan setelah proses hidrotermal (b), proses penyaringan filtrat (c), dan padatan ZSM-5 LUDOX (d)	44

19. Pencampuran prekursor ZSM-5 berbasis silika SCBA (a), hasil padatan setelah proses hidrotermal (b), proses penyaringan filtrat (c), dan padatan ZSM-5 SCBA (d)	45
20. ZSM-5 berbasis silika SCBA	46
21. Difraktogram ZSM-5 standar (a), zeolit analsim standar (b), benih ZSM-5 (c), ZSM-5 silika LUDOX (d), dan ZSM-5 silika SCBA (e)	47
22. Morfologi ZSM-5 silika SCBA	50
23. Distribusi ukuran partikel ZSM-5 silika SCBA	50
24. Katalis Ti/H-ZSM-5 silika SCBA	52
25. Sintesis DME menggunakan teflon autoklaf (a), filtrat hasil sintesis DME menggunakan H-ZSM-5 silika LUDOX (b), filtrat hasil sintesis DME menggunakan Ti/H-ZSM-5 silika LUDOX (c) filtrat hasil sintesis DME menggunakan Ti/H-ZSM-5 silika SCBA (d)	55
26. Kromatogram hasil sintesis DME dengan H-ZSM-5 silika LUDOX (a), spektrum massa puncak kromatogram (b)	56
27. Kromatogram hasil sintesis DME dengan Ti/H-ZSM-5 silika LUDOX (a), spektrum massa puncak satu kromatogram (b), dan spektrum massa puncak dua kromatogram (c)	57
28. Kromatogram hasil sintesis DME dengan Ti/H-ZSM-5 silika SCBA (a), spektrum massa puncak satu kromatogram (b), dan spektrum massa puncak dua kromatogram (c)	58
29. Perbandingan hasil konversi metanol	59
30. Perbandingan persen rendemen DME	59

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Perhitungan dan Data Analisis Silika SCBA	74
2. Perhitungan dan Data Analisis ZSM-5 Hasil Sintesis	77
3. Perhitungan dan Data Analisis Sintesis DME.....	83

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sektor perkebunan memiliki peranan penting dalam mendukung produksi gula nasional. Menurut data Badan Pusat Statistik tahun 2023, Provinsi Lampung menempati posisi kedua sebagai daerah penghasil gula terbesar nasional.

Banyaknya industri gula berbahan dasar tebu di Provinsi Lampung mengakibatkan limbah ampas tebu yang dihasilkan turut melimpah. Selama ini, ampas tebu dimanfaatkan sebagai bahan bakar pada ketel uap maupun bahan bakar tungku pada produksi gula (Mubin dan Fitriadi, 2005). Namun, penelitian yang dilakukan Purnawan *et al.* (2018) menunjukkan bahwa pemanfaatan ampas tebu akan lebih meningkat jika dijadikan abu ampas tebu atau *sugarcane bagasse ash* (SCBA). Ampas tebu yang telah diabukan mengandung oksida-oksida anorganik yaitu SiO_2 71; Al_2O_3 1,9; Fe_2O_3 7,8; CaO 3,4; MgO 0,3; K_2O 8,2; P_2O_5 3; dan MnO 0,2% (Sriatun *et al.*, 2015). Penelitian yang telah dilakukan oleh Rilyanti *et al.* (2020) berhasil mengekstraksi silika amorf sebesar 85,5% dan alumina sebesar 12% dari abu ampas tebu dengan metode alkali. Kandungan senyawa silika yang tinggi pada kandungan abu ampas tebu dapat digunakan sebagai sumber silika alternatif untuk sintesis material berbasis silika misalnya zeolit (Moisés *et al.*, 2013).

Zeolit merupakan kristal aluminosilikat dari alkali dan alkali tanah yang tersusun atas $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$, serta membentuk struktur tetrahedral dengan kerangka anorganik bermuatan negatif (Wang *et al.*, 2018). Zeolit memiliki pusat asam Bronsted dan Lewis yang aktif serta sangat stabil terhadap kondisi kimia dan panas. Struktur zeolit ialah kerangka tiga dimensi dan pori berukuran mikro (3-15

Å). Pori-pori yang dimiliki zeolit membuatnya memiliki luas permukaan yang besar. Zeolit dapat dikategorikan ke dalam beberapa jenis. Berdasarkan proses terbentuknya, zeolit dibedakan menjadi zeolit alam dan zeolit sintetik. Jenis zeolit yang sering dipilih dalam industri adalah jenis zeolit sintetik karena memiliki kemurnian dan struktur kristal yang baik (Hidayat *et al.*, 2019). Dari beragam zeolit sintetik, *Zeolite Socony Mobile-5* (ZSM-5) ialah jenis yang paling umum digunakan.

Zeolit ZSM-5 adalah jenis zeolit yang memiliki struktur pori dengan ukuran sedang, kandungan silika yang dominan, perbandingan silika terhadap aluminium yang tinggi (10-100), dan diameter pori sekitar 0,54-0,56 nm (Narayanan *et al.*, 2020). Kerangka zeolit ZSM-5 terdiri dari dua sistem saluran 10-cincin yang saling terhubung secara tegak lurus; satu lurus dengan bentuk elips dan dimensi 0,51-0,54 nm dan yang lainnya adalah sinusoidal dengan bukaan pori hampir melingkar dan dimensi 0,54-0,56 nm (Zhang *et al.*, 2020). ZSM-5 termasuk salah satu katalis yang banyak digunakan dalam berbagai reaksi karena sifatnya yang unggul dibanding jenis katalis lain seperti jenis kerangka *Mobile Five Instructure* (MFI), sifat hidrofobik yang baik, stabilitas hidrotermal tinggi, struktur pori unik, rasio silika-aluminium tinggi, dan memiliki selektivitas yang baik. Namun, rasio Si/Al yang tinggi pada ZSM-5 menyebabkan jumlah situs asam relatif rendah. Upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan aktivitas katalitik ZSM-5 salah satunya dengan penambahan logam. Penambahan logam pada struktur ZSM-5 dapat meningkatkan situs asam sehingga keasamannya meningkat (Aspromonte *et al.*, 2019).

Telah banyak penelitian menyelidiki impregnasi logam ke dalam ZSM-5 yang menyediakan cara efektif untuk mengatur kekuatan dan kepadatan situs asam dalam zeolit secara tepat (Ding *et al.*, 2020). Metode impregnasi umumnya menggunakan logam-logam transisi sebagai bahan utamanya (Thue *et al.*, 2017). Logam transisi dipilih karena logam transisi menyediakan orbital d yang tidak terisi penuh mampu membentuk situs asam Lewis yang kuat, sehingga sangat efektif dalam mengadsorpsi reaktan dan mempercepat reaksi (Handoko *et al.*,

2009). Impregnasi logam transisi pada ZSM-5 terbukti efektif dalam meningkatkan laju dan efisiensi reaksi-reaksi kimia (Anekwe *et al.*, 2024). Titanium (Ti) adalah salah satu logam transisi yang sering digunakan karena sifat katalitiknya. Titanium memiliki sifat keasaman yang didominasi oleh situs asam Lewis, di mana ion Ti^{4+} bertindak sebagai akseptor pasangan elektron (Bagheri *et al.*, 2014). Sifat inilah yang membuat Ti mampu berperan aktif dalam meningkatkan keasaman katalis, sehingga ZSM-5 termodifikasi Ti banyak diaplikasikan pada berbagai reaksi kimia, termasuk reaksi dehidrasi metanol untuk menghasilkan dimetil eter (DME).

Dimetil eter, CH_3OCH_3 , adalah eter paling sederhana dan tidak mengandung ikatan C-C. Dalam sistem energi, DME dimanfaatkan dalam turbin gas untuk menghasilkan listrik (Lee *et al.*, 2009) serta berperan sebagai pembawa hidrogen yang lebih mudah disimpan dan diangkut dibandingkan hidrogen murni, dengan efisiensi tinggi bersama metanol selama proses *steam reforming* menjadi H_2 (Catizzone *et al.*, 2021). Selain itu, DME juga diproyeksikan memainkan peran penting sebagai perantara kimia maupun bahan baku dalam produksi metanol–DME di masa depan (Haro *et al.*, 2013). Sebagai biofuel, DME telah dipertimbangkan oleh *International Renewable Energy Agency* (IRENA) sebagai alternatif pengganti bahan bakar fosil konvensional karena lebih ramah lingkungan dan memiliki sumber bahan baku yang melimpah. Dengan potensi tersebut, pengembangan katalis yang efisien seperti ZSM-5 menjadi penting untuk mendukung sintesis DME secara berkelanjutan sebagai solusi terhadap meningkatnya kebutuhan energi global (Rahman *et al.*, 2023).

Berdasarkan penjelasan yang telah dipaparkan, penelitian ini mensintesis ZSM-5 dari silika yang diekstraksi dari ampas tebu menggunakan metode hidrotermal yang diimpregnasi dengan logam Titanium (Ti). Setelah memperoleh Ti/H-ZSM-5, aktivitas katalitiknya diuji pada reaksi dehidrasi metanol menghasilkan DME.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memperoleh silika melalui proses ekstraksi SCBA yang digunakan sebagai prekursor dalam mensintesis ZSM-5.
2. Memperoleh ZSM-5 dari silika SCBA dan ZSM-5 hasil impregnasi logam Ti.
3. Mempelajari hasil aktivitas katalitik ZSM-5 sebagai katalis pada reaksi dehidrasi metanol.

1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Penelitian ini tidak hanya memberikan informasi ilmiah, tetapi juga meningkatkan penggunaan ampas tebu sebagai sumber silika-alumina yang ramah lingkungan untuk sintesis ZSM-5. Selain itu, ampas tebu dapat digunakan sebagai katalis untuk proses mengubah metanol menjadi DME. Sehingga, dapat meningkatkan nilai moneter dari pemanfaatan ampas tebu dalam sektor pertanian dan industri.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Abu Ampas Tebu

Abu ampas tebu, juga dikenal sebagai SCBA, dihasilkan dari pembakaran ampas tebu. Menurut Organisasi Pangan dan Pertanian Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), tebu merupakan tanaman paling produktif di seluruh dunia, menghasilkan total produksi sebesar 1,87 miliar ton per tahun pada 2020. Satu ton ampas tebu dapat menghasilkan sekitar 25-40 kg SCBA (Zhang *et al.*, 2020). Jumlah SCBA yang terus bertambah sering kali dibuang di daerah sekitar dan belum dimanfaatkan secara efisien. Pembuangan limbah pertanian atau industri akan menyebabkan pencemaran air dan air tanah. Abu ampas tebu mengandung silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan oksida besi (Fe_2O_3) dalam jumlah yang signifikan (lebih dari 70%) (Piedrahita *et al.*, 2016). Pada saat ini masih banyak industri yang belum dapat mengembangkan produk-produk berbahan dasar ampas tebu. Beberapa peneliti melakukan identifikasi terhadap kandungan abu ampas tebu yang ternyata memiliki silika yang cukup tinggi. Affandi *et al.* (2009) menyatakan abu ampas tebu dapat digunakan sebagai bahan baku untuk membuat silika gel. *Bagasse* yang telah diabukan juga mengandung oksida-oksida anorganik, seperti SiO_2 71; Al_2O_3 1,9; Fe_2O_3 7,8; CaO 3,4; MgO 0,3; K_2O 8,2; P_2O_5 3; dan MnO 0,2% (Sriatun *et al.*, 2015). Penelitian yang telah dilakukan oleh Rilyanti *et al.* (2020) berhasil mengekstraksi silika amorf sebesar 85,5% dan alumina sebesar 12% dari abu ampas tebu dengan metode alkali. Gambar abu ampas tebu dapat dilihat pada Gambar 1.

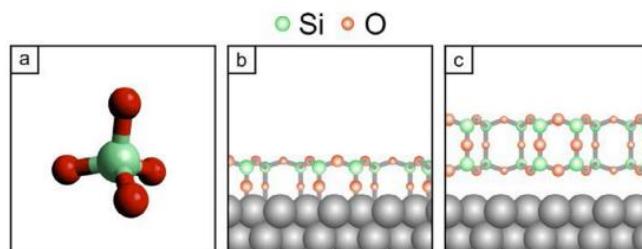


Gambar 1. Abu ampas tebu (Rajasekar *et al.*, 2018)

Abu ampas tebu dihasilkan dengan membakar ampas tebu pada suhu antara 500 hingga 600 °C. Menurut Hanafi dan Nandang (2010), derajat kekristalan SiO_2 rendah pada pembakaran ampas tebu pada suhu antara 500 dan 600 °C, yang menunjukkan bahwa fasa amorf lebih dominan daripada fasa kristalin.

2.2 Silika

Silika (SiO_2) adalah material berpori yang terdiri dari atom silikon dan oksigen. Silika, juga dikenal sebagai kuarsa (*quartz*), adalah mineral yang sangat umum di permukaan kerak bumi. Silika rumus kimia Si memiliki kekerasan yang sangat tinggi dan sangat tahan terhadap asam. Meskipun silika selalu terikat secara tetrahedral pada empat atom oksigen, ikatannya sangat ionik. Karena sifat elektronegatif atom oksigen pada silika, kerapatan elektronnya dapat sebagian ditransfer ke atom oksigen. Akibatnya, silika terikat kovalen ke dalam struktur tetrahedral yang terdiri dari empat atom oksigen. Sudut ikatan yang terbentuk pada struktur silika (O-Si-O) adalah 109° dan struktur Si-O-Si adalah 145°, dan jarak antara atom Si-O adalah 1,61 Å (0,16 nm) (Sunarya, 2019). Sifat unik silika berasal dari jembatan oksigen yang terletak di antara atom silikon.



Gambar 2. Struktur silika (Büchner and Heyde, 2017)

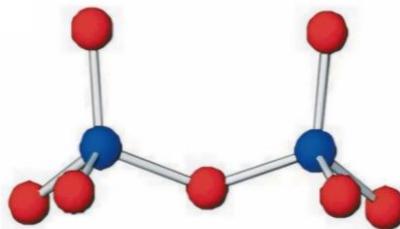
Gambar struktur silika ditunjukkan pada Gambar 2. Silika terdiri dari satuan struktur primer tetrahedral silikat SiO_4^{4-} , di mana satu atom Si^{4+} dikelilingi oleh empat atom oksigen (O) yang terikat secara ionik dan kovalen. Karakteristik silika termasuk titik lebur yang tinggi, ketahanan terhadap baik asam maupun basa, dan tidak larut dalam air. Selain itu, silika tidak reaktif terhadap asam kecuali asam hidrofluorida dan asam phospat, dan dapat bereaksi dengan basa, terutama basa yang kuat seperti hidroksida alkali (Katsuki, 2005).

Berdasarkan bentuknya, silika biasanya dibagi menjadi dua jenis yaitu kristalin dan amorf. Perbedaan yang paling umum dari kedua jenis ini adalah silika kristalin dibuat dari silika alami yang banyak ditemukan di alam, seperti batuan bumi, pasir, granit, dan abu vulkanik. Bentuk amorf termasuk kuarsa (*quartz*), tridymite, dan kristobalit. Sementara silika amorf berasal dari produk sampingan bahan alami dan sintetik, seperti *fused silica* dan *fume silica*. Bahan alami termasuk kalsin dan flux kalsinasi, dan bahan sintetik termasuk sekam padi, ampas tebu, dan sebagainya (Boinski *et al.*, 2010). Karena kecenderungannya untuk bereaksi ke bentuk yang lebih stabil dengan kadar bebas energi yang lebih rendah, silika amorf lebih reaktif daripada silika kristal.

2.3 Zeolit

Zeolit merupakan aluminosilikat kristal dengan kerangka anorganik bermuatan negatif (Wang *et al.*, 2018). Kerangka ini terdiri dari pori-pori yang ditandai dengan diameter bukaan, dan saluran intra-kristal dengan geometri karakteristik, dan arsitektur yang terdiri dari kation bergerak dan dapat dipertukarkan untuk mengimbangi muatan negatif. Kerangka zeolit terdiri dari tetrahedra TO_4 tiga dimensi tak terbatas (T umumnya mewakili unsur aluminium atau silikon) yang terhubung satu sama lain dengan berbagi atom oksigen (Khaleque *et al.*, 2020). Unit pembangun utama untuk kerangka zeolit aluminosilikat adalah tetrahedra $[\text{SiO}_4]$ dan $[\text{AlO}_4]$, sehingga mereka adalah unit pembangun primer, dapat dilihat pada Gambar 3. Unit pembangun sekunder tidak pernah kiral dan dapat

menampung hingga 16 atom T. Cincin dapat dikombinasikan untuk membentuk sangkar atau rongga komposit.



Gambar 3. Kerangka zeolit tetrahedral TO_4 tiga dimensi (Deepak *et al.*, 2015)

Zeolit adalah salah satu katalis yang paling umum untuk dehidrasi metanol. Dalam beberapa tahun terakhir, zeolit telah menarik perhatian para ilmuwan karena sifat spesifik mereka. Zeolit silika murni memiliki kerangka elektrik netral, dan substitusi butisomorf satu atom Si dengan satu atom Al menghasilkan muatan negatif, yang dapat diseimbangkan dengan satu proton (H) untuk membentuk Situs asam Brønsted. Oleh karena itu, situs distribusi asam pada zeolit kerangka sangat dekat dengan lokasi Al. Ini menyebabkan lingkungan reaksi yang berbeda, yang mencakup reaksi ruang dan kemampuan aktivasi situs asam. Akibatnya, ada perbedaan kinerja katalitik yang signifikan (Wang *et al.*, 2018).

2.4 Sintesis Zeolit

Zeolit sintetis sangat murni dengan ukuran kristal yang seragam dan berguna untuk aplikasi industri tertentu. Sebaliknya, zeolit alami mengandung berbagai bahan asing yang tidak memiliki ukuran kristal yang seragam. Zeolit alami membutuhkan waktu beberapa hari hingga puluhan tahun untuk dibuat, sementara zeolit sintetis dapat disiapkan di laboratorium dari beberapa jam hingga beberapa hari dengan ukuran pori yang dapat dikontrol, karakteristik permukaan adsorben, dan stabilitas termal yang sangat baik. Namun, dengan biaya yang sedikit lebih tinggi, ini menghasilkan produk yang jauh lebih seragam daripada zeolit alami. Ukuran kristal zeolit sintetis biasanya ditemukan dalam kisaran $1,0\text{--}10,0\text{ }\mu\text{m}$ sementara kepadatannya bervariasi antara $2,0$ hingga $23,0\text{ g/cm}^3$. Berat jenis

zeolit sintetis berkisar antara 0,80 dan 0,90 g/cm³. Secara optik, indeks bias zeolit sintetis berkisar antara 1,47 dan 1,52. Zeolit memiliki kapasitas penyerapan air sebesar 45,0 hingga 75,0 mL/100 g (Smit *and* Maesen, 2008). Stabilitas termal dapat dicapai pada tahap yang diinginkan dengan mengurangi kandungan Al atau lebih tinggi dengan mempertahankan rasio Si/Al yang lebih tinggi.

Secara komersial, zeolit sintetis digunakan dalam jumlah besar daripada zeolit alami karena karena memiliki kemurnian dan struktur kristal yang baik (Hidayat *et al.*, 2019). Selain itu, zeolit sintetis dibuat secara komersial untuk penggunaan tertentu. Zeolit sintesis juga digunakan sebagai sensor kimia dalam kontrol proses industri, mitigasi lingkungan, termasuk penghilangan logam berat, penangkapan gas, pemantauan kualitas udara dalam ruangan, pemantauan medis dan masih banyak lagi. Oleh karena itu, zeolit sintetis telah menarik banyak minat di kalangan peneliti dan ilmuwan karena fleksibilitasnya yang tinggi dan kemampuan beradaptasi yang baik.

Zeolit sintetis menawarkan lebih banyak manfaat daripada zeolit alami. Misalnya, zeolit sintetis disukai untuk mengendalikan reaksi tertentu seperti pengendalian emisi N₂O. Selain itu, zeolit sintetis memiliki kemampuan yang sangat baik dalam pembuangan limbah radioaktif dibandingkan zeolit alami (Lonin, 2019), kapasitas penyerapan yang lebih besar untuk menghilangkan berbagai ion logam beracun, misalnya Cr³⁺, Ni²⁺, Zn²⁺, Cu²⁺, dan Cd²⁺. Lebih jauh lagi, zeolit sintetis memiliki volume pori yang lebih besar daripada zeolit alami, yang lebih baik untuk menjebak berbagai kontaminan dari udara dan air. Karena manfaat zeolit sintetis yang sangat besar dibandingkan zeolit lainnya, zeolit sintetis akan menggantikan zeolit alami untuk berbagai aplikasi.

Zeolit dapat disintesis dari berbagai bahan baku yang dapat berupa bahan alami maupun buatan manusia. Namun, tidak semua bahan baku cocok untuk mensintesis zeolit dari sudut pandang ekonomi. Oleh karena itu, bahan baku harus memiliki beberapa sifat. Bahan baku tersebut harus murah, mudah diperoleh, biaya produksi rendah, selektif, hasil produksi tinggi, dan sedikit mengandung zat asing. Hingga saat ini, berbagai metode fisikokimia dan solvotermal telah

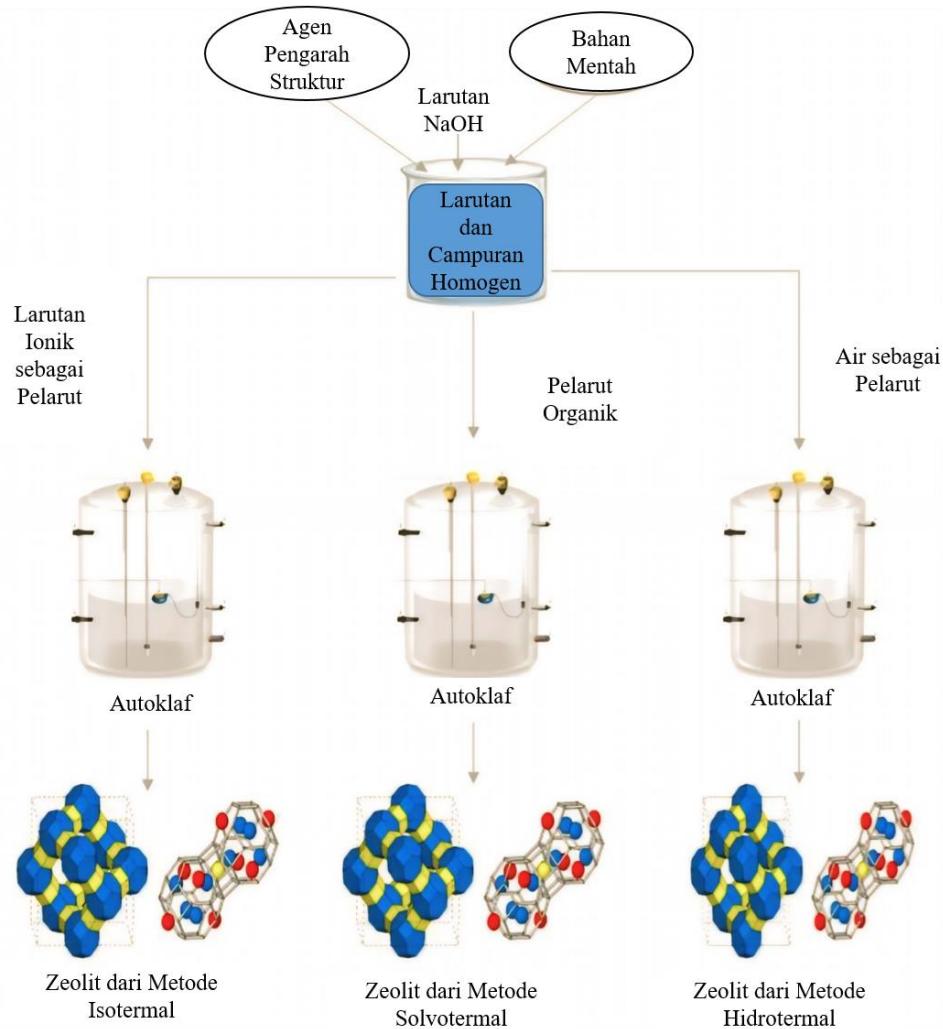
diadopsi dan dikembangkan untuk menghasilkan zeolit sintetis seperti metode hidrotermal, metode fusi alkali, metode sol-gel, dan metode pelindian alkali (Shoppert *et al.*, 2017).

2.5 Metode Hidrotermal

Metode hidrotermal sejalan dengan solvotermal di mana air digunakan sebagai pelarut, dan basa digunakan sebagai mineralizer pada suhu dan tekanan yang berbeda, perbedaannya dapat dilihat pada Gambar 4. Secara konvensional, sintesis hidrotermal perlu menggunakan bejana tertutup yang biasanya terbuat dari polipropilena dan baja berlapis teflon (PTFE) (Sangeetha *and* Baskar, 2016).

Dalam metode ini, diperlukan suhu yang lebih rendah. Itulah sebabnya, metode ini sangat mudah dan lebih murah dibandingkan dengan metode lainnya. Zeolit biasanya disintesis melalui pendekatan hidrotermal karena beberapa keuntungan yang meliputi konsumsi energi rendah, reaktivitas reaktan yang tinggi, perawatan mudah atas larutan, polusi udara lebih rendah, pembentukan fase metastabil dan fase terkondensasi unik (Wu *et al.*, 2006). Ada banyak faktor yang dapat memengaruhi kinerja metode hidrotermal apa pun, misalnya suhu dan tekanan, komposisi batch, rasio silika dan aluminium, bahan reaktan, alkalinitas keseluruhan, waktu penuaan, kondisi templat, dan penyemaian (Johnson *and* Arshad, 2014). Hingga saat ini, telah ada beberapa upaya sebelumnya untuk mensintesis zeolit melalui metode hidrotermal konvensional. Misalnya, Wang *et al.* (2007) menggambarkan persiapan zeolit sintetis (yaitu, ZSM-5) dari perlit yang mengembang (atau kaolin) melalui metode hidrotermal. Kelompok penelitian lain mengembangkan zeolit berstruktur hierarkis yang berbeda (BEA, LTA, FAU) melalui pendekatan hidrotermal konvensional (Chen *et al.*, 2011).

Keuntungan dari proses ini adalah tidak memerlukan pra-perlakuan untuk aktivasi atau penghilangan komponen berbahaya. Namun, metode hidrotermal konvensional tidak memenuhi persyaratan keberlanjutan yang ketat.



Gambar 4. Metode ionotermal, solvotermal, dan hidrotermal sintesis zeolit (Khaleque *et al.*, 2020)

Meng dan Xiao (2014) melaporkan, dengan menggunakan agen pengaruh struktural, mereka merakit dan mengisi volume pori zeolit yang disintesis secara langsung yang secara konstan membutuhkan pembakaran suhu tinggi untuk dihilangkan. Oleh karena itu, ada kemungkinan besar produksi gas berbahaya dan gas rumah kaca karena pembakaran suhu tinggi. Pendekatan sintesis hidrotermal konvensional sering dipandang sebagai metode konsumsi energi tinggi karena membutuhkan waktu yang lama (1–20 hari) untuk produksi akhir. Selain itu, dalam metode hidrotermal konvensional, pengendalian nukleasi sulit dilakukan karena pencampuran yang lambat sehingga nukleasi yang tidak terkendali menyebabkan pembentukan ukuran kristal yang lebih besar (Li, 2006). Meskipun,

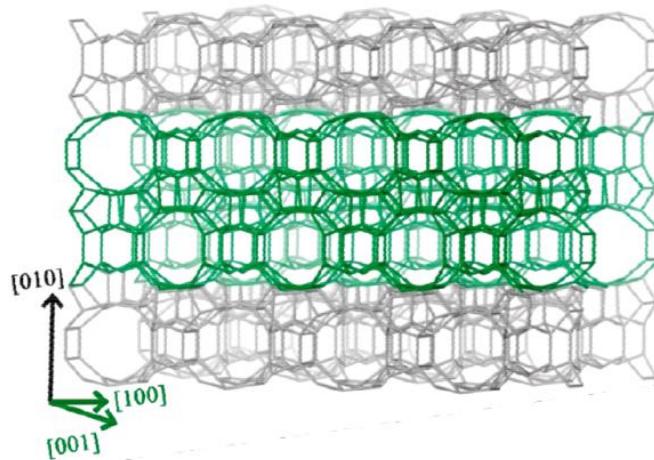
pengaduk digunakan untuk mengatasi masalah tersebut, tetapi pengaduk hanya mendorong gerakan lapisan makroskopis sehingga pencampuran di dalam lapisan bergantung pada difusi molekul reaktan yang lambat. Untuk mengatasi keterbatasan strategi hidrotermal konvensional yang disebutkan di atas untuk sintesis zeolit, peneliti telah mengembangkan berbagai cara untuk strategi sintesis yang berkelanjutan seperti metode hidrotermal berbantuan gelombang mikro, metode hidrotermal fusi alkali, metode hidrotermal berbantuan fusi alkali pencernaan gelombang mikro, dan metode hidrotermal berbantuan ultrasonik (Jusoh *et al.*, 2017).

2.6 Zeolite Socony Mobile-5 (ZSM-5)

Penggunaan senyawa organik yang terstruktur ke dalam sintesis zeolit telah memungkinkan pengaturan porositas material, peningkatan kandungan silikon, sintesis yang diarahkan ke struktur tertentu, dan bahkan penemuan topologi zeolitik baru. Hal ini terjadi pada ZSM-5, yang dipatenkan oleh *Mobile Oil Corporation* pada tahun 1972 sebagai hasil kerja Argauer dan Landolt dengan menggabungkan tetrapropilamonium hidroksida (TPAOH) dalam sintesis hidrotermal. Saringan molekuler ini mengandung banyak silikon dan memiliki saluran yang terhubung lurus sejajar dengan sumbu [010] dan sinusoidal sejajar dengan sumbu [100] dengan dimensi masing-masing $0,53 \times 0,56 \text{ nm}^2$ dan $0,51 \times 0,55 \text{ nm}^2$ (Smolin, 2020). Paten tersebut menunjukkan bahwa komposisi ZSM-5 dapat dikenali menggunakan rasio molar (rasio Si/Al). Penemuan ZSM-5 dianggap sebagai momen penting dalam sejarah sintesis zeolit hidrotermal. ZSM-5 adalah zeolit yang paling banyak diteliti karena pentingnya dalam industri petrokimia dan kimia halus (Mevawala *et al.*, 2019).

Rasio Si/Al dan Na/Al sangat penting dalam sintesis ZSM-5. ZSM-5 sintetis kasar yang mengandung agen penataan organik mengkristal dalam sistem ortorombik dan terdiri dari 96 tetrahedra yang membentuk jaringan tiga dimensi. Parameter mesh adalah sebagai berikut: $a = 20,1 \text{ \AA}$, $b = 19,7 \text{ \AA}$, $c = 13,1 \text{ \AA}$, dan $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (Smolin, 2020). Lapisan tetrahedra TO_4 rentan terhadap distorsi dan

perpindahan kecil. Karakteristik ini menunjukkan kemampuan adaptasi ZSM-5, karena dapat memodifikasi simetri dan struktur kristalnya. Ketika rasio Si/Al \leq 85, zeolit ZSM-5 mempertahankan simetri ortorombiknya setelah kalsinasi, dan ketika rasio Si/Al lebih besar dari 85, ia mengadopsi simetri monoklinik. Hanya translasi lapisan tetrahedron dan, sebagai hasilnya, fluktuasi sederhana parameter kisi tergantung pada suhu dan komposisi kimia yang membedakan bentuk polimorfik ini. Pada persimpangan bidang (100) dan (010), perubahan dari simetri ortorombik menjadi monoklinik mengurangi jarak antara ikatan Si-O sambil meningkatkan nilai sudut Si-O-Si (Larson *et al.*, (2003)). ZSM-5 yang diproduksi dalam media terfluorinasi dengan rasio Si/Al > 2000 dapat bertransisi dari bentuk ortorombik ke bentuk monoklinik pada suhu 175 K, mirip dengan zeolit yang dikalsinasi (Clausen *et al.*, 2010). Struktur tiga dimensi dari ZSM-5 dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Struktur tiga dimensi ZSM-5 (Shamzhy *et al.*, 2021)

2.7 Impregnasi Logam Ti

Saat ini, katalis yang digunakan terutama dibagi menjadi katalis berpenyangga dan katalis yang tidak berpenyangga. Pilihan penyangga untuk katalis yang perbenyangga merupakan faktor penting yang mempengaruhi efisiensi aktivitas katalitik. Penyangga yang tepat dapat memfasilitasi pembentukan pusat reaksi yang sangat aktif selain menawarkan situs reaksi yang cukup. Struktur MFI yang

dimiliki molekul ZSM-5 dianggap sebagai salah satu karakteristik terbaik untuk aktivitas katalitik karena struktur kerangkanya yang stabil, luas permukaan spesifik yang tinggi, dan sejumlah besar saluran tiga dimensi. Karakteristik ini dapat menyediakan ruang reaksi yang cukup, dan yang mendukung dispersi oksida logam aktif dan difusi gas reaksi (Zhu *et al.*, 2015). Telah banyak penelitian menyelidiki impregnasi logam ke dalam ZSM-5, yang menyediakan cara efektif untuk mengatur kekuatan dan kepadatan situs asam dalam zeolit secara tepat (Ding *et al.*, 2020). Metode impregnasi umumnya menggunakan logam-logam transisi sebagai bahan utamanya (Thue *et al.*, 2017). Logam transisi dipilih karena logam transisi menyediakan orbital d yang tidak terisi penuh mampu membentuk situs asam Lewis yang kuat, sehingga sangat efektif dalam mengadsorpsi reaktan dan mempercepat reaksi (Handoko *et al.*, 2009). Impregnasi logam transisi pada ZSM-5 terbukti efektif dalam meningkatkan laju dan efisiensi reaksi-reaksi kimia (Anekwe *et al.*, 2024).

Titanium (Ti) adalah salah satu logam transisi yang sering digunakan karena sifat katalitiknya. Ti tidak bersifat toksik dan memiliki stabilitas pada temperatur tinggi, sehingga dapat digunakan berkali-kali tanpa kehilangan kereaktifannya (Bani dkk., 2024). Modifikasi keasaman ZSM-5 dapat mengubah distribusi produk dalam banyak reaksi (Zhao *et al.*, 2017). Penggunaan metode impregnasi dengan nitrat logam untuk memodifikasi keasaman akan mengakibatkan penurunan diameter pori. Titanium memiliki sifat keasaman yang didominasi oleh situs asam Lewis, di mana ion Ti^{4+} bertindak sebagai akseptor pasangan elektron (Bagheri *et al.*, 2014). Penelitian mencatat bahwa Ti dapat menggantikan Si pada situs kerangka tetrahedral untuk membentuk TS-1 dengan topologi MFI dan Al dapat bergabung dengan Ti secara bersamaan ke dalam kerangka TS-1 untuk membentuk katalis dengan bifungsi. Secara khusus, Ti tidak dapat membentuk situs asam Brönsted (Shen *et al.*, 2013).

2.8 Katalis Heterogen

Katalis adalah zat yang meningkatkan laju reaksi tanpa mengalami perubahan permanen dan tetap hadir pada akhir reaksi. Secara umum, katalis melakukan tiga peran: (1) aktivasi untuk meningkatkan laju reaksi; (2) selektivitas untuk mengarahkan suatu reaksi untuk menghasilkan produk tertentu; dan (3) stabilitas untuk mencegah deaktivasi katalis (Deutschmann *et al.*, 2009). Katalis termasuk dalam dua kelompok utama: katalis homogen dan katalis heterogen. Katalis homogen adalah katalis dimana fasa reaktan dan fasa katalis sama atau dapat dikatakan berada dalam satu fasa, misalnya dalam suatu fasa tunggal cair atau gas. Hal ini mengakibatkan proses pemisahan katalis dengan reaktan menjadi sulit sehingga menghambat penggunaannya dalam skala industri. Berbeda dengan katalis heterogen cenderung lebih mudah dipisahkan dan dapat digunakan kembali, dikarenakan fasa antara reaktan dan katalis berbeda sehingga, lebih menguntungkan dibandingkan katalis homogen (Istadi, 2011).

Katalis heterogen adalah katalis di mana fasa antara katalis dan reaktan berbeda. Difusi dan penyerapan atau adsorpsi molekul reaktan pada permukaan katalis adalah cara katalisis terjadi. Sistem ini memungkinkan pemisahan reaktan dan aliran produk katalis yang mudah. Katalis heterogen juga dapat digunakan kembali. Selain itu, katalis heterogen cukup murah dan mudah diaktifkan untuk memperoleh sifat katalitik yang diinginkan, dan dapat digunakan dalam berbagai media dan aktivitas. Menurut Widi (2018), katalis heterogen lebih efektif dan efisien daripada katalis homogen.

Katalis heterogen sangat aktif dan selektif. Mereka dapat digunakan dalam kondisi reaksi yang kuat atau menggunakan suhu tinggi. Mereka mudah dipisahkan dari campuran reaksi, mudah digunakan, dan ramah lingkungan. Beberapa contoh katalis heterogen termasuk logam oksida seperti ZnO, NiO, TiO₂, MgO, zeolit seperti zeolit Y, zeolit β , zeolit mordenit, dan ZSM-5. Karena mikroporinya yang homogen, stabilitas termal yang tinggi, keasaman, dan kemampuan unik untuk menstabilkan spesies logam, zeolit banyak digunakan dalam bidang katalisis, adsorpsi, pemisahan dan pertukaran ion, dan membran

(Huang *and* Fu, 2013), dan memiliki kemampuan sebagai katalis asam untuk berbagai reaksi kimia. Zeolit ZSM-5 menjadi salah satu katalis yang banyak digunakan dalam berbagai reaksi karena sifatnya yang unggul dibanding jenis katalis lain seperti: jenis kerangka MFI (*Mobile Five Instructure*), rasio silika-aluminium tinggi, sifat hidrofobik yang baik, stabilitas hidrotermal tinggi, struktur pori unik, dan memiliki selektivitas yang baik (Liu *et al.*, 2019).

2.9 Metanol

Metanol, sering disebut sebagai metil alkohol atau alkohol kayu, adalah cairan transparan dan tanpa aroma yang mudah larut dalam air. Pada 64,6 °C metanol akan mendidih (Olah, 2005). Metanol memiliki berat molekul 32,043 g/mol. Metanol merupakan senyawa alkohol sederhana dengan rumus kimia CH_3OH . Metanol memiliki beberapa karakteristik fisik yang menonjol, antara lain berbau menyengat, dapat bercampur dengan air dan beberapa pelarut organik seperti aseton dan kloroform lebih ringan dari air, dan viskositasnya rendah, menunjukkan sifatnya yang mudah mengalir. Metanol memiliki sifat yang mudah menguap, tidak berwarna, mudah terbakar, dan bau yang beracun. Banyak industri kimia menggunakan metanol. Dimetil eter (DME) adalah turunan metanol lainnya yang digunakan untuk mengantikan klorofluorokarbon dalam aerosol dan asam asetat. Dimetil eter juga digunakan sebagai campuran dalam pembuatan gas *petroleum liquified* (LPG).

Bahan dasar untuk produksi metanol, urea, asam format, asam salisilat, karbonat siklik, etilen karbonat, dimetil karbamat, formaldehida, dan kopolimer adalah CO_2 . Salah satu cara terbaik untuk memanfaatkan gas berbahaya seperti itu adalah dengan memproduksi metanol dari CO_2 , karena memiliki banyak aplikasi dalam industri kimia. Meskipun secara industri layak untuk membuat metanol dan urea dari CO_2 , proses ini menggunakan sekitar 110 mt CO_2 per tahun. Salah satu cara terbaik untuk memanfaatkan gas berbahaya seperti itu adalah dengan memproduksi metanol dari CO_2 , karena memiliki banyak aplikasi dalam industri kimia. Seiring dengan produksi barang termasuk pernis, cat, formaldehida, asam

asetat, dimetil eter, metiltributil eter, dan beberapa produk pembersih, dapat digunakan sebagai pelarut dan reaktan untuk membuat beberapa bahan kimia yang berguna (Jadhav *et al.*, 2014). Metanol juga dalam permintaan yang lebih tinggi untuk aplikasi bahan bakar seperti pembuatan dimetilkarbonat (DMC), produksi biodiesel, pencampuran bensin langsung, dan potensi penyediaan penyimpanan energi konvensional untuk aplikasi sel bahan bakar karena emisinya yang lebih bersih dibandingkan dengan sumber bahan bakar fosil (Steinhauer *et al.*, 2009).

2.10 Reaksi Dehidrasi

Reaksi dehidrasi adalah reaksi yang melibatkan pelepasan molekul air dari senyawa yang bereaksi. Reaksi dehidrasi merupakan kebalikan dari reaksi hidrasi dan termasuk dalam kategori reaksi eliminasi yang dapat terjadi melalui mekanisme E1 atau E2, berdasarkan jenis alkohol (Gunawan dan Susanto, 2008). Pada dehidrasi alkohol, proton yang dilepaskan selama reaksi dapat berasal dari atom karbon yang berdekatan dengan atom karbon yang membawa, reaksi dehidrasi alkohol terkadang dapat menghasilkan lebih dari satu jenis alkena. gugus hidrokarbon (Primadevi dkk., 2015). Oleh karena itu, gugus hidroksil (-OH) tidak terlepas, penambahan katalis asam Bronsted membantu memprotonasi gugus hidroksil sehingga meningkatkan gugus lepasnya, yaitu $-\text{OH}_2^+$ (Rianto *et al.*, 2014).

Di antara berbagai reaksi dehidrasi yang terjadi pada alkohol dalam kimia organik adalah sebagai berikut:

1. Konversi alkohol menjadi eter

Reaksi ini terjadi ketika alkohol primer dipanaskan pada suhu 140 °C dengan katalis asam sulfat (H_2SO_4).

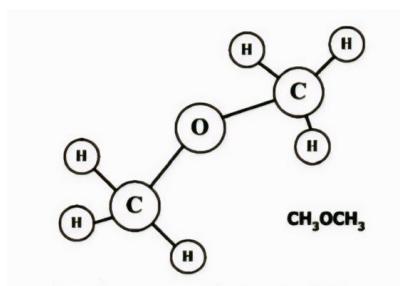
2. Konversi alkohol menjadi alkena

Ini adalah metode yang sederhana untuk membuat alkohol menjadi alkena. Bubuk aluminium oksida (alumina) yang dipanaskan akan pecah menjadi alkena dan uap air jika uap alkohol sekunder ditambahkan ke dalamnya. Selain itu, alkohol dapat dehidrasi menjadi alkena melalui reaksi dengan katalis asam sulfat (H_2SO_4).

Proses dehidrasi terjadi ketika molekul alkohol dipanaskan dengan katalis asam. Reaksi eliminasi dapat terjadi pada suhu yang cukup tinggi. Asam Bronsted, suatu molekul yang mampu mendonorkan proton seperti asam sulfat dan asam fosfat, adalah asam yang digunakan sebagai katalis (Solomons, 2004). Dalam proses dehidrasi metanol pada suhu rendah, molekul methanol pertama kali teradsorpsi pada situs asam zeolit, dan kemudian molekul metanol kedua bereaksi dengan yang pertama melanjutkan proses dehidrasi. Dengan demikian, aktivitas dehidrasi terutama tergantung pada kelimpahan situs asam sedang dan asam kuat.

2.11 Dimetil Eter (DME)

Dimetil eter, baik yang diperoleh dari syngas yang berasal dari biomassa atau dari CO_2 non-biogenik adalah di antara biofuel atau elektro-bahan bakar (*E-fuel*) yang dipertimbangkan oleh Irena untuk menggantikan bahan bakar berbasis fosil konvensional. DME, CH_3OCH_3 , adalah eter paling sederhana dan tidak mengandung ikatan C-C. Struktur DME dapat dilihat pada Gambar 6. Pada kondisi atmosfer DME adalah gas, tetapi karena tekanan uapnya 5,1 bar pada 20 °C, dapat dengan mudah dicairkan (Olah *et al.*, 2009). Oleh karena itu, dapat dengan mudah disimpan dan diangkut dalam tangki bertekanan dalam bentuk cair. Bahan kimia lain yang dapat berasal dari DME adalah metil asetat (Cheung *et al.*, 2006), asam asetat (Patricia *et al.*, 2006), dan olefin (Bakare *et al.*, 2018).



Gambar 6. Struktur DME (Arcoumanis, 2008)

DME juga dapat digunakan sebagai pengganti diesel, mengingat jumlah setananya 55–60, yang mengatasi fosil diesel, tanpa memproduksi NOx, CO atau partikulat

selama pembakarannya (Semelsberger *et al.*, 2006). Aplikasi lain DME dalam sistem energi adalah penggunaannya dalam turbin gas untuk menghasilkan listrik (Lee *et al.*, 2009) atau sebagai pembawa hidrogen yang lebih mudah disimpan dan diangkut daripada hidrogen, dan mampu menunjukkan efisiensi tertinggi bersama dengan metanol selama proses steam reforming menjadi H₂ (Catizzone *et al.*, 2021). Lebih jauh, DME akan memainkan peran penting sebagai perantara kimia atau sebagai bahan baku untuk produksi bahan dalam ekonomi metanol-DME di masa depan (Haro *et al.*, 2013).

2.12 Instrumen Karakterisasi

2.12.1 X-Ray Fluorescence (XRF)

Metode analisis non-destruktif yang dikenal sebagai XRF digunakan untuk mengidentifikasi dan mengukur konsentrasi elemen yang ada pada sample cair, bubuk, atau padatan. Berdasarkan pada caranya digunakan, XRF dapat dibuat oleh sinar-X atau sumber eksitasi primer seperti partikel alfa, proton, atau sumber elektron dengan energi tinggi. Metode ini banyak digunakan di lapangan dan industri untuk mengontrol material. Analisis unsur XRF dilakukan baik secara kuantitatif maupun kualitatif. Analisis kualitatif menunjukkan jenis unsur dalam sampel, yang ditunjukkan oleh spektrum unsur pada karakteristik energi sinar-xnya.

Prinsip utama XRF adalah bahwa sinar-X primer dapat diabsorpsi atau dihamburkan oleh material karena berasal dari sumber radioaktif atau tabung sinar-X mengenai sampel. Efek fotolistrik di mana sinar-X diabsorpsi oleh atom dengan mentransfer energinya pada elektron yang terdapat pada kulit yang lebih dalam. Apabila sinar-X primer memiliki cukup energi, elektron pindah dari kulit yang di dalam dan menimbulkan kekosongan, yang menyebabkan keadaan atom yang tidak stabil. Kemudian, elektron dari kulit luar pindah ke kulit yang lebih dalam, menghasilkan energi sinar-X. Menurut Patty (2013), analisis XRF adalah proses mendeteksi dan menganalisis emisi sinar-X.

Channoy *et al.* (2018) melakukan analisis kandungan kimia dalam SCBA dengan menggunakan XRF. Data yang dihasilkan terdiri dari data kuantitatif dan kualitatif, dan kandungan silika tertinggi di antara unsur lainnya, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi dari SCBA

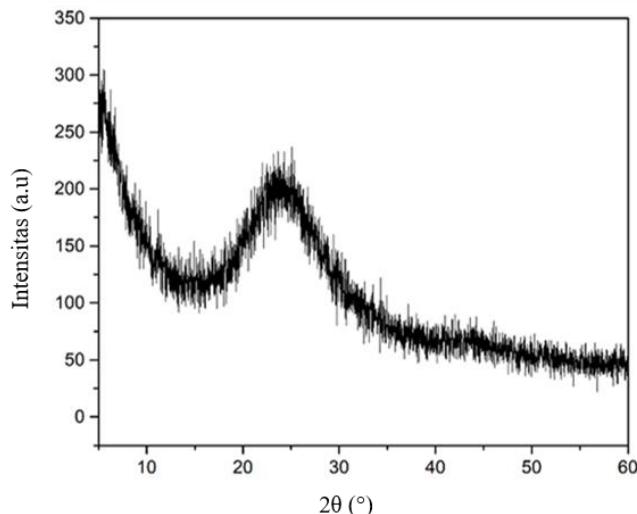
Komposisi Kimia	Berat (wt %)
SiO ₂	80,81
Al ₂ O ₃	4,29
MgO	2,17
P ₂ O ₅	1,84
SO ₃	1,69
K ₂ O	2,54
CaO	3,39
Fe ₂ O ₃	2,40

2.12.2 *X-Ray Diffraction (XRD)*

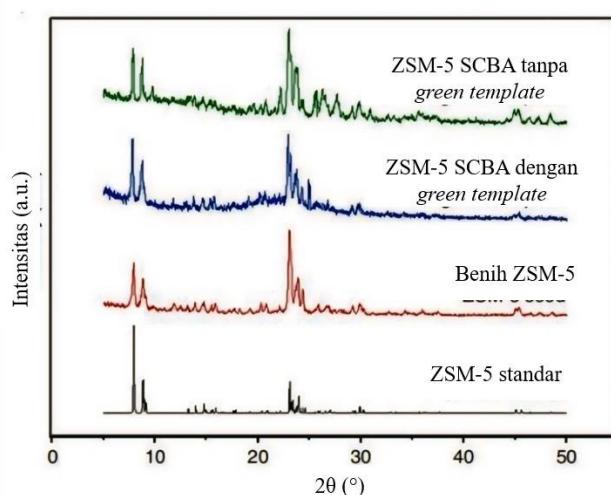
Metode karakterisasi sinar-X yang umum digunakan untuk mengetahui ciri-ciri kristal termasuk parameter kisi, struktur, dan susunan berbagai jenis atom yang ada di dalamnya. Mendifraksi cahaya melalui celah kristal adalah dasar teknik XRD. Jika difraksi berasal dari radius dengan panjang gelombang setara dengan jarak antar atom, kira-kira 1 Angstrom, maka kisi-kisi atau kristal ini dapat difraksi oleh cahaya. Jenis radiasi yang digunakan adalah sinar-X, elektron, dan neutron. Ketika sinar-X berinteraksi dengan suatu material, sebagian berkas diabsorpsi, ditransmisikan, dan dihamburkan terdifraksi. Berkas-berkas yang dihamburkan ini, karena fasanya yang berbeda, saling menghilangkan dan menguatkan satu sama lain. Berkas sinar X yang saling menguatkan itulah yang disebut sebagai berkas difraksi (Hakim dkk., 2019).

Metode analisis XRD bergantung pada interaksi materi dengan radiasi elektromagnetik sinar-X, khususnya pengukuran radiasi sinar-X yang terdifraksi oleh bidang kristal. Penghamburan sinar-X ini dilakukan oleh unit pada kristal,

yang menghasilkan pola difraksi yang digunakan untuk menentukan susunan partikel pola padatan (Indrawati, 2008).



Gambar 7. Difraktogram silika SCBA (Rilyanti *et al.*, 2025)



Gambar 8. Difraktogram ZSM-5 sintesis (Rilyanti *et al.*, 2023)

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Rilyanti *et al.* (2023), sintesis hidrotermal dari ZSM-5 berhasil dilakukan. Untuk waktu 144 jam, pola difraktogram kristal ZSM-5 menunjukkan bahwa terbentuk kristal zeolite dengan karakteristik MFI dengan intensitas tinggi muncul pada $2\theta = 8-9$ dan $23-25^\circ$. Difraktogram ZSM-5 dapat dilihat pada Gambar 8.

2.12.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

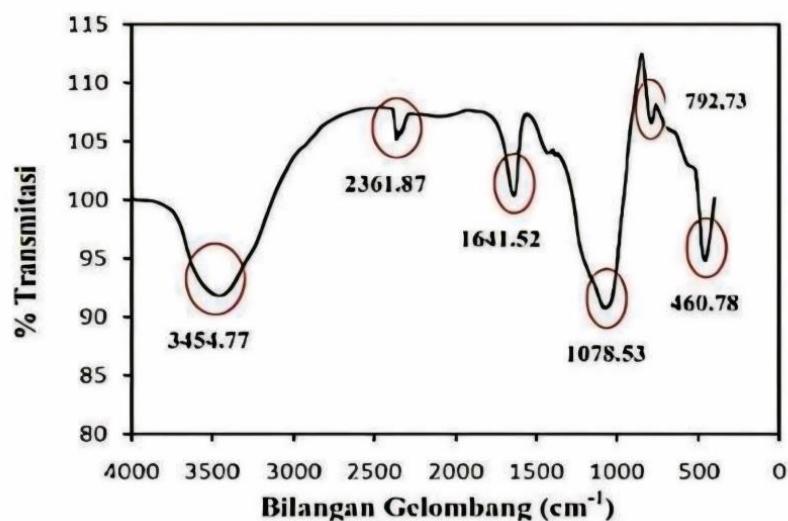
Perangkat SEM dapat digunakan untuk mengamati karakteristik bentuk, struktur, dan distribusi pori pada permukaan bahan dapat diamati. SEM digunakan untuk mengkarakterisasi material yang heterogen pada permukaan bahan pada skala mikrometer atau submikrometer. Dua komponen utama SEM adalah elektron kolumn dan *display console*. Elektron kolumn berfungsi sebagai model *scanning electron beam*, dan *display console* adalah elektron sekunder yang di dalamnya terdapat CRT. Pistol elektron kedua jenisnya menggunakan arus untuk menghasilkan pancaran elektron energi tinggi. Pistol termionik pertama memanaskan tungsten atau filament hingga suhu 1500 K hingga 3000 K untuk menghasilkan pancaran elektron.

SEM berfungsi dengan memancarkan berkas elektron dari filament tungsten. Jika elektron berinteraksi dengan bahan, atau spesimen, mereka akan menghasilkan elektron sekunder dan sinar-X. *Scanning* dapat dilakukan pada permukaan bahan yang diinginkan dengan mengatur *scanning generator* dan *scanning coils*. Detektor elektron sekunder (SE) mengumpulkan elektron sekunder yang dihasilkan dari interaksi elektron dengan permukaan spesimen. Kemudian, elektron ini diolah dan diperkuat oleh amplifier, dan kemudian diproyeksikan pada monitor sinar katoda (CRT) (Smallman, 2000).

2.12.4 Fourier Transform InfraRed (FTIR)

Gugus fungsi diidentifikasi dengan spektra absorbs sinar inframerahnya melalui teknik analisis yang dikenal sebagai spektroskopi inframerah, juga dikenal sebagai FTIR. Metode ini dapat menentukan komposisi gugus fungsi senyawa, yang membantu menentukan struktur molekulnya. Bisa jadi padatan, cairan, atau gas. Menurut Handayani *et al.* (2015), metode ini didasarkan pada kenyataan bahwa vibrasi internal atom gugus fungsi dikaitkan dengan frekuensi molekul tertentu. Interaksi antara vibrasi atom-atom yang terikat atau gugus fungsi dalam molekul terjadi saat mengadsorpsi radiasi gelombang elektromagnetik inframerah.

Absorpsi radiasi inframerah dapat mengeksitasi energi vibrasi molekul menjadi tingkat yang lebih tinggi. Untuk dapat diabsorpsi, molekul harus mengalami perubahan momen dipol karena vibrasi. Daerah radiasi inframerah spektroskopi berkisar dari $12800-10\text{ cm}^{-1}$, dengan bilangan gelombang $128000-4000\text{ cm}^{-1}$, daerah inframerah dekat ($12800-4000\text{ cm}^{-1}$), daerah inframerah tengah ($4000-200\text{ cm}^{-1}$), dan daerah inframerah jauh ($200-10\text{ cm}^{-1}$). Daerah inframerah antara 400 dan 800 cm^{-1} adalah yang paling sering digunakan, dan biasanya disebut sebagai daerah inframerah tengah (Khopkar, 2008).



Gambar 9. Spektra FTIR silika SCBA (Rilyanti *et al.*, 2023)

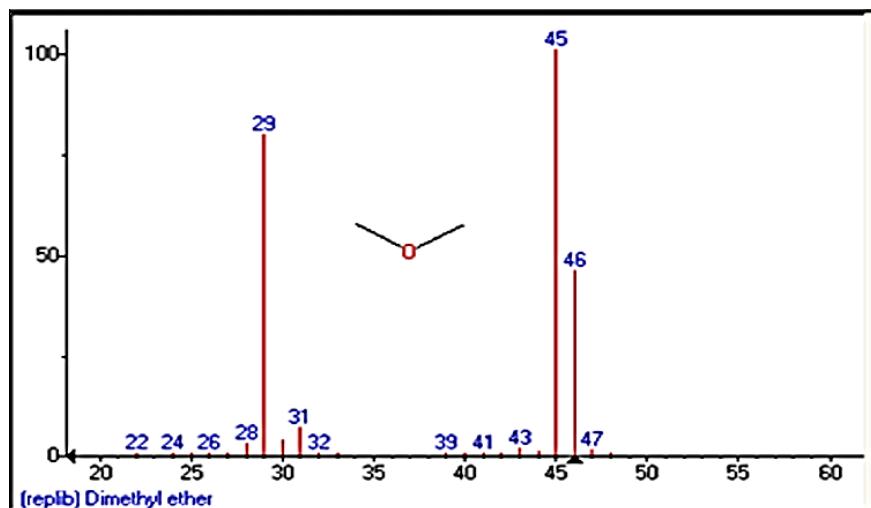
Spektrum FTIR pada Gambar 9 mengkonfirmasi adanya gugus silanol ($\text{Si}-\text{OH}$) ditunjukkan pada bilangan gelombang $3454,77\text{ cm}^{-1}$ dan siloksan ($\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$) ditunjukkan pada bilangan gelombang $1641,52$ hingga 1100 cm^{-1} , sedangkan pita serapan yang muncul pada bilangan gelombang $792,73\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya vibrasi simetri $-\text{O}-\text{Si}-\text{O}$ dan $-\text{O}-\text{Al}-\text{O}$ serta vibrasi tekuk dari $\text{O}-\text{Si}-\text{O}$ yang ditunjukkan pada bilangan gelombang $460,78\text{ cm}^{-1}$ pada silika abu ampas tebu (Rilyanti *et al.*, 2023).

2.12.5 Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

Untuk mengetahui karakteristiknya, DME yang dihasilkan dari reaksi dehidrasi metanol dikarakterisasi dengan menggunakan GC-MS untuk menganalisis komposisinya dan sifat fisiknya. Karena sampel didistribusikan di antara fasa diam dan fasa gerak, kromatografi gas biasanya digunakan untuk memisahkan campuran kimia menjadi masing-masing komponennya. Fasa gerak kromatografi gas adalah gas, dan fasa diamnya adalah padatan atau cairan. Fasa gerak membawa campuran untuk terpisah menjadi masing-masing komponennya. Jumlah waktu relatif yang dibutuhkan oleh masing-masing komponen untuk berada dalam fase diam akan menentukan pemisahan komponen (Sparkman *et al.*, 2011). Prinsip MS adalah pengionan senyawa kimia untuk menghasilkan molekul bermuatan atau fragmen molekul dan mengukur rasio massa/muatan.

Spektroskopi massa diperlukan untuk mengidentifikasi senyawa sebagai penentu rumus molekul dan bobot molekul. Penembakan elektron berenergi tinggi akan mengionisasi molekul, menghasilkan ion dengan muatan positif. Ion ini kemudian bergerak menuju medan magnet dengan kecepatan tinggi. Menurut David (2005), ion akan dibelokkan oleh medan magnet atau listrik agar mereka dapat mengukur bobot molekulnya sendiri dan semua fragmen yang dibuat. Kemudian, ketika ion mengenai permukaan atau dilewatkan, detektor akan menghitung muatan yang terinduksi atau arus yang dihasilkan dengan melakukan scanning massa. Kemudian, ia akan menghitung jumlah ion sebagai perbandingan massa terhadap muatan (m/e).

Analisis hasil sintesis DME diidentifikasi menggunakan instrumen GC MS. Menurut Rostamizadeh dan Yaripour (2017), analisis GC merupakan metode utama untuk memantau reaksi dehidrasi metanol karena produk yang dihasilkan yakni DME merupakan senyawa ringan dan mudah menguap.



Gambar 10. Spektrum massa DME (Deshpande *et al.*, 2016)

Setelah komponen terpisahkan oleh GS, MS digunakan untuk mengenali identitas molekul melalui pola fragmentasi ion (m/z). spektrum MS dari DME ditunjukkan pada Gambar 10. GC-MS adalah kombinasi tepat untuk mengofirmasi pembentukan DME dari metanol. Analisis GC-MS akan menyajikan dua data yaitu melalui kromatogram yang berasal dari hasil analisis kromatografi gas (GC) dan spektum massa dari hasil analisis spektroskopi massa (MS).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

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

3.2 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam prosedur penelitian ini antara lain: XRD PANalytical, XRF PANalytical Epsilon 3, FTIR Agilent Cary 630, SEM tipe ZEISS EVO MA 10, GC-MS Shimadzu QP 2010 SE, neraca analitik, gelas ukur, termometer, buret, pipet tetes, gelas kimia, Erlenmeyer, *hotplate stirrer*, oven, tanur, *hotplate*, batang pengaduk, corong kaca, loyang, saringan, mortal dan alu, botol polipropilen, cawan krus, kaca arloji, statif dan klem, spinbar, dan seperangkat teflon autoklaf.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: ampas tebu, metanol, etanol, titanium dioksida (TiO_2), LUDOX, aluminum hidroksida ($Al(OH)_3$), asam nitrat teknis (HNO_3 2,5% dan 10%), NaOH 2M, kertas saring,

ammonium nitrat (NH_4NO_3 99%), larutan natrium hidroksida sintesis (NaOH 50%), TPA-Br, HCl 1M, *oil bath*, dan akuades.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Ekstraksi Silika dari Ampas Tebu

Ampas tebu yang dibeli dari PT. Sweet Indo Lampung (SIL) yang terletak di Tulang Bawang, Lampung, dicuci dan dibakar untuk menghasilkan abu ampas tebu yang dikenal sebagai SCBA. Tahap pertama, 10 g serat ampas tebu kering yang telah diayak dan dipisahkan dari pasir dicuci dengan direndam dalam larutan HNO_3 2,5% 250 mL (ratio 1:25). Kemudian dipanaskan menggunakan *hotplate* pada suhu 80 °C, dan kemudian didinginkan sampai suhu ruang. Setelah itu, ampas tebu dibilas dengan akuades hingga pH netral, disaring, dan dikeringkan dalam oven pada suhu 80 °C. Setelah itu, ampas tebu kering dibakar menggunakan tanur pada suhu 600 °C selama 5 menit.

Silika diekstraksi dengan mencampurkan 5 g SCBA yang dihasilkan dari pembakaran dengan 125 mL larutan NaOH 2 M, dipanaskan di *hotplate* pada suhu 80 °C sambil diaduk selama sekitar 1 jam. Campuran dibiarkan pada suhu ruang selama 24 jam untuk mengoptimalkan proses ekstraksi, lalu filtratnya disaring menggunakan kertas saring. Filtrat yang diperoleh ditambahkan larutan HNO_3 10% secara bertahap hingga mencapai pH 7 dan membentuk hidrogel silika. Hidrogel dibiarkan selama 48 jam untuk memaksimalkan pembentukan gel. Setelah itu, gel didekantasi, dicuci dengan akuades panas, dan dikeringkan dalam oven pada suhu 80 °C selama 24 jam. Padatan silika yang dihasilkan digerus dengan mortar hingga halus.

Sebanyak 1 g silika yang didapatkan kemudian dicuci dengan 20 mL larutan HCl 1 M dalam wadah polipropilen. Selanjutnya, dimasukkan ke wadah yang berisi *oil bath* dan dipanaskan pada suhu 60-85 °C selama 3 jam dengan pengadukan konstan. Hasil yang diperoleh didinginkan dengan cara direndam pada air dingin lalu diuapkan menggunakan oven pada suhu 60 °C. Serbuk yang dihasilkan dicuci

dengan akuades sampai pH 7 dan dioven lagi pada suhu 60 °C selama 12 jam. Silika yang didapatkan selanjutnya dikarakterisasi dan dijadikan prekursor untuk sintesis ZSM-5 menggunakan metode hidrotermal (Hastriana, 2017).

3.3.2 Karakterisasi Silika Hasil Ekstraksi

Silika yang diperoleh dari proses ekstraksi dianalisis menggunakan XRF untuk mengetahui komposisi senyawa yang dihasilkan. Analisis menggunakan FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang menyusun kerangka silika, seperti gugus silanol Si-OH dan siloksan Si-O-Si. Selain itu, analisis XRD juga dilaksanakan untuk menentukan fase silika hasil ekstraksi serta mengukur tingkat kristalinitasnya.

3.3.3 Sintesis Benih ZSM-5

Benih ZSM-5 pada penelitian ini digunakan sebagai cetakan yang akan menjadi situs nukleasi awal tempat prekursor amorf membentuk struktur kerangka ZSM-5 sehingga memperpendek waktu induksi dan mempercepat proses kristalisasi (Kadja *et al.*, 2021). Sintesis benih ZSM-5 dalam penelitian ini dilakukan melalui metode hidrotermal menggunakan silika LUDOX dan alumina Al(OH)₃ sebagai sumbernya. Rasio molar reaktan yang digunakan untuk sintesis benih ZSM-5 adalah 1 SiO₂: 0,248 Al(OH)₃: 0,229 NaOH: 0,240 TPABr: 30,00 H₂O. Secara rinci komposisi molar dari masing-masing pereaksi dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Komposisi molar pereaksi benih ZSM-5

Komposisi	SiO ₂	NaOH	H ₂ O	Al(OH) ₃	TPABr
Molar	1	0,229	30	0,248	0,240
M/E (g/mol)	60	40	18	78	266,260
ρ (g/mL)	-	-	-	-	-
W (g)	60	9,173	540	19,344	63,90

Tabel 3. Perhitungan komposisi molar pereaksi benih ZSM-5

Bahan Massa untuk 1 Autoklaf	ρ (g/mL)	Kemurnian (%)	M/W (g/mol)	Massa (g)	(g)*
SiO ₂ (LUDOX)	-	100	60	150	7,656
Al(OH) ₃	-	100	78	9,672	0,493
NaOH 50% (w/v)	1,515	50	40	18,347	0,936
TPABr	-	100	266,26	63,902	3,262
H ₂ O dari NaOH	-	-	-	9,173	-
H ₂ O ditambahkan	-	-	18	530,83	27,093

Untuk sintesis benih ZSM-5, tahap pertama adalah membuat larutan A dengan melarutkan 0,4937 g Al(OH)₃ dan 0,936 g NaOH 50% dalam 9,031 g H₂O, yang diaduk terus-menerus selama 1 jam. Selain itu, larutan B dibuat dengan melarutkan 7,656 g LUDOX dalam 9,031 g H₂O, juga diaduk selama 1 jam. Selanjutnya, larutan A dan B dicampurkan dengan pengadukan selama 30 menit untuk menghasilkan larutan C. Setelah homogen, 3,262 g TPABr yang telah dilarutkan dalam 9,031 g H₂O ditambahkan ke larutan C dan diaduk selama 90 menit pada suhu ruang. Campuran kemudian dipindahkan ke teflon autoklaf untuk proses kristalisasi hidrotermal pada suhu 170 °C selama 120 jam. Setelah kristalisasi, produk dicuci dengan akuades dan dikeringkan pada suhu 60 °C sampai kering. Produk akhir berupa benih ZSM-5 dalam bentuk padatan. Sebelum digunakan, benih ZSM-5 hasil sintesis ini melalui proses kalsinasi dengan dipanaskan dalam tanur pada suhu 550 °C selama 6 jam untuk menghilangkan *template* organik dan membuka pori-pori dalam benih ZSM-5 (Lestari, 2018).

3.3.4 Sintesis ZSM-5

Dalam penelitian ini, dilakukan sintesis katalis ZSM-5 dengan dua jenis sumber silika, yaitu silika LUDOX dan silika dari SCBA. ZSM-5 silika LUDOX pada penelitian ini disintesis untuk dibandingkan kinerjanya sebagai ZSM-5 silika komersial dengan ZSM-5 dari silika SCBA hasil ekstraksi. Perbandingan ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana perbedaan sumber silika mempengaruhi kinerja katalitiknya.

3.3.4.1 Sintesis ZSM-5 sumber silika LUDOX

Sintesis ZSM-5 sumber silika komersial dalam penelitian ini dilakukan melalui metode hidrotermal menggunakan silika LUDOX dan alumina Al(OH)_3 sebagai sumbernya. Rasio molar reaktan yang digunakan untuk sintesis benih ZSM-5 adalah 1 SiO_2 : 0,248 Al(OH)_3 : 0,229 NaOH : 0,240 TPABr: 30,00 H_2O . Secara rinci komposisi molar dari masing-masing pereaksi dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4. Komposisi molar pereaksi ZSM-5 sumber silika LUDOX

Komposisi	SiO_2	NaOH	H_2O	Al(OH)_3	TPABr
Molar	1	0,229	30	0,248	0,240
M/E (g/mol)	60	40	18	78	266,26
ρ (g/mL)	-	-	-	-	-
W (g)	60	9,173	540	19,344	63,90

Tabel 5. Perhitungan komposisi molar pereaksi ZSM-5 sumber silika LUDOX

Bahan Massa untuk 1 Autoklaf	ρ (g/mL)	Kemurnian (%)	M/W (g/mol)	Massa (g)	(g)*
SiO_2 (LUDOX)	-	100	60	150	7,656
Al(OH)_3	-	100	78	9,672	0,493
NaOH 50% (w/v)	1,515	50	40	18,347	0,936
TPABr	-	100	266,26	63,902	3,262
H_2O dari NaOH	-	-	-	9,173	-
H_2O ditambahkan	-	-	18	530,83	27,093

Untuk sintesis ZSM-5 sumber silika LUDOX, tahap pertama adalah membuat larutan A dengan melarutkan 0,4937 g Al(OH)_3 dan 0,936 g NaOH 50% dalam 9,031 g H_2O , yang diaduk terus-menerus selama 1 jam. Selain itu, larutan B dibuat dengan melarutkan 7,656 g LUDOX dalam 9,031 g H_2O , juga diaduk selama 1 jam. Selanjutnya, larutan A dan B dicampurkan dengan pengadukan selama 30 menit untuk menghasilkan larutan C. Setelah homogen, 3,262 g TPABr yang telah dilarutkan dalam 9,031 g H_2O ditambahkan ke larutan C dan diaduk selama 90 menit pada suhu ruang. Campuran kemudian dipindahkan ke teflon autoklaf untuk proses kristalisasi hidrotermal pada suhu 170 °C selama 120 jam.

Setelah kristalisasi, produk dicuci dengan akuades dan dikeringkan pada suhu 60 °C sampai kering. Produk akhir berupa ZSM-5 sumber silika LUDOX dalam bentuk padatan. Sebelum digunakan, ZSM-5 sumber silika LUDOX hasil sintesis ini melalui proses kalsinasi dengan dipanaskan dalam tanur pada suhu 550 °C selama 6 jam untuk menghilangkan *template* organik dan membuka pori-pori dalam ZSM-5 sumber silika LUDOX (Lestari, 2018).

3.3.4.2 Sintesis ZSM-5 silika SCBA

Sintesis ZSM-5 dilakukan menggunakan metode hidrotermal dengan sumber silika dari SCBA sebagai kontrol. ZSM-5 disintesis dengan perbandingan molar reaktan 1 SiO₂: 0,067 Al₂O₃: 0,250 NaOH: 30 H₂O (Salis, 2022). Rincian komposisi molar dari masing-masing reaktan dapat dilihat pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Dalam proses sintesis ZSM-5 silika SCBA, sebanyak 1,153 g NaOH 50% dimasukkan ke dalam botol polipropilen, lalu ditambahkan 3,875 g silika SCBA yang telah dilarutkan dalam H₂O sesuai pengukuran. Silika SCBA yang larut kemudian dicampurkan dengan NaOH 50% dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 1 jam pada suhu 80 °C. Setelah itu, gel yang terbentuk ditambahkan dengan benih ZSM-5 sebanyak 15% dari berat silika SCBA, perhitungan jumlah benih yang digunakan terdapat pada Lampiran 1. Lalu diaduk kembali selama 1 jam pada suhu 80 °C. Gel selanjutnya dipindahkan ke dalam teflon autoklaf untuk disintesis secara hidrotermal pada suhu 180 °C selama 144 jam. Produk yang dihasilkan disaring dan dicuci dengan akuades hingga bersih, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 90 °C selama 2 jam. Sebelum digunakan sebagai katalis, produk padatan berwarna putih dikalsinasi pada suhu 550 °C selama 5 jam.

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

Komposisi	SiO₂	NaOH	H₂O	Al₂O₃
Molar	1	0,250	30	0,080
M/W (g/mol)	60	40	18	102
ρ (g/mL)	-	-	-	-
W (g)	60	10	540	8,137

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

Bahan Massa untuk 1 Autoklaf	ρ (g/mL)	Kemurnian (%)	M/W (g/mol)	Massa (g)	(g)*
SiO ₂ (SCBA)	-	89	60	115,07	3,875
Al ₂ O ₃ (SCBA)	-	6	102	-	-
NaOH 50% (w/v)	1,515	50	40	18,35	1,153
TPABr	-	100	266,26	63,9	0
H ₂ O dari NaOH	-	-	18	9,17	-
H ₂ O ditambahkan	-	-	18	530,83	30,546

3.3.5 Karakterisasi ZSM-5

Hasil sintesis ZSM-5 selanjutnya dikarakterisasi menggunakan XRD untuk mengidentifikasi jenis fase dan kristalinitas zeolit yang dihasilkan. SEM digunakan untuk menganalisis morfologi kristal zeolit. Selain itu, XRF digunakan untuk menganalisis kandungan ZSM-5 dan menghitung rasio Si/Al ZSM-5.

3.3.6 Persiapan Katalis

3.3.6.1 Katalis H-ZSM-5

Sebelum dilakukan uji katalitik, ZSM-5 hasil sintesis dari sumber silika LUDOX dan silika SCBA diperlakukan prosedur *ion exchange* menggunakan NH₄NO₃ 2 M untuk mengaktifkan situs asam Lewis dan Brönsted-Lowry pada ZSM-5.

Sebanyak 2 g katalis ZSM-5 dicampur dengan 20 mL larutan NH₄NO₃ 2 M, kemudian diaduk dan dipanaskan pada suhu 80 °C selama 48 jam, dengan penggantian larutan NH₄NO₃ 2 M setiap 24 jam. Campuran tersebut kemudian disaring dan dicuci dengan akuades, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 80 °C

selama 24 jam dan dikalsinasi pada suhu 550 °C selama 6 jam. Hasil pertukaran ion ini disebut H-ZSM-5.

3.3.6.2 Katalis Ti/H-ZSM-5

H-ZSM-5 yang dihasilkan dari proses *ion exchange* selanjutnya mengalami perlakuan impregnasi dengan logam Ti. Sebanyak 1 g H-ZSM-5 dimasukkan ke dalam 10 mL pelarut dan TiO₂ dengan konsentrasi 5%, sesuai dengan prosedur yang diikuti oleh Mergenbayeva *et al.* (2024), kemudian diaduk pada suhu ruang selama 3 jam. Setelah itu, sampel dicuci dengan akuades hingga mencapai pH netral dan dikeringkan selama 12 jam pada suhu 100 °C. Sampel dikalsinasi pada suhu 550 °C selama 6 jam (Nurjanah, 2019).

3.3.7 Karakterisasi Ti/H-ZSM-5

ZSM-5 yang dihasilkan dari pertukaran ion dan impregnasi dengan Ti kemudian dikarakterisasi menggunakan XRF untuk mengetahui komposisi senyawa dan kandungan logam Ti yang terdapat pada Ti/H-ZSM-5 sebagai perbandingan.

3.3.8 Uji Aktivitas Katalitik

Aktivitas katalitik dari hasil sintesis H-ZSM-5 dan Ti/H-ZSM-5 pada penelitian ini diujikan pada reaksi dehidrasi metanol menjadi DME. Mengacu pada penelitian yang telah dilakukan oleh Kriprasertkul *and* Witoon (2022), katalis hasil sintesis masing-masing sebanyak 0,3 g dicampurkan dengan 8 mL metanol ke dalam teflon autoklaf berukuran 100 mL, kemudian dimasukkan ke dalam oven. Reaksi dehidrasi dilakukan selama 3 jam pada suhu 180 °C, kemudian setelah proses dehidrasi selesai, larutan tersebut didinginkan dan dipisahkan dari endapannya menggunakan kertas saring. Filtrat yang didapat kemudian digunakan untuk analisis menggunakan GC-MS.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat diperoleh simpulan sebagai berikut.

1. Silika SCBA berhasil diekstraksi dengan rasio Si/Al sebesar 7,373 yang didominasi berfasa amorf serta memiliki gugus fungsi khas seperti silanol dan siloksan.
2. ZSM-5 silika LUDOX dan silika SCBA berhasil disintesis ditandai dengan kesesuaian difraktogram ZSM-5 MFI standar dengan persentase kristalinitas sebesar 77,81%, dan 68,86%.
3. Morfologi ZSM-5 silika SCBA menunjukkan distribusi ukuran partikel yang relatif homogen berbentuk *bulky* dengan ukuran rata-rata 4,61 μm .
4. Analisis komposisi Ti/H-ZSM-5 hasil sintesis menunjukkan bahwa rasio Si/Al Ti/H-ZSM-5 silika LUDOX dan silika SCBA masing-masing 12,47 dan 10,37, setelah diimpregnasi kandungan Ti terukur masing-masing 6,028% dan 6,179%.
5. Katalis H-ZSM-5 tanpa impregnasi menghasilkan rendemen DME 73,20% dengan selektivitas 100%, sedangkan Ti/H-ZSM-5 LUDOX menghasilkan rendemen 51,39% dengan selektivitas 85,78% dan Ti/H-ZSM-5 SCBA 43,92% dengan selektivitas 97,02%

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan perlu dilakukan optimasi kondisi uji katalitik yang diperluas dengan variasi suhu, waktu, dan rasio metanol terhadap katalis guna memperoleh data yang lebih akurat. Penelitian lanjutan dapat mengkaji pengaruh variasi impregnasi jenis logam untuk mengetahui pengaruhnya terhadap aktivitas katalitiknya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abd El Haleem, S. M., and Abd El Aal, E. E. 2008. Thermometric Behaviour of Cobalt in HNO₃ Solutions. *Journal of Materials Processing Technology*. 204(1–3): 139–146.
- Acroumanis, C., Bae, C. S., Crookes, R. and Kimoshita, E. 2008. The Potential of Di-Methyl Ether (DME) As an Alternative Fuel For Compression-Ignition Engines: A Review. *Fuel*. 87(7): 1014–1030.
- Affandi, S., Setyawan, H., Winardi, S., Purwanto, A., and Balgis, R. 2009. A Facile Method Production of High-Purity Silica Xerogels from Bagasse Ash. *Advance Powder Technology*. 20 : 468–472.
- Aguado, J., Serrano, D. P., Escola, J. M., and Peral, A. 2009. Catalytic Cracking of Polyethylene Over Zeolite Mordenite with Enhanced Textural Properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 85(1–2): 352–358.
- Anekwe, I. M. S., Oboirien, B., and Isa, Y. M. 2024. Effects of Transition Metal Doping on the Properties and Catalytic Performance of ZSM-5 Zeolite Catalyst on Ethanol-to-Hydrocarbons Conversion. *Fuel Communications*. 18(100101).
- Arenas-piedrahita, J. C., Montes-garcía, P., Mendoza-rangel, J. M., and Calvo, H. Z. L. 2016. Mechanical and Durability Properties of Mortars Prepared with Untreated Sugarcane Bagasse Ash and Untreated Fly Ash. *Construction and Building Materials*. 105 : 69–81.
- Aspromonte, S. G., Romero, A., Boix, A. V., and Alonso, E. 2019. Hydrolysis of Cellulose to Glucose by Supercritical Water and Silver Mesoporous Zeolite Catalysts. *Cellulose*. 26(4): 2471–2485.

- Bagheri, S., Muhd Julkapli, N., and Bee Abd Hamid, S. 2014. Titanium Dioxide as A Catalyst Support In Heterogeneous Catalysis. *Scientific World Journal*. 727496 : 1–21.
- Bakare, I. A., Muraza, O., Sanhoob, M. A., Miyake, K., Hirota, Y., Yamani, Z. H., and Nishiyama, N. 2018. Dimethyl Ether-To-Olefins over Aluminum Rich ZSM-5: The Role of Ca and La as Modifiers. *Fuel*. 211 : 18–26.
- Bani, G. A., Ghello, J. M., Alupan, V., dan Atson, A. L. 2024. Impregnasi Zeolit Alam Ende Dengan Titanium Menjadi Bahan Fotokatalis. *Dalton : Jurnal Pendidikan Kimia Dan Ilmu Kimia*. 7(2): 123–130.
- Boinski, F., Khouchaf, L., and Tuilier, M. 2010. Study of the Mechanisms Involved In Reactive Silica. *Materials Chemistry and Physics*. 122 : 311–315.
- Büchner, C., and Heyde, M. 2017. Two-Dimensional Silica Opens New Perspectives. *Progress in Surface Science*. 92(4): 341–374.
- Catizzone, E., Freda, C., Braccio, G., Frusteri, F., and Bonura, G. 2021. Dimethyl Ether as Circular Hydrogen Carrier: Catalytic Aspects of Hydrogenation/Dehydrogenation Steps. *Journal of Energy Chemistry*. 58 : 55–77.
- Channoy, C., Maneewan, S., Punlek, C., and Chirarattananon, S. 2018. Preparation and Characterization of Silica Gel from Bagasse Ash. *Advanced Materials Research*. 1145 : 44–48.
- Chen, H., Wydra, J., Zhang, X., Lee, P. S., Wang, Z., Fan, W., and Tsapatsis, M. 2011. Hydrothermal Synthesis of Zeolites With Three-Dimensionally Ordered Mesoporous-Imprinted Structure. *Journal American Chemistry Society*. 133(32): 12390–12393.
- Coombes, M. J., Olivier, E. J., Prestat, E., Haigh, S. J., du Plessis, E., and Neethling, J. H. 2021. Iron-Silica Interaction During Reduction of Precipitated Silica-Promoted Iron Oxides Using In Situ XRD and TEM. *Applied Catalysis A: General*. 613 : 118031.
- David, G. W. 2005. *Analisis Farmasi Edisi kedua*. EGC. Jakarta
- Deshpande, A. A., Scientist, S., Services, C. P., and Road, B. 2016. Identification and Quantification of An Unknown Peak In Residual Solvent Analysis By Gc Using Relative Response Factor. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. 7(3): 1338–1347.

- Deutschmann, O., Knozinger, H., Kochloefl, K., and Turek, T. 2009. *Heterogeneous Catalysis and Solid Catalysts*. Wiley-VCH Verlag GmhH and Co. KGaA, Weinheim.
- Ding, Y. L., Wang, H. Q., Xiang, M., Yu, P., Li, R. Q., and Ke, Q. P. 2020. The Effect of Ni-ZSM-5 Catalysts on Catalytic Pyrolysis and Hydro-Pyrolysis of Biomass. *Frontiers in Chemistry*. 8 : 1–11.
- Doši, A. 2025. Ion Exchange of Na + Ions with H + Ions on ZSM-5 Zeolite Using Acetic Acid. *Engineering Proceedings*. 99(1): 1–8.
- Gunawan, M. L. dan Susanto, H. 2008. Dehidrasi N-Butanol menjadi Senyawa Butena pada Katalis Molecular Sieve 13 X dalam Reaktor Unggun Tetap. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*. 6(2): 642–648.
- Hakim, L., Dirgantara, M., dan Nawir, M. 2019. Karakterisasi Struktur Material Pasir Bongkahan Galian Golongan C Dengan Menggunakan X-Ray Difraction (X-RD) Di Kota Palangkaraya. *Jurnal Jejaring Matematika Dan Sains*. 1(1): 44–51.
- Hanafi, A., dan Nandang R, A. 2010. Studi Pengaruh Bentuk Silika dari Abu Ampas Tebu terhadap Kekuatan Produk Keramik. *Jurnal Kimia Indonesia*. 5(1). 35–38.
- Handoko, D. S. P., Triyono, Narsito, dan Wahyuningsih, T. D. 2009. Pengaruh Temperatur Terhadap Kinerja Katalis Ni/Zeolite Pada Reaksi Hidrogenasi Katalitik 1-Oktadekena. *Reaktor*. 12(4): 218–225.
- Haro, P., Trippe, F., Stahl, R., and Henrich, E. 2013. Bio-syngas to Gasoline and Olefins via DME - A Comprehensive Techno-Economic Assessment. *Applied Energy*. 108 : 54–65.
- Hidayat, A. E., Moersidik, S. S., dan Adityosulindro, S. 2019. *Sintesis dan Karakterisasi Zeolit Hidroksi Sodalit dari Limbah Padat Abu Layang PLTU Batubara*. *Reka Buana : Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Dan Teknik Kimia*. 4(2): 85–91.
- Huang, Y. B., and Fu, Y. 2013. Hydrolysis of Cellulose to Glucose by Solid Acid Catalysts. *Green Chemistry*. 15(5): 1095–1111.
- Indrawati, L. 2008. *Aktivasi Abu Layang Batubara dan Aplikasinya pada Proses Adsorpsi Ion Logam Cr dalam Limbah Elektroplating*. Tesis. Universitas Negeri Semarang. Semarang.

Istadi. 2011. *Teknologi Katalis untuk Konversi Energi Fundamental dan Aplikasi*. Graha Ilmu. Yogyakarta.

Johnson, E. B. G., and Arshad, S. E. 2014. Applied Clay Science Hydrothermally Synthesized Zeolites Based on Kaolinite : A Review. *Applied Clay Science*. 98 : 215–221.

Jusoh, N., Yeong, Y. F., Mohamad, M., Lau, K. K., and Shariff, A. M. 2017. Ultrasonics Sonochemistry Rapid-synthesis of zeolite T via sonochemical-assisted hydrothermal growth method. *Ultrason. Sonochem.* 34 : 273–280.

Kadja, G. T. M., Azhari, N. J., Mukti, R. R., and Khalil, M. 2021. A Mechanistic Investigation of Sustainable Solvent-Free , Seed- Directed Synthesis of ZSM-5 Zeolites in the Absence of an Organic Structure-Directing Agent. *ACS Omega*. 6(2): 925–933.

Karwacki, L., Kox, M. H. F., Winter, D. A. M. De, Drury, M. R., Meeldijk, J. D., Stavitski, E., Schmidt, W., Mertens, M., Cubillas, P., John, N., Chan, A., Kahn, N., Bare, S. R., Anderson, M., Kornatowski, J., and Weckhuysen, B. M. 2009. Outer-Surface Molecular Diffusion Barriers. *Nature Materials*. 8(12): 959–965.

Katsuki, H., Furuta, S., Watari, T. and Komameni, S. 2005. ZSM-5 Zeolite/Porous Carbon Composite: Conventional and Microwave-Hydrothermal Synthesis From Carbonized Rice Husk. *Microporous and Mesoporous Materials*. 86 : 145–151.

Khaleque, A., Alam, M., Hoque, M., Mondal, S., Bin, J., Xu, B., Johir, M. A. H., Krishna, A., Zhou, J. L., Boshir, M., and Ali, M. 2020. Zeolite Synthesis From Low-Cost Materials and Environmental Applications : A Review. *Environmental Advice*. 2(100019).

Khatun, A., Reddy, V. P., Chandrashekhar, R., Kumar, M., and Kumar, C. V. 2024. Experimental Analysis of Sugarcane Bagasse Ash Behavior as a Partial Replacement for Cement in Concrete Mix. *Proceeding of the ICCMES 2024*. 01024 : 1–7.

Khopkar. 2008. *Konsep Dasar Kimia Analitik*. Universitas Indonesia. 293–295.

Kriprasertkul, W., Witton, T., and Kim-Lohsoontorn, P. 2022. Dimethyl Ether (DME) Synthesis From CO2 and H2 Through Ethanol-Assisted Methanol Synthesis and Methanol Dehydration. *International Journal of Hydrogen Energy*. 47 : 33338–33351.

- Lee, M. C., Seo, S. Bin, Chung, J. H., Joo, Y. J., and Ahn, D. H. 2009. Industrial Gas Turbine Combustion Performance Test of DME to Use As An Alternative Fuel For Power Generation. *Fuel*. 88(4): 657–662.
- Lestari, D.Y. 2010. Kajian Modifikasi dan Karakterisasi Zeolit Alam dari Berbagai Negara, *Prosiding Seminar Nasional Kimia dan Pendidikan Kimia*. Yogyakarta.
- Li, H. 2006. The Application of Power Ultrasound to Reaction Crystallization. *Ultrasonics Sonochemistry*. 13 : 359–363.
- Li, H., Wang, Y., Wang, X., and Wang, S. 2017. Controllable Fabrication of Single-Crystalline, Ultrafine and High-Silica Hierarchical ZSM-5 Aggregates Via Solid-Like State Conversion. *RSC Advances*. 7 : 25605–25620.
- Li, J., Gao, M., Yan, W., and Yu, J. 2022. Regulation of the Si/Al Ratios and Al Distributions of Zeolites and Their Impact on Properties. *Chemical Science*. 14(8): 1935–1959.
- Liu, R., Rahman, M., Sarker, M., Chai, M., and Li, C. 2020. A Review on The Catalytic Pyrolysis of Biomass For The Bio-Oil Production With ZSM-5 : Focus on Structure. *Fuel Processing Technology*. 199 : 106301.
- Lonin, O. 2019. The Usage of Zeolites For Dynamic Sorption of Cesium From Waste Waters of Nuclear Power Plants. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 303 : 831–836.
- Mergenbayeva, S., Abitayev, Z., Batyrbayeva, M., Vakros, J., Mantzavinos, D., Atabaev, T. S., and Poulopoulos, S. G. 2024. TiO₂/Zeolite Composites for SMX Degradation under UV Irradiation. *Catalysts*. 14(2): 1–16.
- Mevawala, C., Jiang, Y., and Bhattacharyya, D. 2019. Techno-economic Optimization of Shale Gas to Dimethyl Ether Production Processes Via Direct and Indirect Synthesis Routes. *Applied Energy*. 238 :119–134.
- 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.
- Moisés, M. P., Da Silva, C. T. P., Meneguin, J. G., Girotto, E. M., and Radovanovic, E. (2013). Synthesis of Zeolite Naa From Sugarcane Bagasse Ash. *Materials Letters*. 108 : 243–246.

- Mubin, A dan Fitriadi, R. 2005. Upaya Penurunan Biaya Produksi dengan Memanfaatkan Ampas Tebu Sebagai Pengganti Bahan Penguat dalam Proses Produksi Asbes Semen. *Jurnal Teknik Gelagar*. 16.
- Narayanan, S., Tamizhdurai, P., Mangesh, V. L., Ragupathi, C., Santhana krishnan, P., and Ramesh, A. 2020. Recent Advances In The Synthesis and Applications of Mordenite Zeolite - Review. *RSC Advances*. 11(1): 250–267.
- Nguyen, D., Dinh, V., Dang, N. T., Khan, D. T., Hung, N. T., Hoa, N., and Tran, T. 2023. Efect of Aging and Hydrothermal Treatment on The Crystallization of ZSM-5 Zeolite Synthesis From. *RSC Advances*. 3 : 20565–20574.
- Niu, X., Bai, Y., Du, Y., Qi, H., and Chen, Y. 2022. Size Controllable Synthesis of ZSM-5 Zeolite and Its Catalytic Performance In The Reaction of Methanol Conversion to Aromatics. *Royal Society Open Science*. 9(3).
- Olah, G. A., Goeppert, A., and Prakash, G. K. S. S. 2009. Chemical Recycling of Carbon Dioxide to Methanol and Dimethyl Ether: From Greenhouse Gas to Renewable, Environmentally Carbon Neutral Fuels and Synthetic Hydrocarbons *The Journal of Organic Chemistry*. 74 : 487-498.
- Olah, G.A., Goeppert, A., and Prakash, G. K. S. S. 2005. *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy: Second Edition*. Wiley-VCH.
- Piedrahita, J. C. A., García, P. M., Rangel, J. M. M., Calvo, H. Z. L., Tamez, P. L. V., and Reyes, J. M. 2016. Mechanical and Durability Properties of Mortars Prepared With Untreated Sugarcane Bagasse Ash and Untreated Fly Ash. *Construction and Building Materials*. 105.
- Primadevi, S., Wijayati, N., dan Kusuma, E. 2015. Transformasi Setil Alkohol menjadi Dimetil Setil Alkohol dan Setil Asetat. *Biomedika*. 8(1): 1–7.
- Purnawan, C., Martini, T., dan Rini, I. P. 2018. Sintesis dan Karakterisasi Silika Abu Ampas Tebu Termodifikasi Arginin sebagai Adsorben Ion Logam Cu(II). *Alchemy Jurnal Penelitian Kimia*. 14(2): 333.
- Rahman, M. A., Karim, M. R., and Ehsan, M. M. 2023. Solar Energy Harvesting from Evacuated Flat Plate Collector: Design, Thermo-Economic Analysis, and off Design Performance. *Results in Engineering*. 20.

- Reddy, J. K., Motokura, K., Koyama, T., Miyaji, A., and Baba, T. 2012. Effect of Morphology and Particle Size Of ZSM-5 on Catalytic Performance For Ethylene Conversion and Heptane Cracking. *Journal of Catalysis*. 289 : 53–61.
- Rianto, A., Islamiyah, Pambudi, K. E., dan Al-Mufih, A. A. 2014. *Sintesis Katalitik 2,2-Diisopropoksipropan dari Isopropanol untuk Meningkatkan Angka Oktan Bahan Bakar Terbarukan*. Universitas Gajah Mada. Yogyakarta.
- Rilyanti, M., Ningrum, A. D., 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., Gita Silviana, E., Buhani, B., Pandiangan, K. D., dan Juliasih, N. L. G. R. 2020. Sintesis Dan Karakterisasi Zeolit Mordenit (Mor) Pori Hirarki Berbasis Silika Abu Ampas Tebu. *Analit:Analytical and Environmental Chemistry*. 5(2): 178–191.
- 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.
- Riyanto, A., Machmudah, S., Purwaningsih, S. Y., and Pratapa, S. 2025. Rice Husk-Based Silica: A Structural and Optical Study of Xerogel, Amorphous, and Crystalline Phases. *Optical Materials*. 166.
- Rostamizadeh, M., and Yaripour, F. 2017. Dealumination of High Silica H-ZSM-5 As Long-Lived Nanocatalyst For Methanol to Olefin Conversion. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 71: 454–463.
- Sangeetha, C., and Baskar, P. 2016. Zeolite and Its Potential Uses in Agriculture : A Critical Review. *Agricultural Research*. 37(2): 101–108.
- Sanhoob, M. A., Khan, A., and Ummer, A. C. 2022. ZSM-5 Catalysts for MTO: Effect and Optimization of the Tetrapropylammonium Hydroxide Concentration on Synthesis and Performance. *ACS Omega*. 7(25): 21654–21663.

- Semelsberger, T. A., Borup, R. L., and Greene, H. L. 2006. Dimethyl Ether (DME) As an Alternative Fuel. *Journal of Power Sources*. 156(2): 497–511.
- Shamzhy, M., Gil, B., Opanasenko, M., Roth, W. J., and Čejka, J. 2021. MW and MFI Frameworks as Model Layered Zeolites: Structures, Transformations, Properties, and Activity. *ACS Catalysis*. 11(4): 2366–2396.
- Shen, L., Deng, X., and Liu, Y. 2013. Synthesis and Catalytic Oxidation Performance of Al-TS-1. *Chinese Journal of Catalysis*. 34 : 1232–1241.
- Shoppert, A., Loginova, I., Chaikin, L., and Rogozhnikov, D. 2017. Alkali Fusion-Leaching Method for Comprehensive Processing of Fly Ash. *KnE Materials Science*. 2(2): 89–96.
- Smallman, R. E. 2000. *Metalurgi Fisik Modern, Edisi Keempat*. PT. Gramedia Pustaka Utama. 137–140.
- Smit, Berend and Maesen, T. L. M. 2008. Towards a Molecular Understanding of Shape Selectivity. *Nature*. 451(7179): 1–8.
- Smolin, A. 2020. Modelling and Process Integration Study of Dimethyl Ether Synthesis From Syngas Derived From Biomass Gasification : Flowsheet Simulation. *Alexandria Engineering Journal*. 4441–4448.
- Solomons, T. W. G. 2004. *Solomons and Fryhle Organic Chemistry*. John Wiley and Sons. USA.
- Sparkman, O. D., Z. Penton, F. Kitson. 2011. *Gas Chromatography and Mass Spectrometry: A Practical Guide*. Academic Press. Amsterdam.
- Sriatun, Taslimah, dan Linda, S. 2015. Pemanfaatan Katalis Silika Alumina Dari Bagasse Pada Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Goreng Sisa Pakai. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*. 25(1): 35–42.
- Sun, R., Delidovich, I., and Palkovits, R. 2019. Dimethoxymethane as a Cleaner Synthetic Fuel: Synthetic Methods, Catalysts, and Reaction Mechanism. *ACS Catalysis*. 9(2): 1298–1318.
- Sunarya, R. 2009. *Struktur Padatan Silikon Dioksida*. UIN Sunan Gunung Djati Bandung. Bandung.

- Thue, P. S., Lima, E. C., Sieliechi, J. M., Saucier, C., Dias, S. L. P., Vaghetti, J. C. P., Rodembusch, F. S., and Pavan, F. A. 2017. Effects of First-Row Transition Metals and Impregnation Ratios on the Physicochemical Properties of Microwave-Assisted Activated Carbons from Wood Biomass. *Journal of Colloid and Interface Science*. 486 : 163–175.
- Tong, Y., Zhang, L., Ma, H., Wang, Y., and Liu, X. 2024. Understanding the Structural and Catalytic Properties of Al(IV)-2 Acidic Sites of ZSM-5. *Materials*. 17(12).
- Wang, P., Shen, B., Shen, D., Peng, T., and Gao, J. 2007. *Synthesis of ZSM-5 Zeolite from Expanded Perlite / Kaolin and Its Catalytic Performance For FCC Naphtha Aromatization*. *Catalysis Communications*. 8 : 1452–1456.
- Wang, P., Shen, B., Shen, D., Peng, T., Gao, J. 2007. Synthesis of ZSM-5 Zeolite Fromexpanded Perlite/Kaolin and Its Catalytic Performance For FCC Naphtha Aromatization. *Catalyst Community*. 8 : 1452–1456.
- Wang, W., Zhang, W., Chen, Y., Wen, X., Li, H., Yuan, D., Guo, Q., Ren, S., Pang, X., and Shen, B. 2018. Mild-Acid-Assisted Thermal Or Hydrothermal Dealumination of Zeolite Beta, Its Regulation to Al Distribution and Catalytic Cracking Performance to Hydrocarbons. *Journal of Catalysis*. 362 : 94–105.
- Wei, H., Zhang, Z., Zhou, L., Heidarshenas, B., Zhang, C., Xia, J., Zhi, L., Shen, G., and Wu, H. 2020. Influence of Heat Treatment on The Microwave Absorption Properties of Flaky Carbonyl Iron Powder. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 3(3): 258–264.
- Widi, R. K. 2018. *Pemanfaatan Material Anorganik: Pengenalan dan Beberapa Inovasi di bidang Penelitian*. Deepublish. Yogyakarta.
- Wu, H. M., Tu, J. P., Yuan, Y. F., Chen, X. T., Xiang, J. Y., Zhao, X. B., and Cao, G. S. 2006. One-Step Synthesis Limn 2 O 4 Cathode By A Hydrothermal Method. *Journal Power Source*. 161 : 1260–1263.
- Wu, M. E. I., Jiang, W., Jiang, J., Zou, Y., Zhang, P., and Mao, P. 2020. Synthesis of ZSM-5 Zeolites Using Palygorskite as Raw Material under Solvent-Free Conditions. *Bulletin of Materials Science*.
- Yalc, N., and Sevinc, V. 2001. Studies on Silica Obtained From Rice Husk. *Ceramics International*. 27 : 219–224.