

SKRIPSI - SK234801

**FABRIKASI MEMBRAN MATRIKS CAMPURAN (MMM)
BERBASIS POLISULFON DENGAN MATERIAL
PENGISI KARBON ZIF-L UNTUK PERMEASI GAS
 H_2/CO_2**

**TIFANI DJILHAM SALSABILLA
NRP 5004221017**

Dosen Pembimbing
Dr.Triyanda Gunawan, S.Si.
NIP. 1993202011003

Sarjana
Departemen Kimia
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2026

FINAL PROJECT - SK234801

**FABRICATION OF POLYSULFONE-BASED MIXED
MATRIX MEMBRANES WITH ZIF-L CARBON FILLER
FOR H₂/CO₂ GAS PERMEATION**

TIFANI DJILHAM SALSABILLA
NRP 5004221017

Supervisor
Dr.Triyanda Gunawan, S.Si.
NIP. 1993202011003

Bachelor
Chemistry Department
Faculty of Science and Data Analytics
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2026



SKRIPSI - SK234801

**FABRIKASI MEMBRAN MATRIKS CAMPURAN
(MMM) BERBASIS POLISULFON DENGAN
MATERIAL PENGISI KARBON ZIF-L UNTUK
PERMEASI GAS H₂/CO₂**

**TIFANI DJILHAM SALSABILLA
NRP 5004221017**

Dosen Pembimbing
Dr.Triyanda Gunawan, S.Si.
NIP. 1993202011003

Sarjana
Departemen Kimia
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2026



FINAL PROJECT - SK234801

FABRICATION OF POLYSULFONE-BASED MIXED MATRIX MEMBRANES WITH ZIF-L CARBON FILLER FOR H₂/CO₂ GAS PERMEATION

TIFANI DJILHAM SALSABILLA
NRP 5004221017

Supervisor
Dr.Triyanda Gunawan, S.Si.
NIP. 1993202011003

Bachelor
Department Chemistry
Faculty of Science and Data Analytics
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2026

APPROVAL SHEET

FABRICATION OF POLYSULFONE-BASED MIXED MATRIX MEMBRANES WITH ZIF-L CARBON FILLER FOR H₂/CO₂ GAS PERMEATION

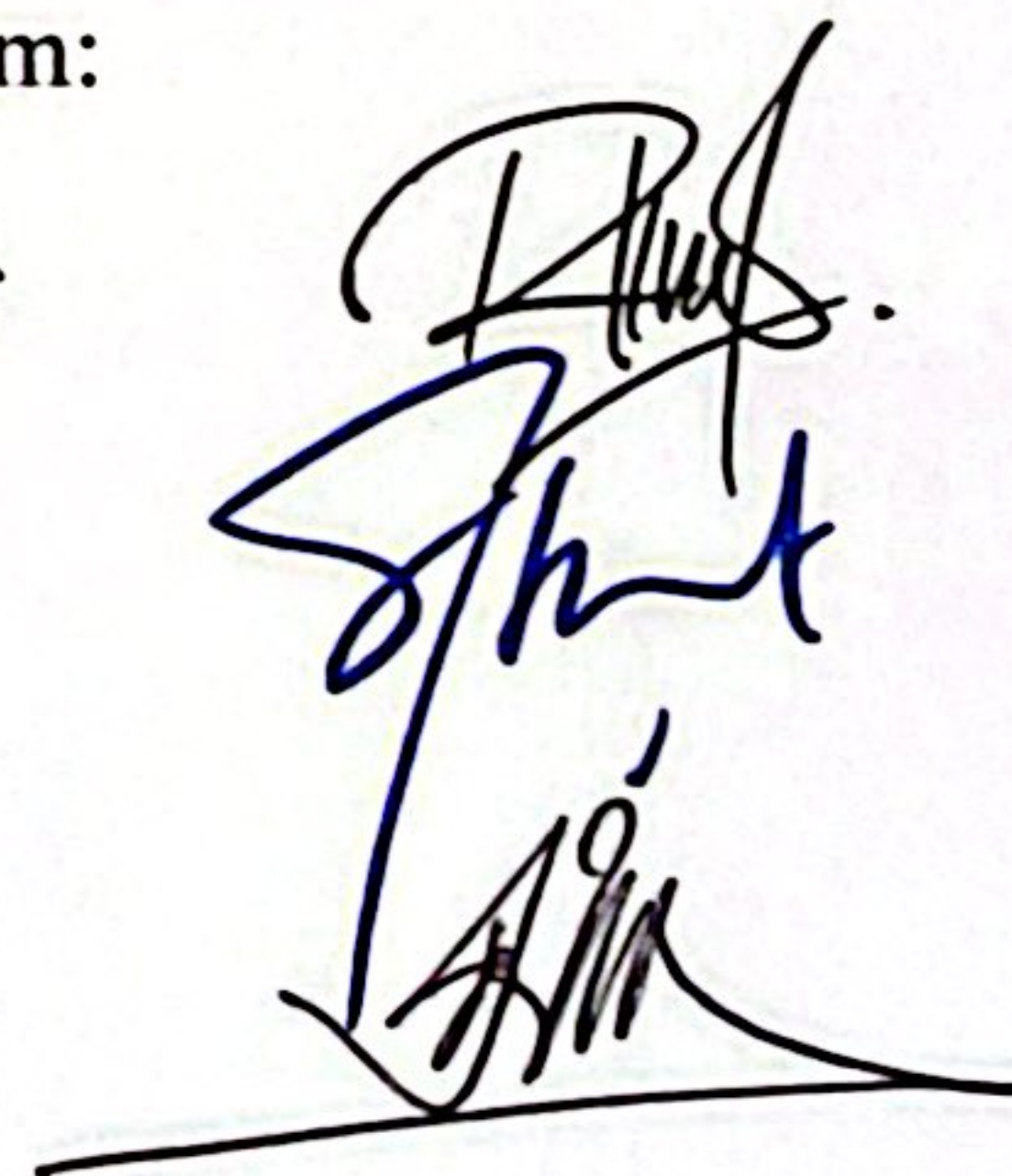
FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree Bachelor of Science at
Undergraduate Study Program of Chemistry
Department of Chemistry
Faculty of Science and Data Analytics
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : Tifani Djlham Salsabilla
NRP. 5004221017

Approved by Final Project Examiner Team:

- | | |
|--|------------|
| 1. Dr.Triyanda Gunawan, S.Si. | Supervisor |
| 2. Dr. Eko Santoso, M.Si. | Examiner |
| 3. Prof. Dr.rer.nat. Irminda Kris Murwani, M.Si. | Examiner |



SURABAYA
20th January 2026

LEMBAR PENGESAHAN

FABRIKASI MEMBRAN MATRIKS CAMPURAN (MMM) BERBASIS POLISULFON DENGAN MATERIAL PENGISI KARBON ZIF-L UNTUK PERMEASI GAS H₂/CO₂

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Sains pada
Program Studi S-1 Kimia
Departemen Kimia
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : TIFANI DJILHAM SALSABILLA
NRP. 5004221017

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Dr.Triyanda Gunawan, S.Si.

Pembimbing

2. Dr. Eko Santoso, M.Si.

Penguji

3. Prof. Dr.rer.nat. Irminda Kris Murwani, M.Si.

Penguji



SURABAYA

20 Januari 2026

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Tifani Djilham Salsabilla / 5004221017
Departemen : Kimia
Dosen Pembimbing / NIP : Dr.Triyanda Gunawan, S.Si. / 1993202011003

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul **“FABRIKASI MEMBRAN MATRIKS CAMPURAN (MMM) BERBASIS POLISULFON DENGAN MATERIAL PENGISI KARBON ZIF-L UNTUK PERMEASI GAS H_2/CO_2 ”** adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 20 Januari 2026

Menyetujui,
Dosen Pembimbing



(Dr. Triyanda Gunawan, S.Si)
NIP. 1993202011003

Mahasiswa



(Tifani Djilham Salsabilla)
NRP. 5004221017

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP: Tifani Djiham Salsabilla / 5004221017
Department : Kimia
Advisor / NIP : Dr.Triyanda Gunawan, S.Si. / 1993202011003

hereby declare that the Final Project with the title of “**FABRICATION OF POLYSULFONE-BASED MIXED MATRIX MEMBRANES WITH ZIF-L CARBON FILLER FOR H₂/CO₂ GAS PERMEATION**” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing. If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Acknowledged
Supervisor



(Dr.Triyanda Gunawan, S.Si)
NIP. 1993202011003

Surabaya, 20th January 2026

Student



(Tifani Djiham Salsabilla)
NRP. 5004221017

FABRIKASI MIXED MATRIX MEMBRANE BERBASIS POLISULFON DENGAN MATERIAL PENGISI KARBON ZIF-L UNTUK PERMEASI GAS H₂/CO₂

Nama Mahasiswa / NRP. : Tifani Djiham Salsabilla / 5004221017
Departemen : Kimia
Dosen Pembimbing : Dr.Triyanda Gunawan, S.Si.

Abstrak

Teknologi membran sebagai aplikasi pemisahan gas memiliki peran penting dalam berbagai proses industri, khususnya dalam pemurnian hidrogen. Pada penelitian ini telah berhasil difabrikasi *Mixed Matrix Membrane* (MMM) berbasis polisulfon (PSf) dengan karbon ZIF-L (C-ZIF-L) sebagai material pengisi serta perlakuan *annealing* pada suhu 120, 150, dan 190°C. Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan penambahan optimum material pengisi C-ZIF-L (0,5; 1,0; dan 1,5 %b/b) serta mendapatkan suhu *annealing* optimum terhadap kinerja pemisahan gas H₂/CO₂. Fabrikasi MMM dilakukan dalam modul *flat-sheet* melalui metode inversi fasa. MMM dikarakterisasi untuk menentukan struktur, gugus fungsi, dan morfologi dengan XRD, ATR-FTIR, dan SEM. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan peningkatan nilai *d-spacing* pada membran berpengisi C-ZIF-L dibandingkan dengan membran *neat*. Perlakuan *annealing* menunjukkan penurunan nilai *d-spacing* dibandingkan dengan membran tanpa perlakuan *annealing*, yang menandakan terjadinya densifikasi matriks polimer. Karakterisasi ATR-FTIR menunjukkan tidak terbentuknya ikatan kimia baru setelah penambahan C-ZIF-L, yang mengindikasikan interaksi fisik. Hasil ATR-FTIR setelah perlakuan *annealing* menunjukkan struktur PSf tetap terjaga. Karakterisasi SEM menunjukkan dispersi material pengisi yang relatif merata di dalam matriks PSf pada penambahan tertentu. Citra SEM menunjukkan peningkatan *Dense Selective Layer* (DSL) pada membran yang diberi perlakuan *annealing*. Kinerja membran diuji melalui uji permeasi gas tunggal untuk gas H₂ dan CO₂. Hasil pengujian menunjukkan bahwa MMM PSf/C-ZIF-L dengan penambahan 1 %b/b memiliki kinerja pemisahan gas terbaik. Membran tersebut menunjukkan peningkatan nilai permeabilitas gas H₂ sebesar 193,78 % dan selektivitas H₂/CO₂ sebesar 108,53 % dibandingkan membran *neat*. Kinerja pemisahan gas H₂/CO₂ yang diperoleh berada di atas kurva Robeson *Upper Bound* 2008, menunjukkan bahwa MMM PSf/C-ZIF-L berpotensi tinggi untuk aplikasi pemisahan dan pemurnian gas hidrogen.

Kata kunci: *Annealing, C-ZIF-L, H₂/CO₂, Membran Matriks Campuran, Polisulfon*

FABRICATION OF POLYSULFONE-BASED MIXED MATRIX MEMBRANES WITH ZIF-L CARBON FILLER FOR H₂/CO₂ GAS PERMEATION

Student Name / NRP. : Tifani Djilham Salsabilla / 5004221017
Department : Chemistry
Advisor : Dr.Triyanda Gunawan, S.Si.

Abstract

Membrane technology for gas separation plays a crucial role in various industrial processes, particularly in hydrogen purification. In this study, polysulfone (PSf)-based mixed matrix membranes (MMMs) incorporating carbonized ZIF-L (C-ZIF-L) as a filler material were successfully fabricated, followed by annealing treatments at temperatures of 120, 150, and 190 °C. This study aims to determine the optimum C-ZIF-L loading (0.5, 1.0, and 1.5 %w/w) and the optimum annealing temperature for enhancing H₂/CO₂ gas separation performance. The MMMs were fabricated in a flat-sheet configuration using the phase inversion method. The membranes were characterized to evaluate their structural properties, functional groups, and morphology using X-ray diffraction (XRD), attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR), and scanning electron microscopy (SEM). XRD analysis revealed an increase in d-spacing values for C-ZIF-L-filled membranes compared to the neat PSf membrane. Annealing treatment resulted in a decrease in d-spacing values relative to the non-annealed membranes, indicating polymer matrix densification. ATR-FTIR analysis confirmed the absence of new chemical bond formation after C-ZIF-L incorporation, suggesting that the interaction between the filler and polymer matrix is primarily physical in nature. Furthermore, ATR-FTIR spectra after annealing demonstrated that the PSf chemical structure remained intact. SEM observations indicated a relatively homogeneous dispersion of the filler within the PSf matrix at certain loadings. In addition, SEM images showed an increase in the dense selective layer (DSL) thickness in annealed membranes. Membrane performance was evaluated through single-gas permeation tests using H₂ and CO₂ gases. The results demonstrated that the PSf/C-ZIF-L MMM with 1 %w/w filler loading exhibited the best gas separation performance. This membrane showed an increase in H₂ permeability of 193.78% and H₂/CO₂ selectivity of 108.53% compared to the neat PSf membrane. The obtained H₂/CO₂ separation performance surpassed the Robeson Upper Bound (2008), indicating that PSf/C-ZIF-L MMMs possess high potential for hydrogen separation and purification applications.

Keywords: *Annealing, C-ZIF-L, H₂/CO₂, Mixed Matrix Membrane, Polysulfone.*

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan hidayah-Nya, sehingga naskah skripsi yang berjudul **“FABRIKASI MEMBRAN MATRIKS CAMPURAN (MMM) BERBASIS POLISULFON DENGAN MATERIAL PENGISI KARBON ZIF-L UNTUK PERMEASI GAS H_2/CO_2 ”** dapat diselesaikan dengan baik. Tulisan ini juga tidak akan terwujud tanpa adanya dukungan, bantuan, motivasi dan doa dari orang-orang terdekat. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Triyanda Gunawan, S.Si. selaku dosen pembimbing dan kepala laboratorium yang telah memberikan banyak sekali bantuan dan bimbingan dalam keberlangsungan penelitian ini. Terima kasih atas segala hal yang bapak berikan mulai dari awal kita bertemu hingga saat ini. Penulis merasa tidak akan pernah mampu membalas semua kebaikan bapak sampai kapanpun.
2. Wahyu Prasetyo Utomo, M.Si., Ph.D. selaku Kepala Departemen Kimia, telah memberikan berbagai fasilitas yang menunjang proses perkuliahan yang telah penulis tempuh.
3. Prof. Yuly Kusumawati, S.Si., M.Si. selaku dosen wali dan kepala prodi yang sudah membersamai penulis dari semester satu hingga saat ini. Terima kasih atas semua nasihat dan bimbingan yang ibu berikan.
4. Bapak dan Ibu Dosen serta Tendik Departemen Kimia ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan bimbingan selama penulis berkuliah di Departemen Kimia ITS.
5. Keluarga penulis, yaitu Mama (Indah Fauziah), Ayah (Wahyu Diantoro), Adik Pertama (Ghifari Idhafi Mayzura), dan Adik Kedua (Ghani Azzam Al-gibran) yang telah menjadi motivasi utama dan memberikan semua hal yang penulis butuhkan. Terima kasih banyak.
6. Keluarga Haaduu, yaitu Ergan, Fahri, Razzan, Nanda, Asad, Alvaro, Daffa Akbar, Daffa Izza, Fadl, Ezi, Rangga, Bram, Galuh, Tea, Igne, Meyra, Dinara, Syarifah, Heca, Ridha, dan Jessy. Terima kasih sudah memberikan banyak pengalaman berharga bagi penulis. Sungguh perjalanan yang menyenangkan bersama kalian selama tujuh semester ini. Walaupun kisah kita sudah selesai sampai disini, tapi kenangan bersama kalian tidak akan pernah penulis lupakan sampai kapanpun.
7. Tim Clearon-works, yaitu Ridha, Nanda, Ryan, dan Donna. Bagi penulis kalian merupakan orang-orang yang membersamai penulis di ujung perkuliahan ini. Kehadiran kalian memberikan penulis rasa bangkit untuk terus berjuang sampai akhir. Sungguh, terima kasih banyak.
8. Kakak-kakak tingkat yang telah memberikan banyak sekali bantuan kepada penulis, yakni Mbak Irma, Mbak Bunga, Mbak Kavita, Mas Sayyid, Mbak Cininta, Mas Henky, Mbak Hasya, dan Mas Nuel.
9. Teman-teman seangkatan yang tidak bisa penulis sebutkan namanya satu persatu. Terima kasih telah menjadi bagian dalam hidup penulis. Kenangan bersama kalian telah memberikan banyak makna kepada penulis.

Surabaya, 20 Januari 2026

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
APPROVAL SHEET.....	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
STATEMENT OF ORIGINALITY	iv
Abstrak	v
Abstract.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Produksi Hidrogen dari <i>Water Gas Shift Reaction</i> (WGSR).....	6
2.3 Teknologi Membran untuk Pemisahan Gas H ₂ /CO ₂	7
2.4 Polisulfon sebagai Bahan Membran Polimer.....	11
2.5 <i>Zeolitic Imidazolate Framework-L</i> (ZIF-L)	12
2.6 <i>Annealing</i> Membran	13
2.7 Karakterisasi Material Pengisi dan Membran.....	14
2.7.1 X-Ray Diffraction (XRD)	14
2.7.2 Attenuated Total Reflectance–Fourier Transform Infrared (ATR-FTIR).....	15
2.7.3 Scanning Electron Microscope-Electron Dispersive X-ray (SEM-EDX).....	17
2.7.4 <i>Water Contact Angel</i> (WCA)	19
2.8 Kinerja Membran dalam Pengujian Pemisahan Gas.....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1 Alat.....	23
3.2 Bahan	23
3.3 Prosedur Riset	23
3.3.1 Sintesis Material Pengisi Karbon ZIF-L	23
3.3.2 Fabrikasi Membran	23
3.3.3 <i>Annealing</i> Membran.....	24
3.4 Karakterisasi Material.....	24
3.4.1 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	24
3.4.2 <i>Attenuated Total Reflectance–Fourier Transform Infrared</i> (ATR-FTIR)	24
3.4.3 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	25
3.4.4 Uji sudut kontak air	25
3.5 Pengujian Pemisahan Gas	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Hasil Sintesis <i>Filler</i>	27
4.2 Hasil Fabrikasi Membran.....	31
4.3 Hasil <i>Annealing</i> Membran	34
4.4 Performa Pemisahan Gas	37

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	44
5.1 Kesimpulan	44
5.2 Saran	44
DAFTAR PUSTAKA.....	45
LAMPIRAN	51
BIODATA PENULIS.....	66

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema WGSR dengan bantuan katalis (Jiang & Caro, 2017).....	7
Gambar 2.2 Driving Force pada membran (De Meis., 2017)	8
Gambar 2.3 Diagram skematik mekanisme perpindahan massa pada membran ((a) difusi kelarutan, (b) molecular sieving, (c) difusi permukaan, dan (d) difusi knudsen (Liu dkk., 2025; Sabouri dkk., 2026)	8
Gambar 2.4 Trade off membran pada kurva robenson (Sarfraz, 2020)	9
Gambar 2.5 Ilustrasi dari Flat Sheet Membran (Hazarika & Ingole, 2024)	11
Gambar 2.6 Struktur polisulfon (M. Wang dkk., 2025)	12
Gambar 2.7 Framework dari ZIF-L (Govindan dkk., 2025).....	13
Gambar 2.8 Morfologi MMM (a) sebelum annealing dan (b) sesudah annealing (Caralin dkk., 2021)	14
Gambar 2.9 Skema ilustrasi hukum bragg (Komilian, 2019)	15
Gambar 2.10 XRD ZIF-L (Jia dkk., 2024)	15
Gambar 2.11 Ilustrasi Prinsip Kerja Attenuated total reflectance (ATR) (H. Wang & Chu, 2013)	16
Gambar 2.12 ATR-FTIR polisulfon (Jonnalagedda & Kuncharam, 2025)	17
Gambar 2.13 Mekanisme Kerja SEM (Temiz, 2022).....	18
Gambar 2.14 SEM ZIF-L (W. Zhu dkk., 2019b) dan agregat ZIF-L (Wijaya dkk., 2021a).....	18
Gambar 2.15 Sudut kontak PSf/rGO	19
Gambar 2.16 Ilustrasi pengujian gas menggunakan metode bubble flow meter	20
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	23
Gambar 4.1 Proses sintesis ZIF-L (a) Larutan Zn^{2+} , (b) Larutan Hmim, dan (c) Larutan ZIF-L	27
Gambar 4.2 Hasil karbonisasi ZIF-L	28
Gambar 4.3 Difraktogram XRD material pengisi.....	29
Gambar 4.4 (a) Spektra FTIR material pengisi dan (b) struktur kimia ZIF-L.	30
Gambar 4.5 Citra FESEM (a) ZIF-L dan (b) C-ZIF-L	30
Gambar 4.6 (a) Mapping EDX C-ZIF-L dan (b) Spektrum EDX C-ZIF-L.....	31
Gambar 4.7 (a) Difraktogram membran tanpa perlakuan annealing dan (b) ilustrasi peningkatan d-spacing akibat penambahan material pengisi.....	32
Gambar 4.8 Spektra FTIR membran tanpa perlakuan annealing.....	32
Gambar 4.9 Citra SEM permukaan (a–e) dan penampang lintang (a_1 – e_1) untuk membran: (a) PSf neat; (b) MMM PSf/C-ZIF-L 0,5%; (c) MMM PSf/C-ZIF-L 1%; (d) MMM PSf/C-ZIF-L 1,5%; dan (e) MMM PSf/ZIF-L 1%.....	34
Gambar 4.10 Difraktogram XRD membran dengan perlakuan annealing	35
Gambar 4.11 Spektra FTIR membran dengan perlakuan annealing.....	35
Gambar 4.12 Citra SEM cross section membran dengan perlakuan annealing (a-b) MMM 120, (c-d) MMM 150, dan (e-f) MMM 190.....	36
Gambar 4.13 Nilai sudut kontak membran (a) sebelum perlakuan annealing dan (b) sesudah perlakuan annealing	37
Gambar 4.14 Permeabilitas dan selektivitas membran tanpa perlakuan annealing.....	39
Gambar 4.15 Permeabilitas dan selektivitas membran dengan perlakuan annealing	40
Gambar 4.16 Grafik perbandingan diameter kinetik dengan permeabilitas dari masing masing membran (a) membran tanpa perlakuan annealing, (b) membran dengan perlakuan annealing.....	41
Gambar 4.17 Perbandingan kinerja membran yang diteliti terhadap kurva Robeson 2008 dan literatur (Eden & Daramola, 2021; Mei dkk., 2020; Wijiyanti dkk., 2019c, 2023) ...	42
Gambar 4.18 Diagram kartesius peningkatan permeabilitas dan selektivitas membran.....	43
Gambar 4.19 Plot F index material pengisi (a) MMM tanpa annealing dan (b) MMM dengan annealing	43

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tinjauan penelitian terdahulu	5
Tabel 2.2 Sifat Fisika dan Kimia H ₂ (Levikhin & Boryaev, 2024).....	6
Tabel 2.3 Konsentrasi gas dalam proses WGSr (S.-W. Lee dkk., 2014)	7
Tabel 2.4 Perbandingan Karakteristik Membran (Imtiaz dkk., 2022)	10
Tabel 3.1 Komposisi larutan dope	24
Tabel 3.2 Parameter perlakuan annealing pada MMM	24
Tabel 4.1 Nilai d-spacing dan DSL membran dengan perlakuan annealing.....	36
Tabel 4.2 Hasil pengujian gas tanpa perlakuan annealing.....	38
Tabel 4.3 Hasil pengujian gas dengan perlakuan annealing	39

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Hidrogen (H_2) merupakan bahan bakar bersih dan efisien untuk pembangkitan energi dan transportasi karena memiliki densitas energi yang tinggi serta tidak menghasilkan emisi saat proses pembakaran. Dalam skala industri, hidrogen umumnya diproduksi melalui proses *Water Gas Shift Reaction* (WGSR), yaitu reaksi antara karbon monoksida (CO) dan uap air (H_2O) yang menghasilkan hidrogen (H_2) dan karbon dioksida (CO_2). Proses ini berperan penting dalam meningkatkan rendemen hidrogen, tetapi menghasilkan produk samping CO_2 dalam jumlah signifikan dengan rasio molar $H_2:CO_2$ yang umumnya mendekati 1:1 (J. Zhu dkk., 2025). Dalam konteks transisi energi global, hidrogen diproyeksikan mampu memenuhi sekitar 10–18% kebutuhan energi dunia pada tahun 2050, seiring meningkatnya permintaan dari sekitar 52,5 juta ton pada tahun 2000 menjadi 88,5 juta ton pada tahun 2020, dan diperkirakan mencapai lebih dari 210 juta ton pada tahun 2030 (IEA., 2022a). Daya tarik hidrogen sebagai sumber energi juga didukung oleh nilai *Higher Heating Value* (HHV) yang sangat tinggi, yakni sekitar 142,5 MJ/kg, jauh melampaui diesel (44,8 MJ/kg), bensin (47,3 MJ/kg), propana (50,3 MJ/kg), maupun metana (55,5 MJ/kg) (Rubio dkk., 2023). Di tingkat nasional, Indonesia memiliki potensi energi terbarukan sebesar 3.687 GW, tetapi kapasitas produksi hidrogen domestik saat ini baru mencapai sekitar 1,6 GW per tahun, sehingga diperlukan pengembangan teknologi yang lebih intensif. Lebih lanjut, keberadaan CO_2 dalam WGSR dapat menurunkan nilai kalor pembakaran hingga lebih dari 30% karena CO_2 bersifat inert dan tidak dapat dioksidasi (Wu dkk., 2024). Oleh karena itu, pengembangan teknologi pemisahan gas H_2/CO_2 menjadi sangat penting untuk meningkatkan kemurnian hidrogen sekaligus menekan emisi karbon pada proses produksi.

Berbagai teknologi pemisahan gas telah dikembangkan, seperti adsorpsi dengan material berpori (Abbaspour dkk., 2025), destilasi kriogenik (He dkk., 2025), dan teknologi berbasis membran (Arnal-Herault dkk., 2025). Di antara teknologi tersebut, teknologi membran dinilai paling unggul karena efisiensi energi tinggi, jejak karbon rendah, kemudahan *scale-up*, serta pengoperasian yang sederhana (Widiastuti dkk., 2020). Pada teknologi ini, campuran gas dilewatkan melalui lapisan selektif, sehingga gas dengan permeabilitas lebih tinggi seperti H_2 dapat melintas lebih cepat ke sisi permeat, sementara CO_2 tertahan di sisi retentat (Xu dkk., 2025). Efisiensi pemisahan H_2/CO_2 dengan membran dapat mencapai 92–98%, bergantung pada jenis membran dan kondisi operasi, sehingga menjadikannya sangat potensial untuk mendukung produksi hidrogen biru (Sun dkk., 2024). Kinerja membran sangat ditentukan oleh jenis polimer yang digunakan karena sifat intrinsik polimer memengaruhi permeabilitas dan selektivitas. Beberapa polimer yang umum digunakan dalam fabrikasi membran antara lain poliimida (PI), polietersulfon (PES), selulosa asetat (CA), polikarbonat (PC), dan polisulfon (PSf) (Park dkk., 2022). Di antara polimer tersebut, PSf merupakan salah satu yang paling banyak dieksplorasi untuk aplikasi pemisahan gas karena memiliki ketahanan panas yang tinggi (suhu plastisasi 187–230°C), kekuatan mekanik yang baik (*tensile strength* >70 Mpa), serta kemampuan permeasi yang memadai (permeasi H_2 sekitar 11 Barrer) (Jonnalagedda & Kuncharam, 2025a; Santosh dkk., 2024). Namun demikian, ukuran pori PSf yang relatif besar membuat selektivitasnya masih rendah. Selain itu, PSf dapat mengalami proses plastisasi pada tekanan dan suhu tertentu, yang mengakibatkan penurunan kinerja membran secara signifikan. Oleh karena itu, diperlukan upaya modifikasi membran PSf untuk meningkatkan selektivitas sekaligus menjaga permeabilitasnya tetap tinggi.

Keterbatasan tersebut dapat diatasi dengan modifikasi struktur PSf melalui penambahan material anorganik sebagai pengisi (*filler*) untuk membentuk membran berjenis baru, yaitu

Membran Matriks Campuran atau yang dikenal juga *Mixed Matrix Membran* (MMM). Pemilihan material pengisi harus mempertimbangkan struktur kristalnya, interaksi dengan matriks polimer, serta sifat fisis dan kimianya terhadap gas yang akan dipisahkan (Gunawan dkk., 2019). Dalam beberapa tahun terakhir, material berbasis *Metal–Organic Frameworks* (MOF), khususnya *Zeolitic Imidazolate Framework–Leaf-like* (ZIF-L), banyak dieksplorasi sebagai *filler* MMM karena memiliki struktur berlapis dua dimensi berpori yang stabil hasil koordinasi ion Zn^{2+} dan ligan 2-metilimidazolat (Cao dkk., 2023). Struktur berlapis ZIF-L memungkinkan difusi cepat gas berukuran kecil seperti H_2 , sementara molekul CO_2 yang lebih besar mengalami hambatan difusi, diperkuat oleh interaksi elektrostatis antara CO_2 dan situs aktif Zn^{2+} (Govindan dkk., 2025). Lebih lanjut, modifikasi material melalui proses karbonisasi ZIF-L menjadi karbon berpori berbasis ZIF-L (C-ZIF-L) telah menjadi strategi menjanjikan untuk peningkatan kinerja pemisahan gas. Selama proses karbonisasi, struktur berlapis ZIF-L secara bertahap mengalami kerusakan akibat suhu tinggi sehingga kerangka organiknya terdegradasi dan berubah menjadi kerangka karbon berpori yang lebih stabil. Pada saat yang sama, sebagian ion Zn yang semula berada dalam struktur ZIF-L bereaksi membentuk partikel ZnO. Kehadiran ZnO ini memberikan kontribusi tambahan, karena permukaannya yang lebih polar mampu berinteraksi kuat dengan molekul CO_2 melalui gaya elektrostatis dan sifat keasaman-lemah permukaannya (F. Zhang dkk., 2018). Struktur awal ZIF-L yang tidak lagi dipertahankan secara utuh setelah karbonisasi justru menghasilkan kerangka karbon berpori dan fase ZnO yang keduanya berperan dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi CO_2 .

Selain melalui modifikasi material pengisi seperti karbonisasi ZIF-L menjadi C-ZIF-L, peningkatan kinerja MMM dapat dilakukan melalui perlakuan termal pasca-fabrikasi atau *annealing*. Proses *annealing* bertujuan untuk memperbaiki struktur internal membran, meningkatkan kompatibilitas antara matriks polimer dan material pengisi, serta mengoptimalkan jalur transportasi gas di dalam membran. Perlakuan ini dilakukan dengan memanaskan membran pada suhu tertentu di bawah titik transisi gelas (T_g) polimer agar tidak menyebabkan deformasi permanen pada struktur membran. Pada penelitian ini, proses *annealing* dilakukan pada suhu 120, 150, dan 190°C. Suhu ini dipilih karena mendekati suhu T_g polisulfon (187–230°C), yang memungkinkan terjadinya relaksasi rantai polimer tanpa merusak morfologi membran (Jasrotia dkk., 2025). Proses *annealing* pada suhu tersebut memperbaiki permukaan antarmuka antara PSf dan C-ZIF-L, sehingga mengurangi terbentuknya *voids* yang sering menjadi jalur bocor gas (*non-selective pathways*). Selain itu, perlakuan termal juga membantu meningkatkan kerapatan struktur polimer akibat reorientasi rantai PSf, yang memperkecil volume bebas (*free volume*) dan menekan permeabilitas gas berukuran besar seperti CO_2 . Studi sebelumnya oleh Widiastuti dkk., (2022) menunjukkan *annealing* PSf pada suhu mendekati T_g mampu meningkatkan selektivitas gas hingga 144% dibandingkan dengan membran tanpa perlakuan *annealing*.

Sejauh ini, modifikasi material pengisi berbasis MOF hasil karbonisasi seperti C-ZIF-L pada membran PSf yang dikombinasikan dengan perlakuan *annealing* masih jarang dilaporkan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh penambahan material C-ZIF-L terhadap kinerja pemisahan gas, khususnya dalam sistem H_2/CO_2 , serta peran proses *annealing* dalam meningkatkan selektivitas membran. Studi ini dilakukan melalui sintesis material pengisi C-ZIF-L, pembuatan MMM PSf/C-ZIF-L dengan variasi persentase berat pengisi, dan perlakuan termal pasca-fabrikasi. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan kinerja membran, khususnya untuk pemisahan gas H_2/CO_2 .

1.2 Rumusan Permasalahan

Berdasarkan uraian latar belakang, membran PSf menawarkan sifat mekanik yang baik, stabilitas termal, dan kemudahan fabrikasi, tetapi memiliki keterbatasan selektivitas dalam

pemisahan gas, khususnya untuk gas H_2/CO_2 . Penambahan material pengisi ke dalam matriks PSf diperlukan untuk meningkatkan kinerja pemisahan gas melalui peningkatan permeabilitas dan selektivitas. C-ZIF-L berpotensi sebagai material pengisi karena memiliki struktur berpori dan keberadaan situs aktif ZnO yang berpotensi meningkatkan selektivitas gas H_2/CO_2 . Namun, penambahan material pengisi yang terlalu sedikit tidak memberikan pengaruh terhadap kinerja membran, sedangkan penambahan berlebihan dapat membentuk *void* dan menurunkan selektivitas. Oleh karena itu, diperlukan kajian tentang optimasi penambahan C-ZIF-L pada matriks PSf. Pengaruh perlakuan *annealing* pada berbagai suhu menentukan kinerja membran. Suhu *annealing* yang terlalu rendah tidak berdampak terhadap kinerja membran, sedangkan suhu yang terlalu tinggi menyebabkan membran bersifat *rubbery*. Dengan demikian, penelitian ini difokuskan untuk mengkaji pengaruh variasi penambahan C-ZIF-L dan suhu *annealing* terhadap kinerja pemisahan gas H_2/CO_2 pada membran PSf, guna memperoleh kondisi membran dengan kinerja yang optimal.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini meliputi metode sintesis material pengisi C-ZIF-L yang dilakukan pada suhu karbonisasi 600 °C dengan *heating rate* 10 °C/menit dan *holding time* selama 2 jam. Konsentrasi larutan *dope* polisulfon yang ditetapkan sebesar 20 %b/b terhadap pelarut. Variasi penambahan material pengisi C-ZIF-L ke dalam matriks PSf dibatasi pada tiga komposisi, yaitu 0,5; 1; dan 1,5 %b/b terhadap massa polimer. Selain itu, penelitian ini juga dibatasi pada penerapan perlakuan *annealing* pada temperatur 120, 150, dan 190 °C untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap struktur dan kinerja membran. Uji performa membran difokuskan pada pemisahan gas H_2 dan CO_2 dengan kemurnian 99,99% (UHP).

1.4 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan penambahan optimum C-ZIF-L ke dalam matriks membran PSf terhadap kinerja pemisahan gas H_2/CO_2 . Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan suhu optimum *annealing* terhadap kinerja membran, khususnya dalam kaitannya dengan perubahan permeabilitas dan selektivitas pemisahan gas H_2/CO_2 .

1.5 Manfaat

Hasil penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan teknologi pemisahan gas H_2/CO_2 hasil WGSR melalui fabrikasi MMM berbasis PSf dengan pengisi C-ZIF-L serta perlakuan *annealing*. Temuan ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan membran pemisahan gas hidrogen yang lebih selektif dan berpotensi diaplikasikan pada proses pemurnian hidrogen berbasis WGSR.

“Halaman sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menyajikan pembahasan yang lebih mendalam mengenai dasar teori dan konsep yang mendukung penelitian yang telah dijabarkan pada bab sebelumnya. Uraian mencakup penjelasan tentang berbagai metode pemisahan gas, teknologi membran yang digunakan dalam aplikasi pemisahan gas, serta pengembangan dan modifikasi MMM. Selain itu, dibahas struktur, sifat, serta karakteristik material pengisi yang digunakan dalam penelitian ini. Pada bagian akhir, bab ini juga menjelaskan metode pengujian dan teknik karakterisasi yang diterapkan untuk menganalisis kinerja dan sifat material yang dihasilkan.

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai MMM dengan penambahan berbagai material pengisi anorganik telah banyak dilakukan untuk meningkatkan kinerja pemisahan gas, khususnya dalam mengatasi keterbatasan membran PSf yang umumnya mengalami fenomena *trade-off* antara permeabilitas dan selektivitas. Berbagai jenis pengisi seperti MOF dan karbon berpori telah dilaporkan mampu meningkatkan jalur difusi selektif dalam matriks polimer. Tinjauan mengenai modifikasi beberapa jenis polimer serta pengaruh material berbasis MOF dan karbon disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Tinjauan MMM berpengisi MOF dan karbon

Polimer	Material Pengisi	Permeabilitas H ₂ (Barrer)	Selektivitas H ₂ /CO ₂	Referensi
PSf	ZTC	48,79	3,04	(Wijiyanti dkk., 2019c)
	ZIF-8	17,40	2,40	(Mei dkk., 2020)
	ZIF-L	567,70	4,30	(Jia dkk., 2024)
Poli(furfuril alkohol)	C-ZIF-L	1.040	4,90	(Z. Zhong dkk., 2014)
Matrimid	ZIF-95	76,60	3,30	(Ilicak dkk., 2021)
Poli(imida) 6FDA-DAM	ZIF-11	272,45	1,06	(Safak Boroglu & Yumru, 2017)

Penelitian sebelumnya oleh Jia *dkk.* (2014) melaporkan proses karbonisasi ZIF-L menjadi karbon ZIF-L yang kemudian diendapkan pada substrat berpori α -Al₂O₃ dan digunakan sebagai *filler* pada MMM berbasis poli(furfuril alkohol). Membran yang dihasilkan menunjukkan permeabilitas gas H₂ yang tinggi, mencapai 1.040 GPU. Namun demikian, performa pemisahan membran tersebut belum mampu melampaui batas atas Robeson (2008) akibat rendahnya nilai selektivitas, sebesar 4,90. Kondisi ini menjadi dasar penelitian ini, yang bertujuan untuk mengoptimalkan performa membran agar mampu melampaui batas atas Robeson (2008). Selain itu, berbeda dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan suhu karbonisasi 550 °C, penelitian ini menerapkan suhu karbonisasi yang lebih tinggi, yaitu 600 °C, untuk memastikan proses karbonisasi berlangsung secara lebih sempurna. Penerapan material ini pada matriks PSf, disertai dengan perlakuan *annealing*, diharapkan dapat meningkatkan nilai selektivitas membran yang dihasilkan.

2.2 Produksi Hidrogen dari *Water Gas Shift Reaction* (WGSR)

Hidrogen (H₂) merupakan gas yang tidak berwarna dan tidak berbau, serta memiliki sifat sangat mudah terbakar. Sifat fisika dan kimia gas H₂ dapat dilihat pada Tabel 2.2. Gas ini merupakan unsur paling ringan dan paling melimpah di alam semesta. Beberapa sumber seperti biomassa, gas alam, dan air dapat digunakan untuk menghasilkan hidrogen melalui berbagai jalur proses seperti reformasi, elektrolisis, maupun reaksi kimia lainnya (Jumah, 2024). Selain itu, gas hidrogen juga dikenal sebagai bahan bakar bersih karena tidak menghasilkan senyawa karbon selama proses pembakaran atau oksidasi pada suhu rendah. Potensi hidrogen yang besar dalam menekan emisi karbon menjadikannya salah satu fokus utama dalam upaya transisi menuju energi hijau dan pencapaian target NZE pada tahun 2060. Sejalan dengan itu, berbagai negara kini berupaya mengembangkan infrastruktur serta teknologi produksi hidrogen yang berkelanjutan untuk mendukung kemandirian energi di masa depan (Chen dkk., 2017).

Tabel 2.2 Sifat Fisika dan Kimia H₂ (Levikhin & Boryaev, 2024)

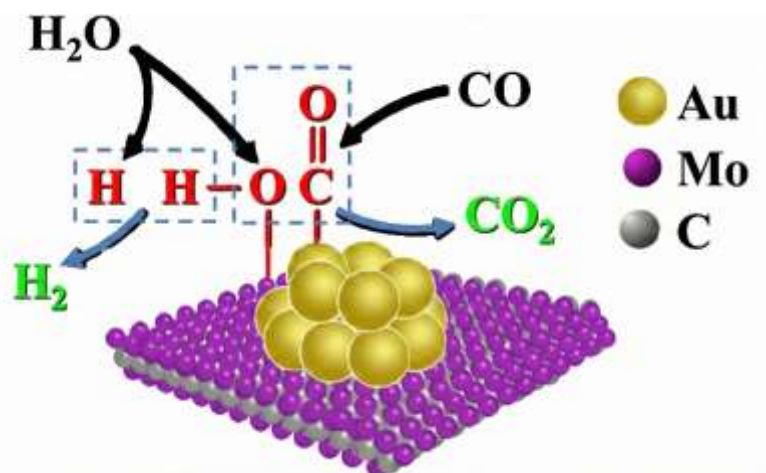
Properti	Nilai	Satuan
Massa molekul relatif	2,01	g/mol
Densitas gas pada STP	0,08	g/L
Titik leleh	259,16	°C
Titik didih	252,76	°C
Tekanan kritis (P _n)	13,09	bar
Suhu kritis (T _n)	33,18	K
Nilai panas spesifik (C _p) gas	14,31	J/g·K
<i>Lower Heating Value</i> (LHV)	120	kJ/g

Salah satu proses dalam meningkatkan kandungan hidrogen adalah WGSR seperti pada Gambar 2.1, yang berfungsi mengonversi karbon monoksida (CO) menjadi hidrogen (H₂) dan karbon dioksida (CO₂). Reaksi kimia yang terjadi dapat dituliskan sebagai berikut (Latifi & Ravindi, 2015) :



Reaksi ini bersifat eksotermik, sehingga cenderung lebih efisien pada suhu rendah karena kesetimbangan reaksi bergeser ke arah pembentukan H₂. Secara industri, proses WGSR umumnya dilakukan dalam dua tahap, yaitu *High Temperature Shift* (HTS) pada kisaran 350-450 °C menggunakan katalis Fe–C dan *Low Temperature Shift* (LTS) pada kisaran 200-250 °C menggunakan katalis Cu–Zn–Al (Ebrahimi dkk., 2020). Kombinasi kedua tahap ini memungkinkan tercapainya konversi CO yang tinggi sekaligus mempertahankan laju reaksi yang optimal. Reaksi *WGSR* merupakan langkah penting untuk meningkatkan kandungan hidrogen pada gas produk dari proses gasifikasi atau reformasi. Penggunaan katalis berbasis Ni dilaporkan secara signifikan mempercepat WGSR dan meningkatkan fraksi H₂ dalam gas produk. Sebagai contoh, Baraj dkk., (2022) melaporkan bahwa penambahan katalis berbasis Ni mampu mengonversi CO₂ hingga sekitar 95% pada rentang suhu 220–480 °C. Dibandingkan penelitian terdahulu, studi tersebut juga menerapkan laju alir umpan yang jauh lebih tinggi, sehingga percobaan dapat dipercepat tanpa mengurangi aktivitas WGSR maupun selektivitasnya. Katalis komersial berbasis Ni (72,2 %b/b Ni) juga menunjukkan performa yang stabil pada tekanan 2–6 MPa, dengan konversi CO tetap melebihi 95% dalam rentang suhu

yang sama. Selain itu, fraksi H_2 yang dihasilkan tercatat mencapai sekitar 10,6–12,1 mol% pada tekanan rendah (0,5 MPa).



Gambar 2.1 Skema WGSR dengan bantuan katalis (Jiang & Caro, 2017)

Setelah reaksi WGSR berlangsung, komposisi gas hasil reaksi umumnya didominasi oleh H_2 dan CO_2 sebagai produk utama, dengan komposisi gas nya sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2.3. Kondisi ini menuntut adanya tahap pemisahan H_2/CO_2 yang efektif untuk memperoleh hidrogen dengan kemurnian tinggi yang dapat dimanfaatkan sebagai energi bersih. Pada saat yang sama, pemisahan ini juga berperan penting dalam menangkap dan mengonversi CO_2 agar tidak terlepas ke atmosfer, sehingga mendukung upaya pengurangan emisi karbon dan penerapan teknologi ramah lingkungan.

Tabel 2.3 Konsentrasi gas dalam proses WGSR (S.-W. Lee dkk., 2014)

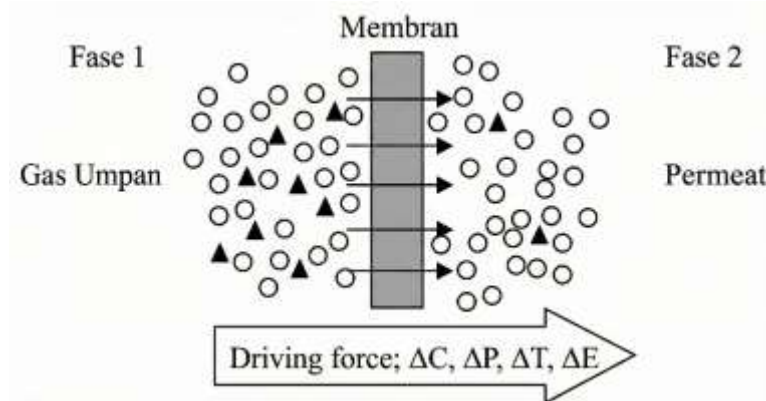
Komponen	Konsentrasi [vol.%] Sebelum WGSR	Konsentrasi [vol.%] Setelah WGSR
CO	60,0	0,1
CO_2	—	37,2
H_2	40,0	62,7

2.3 Teknologi Membran untuk Pemisahan Gas H_2/CO_2

Perkembangan teknologi pemisahan gas berbasis membran dalam dekade terakhir menunjukkan kemajuan yang signifikan, terutama untuk aplikasi pemisahan gas hidrogen (H_2) dan karbon dioksida (CO_2). Penerapan teknologi ini semakin meluas seiring meningkatnya kebutuhan terhadap hidrogen berkualitas tinggi dari berbagai proses, seperti WGSR, reformasi, dan gasifikasi biomassa. Sistem berbasis membran menarik perhatian karena mampu memisahkan H_2 dari campuran gas secara efisien dengan konsumsi energi yang lebih rendah dibandingkan proses konvensional seperti destilasi kriogenik atau absorpsi kimia (Chung dkk., 2007; R. Ding dkk., 2022a; Wijenayake dkk., 2013). Menurut Sholl & Lively, (2016), teknologi membran dapat menghemat hingga 90% energi dibandingkan metode pemisahan berbasis destilasi. Selain itu, keunggulan lain seperti proses yang sederhana, ramah lingkungan, dan mudah diintegrasikan dengan reaksi kimia membuat teknologi ini sangat potensial untuk pengolahan gas hasil reaksi WGSR yang kaya akan H_2 dan CO_2 .

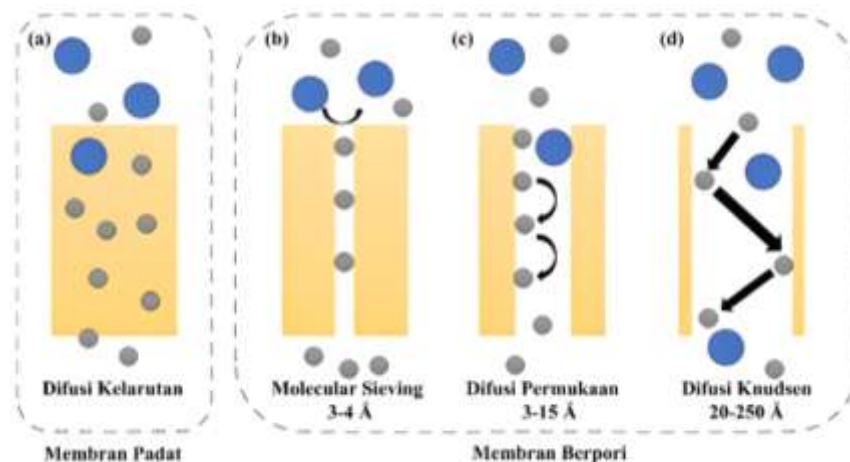
Mekanisme pemisahan pada membran terjadi karena adanya gaya penggerak utama (*driving force*) seperti pada Gambar 2.2 yang memungkinkan suatu molekul atau zat dapat menembus lapisan membran. Gaya penggerak ini dapat berupa gradien tekanan, potensial

kimia, atau potensial listrik, yang masing-masing memicu proses perpindahan massa seperti difusi molekul, migrasi ion, atau konveksi fluida (Dischinger dkk., 2024). Dalam konteks pemisahan gas H_2/CO_2 , perbedaan tekanan parsial antara sisi umpan dan sisi permeat menjadi gaya penggerak utama (*driving force*) yang memicu terjadinya transportasi gas melalui membran. Molekul H_2 , yang memiliki ukuran kinetik lebih kecil (0,28 nm) dan energi difusi lebih tinggi dibandingkan CO_2 (0,33 nm), dapat bergerak melintasi pori atau struktur padat membran dengan lebih cepat. Proses ini secara termodinamika dikendalikan oleh gradien fugasitas, yaitu perbedaan energi bebas antara kedua sisi membran yang menyebabkan H_2 berdifusi menuju daerah bertekanan lebih rendah, sementara CO_2 tertahan akibat interaksi yang lebih kuat dengan material membran.



Gambar 2.2 *Driving Force* pada membran (De Meis., 2017)

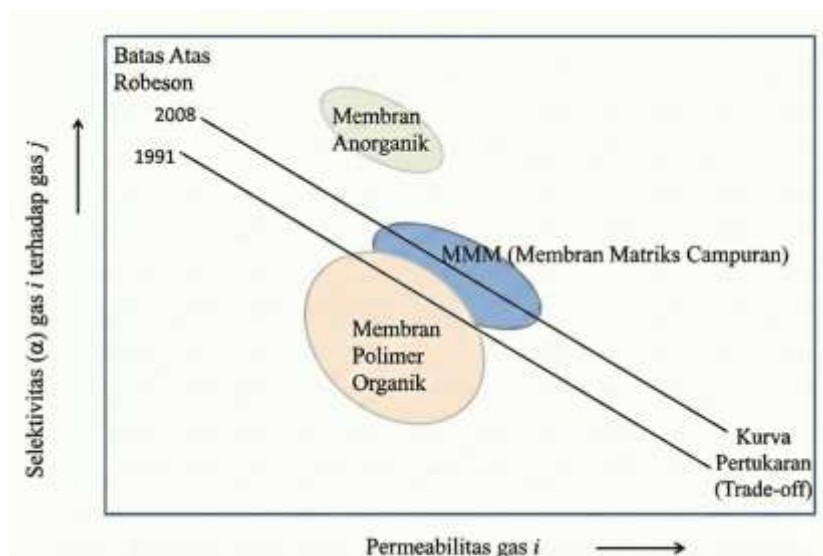
Secara struktural seperti pada Gambar 2.3, membran diklasifikasikan menjadi dua tipe utama, yaitu membran berpori (*porous membrane*) dan membran rapat (*dense membrane*). Pada membran berpori, proses transportasi gas bergantung pada ukuran dan distribusi pori, semakin kecil pori membran, semakin besar peran difusi selektif. Jenis difusi yang terjadi dapat dibedakan menjadi difusi permukaan, difusi Knudsen, dan *molecular sieving*. *Molecular sieving* efektif untuk pemisahan H_2/CO_2 karena perbedaan diameter kinetik kedua gas, yaitu H_2 (2,89 Å) dan CO_2 (3,30 Å). Pada membran rapat, pemisahan gas mengikuti mekanisme larutan difusi (*solution diffusion*), di mana molekul H_2 terlebih dahulu larut dalam material membran kemudian berdifusi ke sisi permeat. Proses ini dikontrol oleh gradien konsentrasi total dan interaksi kimia antara gas dan material membran (Ye dkk., 2024).



Gambar 2.3 Diagram skematik mekanisme perpindahan massa pada membran ((a) difusi kelarutan, (b) *molecular sieving*, (c) difusi permukaan, dan (d) difusi Knudsen (Liu dkk., 2025; Sabouri dkk., 2026).

Fenomena *trade-off* antara permeabilitas dan selektivitas pada sistem pemisahan gas H₂/CO₂ (Gambar 2.4) pertama kali dijelaskan secara mendalam oleh Robeson (2008) melalui analisis kinerja berbagai material membran polimerik. Dalam penelitiannya, Robeson mengumpulkan data eksperimen dari berbagai jenis polimer dan memplotkannya dalam diagram logaritmik yang menggambarkan hubungan antara permeabilitas hidrogen dan selektivitas terhadap karbon dioksida (α). Hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa peningkatan permeabilitas H₂ yang menandakan kemampuan gas untuk melewati membran dengan cepat cenderung diikuti oleh penurunan selektivitas terhadap CO₂, dan sebaliknya. Hal ini menunjukkan bahwa membran dengan selektivitas tinggi terhadap H₂/CO₂ umumnya memiliki permeabilitas H₂ atau CO₂ yang rendah, sehingga sulit untuk mencapai keduanya secara simultan. Berdasarkan pengamatan ini, Robeson menetapkan batas empiris yang dikenal sebagai *Robeson Upper Bound*, yang merepresentasikan batas maksimum performa membran polimer dalam pemisahan gas H₂/CO₂.

Berdasarkan komposisi material penyusunnya, membran pemisahan gas diklasifikasikan ke dalam membran organik dan anorganik. Membran organik berbasis polimer dikategorikan menjadi dua tipe utama, yaitu *glassy* dan *rubbery*, yang dibedakan berdasarkan temperatur transisi gelas (T_g). Membran *glassy* umumnya memiliki struktur yang kaku dengan pori rapat, memberikan selektivitas tinggi, tetapi fluks rendah, sedangkan membran *rubbery* bersifat lebih lentur dan memiliki permeabilitas tinggi tetapi selektivitas yang lebih rendah. Menurut Yang dkk., (2020), kinerja pemisahan gas pada membran *glassy* cenderung berada lebih dekat dengan garis *Robeson Upper Bound* dibandingkan membran *rubbery*, menjadikannya kandidat yang lebih potensial untuk pemisahan H₂/CO₂. Namun, secara umum membran polimerik masih memiliki keterbatasan selektivitas di bawah batas Robeson dan mudah mengalami plastisisasi pada suhu serta tekanan tinggi. Di sisi lain, membran anorganik seperti silika, zeolit, dan MOF menawarkan kestabilan termal dan kimia yang lebih baik serta ukuran pori yang teratur, sehingga mampu memberikan selektivitas difusi H₂ terhadap CO₂ yang lebih tinggi. Meskipun demikian, tantangan dalam proses fabrikasi dan rendahnya kekuatan mekanik masih menjadi hambatan utama dalam penerapan membran anorganik secara luas.



Gambar 2.4 Trade off membran pada kurva robenson (Sarfraz, 2020)

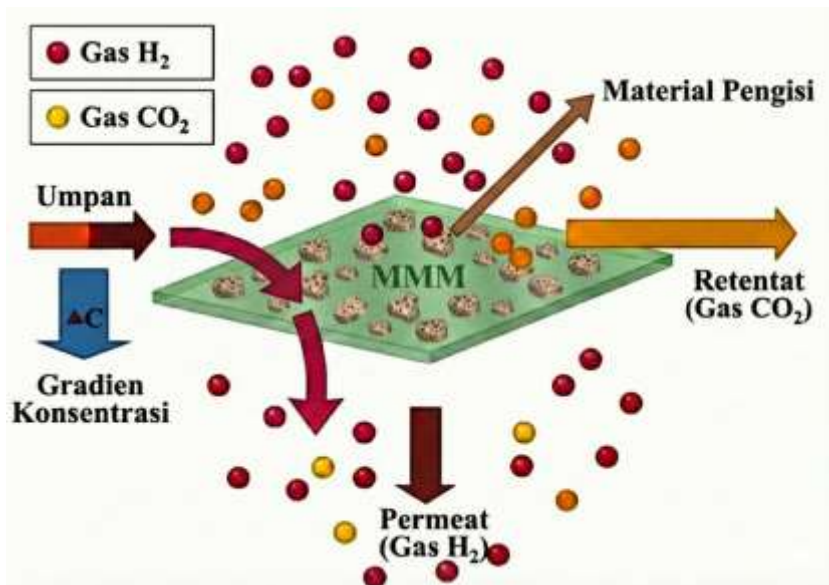
Batas Robeson, terutama dalam konteks H₂/CO₂, menegaskan bahwa material polimer konvensional seperti poliimid, polisulfon, dan polieterimid umumnya masih berada di bawah

garis batas atas dengan selektivitas α sekitar 10–20 dan permeabilitas H_2 berkisar antara 100-1000 Barrer, tergantung kondisi operasi. Oleh karena itu, penelitian ini memfokuskan inovasi MMM yang dirancang untuk meningkatkan selektivitas pemisahan H_2/CO_2 tanpa mengorbankan permeabilitas gas. Selain itu, karakteristik perbedaan antar jenis membran disajikan pada Tabel 2.4 sebagai dasar untuk mengetahui dan membandingkan variasi sifat serta kinerja masing-masing membran.

Tabel 2.4 Perbandingan Karakteristik Membran (Imtiaz dkk., 2022)

Karakteristik	Membran Polimer	Membran Anorganik	Membran Mixed Matrix
Stabilitas termal dan kimia	Moderat	Superior (Unggul)	Superior (Unggul)
Kekuatan mekanis	Baik	Rendah	Sangat Baik
Biaya fabrikasi	Rendah	Tinggi	Moderat
Prosesabilitas dan sintesis	Mudah dan sederhana	Sulit	Mudah dan sederhana
Kinerja pemisahan	Di bawah Robeson <i>upper bound</i>	Di atas Robeson <i>upper bound</i>	Di atas Robeson <i>upper bound</i>
Ketahanan terhadap tekanan tinggi	Moderat	Lebih tinggi	Lebih tinggi
Plastisasi	Rentan	Tidak rentan	Tidak rentan

MMM merupakan jenis membran yang menggabungkan matriks polimer yang fleksibel dengan material anorganik berpori seperti *zeolit*, *MOF*, *covalent organic frameworks (COFs)*, atau material berbasis karbon seperti *graphene oxide (GO)* dan *carbon nanotubes (CNTs)* untuk mengatasi keterbatasan *trade-off* antara permeabilitas dan selektivitas pada membran polimer konvensional (S. Zhong dkk., 2025). Kecocokan antara kedua komponen ini menghasilkan struktur komposit dengan jalur difusi selektif yang memungkinkan transpor gas seperti H_2 berlangsung cepat sekaligus menahan pergerakan gas lainnya, seperti CO_2 , sehingga kinerjanya mampu melampaui batas Robeson (2008). Pada sistem pemisahan H_2/CO_2 , peningkatan performa MMM sangat bergantung pada kecocokan antarmuka antara fase polimer dan partikel anorganik, ketidaksesuaian keduanya dapat menyebabkan terbentuknya celah (*voids*) yang menurunkan selektivitas gas. Beberapa studi menunjukkan hasil signifikan, seperti yang dilaporkan oleh Jia dkk., (2024), bahwa penambahan ZIF-L dalam poliimid meningkatkan permeabilitas H_2 hingga 368,9 Barrer dan selektivitas H_2/CO_2 hingga 19,1 melampaui batas Robeson. Peningkatan ini dikaitkan dengan ukuran pori ZIF-L (0,34 nm) yang sesuai dengan diameter kinetik H_2 (0,289 nm), tetapi cukup kecil untuk menghambat CO_2 (0,33 nm) dan menghasilkan efek penyaringan molekul yang selektif.



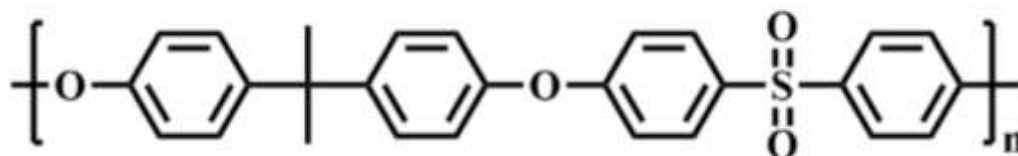
Gambar 2.5 Ilustrasi dari *Flat Sheet* Membran (Hazarika & Ingole, 2024)

Membran pemisahan gas juga dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuk atau geometri strukturnya yang berpengaruh terhadap efisiensi proses pemisahan gas. Salah satu geometri yang banyak digunakan, khususnya pada skala laboratorium, adalah membran lembaran datar (*flat sheet*). Membran *flat sheet* yang diilustrasikan pada Gambar 2.5, memiliki bentuk datar dengan struktur yang dapat bersifat simetris atau asimetris, bergantung pada metode fabrikasi yang digunakan (Zeeshan dkk., 2025). Pada konfigurasi pengujian membran *flat sheet*, gas umpan (*feed gas*) umumnya dialirkan sejajar dengan permukaan membran (*cross-flow*) atau tegak lurus terhadap permukaan membran (*dead-end*). Gas umpan dialirkan pada sisi *feed*, sedangkan gas yang berhasil melewati membran dikumpulkan pada sisi *permeate*. Perbedaan tekanan antara sisi *feed* dan *permeate* berperan sebagai gaya pendorong utama dalam proses permeasi gas. Keunggulan utama geometri *flat sheet* meliputi kemudahan proses fabrikasi, penanganan, dan fleksibilitas pengoperasian pada berbagai kondisi tekanan (Kariman dkk., 2026). Oleh karena itu, membran *flat sheet* banyak digunakan dalam penelitian awal untuk mengevaluasi kinerja pemisahan gas, termasuk pemisahan H_2/CO_2 , sebelum diaplikasikan pada sistem membran berskala besar.

2.4 Polisulfon sebagai Bahan Membran Polimer

Membran polimer telah berkembang menjadi salah satu teknologi pemisahan gas yang unggul dibandingkan metode konvensional karena kemampuannya memisahkan gas berdasarkan ukuran molekul serta kemudahan dalam proses fabrikasi (Tao dkk., 2025). Dalam konteks pembuatan membran, polimer berperan penting sebagai bahan dasar matriks yang menentukan kekuatan mekanik, kestabilan struktur, serta performa pemisahan gas seperti permeabilitas dan selektivitas (An dkk., 2025). Kinerja membran sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia dan sifat fisik polimernya. Perubahan konsentrasi polimer dalam larutan *dope* akan mengubah morfologi membran. Konsentrasi polimer yang lebih tinggi umumnya meningkatkan viskositas, memperlambat pertukaran difusi *solvent/non-solvent*, dan mengubah morfologi membran menjadi lebih padat (Karim dkk., 2022). Berdasarkan morfologinya, membran polimer dibagi menjadi dua jenis, yaitu membran simetris dan asimetris. Membran simetris memiliki struktur padat atau berpori yang seluruh ketebalannya bersifat selektif, tetapi umumnya menunjukkan permeabilitas gas yang rendah karena tingginya resistensi terhadap difusi. Sebaliknya, membran asimetris memiliki struktur heterogen yang terdiri atas lapisan

rapat (*dense layer*) sebagai zona selektif dan substruktur berpori sebagai penopang mekanik, umumnya diproduksi dengan metode inversi fasa (Stewart, 2014). Jenis membran asimetris banyak digunakan pada aplikasi pemisahan gas karena menawarkan keseimbangan antara kekuatan mekanik dan kinerja pemisahan. Beberapa polimer yang umum digunakan sebagai bahan dasar membran antara lain polisulfon (PSf), *silicon rubber*, *poliimida (PI)*, dan *selulosa asetat (CA)* (Sultana dkk., 2025). Di antara berbagai jenis tersebut, PSf dilaporkan memiliki nilai permeabilitas H_2 yang tinggi dan selektivitas yang baik terhadap gas N_2 , CH_4 , dan CO_2 , dengan nilai selektivitas masing-masing 11,06 (H_2/N_2), 3,03 (H_2/CO_2), 7,77 (H_2/CH_4), dan 8,61 (H_2/O_2) (Wijiyanti dkk., 2020).



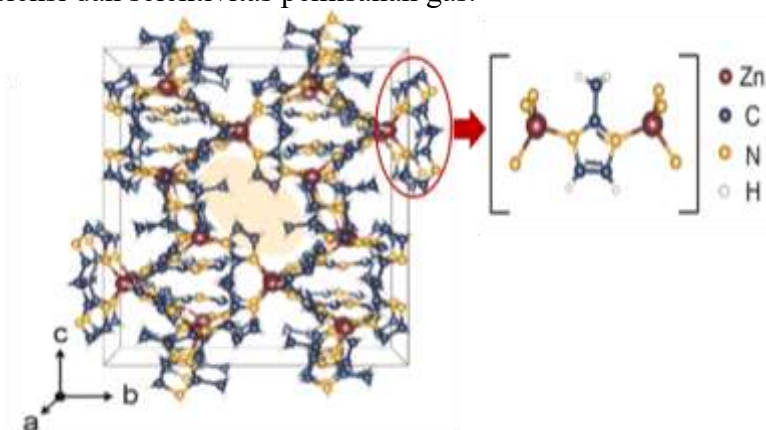
Gambar 2.6 Struktur polisulfon (M. Wang dkk., 2025)

Polisulfon (PSf) merupakan salah satu jenis polimer aromatik termoplastik yang banyak digunakan dalam aplikasi pemisahan gas karena memiliki keseimbangan yang baik antara selektivitas dan permeabilitas, serta stabilitas termal dan kimia yang tinggi. Struktur PSf (Gambar 2.6) tersusun dari rantai polimer dengan gugus fenil dan ikatan eter-sulfon ($-SO_2-$) yang memberikan kekakuan struktural sekaligus ketahanan terhadap pelarut organik dan suhu tinggi (Singh dkk., 2021). Berbeda dengan polimer poliimida seperti P84 yang juga dikenal memiliki performa pemisahan gas yang baik, polisulfon menawarkan biaya produksi yang lebih rendah, proses fabrikasi yang lebih sederhana, dan fleksibilitas dalam modifikasi permukaan maupun pencampuran dengan bahan anorganik, sehingga banyak digunakan sebagai matriks utama dalam pembuatan membran *flat sheet* dan MMM (J.-Y. Lee dkk., 2019; Singh dkk., 2021). PSf memiliki suhu transisi gelas (T_g) yang relatif tinggi, yaitu sekitar $187-230^\circ C$, menjadikannya stabil pada kondisi operasi pemisahan gas bersuhu menengah hingga tinggi (Jasrotia dkk., 2025). Stabilitas termal ini sangat penting untuk aplikasi industri seperti pemisahan gas H_2/CO_2 dari hasil WGS yang biasanya berlangsung pada suhu tinggi.

2.5 Zeolitic Imidazolate Framework-L (ZIF-L)

ZIF-L merupakan salah satu anggota keluarga MOF yang tersusun dari ion logam divalen, seperti Zn^{2+} , yang berkoordinasi dengan ligan organik *2-methylimidazole* (Hmim) melalui ikatan koordinasi yang kuat (W. Zhu dkk., 2019a). Secara umum, MOF merupakan material hibrida anorganik-organik yang terdiri atas ion atau kluster logam yang terkoordinasi dengan ligan organik multidentat, membentuk struktur berpori tiga dimensi dengan luas permukaan dan volume pori yang tinggi. Keberadaan komponen organik dalam struktur MOF meningkatkan kompatibilitasnya dengan matriks polimer dibandingkan material anorganik murni, sehingga MOF, termasuk ZIF-L, banyak dimanfaatkan sebagai material pengisi dalam sistem *mixed matrix membrane* (MMM) untuk meningkatkan kinerja pemisahan gas (Y. Ma dkk., 2025). Struktur ZIF-L membentuk kerangka berpori tiga dimensi dengan morfologi berlapis dua dimensi (*2D layered*) yang khas, menyerupai bentuk daun (*leaf-like structure*), sehingga dinamakan ZIF-L. Material ini memiliki struktur dan komposisi kimia yang mirip dengan ZIF-8, tetapi menunjukkan perbedaan signifikan pada morfologinya. Menurut hasil penelitian terbaru, ZIF-L memiliki rongga berbentuk bantal (*cushion-like cavity*) dengan ukuran antar lapisan sekitar $9,4 \text{ \AA} \times 7,0 \text{ \AA} \times 5,3 \text{ \AA}$, yang sangat sesuai untuk menampung dan berinteraksi dengan molekul CO_2 . Gugus imidazol pada ZIF-L mampu membentuk interaksi

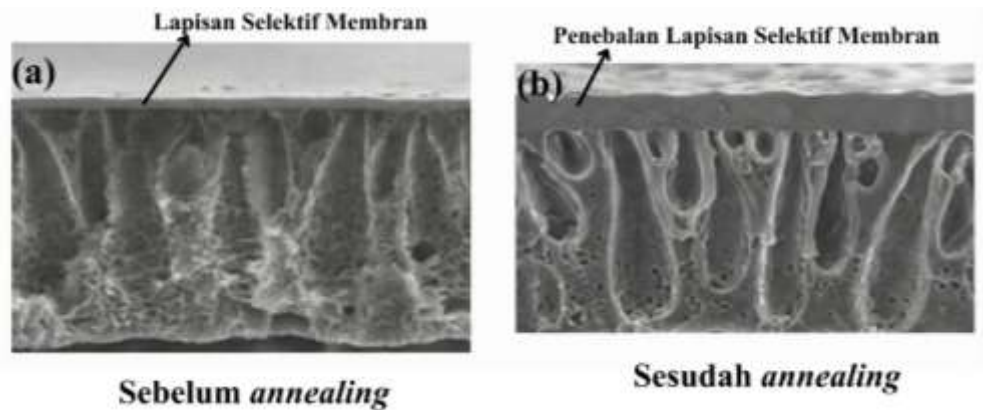
kuat dengan molekul CO₂, yang menyebabkan penurunan laju permeasi CO₂ melalui material ini, sehingga meningkatkan kemampuan selektifnya terhadap gas hidrogen (H₂) (Kim dkk., 2024). Berdasarkan model kerangka kaku (*rigid frame model*), ukuran pori efektif ZIF-L adalah sekitar 3,4 Å, sedikit lebih besar dari diameter kinetik gas H₂ (2,89 Å), yang memungkinkan H₂ untuk dengan mudah berdifusi melalui pori-pori tersebut. Kombinasi dari struktur berlapis dan interaksi kuat antara gugus imidazol dengan CO₂ menjadikan ZIF-L sebagai salah satu kandidat material pengisi potensial dalam sistem MMM berbasis polimer seperti PSf untuk meningkatkan efisiensi dan selektivitas pemisahan gas.



Gambar 2.7 Framework dari ZIF-L (Govindan dkk., 2025)

2.6 Annealing Membran

Annealing merupakan proses perlakuan termal di mana suatu polimer dipanaskan hingga suhu tertentu, dipertahankan selama waktu tertentu, kemudian didinginkan secara terkendali hingga mencapai suhu ruang (Qiao dkk., 2025). Pada polimer amorf seperti polisulfon (PSf), perlakuan ini berperan penting dalam menata ulang struktur internal melalui relaksasi rantai polimer. Pemanasan di bawah suhu transisi gelas (T_g) dapat melepaskan tegangan internal yang timbul selama proses fabrikasi, sedangkan pemanasan mendekati T_g mampu menginduksi pengenduran segmental yang memengaruhi perubahan morfologi dan sifat fisik PSf (Lai dkk., 2019). Secara umum, *annealing* akan menurunkan *free volume* antar rantai dan meningkatkan kerapatan struktur (Moghadam dkk., 2020). Dibandingkan pendekatan lain seperti teknik *Langmuir–Blodgett* atau pertumbuhan kristal *in situ*, *annealing* menawarkan keunggulan karena morfologi polimer dapat dikontrol hanya melalui pengaturan suhu dan waktu pemanasan. Perlakuan termal ini dapat memicu berbagai fenomena seperti reorganisasi segmen dan peningkatan densitas rantai, bergantung pada kondisi *annealing* yang digunakan (Sohail dkk., 2023; Zhuang dkk., 2015). Dampak positif *annealing* pada peningkatan selektivitas gas telah dibuktikan, misalnya melalui studi oleh Widiastuti dkk., (2022) yang menunjukkan bahwa membran PSf berpengisi ZTC mengalami peningkatan selektivitas sebesar 102% dibandingkan membran sebelum *annealing*. Namun, proses ini juga menyebabkan penurunan permeabilitas hingga sekitar 99%, sebuah fenomena yang lazim terjadi mengingat prinsip *trade-off* antara selektivitas dan permeabilitas pada membran pemisahan gas.



Gambar 2.8 Morfologi MMM (a) sebelum *annealing* dan (b) sesudah *annealing* (Caralin dkk., 2021)

2.7 Karakterisasi Material Pengisi dan Membran

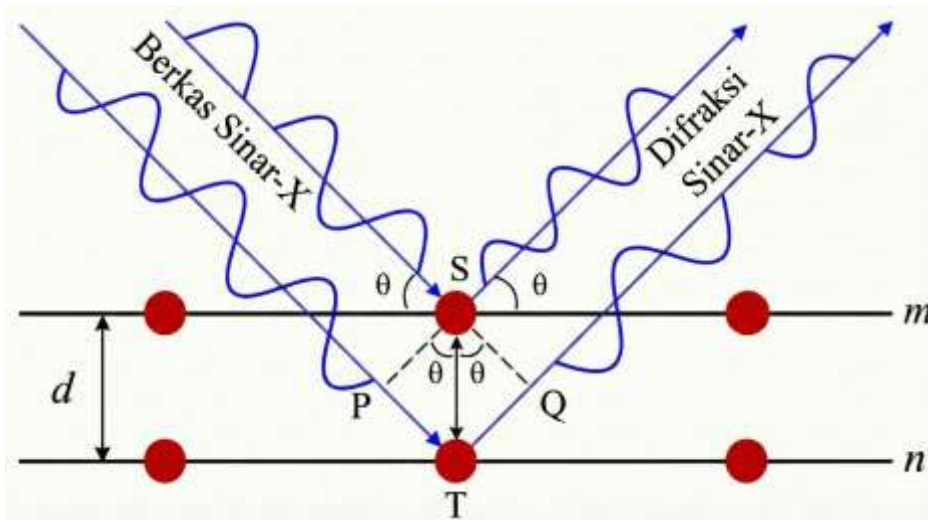
Material pengisi yang telah disintesis dan membran yang telah di fabrikasi perlu untuk dikonfirmasi keberhasilannya. Oleh sebab itu, dilakukan beberapa karakterisasi seperti *X-Ray Diffraction* (XRD), *Attenuated Total Reflectance–Fourier Transform Infrared* (FTIR), *Scanning Electron Microscope–Electron Dispersive X-ray* (SEM-EDX), dan *Water Contact Angel* (WCA).

2.7.1 X-Ray Diffraction (XRD)

XRD merupakan salah satu metode karakterisasi yang paling umum digunakan dalam bidang material untuk mengidentifikasi struktur kristal, tingkat kristalinitas, serta keteraturan atom dalam suatu material padat. Teknik ini bersifat non-destruktif, sehingga memungkinkan analisis dilakukan tanpa merusak sampel (Gumustas dkk., 2017). Prinsip kerja XRD adalah difraksi sinar-X oleh bidang kristal material akibat interaksi sinar-X dengan susunan atom kristal, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.9. Hasil XRD berupa difraktogram yang merepresentasikan struktur kristal material (Raval dkk., 2019). Puncak-puncak yang muncul pada difraktogram merepresentasikan bidang-bidang kristal (hkl) yang aktif menghamburkan sinar-X. Hubungan antara panjang gelombang sinar-X (λ), jarak antar bidang kristal (d), dan sudut difraksi (θ) dijelaskan oleh Hukum Bragg yang dirumuskan pada Persamaan 2.1. Berdasarkan persamaan Hukum Bragg, perubahan posisi atau intensitas puncak difraksi menunjukkan adanya modifikasi struktur kristal, seperti perubahan jarak antar bidang (d -spacing), kristalinitas, atau deformasi kisi akibat proses sintesis, *doping*, atau pencampuran dengan material lain. Persamaan Bragg dituliskan sebagai berikut

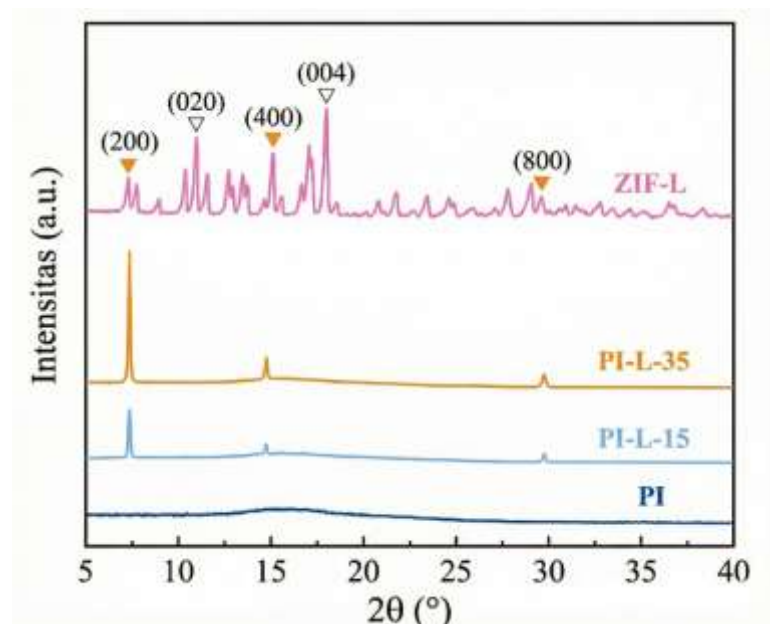
$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.1)$$

di mana n merupakan orde difraksi, λ adalah panjang gelombang sinar-X, θ adalah sudut difraksi, dan d adalah jarak antar bidang kristal. Pergeseran puncak difraksi ke sudut yang lebih kecil mengindikasikan ekspansi jarak antar bidang kristal, sedangkan pergeseran ke sudut lebih besar menunjukkan kontraksi. Informasi ini penting untuk menilai interaksi antarfase, misalnya interkalasi *filler* ke dalam matriks polimer.



Gambar 2.9 Skema ilustrasi hukum bragg (Komilian, 2019)

XRD berperan penting untuk memastikan keberhasilan integrasi material pengisi (*filler*), yaitu ZIF-L ke dalam matriks polimer. Polimer murni seperti polisulfon (PSf) umumnya menunjukkan pola difraksi lebar (*broad peak*) pada 2θ sekitar 17° , yang mengindikasikan struktur amorf atau semi-kristalin. Setelah penambahan material kristalin seperti ZIF-L, akan muncul puncak baru dengan intensitas tinggi pada posisi khas ZIF-L, di sekitar $2\theta = 7^\circ$, yang menandakan terdispersinya partikel kristalin dalam matriks polimer. Fenomena serupa telah dilaporkan oleh Jia dkk., (2024) seperti pada Gambar 2.10 pada membran Polimide/ZIF-L (PI-L), di mana peningkatan fraksi massa ZIF-L menghasilkan puncak baru di sekitar $2\theta \approx 7^\circ$ dan menunjukkan bahwa ZIF-L berhasil terinkorporasi tanpa mengganggu struktur amorf polimer.

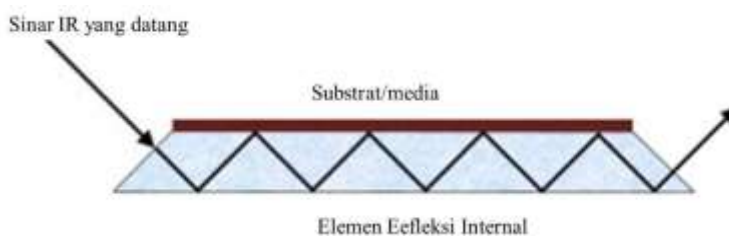


Gambar 2.10 XRD ZIF-L (Jia dkk., 2024)

2.7.2 Attenuated Total Reflectance–Fourier Transform Infrared (ATR-FTIR)

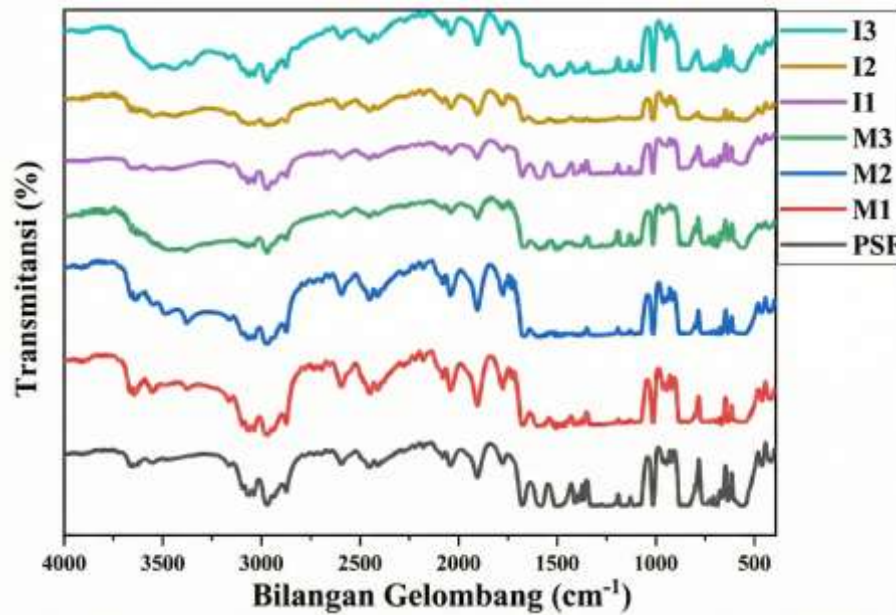
ATR-FTIR merupakan pengembangan dari FTIR konvensional yang bersifat non destruktif. Teknik ini digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada material organik

maupun anorganik. Prinsip dasar ATR-FTIR yang diilustrasikan pada Gambar 2.11 mengacu pada penyerapan radiasi inframerah oleh ikatan kimia dalam molekul, di mana setiap gugus fungsi memiliki frekuensi vibrasi khas yang menghasilkan pola serapan spesifik pada spektrum inframerah. Puncak serapan (*peak*) yang muncul pada spektrum ATR-FTIR merepresentasikan perubahan momen dipol akibat vibrasi ulur dan tekuk atom, sehingga dapat digunakan untuk mengonfirmasi keberadaan ikatan seperti C–H, C=O, C–N, dan N–H pada material (Gong dkk., 2024; Nandiyanto dkk., 2023). Teknik ATR-FTIR berbeda dari FTIR transmisi karena tidak memerlukan preparasi sampel yang kompleks, seperti pencampuran dengan KBr. Teknik ATR bekerja berdasarkan fenomena pemantulan internal total (*total internal reflection*) dari radiasi inframerah pada kristal ATR yang memiliki indeks bias tinggi, seperti ZnSe atau Ge yang bersentuhan langsung dengan permukaan sampel. Pada kondisi ini, terbentuk gelombang evanescent yang menembus permukaan sampel dengan kedalaman penetrasi sekitar 0,1–5 μm (Cychy dkk., 2021). Gelombang ini kemudian berinteraksi dengan gugus fungsi yang aktif secara inframerah pada permukaan material, menghasilkan spektrum serapan yang mencerminkan karakter kimia sampel (Javad Jafari dkk., 2024).



Gambar 2.11 Ilustrasi Prinsip Kerja Attenuated total reflectance (ATR) (H. Wang & Chu, 2013)

Analisis ATR-FTIR pada MMM digunakan untuk mengonfirmasi keberhasilan integrasi material anorganik ke dalam matriks polimer serta memverifikasi interaksi kimia maupun fisik antar komponen. Sebagai contoh, hasil karakterisasi ATR-FTIR yang dilaporkan oleh Jia dkk. (2024) pada Gambar 2.12, menunjukkan bahwa pada sampel poliimida (PI) murni dan MMM PI/ZIF-L, spektra PI memperlihatkan pita regangan khas gugus karbonil (C=O) pada 1775 cm^{-1} dan 1716 cm^{-1} , serta pita regangan C–N–C pada 1368 cm^{-1} , yang konsisten dengan struktur khas polimer PI. Selain itu, pita karakteristik dari ODA (oksidianilin) juga teramati pada 1232 cm^{-1} (regangan C–O–C) dan 1496 cm^{-1} (regangan C=C), menegaskan keutuhan struktur PI. Setelah penambahan ZIF-L sebagai *filler*, muncul sejumlah puncak baru pada 756 cm^{-1} (getaran tekuk C–H), 995 cm^{-1} (regangan C–N), 1146 cm^{-1} (getaran C–H), dan 1309 cm^{-1} (regangan C=N), yang menandakan keberhasilan inkorporasi kristal ZIF-L ke dalam matriks polimer tanpa merusak struktur kimianya. Selain itu, puncak regangan C=O pada 1716 cm^{-1} mengalami sedikit pergeseran ke 1720 cm^{-1} (*blue shift*) seiring dengan peningkatan konsentrasi *filler*. Pergeseran ini menunjukkan terbentuknya ikatan hidrogen antara gugus karbonil (C=O) pada PI dan gugus imidazol pada ZIF-L, yang menandakan adanya interaksi antarmuka yang kuat dan kompatibilitas tinggi antara kedua komponen (Javad Jafari dkk., 2024).

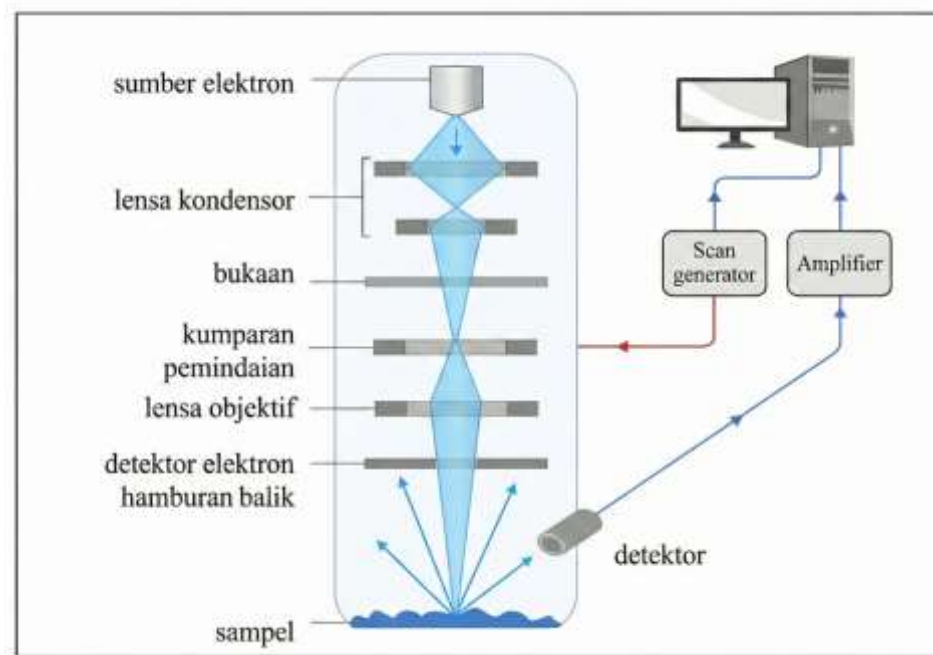


Gambar 2.12 ATR-FTIR polisulfon (Jonnalagedda & Kuncharam, 2025)

Analisis ATR-FTIR juga memberikan informasi penting mengenai perubahan intensitas pita serapan maupun pergeseran bilangan gelombang, yang menandakan adanya modifikasi struktur molekuler atau perubahan lingkungan kimia pada polimer akibat penambahan *filler*. Dalam penelitian terkait membran berbasis polisulfon (PSf), teknik ATR-FTIR sering digunakan untuk memverifikasi keberadaan gugus fungsi khas seperti *bending* C–S=O pada bilangan gelombang 1320–1150 cm^{-1} dan C–H aromatik pada bilangan gelombang 2960–2870 cm^{-1} , serta untuk mendeteksi munculnya pita baru yang menandakan interaksi antara gugus sulfon dan permukaan material berpori seperti ZIF-L.

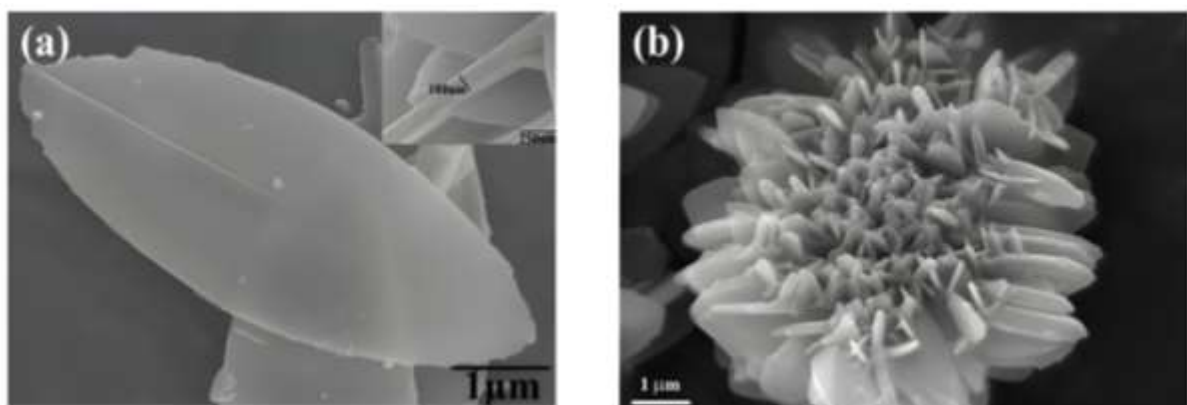
2.7.3 Scanning Electron Microscope-Electron Dispersive X-ray (SEM-EDX)

SEM digunakan untuk mengamati morfologi dan topografi permukaan material secara detail melalui pemindaian menggunakan berkas elektron berenergi tinggi. Prinsip kerja alat ini didasarkan pada interaksi antara berkas elektron dengan atom pada permukaan sampel, yang kemudian menghasilkan sinyal berupa elektron sekunder atau elektron pantul, ilustrasi SEM dapat dilihat pada Gambar 2.13. Sinyal ini ditangkap oleh detektor dan diubah menjadi citra dengan resolusi tinggi. Secara umum, sistem SEM terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sumber elektron (*electron gun*), kolom elektron, sistem fokus elektromagnetik, detektor, serta unit kendali (El-Eskandarany, 2020). Sumber elektron pada FESEM menggunakan *Field Emission Gun* (FEG) yang mampu menghasilkan pancaran elektron dengan kerapatan arus tinggi dan diameter berkas yang sangat kecil. Teknologi ini memberikan resolusi gambar hingga skala nanometer, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) konvensional yang menggunakan sumber elektron termionik berbasis tungsten atau LaB_6 (Mohanty & Geetha, 2017). Kelebihan utama FESEM terletak pada kemampuannya menghasilkan citra dengan ketajaman dan kontras yang tinggi. Hal ini sangat bermanfaat untuk mempelajari bentuk dan ukuran partikel material berpori seperti ZIF-L.



Gambar 2.13 Mekanisme Kerja SEM (Temiz, 2022)

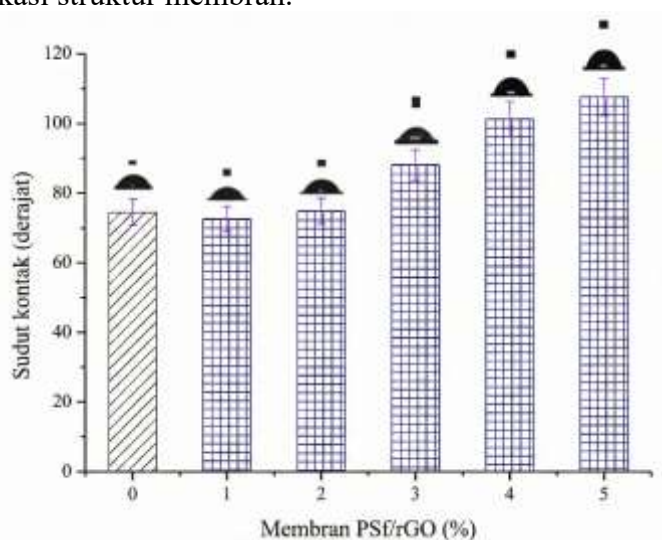
Citra FESEM ZIF-L yang dilaporkan oleh Zhu dkk. (2019) ditunjukkan pada Gambar 2.14(a) dan (b), di mana material ZIF-L yang disintesis dalam pelarut air menunjukkan morfologi khas berupa struktur lembaran tipis menyerupai daun (*leaf-like*). Struktur dua dimensi tersebut terbentuk akibat pertumbuhan anisotropik kristal yang terjadi selama proses nukleasi cepat dalam media berair. ZIF-L yang dihasilkan memiliki ketebalan hanya beberapa nanometer dengan lebar mencapai ratusan nanometer, menunjukkan karakter khas material berlapis. Pada Gambar 2.14(a) tampak kristal ZIF-L tunggal, sedangkan Gambar 2.14(b) memperlihatkan pertumbuhan agregat dari lembaran ZIF-L menjadi struktur bertumpuk akibat waktu sintesis yang lebih lama. Hasil ini sejalan dengan laporan (F. Zhang dkk., 2018) yang menunjukkan bahwa ZIF-L dapat terbentuk melalui interaksi antara ion Zn^{2+} dan ligan 2-methylimidazole (2-MeIm) dengan rasio molar tinggi ligan terhadap logam. Morfologi lembaran ZIF-L sangat sensitif terhadap kondisi sintesis, terutama pH, konsentrasi prekursor, serta jenis pelarut yang digunakan. Pada kondisi dengan rasio ligan tinggi, kristal tumbuh secara lateral menghasilkan bentuk lembaran yang lebar tetapi tipis, sedangkan penurunan rasio ligan mendorong transformasi menuju struktur ZIF-8 yang lebih isotropik (F. Zhang dkk., 2018).



Gambar 2.14 SEM ZIF-L (W. Zhu dkk., 2019b) dan agregat ZIF-L (Wijaya dkk., 2021a)

2.7.4 Water Contact Angle (WCA)

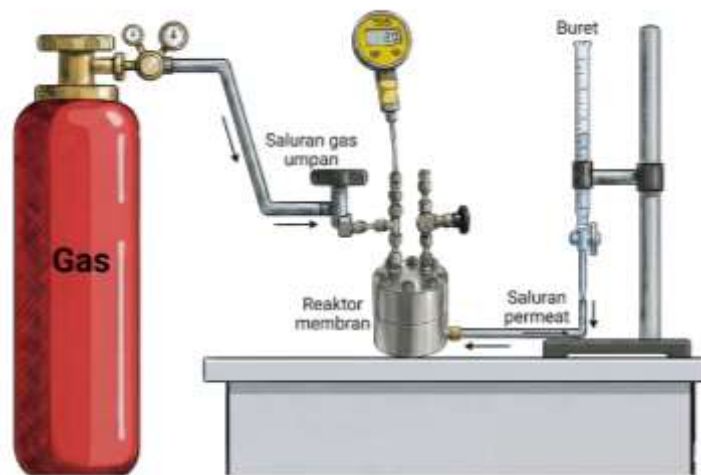
Water Contact Angle (WCA) merupakan parameter penting untuk mengevaluasi sifat kebasahan permukaan membran, di mana nilai sudut kontak di atas 90° mengindikasikan karakter hidrofobik. Pada membran berbasis polisulfon (PSf), peningkatan sifat hidrofobik dapat dicapai melalui dua pendekatan utama, yaitu penambahan material berbasis karbon, seperti C-ZIF-L, serta penerapan perlakuan termal (annealing). Kehadiran fase karbon yang bersifat nonpolar secara efektif menurunkan afinitas permukaan membran terhadap molekul air dengan mengurangi kontribusi gugus hidrofilik yang terekspos di permukaan. Selain itu, proses annealing mendorong terjadinya relaksasi dan penataan ulang rantai polimer yang diikuti oleh densifikasi matriks PSf, sehingga gugus-gugus polar, seperti sulfon ($-\text{SO}_2-$) dan eter, cenderung terorientasi ke bagian dalam membran dan tidak lagi mendominasi permukaan. Kombinasi kedua mekanisme tersebut menyebabkan peningkatan sudut kontak air dan memperkuat karakter hidrofobik membran. Fenomena serupa juga dilaporkan dalam literatur oleh (Akhair dkk., 2018), di mana penambahan *reduced-Graphene Oxide* (rGO) ke dalam membran PSf mampu meningkatkan nilai WCA hingga $107,5^\circ$ dari nilai awal sekitar 75° , yang merepresentasikan peningkatan hidrofobisitas yang signifikan, hasil WCA dapat dilihat pada Gambar 2.15. Peningkatan ini dikaitkan dengan struktur rGO yang tersusun dari atom karbon dengan karakter nonpolar, sehingga cenderung menunjukkan sifat hidrofobik yang kuat. Secara keseluruhan, peningkatan hidrofobisitas permukaan membran memberikan implikasi positif terhadap aplikasi pemisahan gas, terutama dalam meningkatkan ketahanan terhadap kelembapan dan fouling, sehingga pengukuran WCA menjadi indikator yang relevan untuk menilai efektivitas modifikasi struktur membran.



Gambar 2.15 Sudut kontak PSf/rGO

2.8 Kinerja Membran dalam Pengujian Pemisahan Gas

Pengujian pemisahan gas bertujuan untuk menentukan kemampuan membran dalam meloloskan gas tertentu serta menentukan nilai selektivitas ideal terhadap pasangan gas yang diuji. Pengukuran laju aliran gas permeat umumnya dilakukan menggunakan metode *bubble flow* meter, yang bekerja berdasarkan prinsip penentuan laju aliran gas dari waktu pembentukan gelembung gas saat melewati skala tertentu dalam buret. Metode ini banyak digunakan karena kesederhanaan sistemnya serta kemampuannya dalam mengukur laju permeasi gas dengan tingkat akurasi yang memadai. Melalui pengujian menggunakan metode *bubble flow* meter, nilai permeabilitas gas dapat ditentukan secara kuantitatif. Ilustrasi pengujian menggunakan metode bubble flow meter dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Ilustrasi pengujian gas menggunakan metode *bubble flow* meter

Permeabilitas gas (P_i) merupakan parameter utama yang menunjukkan kemampuan membran dalam meloloskan gas tertentu melalui strukturnya. Secara umum, nilai permeabilitas dinyatakan dalam satuan Barrer, yang didefinisikan sebagai $1 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ (STP)} \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cmHg}^{-1}$. Secara matematis, permeabilitas gas dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.2), yang melibatkan laju aliran gas *permeat*, ketebalan membran, luas area efektif membran, serta perbedaan tekanan antara sisi *feed* dan *permeate*.

$$P_i = \frac{Q \cdot l}{A \cdot \Delta P} \times 10^{10} \quad (2.2)$$

di mana P_i menyatakan permeabilitas gas i yang dinyatakan dalam satuan Barrer. Q merupakan laju aliran gas permeat yang dinyatakan dalam cm^3/s , l adalah ketebalan DSL (cm), dan A menunjukkan luas area efektif membran (cm^2). Sementara itu, ΔP menyatakan perbedaan tekanan antara sisi *feed* dan sisi *permeate* yang dinyatakan dalam cmHg. Selain permeabilitas, parameter penting lainnya dalam evaluasi kinerja membran adalah selektivitas ideal (α), yang didefinisikan sebagai rasio antara permeabilitas dua jenis gas. Parameter ini digunakan untuk menggambarkan kemampuan membran dalam memisahkan pasangan gas tertentu, nilai selektivitas yang lebih tinggi menunjukkan kemampuan pemisahan yang lebih baik. Selektivitas ideal (α) dari membran terhadap pasangan gas H_2/CO_2 dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.3.

$$\alpha_{\text{H}_2/\text{CO}_2} = \frac{P_{\text{H}_2}}{P_{\text{CO}_2}} \quad (2.3)$$

di mana $\alpha_{\text{H}_2/\text{CO}_2}$ menyatakan selektivitas membran terhadap gas H_2 dan CO_2 , serta P_{H_2} dan P_{CO_2} merupakan nilai permeabilitas gas hidrogen dan karbon dioksida. Evaluasi kinerja MMM dapat dilakukan menggunakan parameter F index. F index merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan material pengisi terhadap kinerja MMM dalam pemisahan gas. Nilai ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai peningkatan performa membran tanpa mempertimbangkan faktor-faktor lain seperti plastisisasi polimer, kesesuaian antar fase, maupun cacat struktural pada membran.

Nilai F index dihitung menggunakan Persamaan 2.4 berikut:

$$F_{\text{Index}} = \ln \left(\frac{P_{\text{komposit}}}{P_{\text{neat}}} \right) + \phi \times \ln \left(\frac{\alpha_{\text{komposit}}}{\alpha_{\text{neat}}} \right) \quad (2.4)$$

di mana P_{komposit} dan P_{neat} adalah permeabilitas H_2 pada MMM dan membran *neat*, α_{komposit} dan α_{neat} adalah selektivitas gas H_2/CO_2 pada MMM dan membran *neat*, ϕ adalah koefisien peningkatan untuk gas H_2/CO_2 yaitu 2,302. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, nilai F index dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori pengaruh terhadap kinerja membran seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.5 berikut.

Tabel 2.5 Kategori F index Terhadap Kinerja Membran (Wijiyanti dkk., 2019b)

Rentang Nilai F Index	Kategori Pengaruh terhadap Kinerja Membran
< 0	Tidak berpengaruh
0 – 1,5	Cukup berpengaruh
1,5 – 4	Kompeten
4 – 8	Berpengaruh secara baik
> 8	Berpengaruh secara ideal

“Halaman sengaja dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dalam empat tahap yaitu sintesis material pengisi, fabrikasi MMM, *annealing* MMM, serta karakterisasi dan pengujian pemisahan gas. Seluruh tahap penelitian dilakukan di laboratorium Kimia Bahan Bakar dan Fasilitas Riset Membran Departemen Kimia ITS. Keempat tahapan proses ditampilkan pada diagram alir pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.1 Alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi kaca arloji, neraca analitik, gelas kimia, gelas ukur, botol duran, pengaduk magnet, sonikator, plat kaca, *roller* kaca, bak koagulan, *Crucible* alumina, oven vakum, *muffle furnace*, *tubular furnace*, dan *combustion boat*. Pengujian pemisahan gas dilakukan dengan satu set rangkaian *bubble flow meter* yang terdiri atas reaktor membran, *pressure gauge*, serta buret berukuran 50 mL. Karakterisasi material dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD RIGAKU Miniflex 600), *Fourier Transform Infrared* (ATR-FTIR Thermo Scientific Nicolet iS10), dan *Scanning Electron Microscope* (SEM HITACHI FLEXSEM 1000)

3.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Merck), 2-metilimidazol (Hmim, Merck), Akuades, Etanol teknis yang dibeli dari PT. Sumber Ilmiah Persada (SIP) ($\pm 96\%$), Polisulfon (PSf, Udel 3600), dan N-metil-2-pirolidon (NMP, Merck).

3.3 Prosedur Riset

3.3.1 Sintesis Material Pengisi Karbon ZIF-L

Sintesis dilakukan dengan merujuk pada penelitian Kim dkk., (2024). ZIF-L disintesis dengan cara pencampuran $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan Hmim dalam air pada suhu kamar selama satu jam. Secara spesifik, 2,95 g $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan 6,5 g Hmim masing-masing dilarutkan secara terpisah dalam 200 mL air deionisasi, kemudian kedua larutan tersebut dicampurkan sambil diaduk pada suhu 30 °C selama 1 jam. ZIF-L yang terbentuk dicuci dengan air dan etanol sebanyak tiga kali, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 80 °C selama 24 jam. Proses karbonisasi dilakukan melalui pirolisis dalam *tubular furnace* pada suhu 600 °C dengan *heating rate* 2 °C/menit dan *holding time* selama dua jam agar terjadi perubahan ZIF-L menjadi Karbon ZIF-L.

3.3.2 Fabrikasi Membran

Fabrikasi MMM PSf berpengisi C-ZIF-L dilakukan dengan metode inversi fasa yang diadaptasi dari penelitian Gunawan dkk., (2019) dengan sedikit perubahan pada lama waktu perendaman dalam etanol. Mula-mula, larutan *dope* disiapkan dengan mendispersikan C-ZIF-L ke dalam NMP. Larutan *dope* diproses dengan sonikasi selama 15 menit dengan mode *pulse* 40 detik untuk meminimalkan terbentuknya agregat *filler* selama proses fabrikasi membran. Selanjutnya, polimer PSf ditambahkan ke dalam dispersi dan diaduk selama 24 jam dalam suhu

ruang. Komposisi material pengisi, polimer, dan pelarut pada larutan *dope* disajikan dalam Tabel 3.1. Larutan *dope* selanjutnya disonikasi selama 15 menit dan didiamkan selama 24 jam untuk menghilangkan gelembung udara yang terbentuk saat proses pengadukan polimer.

Tabel 3.1 Komposisi larutan *dope*

Jenis Membran	NMP (g)	PSf (g)	ZIF-L (g)	C-ZIF-L (g)
PSf <i>Neat</i>	32	8	-	-
PSf ZIF-L	32	7,92	0,08	
PSf C-ZIF-L 0,5%	32	7,96	-	0,04
PSf C-ZIF-L 1%	32	7,92	-	0,08
PSf C-ZIF-L 1,5%	32	7,88	-	0,12

Proses selanjutnya adalah pencetakan membran. Larutan polimer dituang secukupnya di atas plat kaca yang selanjutnya diratakan dengan *roller* kaca. Plat kemudian direndam di bak koagulan yang berisi akuades selama 24 jam untuk proses pertukaran pelarut dan non-pelarut. Membran kemudian direndam kembali selama 6 jam di dalam bak koagulan yang berisi campuran akuades dan etanol dengan perbandingan 3:1 untuk penghilangan sisa NMP yang masih menempel pada membran. MMM kemudian dikeringkan di suhu ruang hingga benar-benar kering. Membran yang telah kering siap dikarakterisasi dan diuji kinerja pemisahan gas. Proses fabrikasi dilakukan juga dengan membran tanpa penambahan material pengisi sebagai pembanding.

3.3.3 *Annealing* Membran

Perlakuan *annealing* membran dilakukan pada variasi membran dengan penambahan C-ZIF-L yang paling optimum. Metode *annealing* membran PSf C-ZIF-L dengan metode yang mengacu pada penelitian oleh (Widiastuti dkk., 2022b) dengan modifikasi. Proses diawali dengan meletakkan MMM PSf C-ZIF-L yang sudah disesuaikan ukurannya pada *crucible alumina*. Sampel dipanaskan pada suhu 120, 150, dan 190 °C dengan *holding time* selama satu jam dan laju pemanasan 10 °C/menit. Setelah itu, membran didinginkan hingga mencapai suhu ruang.

Tabel 3.2 Parameter perlakuan *annealing* pada MMM

Nama membran	Suhu <i>annealing</i>
MMM 120	120°C
MMM 150	150°C
MMM 190	190°C

3.4 Karakterisasi Material

3.4.1 *X-Ray Diffraction* (XRD)

Karakterisasi (XRD) digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal material pengisi dan membran yang telah difabrikasi. Karakterisasi XRD pada penelitian ini dilakukan dengan instrumen RIGAKU Miniflex 600 dengan sumber radiasi Cu K α ($\lambda = 0,154$ nm) yang dioperasikan pada 40 kV dan 15 mA. Pengukuran dilakukan pada rentang $2\theta = 5\text{--}60^\circ$.

3.4.2 *Attenuated Total Reflectance–Fourier Transform Infrared* (ATR-FTIR)

Karakterisasi *Attenuated Total Reflectance–Fourier Transform Infrared* (ATR-FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi pada material pengisi dan membran

hasil fabrikasi. Pengujian dilakukan dengan instrumen *Thermo Scientific Nicolet iS10* pada rentang bilangan gelombang 400–4000 cm^{-1} .

3.4.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Karakterisasi SEM menggunakan instrumen SEM HITACHI FLEXSEM 1000. Sebelumnya, sampel dilapisi dengan lapisan tipis berbahan dasar emas. *Dense Selective Layer* (DSL) pada membran ditentukan melalui pengukuran langsung pada citra SEM menggunakan perangkat lunak ImageJ. Karakterisasi SEM pada material pengisi juga dilengkapi dengan analisis *Energy Dispersive X-Ray* (EDX).

3.4.4 Uji sudut kontak air

Membran dikeringkan sempurna pada suhu ruang hingga tidak lagi mengandung kelembapan. Potongan membran berukuran 1×1 cm kemudian diletakkan di atas permukaan datar dan stabil. Setetes akuades dijatuhkan perlahan pada permukaan membran, kemudian bentuk tetesan tersebut didokumentasikan menggunakan kamera ponsel dengan jarak pengambilan sekitar 3–5 cm sejajar dengan bidang permukaan. Sudut kontak antara tetesan air dan permukaan membran diukur menggunakan perangkat lunak ImageJ dengan pengulangan sebanyak tiga kali.

3.5 Pengujian Pemisahan Gas

Proses pengujian dilakukan menggunakan sistem *bubble flow meter* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.18. Membran dipotong sesuai ukuran reaktor, kemudian dipasang rapat di dalamnya. Reaktor membran dihubungkan dengan tabung gas uji pada sisi *feed*, sedangkan sisi *permeate* dihubungkan ke buret berisi air. Gas dialirkan melalui membran hingga tekanan pada *pressure gauge* mencapai 2 bar. Setelah kondisi stabil tercapai, gas yang menembus membran membentuk gelembung pada buret, kemudian waktu pembentukan satu gelembung dicatat untuk menghitung laju permeasi gas dengan pengulangan sebanyak lima kali. Pada penelitian ini, gas yang digunakan adalah H_2 dan CO_2 dengan kemurnian UHP (99,99%). Hasil pengukuran pada masing-masing membran kemudian dihitung nilai permeabilitas, selektivitas, dan F index mengacu secara berurutan pada Persamaan 2.2; 2.3; dan 2.4.

“Halaman sengaja dikosongkan”

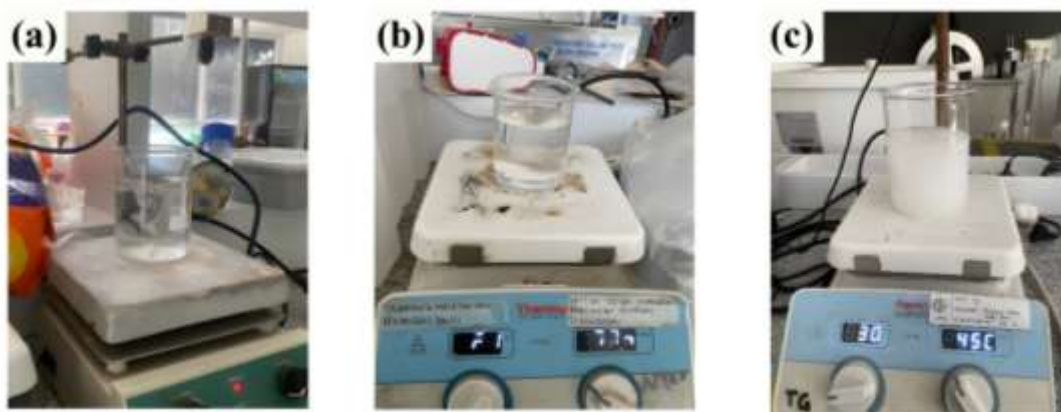
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan mengenai hasil dari sintesis *filler* karbon ZIF-L dan fabrikasi membran PSf/C ZIF-L dengan perlakuan *annealing* yang diikuti dengan pembahasan mengenai karakterisasi dari masing masing material mulai dari *filler*, membran tanpa perlakuan annealing dan dengan perlakuan annealing pada suhu 120, 150, dan 190°C. Karakterisasi yang dilakukan adalah ATR-FTIR, XRD, WCA, dan SEM. Lebih lanjut, dilakukan pengujian gas tunggal (*single gas*) untuk mengetahui performa membran yang telah difabrikasi.

4.1 Hasil Sintesis *Filler*

Karbon ZIF-L disintesis melalui dua tahapan utama, yaitu pembentukan ZIF-L dan proses karbonisasi. Proses perubahan fisik selama sintesis ZIF-L ditunjukkan pada Gambar 4.1. Awalnya, larutan Zn^{2+} dan larutan Hmim berwarna jernih, tetapi setelah keduanya dicampurkan muncul endapan putih. Endapan putih yang muncul dengan cepat merupakan hasil dari koordinasi spontan antara Zn^{2+} dan ligan imidazol, yang dipengaruhi oleh perbandingan prekursor yang tinggi serta kondisi reaksi pada suhu kamar (Wijaya dkk., 2021b). Secara struktural, ZIF-L diketahui memiliki dua jenis pusat Zn^{2+} yang berkoordinasi dengan empat *linker* 2-mIm dan satu molekul 2-mIm bebas. Lebih lanjut, satu ion Zn berkoordinasi dengan empat atom N yang menjembatani dua unit 2-mIm (μ_2 -bridging), sedangkan ion Zn lainnya berkoordinasi dengan tiga atom N dari tiga unit 2-mIm dan satu ligan monodentat (Rahaman dkk., 2022). Endapan ZIF-L yang terbentuk kemudian dipisahkan dan dicuci menggunakan air dan etanol masing-masing sebanyak tiga kali untuk menghilangkan sisa ion maupun ligan yang tidak bereaksi. Padatan yang telah bersih selanjutnya dikeringkan dalam oven pada suhu 80 °C selama 24 jam hingga diperoleh serbuk ZIF-L kering.



Gambar 4.1 Proses sintesis ZIF-L (a) Larutan Zn^{2+} , (b) Larutan Hmim, dan (c) Larutan ZIF-L

Proses karbonisasi dilakukan untuk mengonversi ZIF-L menjadi Karbon ZIF-L melalui pirolisis dalam *tubular furnace* pada atmosfer inert. Berdasarkan analisis TGA yang dilaporkan oleh Z. Zhong dkk., (2014), ZIF-L mengalami dekomposisi *linker* organik pada rentang suhu 290–550 °C, sehingga suhu karbonisasi 600 °C dipilih untuk memastikan bahwa proses transformasi struktural berlangsung secara menyeluruh. Pada tahap ini, komponen organik dalam kerangka ZIF-L terdekomposisi dan mengalami karbonisasi, sementara residu logam mengalami oksidasi menjadi ZnO. Proses tersebut menghasilkan material karbon berpori dengan morfologi berlapis khas ZIF-L. Hasil akhir berupa Karbon ZIF-L, seperti yang

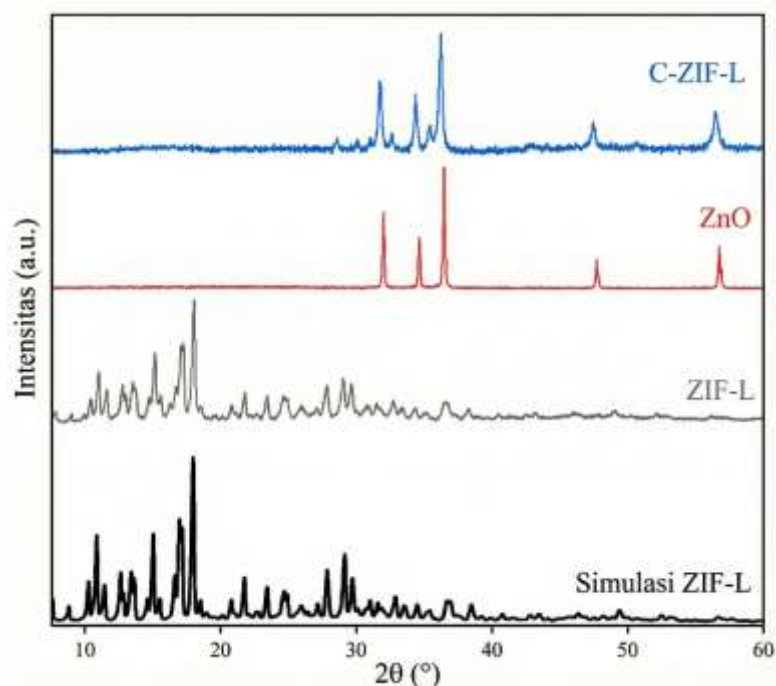
ditampilkan pada Gambar 4.2, yang stabil dan siap digunakan sebagai *filler* pada proses fabrikasi membran.



Gambar 4.2 Hasil karbonisasi ZIF-L

Pola difraksi XRD karbon ZIF-L ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan dibandingkan dengan pola difraksi ZIF-L sebelum proses karbonisasi untuk memastikan kesesuaian struktur. ZIF-L menunjukkan sejumlah puncak khas pada pola XRD-nya yang menegaskan keberadaan struktur kristalin ortorombik yang terdefinisi dengan baik (W. Zhu dkk., 2019b). Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.3, puncak difraksi karakteristik ZIF-L pada bidang (200), (020), (220), (312), (023), dan (420) teramati pada nilai 2θ masing-masing sebesar sekitar 7,08; 10,72; 12,50; 14,88; 16,96; dan 17,74°. Puncak-puncak ini merupakan refleksi khas dari struktur berlapis dua dimensi (*2D leaf-like layered framework*) yang dimiliki ZIF-L, dan telah dilaporkan oleh penelitian lain (Yu dkk., 2022; X. Zhang dkk., 2019). Puncak yang muncul pada $2\theta = 7,08^\circ$ menunjukkan jarak antar-lapis (*interlayer spacing*) yang relatif besar pada struktur ZIF-L. Jarak *d-spacing* pada puncak ini dihitung menggunakan Persamaan Bragg, dan nilai yang diperoleh adalah 1,25 nm, yang sesuai dengan karakter *2D layered structure*.

Pada tahap karbonisasi, struktur ZIF-L mengalami perubahan signifikan akibat dekomposisi termal yang menyebabkan hilangnya sebagian besar komponen organik pembentuk kerangka, sehingga pola difraksi setelah karbonisasi tidak lagi menampilkan puncak tajam khas ZIF-L. Transformasi ini menghasilkan material karbon amorf, tetapi sisa kerangka anorganik dan spesies logam masih dapat dideteksi. Sebagaimana terlihat pada Gambar 4.3, puncak-puncak baru muncul pada $2\theta = 31,48$; 34,14; dan 35,98°, yang mengindikasikan keberadaan fase ZnO hasil oksidasi parsial ion Zn^{2+} selama proses karbonisasi. Ketiga puncak tersebut sesuai dengan refleksi bidang (100), (002), dan (101) ZnO heksagonal (*wurtzite*), menunjukkan bahwa karbonisasi menyebabkan reorganisasi struktur ZIF-L menjadi karbon amorf dengan partikel ZnO yang terperangkap dalam matriks karbon. Kemunculan ZnO ini sejalan dengan laporan Zhong dkk. (2014), yang menjelaskan bahwa struktur ZIF-L memiliki molekul 2-mIm bebas dan stabilitas termal yang lebih rendah dibandingkan MOF 3D seperti ZIF-8. Akibatnya, selama karbonisasi, kerangka ZIF-L lebih mudah terdekomposisi dan menghasilkan partikel ZnO berukuran nano yang terperangkap dalam matriks karbon.

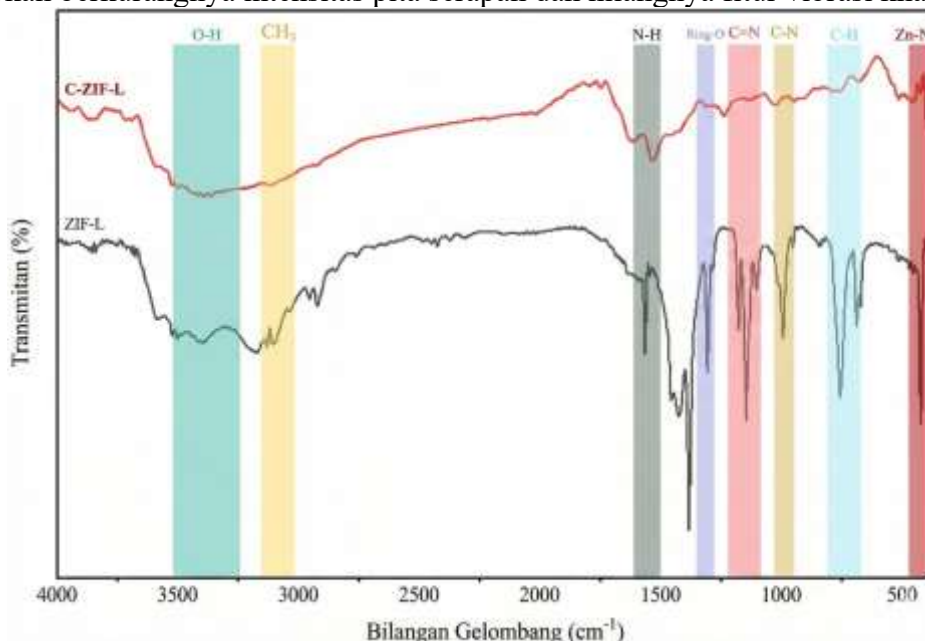


Gambar 4.3 Difraktogram XRD material pengisi

Karakterisasi gugus fungsi ZIF-L dilakukan dengan FTIR untuk memastikan terbentuknya ikatan koordinasi antara Zn^{2+} dan ligan Hmim. Hasil FTIR dapat dilihat pada Gambar 4.4 Spektrum FTIR ZIF-L memperlihatkan beberapa puncak serapan utama yang menjadi ciri khas struktur material ini. Puncak pada $422,42\text{ cm}^{-1}$ dikaitkan dengan getaran Zn-N stretching , yang menegaskan terbentuknya ikatan koordinasi Zn-N sebagai kerangka utama ZIF-L. Sementara itu, puncak pada $754,19\text{ cm}^{-1}$ berhubungan dengan *out-of-plane bending* dari cincin imidazolat (Hmim) (B. Ding dkk., 2018; Khan dkk., 2018). Pada wilayah *in-plane*, beberapa puncak khas muncul pada $997,23\text{ cm}^{-1}$ (getaran C-N), $1145,75\text{ cm}^{-1}$ (getaran C=N), serta $1383,00\text{ cm}^{-1}$ (*ring stretching*). Selain itu, puncak pada $1566,25$ menandakan keberadaan gugus fungsi utama (C-N) sebagai penyusun kerangka organik ZIF-L. Di luar wilayah sidik jari, puncak serapan pada $3101,63\text{ cm}^{-1}$ merupakan ciri dari C-H ulur aromatik, sedangkan puncak pada $3402,54\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan O-H stretching dari molekul air yang teradsorpsi. Kehadiran puncak O-H ini umum ditemukan pada ZIF-L karena penggunaan air sebagai pelarut dalam proses sintesis (Valencia & Abdelhamid, 2019).

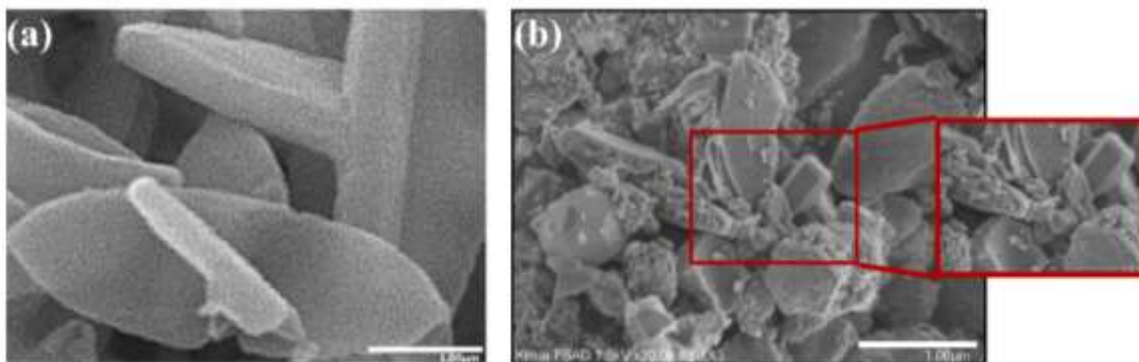
Berbeda dengan ZIF-L murni, spektra FTIR pada Gambar 4.4 untuk C-ZIF-L yang ditunjukkan dengan kurva merah memperlihatkan perubahan signifikan akibat proses karbonisasi. Hampir seluruh puncak tajam khas imidazolat menghilang atau hanya tersisa dalam bentuk sangat melemah, menandakan terdegradasinya ikatan organik serta hancurnya struktur koordinasi Zn-N selama proses pirolisis. Kurva C-ZIF-L cenderung memperlihatkan pita serapan yang lebih lebar dan kurang terdefinisi, terutama pada rentang $1000\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$, yang terkait dengan vibrasi gugus karbon seperti C=C aromatik, C-O, atau residu gugus oksigen fungsional yang tersisa setelah karbonisasi. Hilangnya pita Zn-N khas pada $422,42\text{ cm}^{-1}$ juga mengonfirmasi bahwa kerangka ZIF-L telah runtuh secara struktural. Pada saat karbonisasi, ligan organik imidazolat terurai termal dan membentuk jaringan karbon aromatik yang kaya ikatan C=C dan C-C. Jaringan karbon ini bersifat lebih stabil secara termal serta cenderung membentuk lapisan kontinu pada permukaan material. Pembentukan domain karbon aromatik tersebut menghasilkan permukaan yang didominasi oleh ikatan C-C, yang bersifat kurang aktif dalam interaksi IR, sehingga tidak menunjukkan pita serapan yang tajam seperti struktur

organik awalnya. Lapisan karbon hasil karbonisasi menutupi permukaan material, menyebabkan berkurangnya intensitas pita serapan dan hilangnya fitur vibrasi khas ZIF-L.

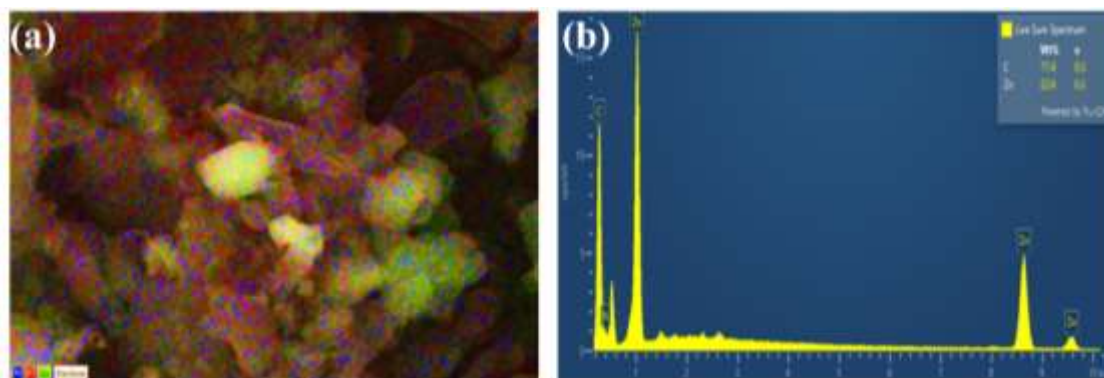


Gambar 4.4 (a) Spektra FTIR material pengisi dan (b) struktur kimia ZIF-L.

Citra SEM material pengisi setelah perlakuan karbonisasi pada Gambar 4.5 menunjukkan bahwa struktur lamelar khas ZIF-L tidak lagi teramati secara utuh. Morfologi yang terbentuk didominasi oleh partikel dengan bidang datar dan sudut tegas, menyerupai kristal berbentuk heksagonal yang merupakan ciri khas ZnO. Hal ini mengindikasikan bahwa proses karbonisasi pada suhu tinggi menyebabkan keruntuhan kerangka organik ZIF-L akibat terputusnya ikatan koordinasi antara ion Zn^{2+} dan ligan imidazolat. Selama proses tersebut, komponen organik mengalami pirolisis dan bertransformasi menjadi fase karbon amorf, sementara pusat logam Zn mengalami rekristalisasi dan oksidasi membentuk kristal ZnO berstruktur heksagonal. Interpretasi ini diperkuat oleh hasil karakterisasi XRD pada material C-ZIF-L yang menampilkan puncak difraksi khas ZnO, yang mengonfirmasi terjadinya transformasi fase dari ZIF-L menjadi ZnO kristalin yang disertai dengan terbentuknya fase karbon amorf di sekitarnya akibat degradasi dan pirolisis komponen organik. Selain itu, dilakukan juga analisis *Energy Dispersive X-Ray* (EDX) untuk mengetahui persebaran distribusi unsur yang dalam C-ZIF-L, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6, dari hasil spektrum EDX tersebut diperoleh kandungan unsur Zn sebesar 22,6 %b/b dan C sebesar 77,4 %b/b.



Gambar 4.5 Citra FESEM (a) ZIF-L dan (b) C-ZIF-L

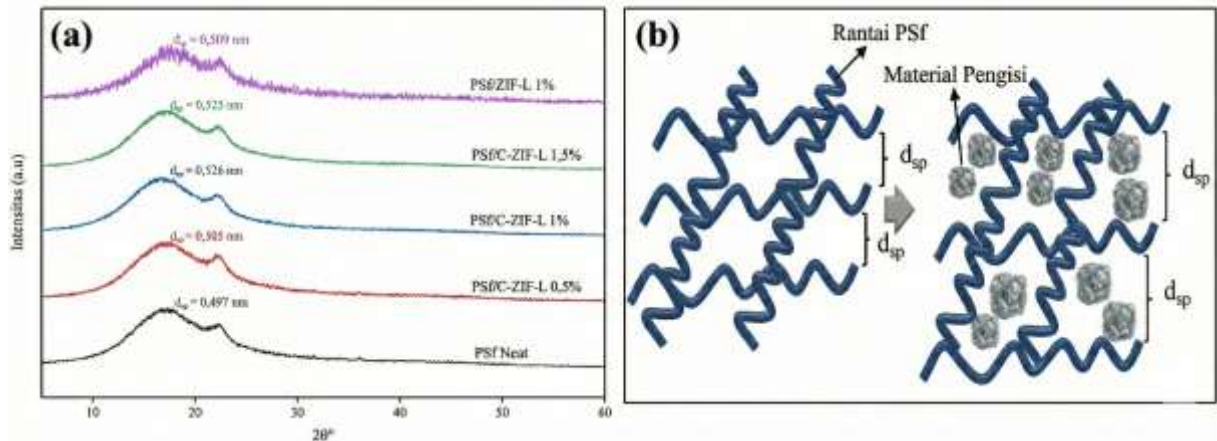


Gambar 4. 6 (a) *Mapping* EDX C-ZIF-L dan (b) Spektrum EDX C-ZIF-L

4.2 Hasil Fabrikasi Membran

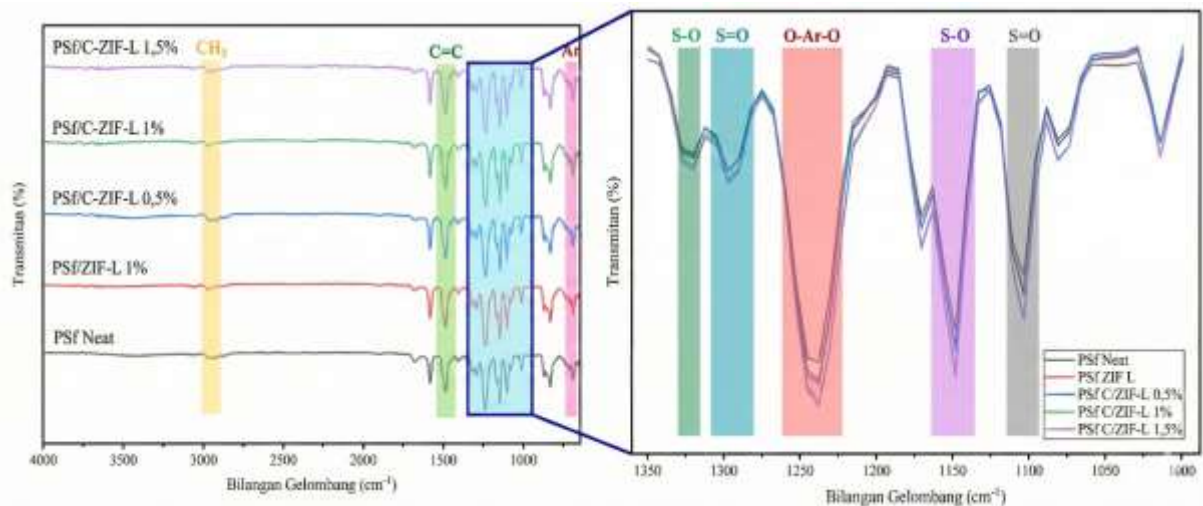
MMM difabrikasi dengan bahan polimer PSf, material pengisi (C-ZIF-L), dan pelarut NMP. Material pengisi terlebih dahulu didispersikan ke dalam pelarut NMP dengan sonikator selama 15 menit hingga terbentuk dispersi berwarna hitam yang homogen. Setelah itu, polimer PSf dilarutkan ke dalam dispersi tersebut dan diaduk selama 24 jam pada suhu ruang hingga membentuk larutan *dope*. Larutan *dope* kemudian disonikasi selama 15 menit dan didiamkan selama 24 jam untuk menghilangkan gelembung udara yang terperangkap. Tahap preparasi pencetakan diawali dengan pembersihan plat dan *roller* kaca menggunakan etanol serta penyiapan bak koagulan berisi akuades. Larutan *dope* kemudian dituangkan secara horizontal di atas plat kaca dan diratakan menggunakan *roller* kaca dengan satu kali gerakan vertikal yang halus untuk menghindari terbentuknya gelembung baru. Plat kaca yang telah dilapisi larutan segera dimasukkan ke dalam bak koagulan untuk memulai proses inversi fasa. Setelah proses inversi fasa selesai, terbentuk membran tipis, elastis, dan berwarna putih keabu-abuan. Membran direndam dalam bak koagulan selama 24 jam untuk memastikan proses inversi fasa berlangsung sempurna. Selanjutnya, akuades pada bak koagulan diganti dengan campuran akuades:etanol (rasio 3:1) dan membran direndam selama 6 jam. Setelah perendaman selesai, membran dikeringkan pada suhu ruang. Prosedur sintesis yang sama juga dilakukan tanpa penambahan *filler* untuk memperoleh membran PSf murni (*neat membrane*).

Karakterisasi XRD dilakukan untuk mengevaluasi perubahan struktur membran akibat penambahan material pengisi Karbon ZIF-L ke dalam matriks PSf. Hasil Difraktogram XRD ditampilkan pada Gambar 4.7(a). Pola difraksi membran PSf *neat* memperlihatkan satu puncak amorf yang lebar pada sekitar $2\theta = 17,28^\circ$, yang merupakan ciri khas struktur polimer amorf. Setelah penambahan C-ZIF-L, pola difraksi tidak menunjukkan munculnya puncak kristal baru, tetapi terjadi pergeseran puncak amorf PSf. Pada konsentrasi *filler* 0,5–1,5 %b/b, nilai 2θ yang menunjukkan fasa amorf pada PSf bergeser secara bertahap ke arah 2θ yang lebih tinggi. Pergeseran ini menunjukkan adanya perubahan nilai *d-spacing* dalam matriks PSf. Perubahan ini mengindikasikan modifikasi jarak antar-rantai polimer (*interchain spacing*) yang dipicu oleh masuknya material pengisi C-ZIF-L ke dalam fase *matrix* polimer. Fenomena ini juga dilaporkan oleh penelitian sebelumnya (Wijiyanti dkk., 2019b), yang menunjukkan bahwa sedikit penambahan pengisi berbasis karbon mampu memengaruhi *d-spacing* polimer tanpa menghasilkan puncak kristal baru.



Gambar 4.7 (a) Difraktogram membran tanpa perlakuan *annealing* dan (b) ilustrasi peningkatan *d-spacing* akibat penambahan material pengisi

Spektra FTIR dari membran ditunjukkan pada Gambar 4.8. Pita serapan pada 1.105, 1.151, dan 1.240 cm^{-1} merupakan vibrasi asimetris dari gugus O=S=O yang menjadi ciri utama struktur polisulfon. Selain itu, membran PSf menampilkan puncak khas lainnya pada 832 cm^{-1} dan 876 cm^{-1} yang berkaitan dengan vibrasi pada cincin fenil. Puncak pada 1.486 cm^{-1} dan 1.585 cm^{-1} masing-masing mengindikasikan vibrasi C=C aromatik, sementara pita serapan lemah pada 2.970 cm^{-1} menunjukkan keberadaan vibrasi C-H aromatik. Pola ini sepenuhnya konsisten dengan karakteristik spektra PSf yang telah dilaporkan dalam literatur (W. Zhu dkk., 2019a). Penambahan *filler* C-ZIF-L tidak menimbulkan pita serapan baru pada spektra FTIR. Hal ini disebabkan oleh penambahan *filler* yang sangat rendah (0,5–1,5 %b/b), sehingga kontribusi vibrasionalnya tidak cukup kuat untuk terdeteksi, fenomena serupa juga dilaporkan oleh (Jonnalagedda & Kuncharam, 2025a). Lebih lanjut, interaksi antara C-ZIF-L dan matriks PSf bersifat fisik (*physical interaction*) dan tidak membentuk ikatan kimia baru, sehingga tidak menghasilkan perubahan pada pola spektra FTIR membran.



Gambar 4.8 Spektra FTIR membran tanpa perlakuan *annealing*

Morfologi permukaan dan penampang melintang (*cross-section*) membran PSf serta MMM PSf/C-ZIF-L dianalisis menggunakan SEM, seperti ditampilkan pada Gambar 4.9. Pada membran PSf *neat*, permukaan terlihat relatif halus tanpa menunjukkan adanya cacat seperti *void*, menandakan bahwa proses pencampuran larutan *dope* dan tahap inversi fasa berlangsung stabil. Kondisi permukaan yang homogen ini menjadi acuan untuk mengevaluasi perubahan

morfologi ketika material pengisi C-ZIF-L ditambahkan ke dalam matriks PSf. Setelah penambahan material pengisi C-ZIF-L, perubahan morfologi permukaan membran mulai terlihat. Pada MMM PSf/C-ZIF-L dengan penambahan 0,5 %b/b, partikel C-ZIF-L tampak terdispersi dengan cukup baik di dalam matriks polimer tanpa membentuk aglomerasi besar. Permukaan membran masih terlihat homogen, dan tidak ditemukan *void* antarmuka yang signifikan di sekitar partikel, menandakan bahwa pada fraksi pengisi yang sangat rendah, kompatibilitas antara C-ZIF-L dan PSf masih berada pada tingkat yang baik. Dispersi partikel yang merata ini menunjukkan bahwa pada penambahan 0,5 %b/b, interaksi fisik antara pengisi dan matriks polimer masih cukup stabil untuk mempertahankan struktur membran tanpa menimbulkan cacat morfologi. Pada penambahan 1 %b/b, jumlah partikel C-ZIF-L yang terdispersi dalam matriks PSf tampak lebih banyak dibandingkan membran dengan penambahan 0,5 %b/b. Bentuk partikel C-ZIF-L juga terlihat cukup baik dan tetap mempertahankan morfologi khasnya tanpa mengalami kerusakan selama proses pencampuran. Persebaran partikel pada permukaan membran relatif merata, dan *void* antarmuka yang muncul masih sangat minim, menunjukkan bahwa interaksi antara pengisi dan matriks PSf tetap terjaga baik. Kondisi ini menghasilkan permukaan membran yang lebih homogen tanpa *defect* signifikan, menandakan bahwa pada penambahan 1 %b/b kompatibilitas antara *filler* dan polimer berada pada tingkat yang lebih optimal dibandingkan dengan penambahan yang lebih rendah. Sebaliknya, pada MMM PSf/C-ZIF-L dengan penambahan 1,5 %b/b, citra SEM menunjukkan munculnya aglomerasi *filler* dan *void* besar di sekitar partikel. Kehadiran aglomerat ini menyebabkan daerah kosong akibat lemahnya ikatan antarmuka antara PSf dan aglomerat karbon. *Void* tersebut dapat bertindak sebagai jalur bocor (*non-selective void*), sehingga akan menurunkan performa pemisahan membran.

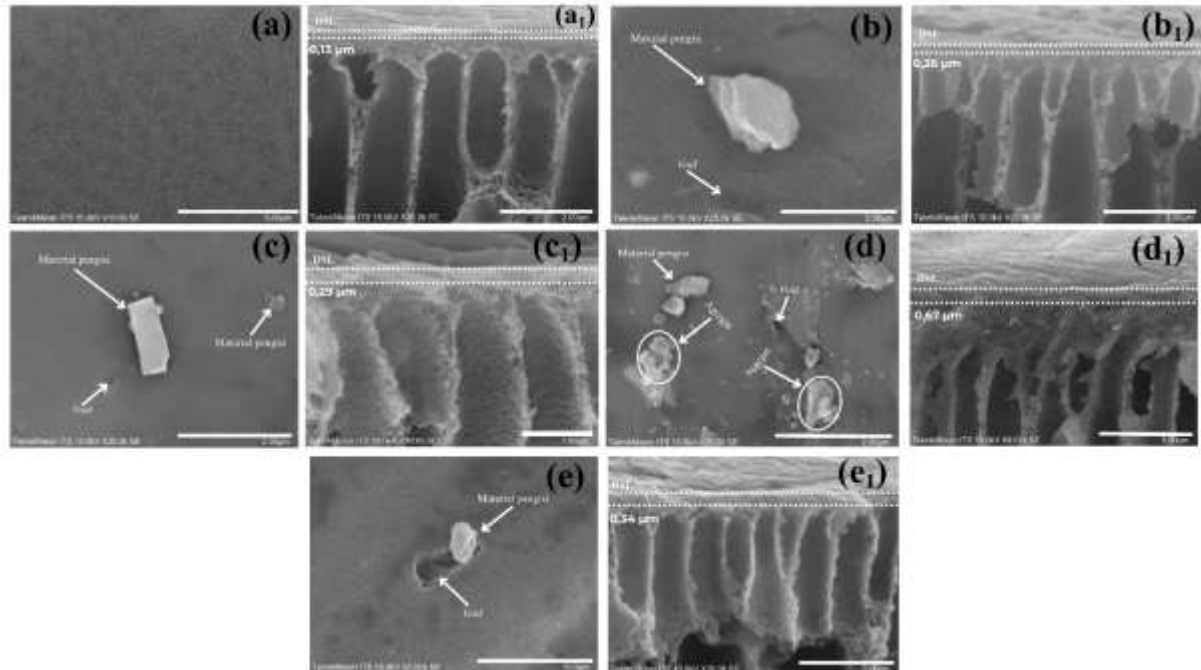
ZIF-L tanpa proses karbonisasi memiliki kompatibilitas yang sangat rendah terhadap matriks polimer PSf. Hal ini terjadi karena ZIF-L memiliki permukaan yang sangat polar, kaya gugus imidazolat dan atom Zn yang mampu berinteraksi kuat dengan fase anorganik, tetapi kurang cocok dengan sifat hidrofobik dan non-polar dari PSf. Ketidaksesuaian sifat antarmuka ini menyebabkan adhesi yang buruk antara ZIF-L dan rantai polimer. Fenomena ini dibuktikan secara jelas melalui citra SEM, di mana terlihat *void* yang sangat besar mengelilingi partikel ZIF-L. *Void* tersebut merupakan celah antarmuka yang muncul akibat terpisahnya *filler* dari matriks. Besarnya celah ini menunjukkan bahwa ZIF-L tidak mampu berbaur atau menempel dengan baik pada PSf, sehingga menghasilkan kontak antarmuka yang lemah dan menciptakan *defect* struktural pada membran.

Tabel 4.1 Nilai *d-spacing* dan DSL membran tanpa perlakuan *annealing*

Jenis Membran	<i>d-spacing</i> (nm)	DSL (μm)
PSf Neat	0,497	0,13+0,02
PSf/C-ZIF-L 0,5%	0,505	0,26+0,03
PSf/C-ZIF-L 1%	0,526	0,29+0,06
PSf/C-ZIF-L 1,5%	0,525	0,67+0,17
PSf/ZIF-L 1%	0,509	0,34+0,06

Selain karakterisasi pada permukaan, analisis morfologi penampang melintang (*cross-section*) juga memegang peranan krusial dalam memahami mekanisme dan kinerja pemisahan gas pada membran. Semua membran yang difabrikasi menunjukkan struktur anisotropik khas membran hasil inversi fasa, yaitu adanya lapisan padat (*dense selective layer* atau DSL) pada bagian permukaan atas yang berfungsi sebagai zona utama pemisahan, serta lapisan bawah yang berpori yang tersusun atas struktur *finger-like* dan *sponge-like*. Variasi ketebalan dan integritas DSL sangat menentukan performa pemisahan karena lapisan inilah yang menjadi hambatan

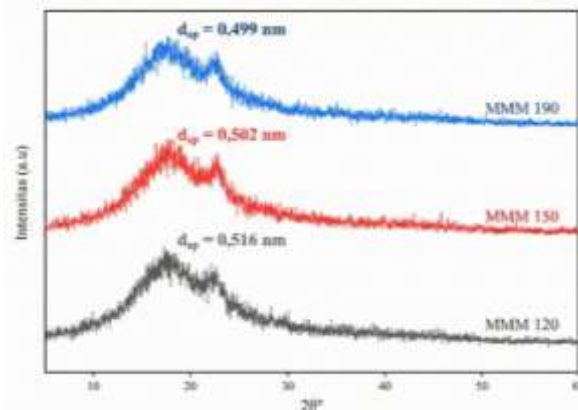
difusi utama bagi molekul gas. Oleh sebab itu, pengamatan SEM pada penampang melintang digunakan sebagai dasar untuk menentukan ketebalan DSL secara kuantitatif. Pengukuran dilakukan menggunakan perangkat lunak ImageJ untuk memastikan penentuan ketebalan yang lebih presisi, sehingga dapat dikorelasikan dengan hasil uji permeabilitas dan selektivitas gas secara lebih akurat.



Gambar 4.9 Citra SEM permukaan (a–e) dan penampang lintang (a₁–e₁) untuk membran: (a) PSf neat; (b) MMM PSf/C-ZIF-L 0,5%; (c) MMM PSf/C-ZIF-L 1%; (d) MMM PSf/C-ZIF-L 1,5%; dan (e) MMM PSf/ZIF-L 1%.

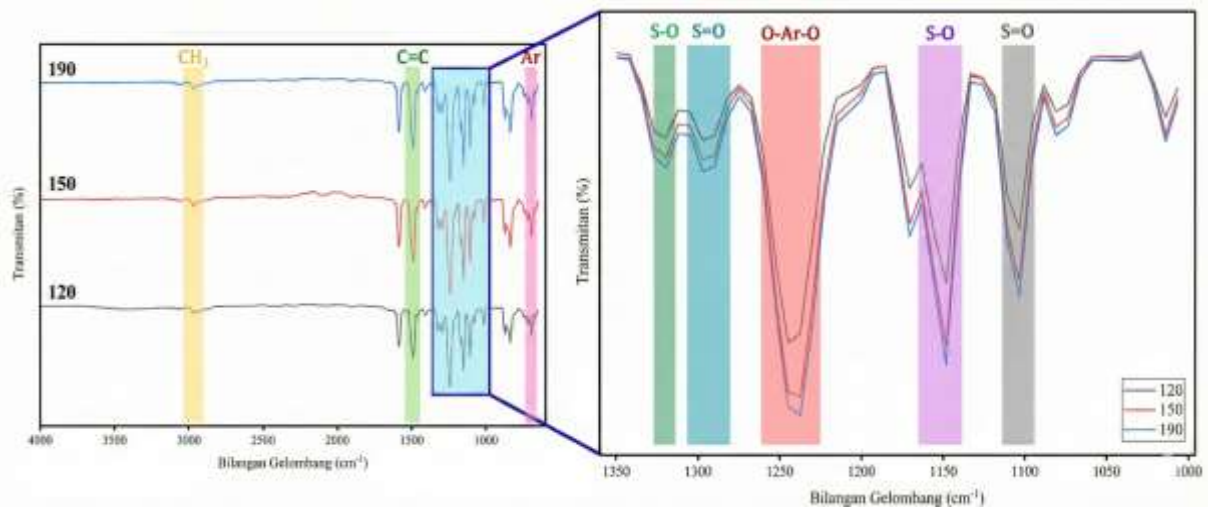
4.3 Hasil *Annealing* Membran

Pola XRD membran PSf/C-ZIF-L 1% setelah perlakuan *annealing* ditunjukkan pada Gambar 4.10. Hasil tersebut menunjukkan perubahan struktur amorf khas polisulfon yang direfleksikan oleh puncak lebar di sekitar $2\theta = 16\text{--}22^\circ$. Pergeseran posisi puncak setelah *annealing* dari *d-spacing* 0,516 nm (120°C) menjadi 0,502 nm (150°C) dan kemudian 0,499 nm (190°C) memperlihatkan kecenderungan penurunan jarak antarsegmen polimer. Fenomena ini konsisten dengan mekanisme pengencangan rantai (*chain densification*) yang terjadi selama perlakuan termal, di mana pemanasan mendekati *T_g* membuat rantai PSf mengalami relaksasi dan menyusun ulang ke konfigurasi yang lebih rapat. Semakin tinggi suhu *annealing*, semakin besar derajat kompaksi yang dicapai, sehingga *d-spacing* bergeser ke nilai yang lebih kecil. Struktur polimer yang semakin kompak secara langsung berpengaruh pada *free volume space* yang menjadi jalur utama difusi molekul gas. Dengan berkurangnya ukuran dan densitas *free volume*, permeabilitas gas cenderung menurun, sementara selektivitas dapat meningkat, sehingga mampu menyaring molekul gas berdasarkan perbedaan ukuran kinetiknya.



Gambar 4.10 Difraktogram XRD membran dengan perlakuan *annealing*

Spektra FTIR membran PSf yang diberi perlakuan *annealing* pada suhu 120, 150, dan 190 °C ditunjukkan pada Gambar 4.11. Seluruh spektra menampilkan pita serapan khas polisulfon yang konsisten, tanpa kemunculan pita baru maupun pergeseran signifikan pada pita utama. Tidak ditemukannya perubahan spektra tersebut menunjukkan bahwa perlakuan *annealing* hingga suhu 190 °C tidak menyebabkan terjadinya pemutusan ikatan kimia maupun dekomposisi struktur polimer. Hal ini memang diharapkan agar proses *annealing* hanya berperan dalam memodifikasi sifat fisik membran, seperti densifikasi struktur, tanpa mengubah atau merusak struktur kimia utama PSf. Dengan demikian, struktur matrik membran tetap terjaga selama perlakuan termal.



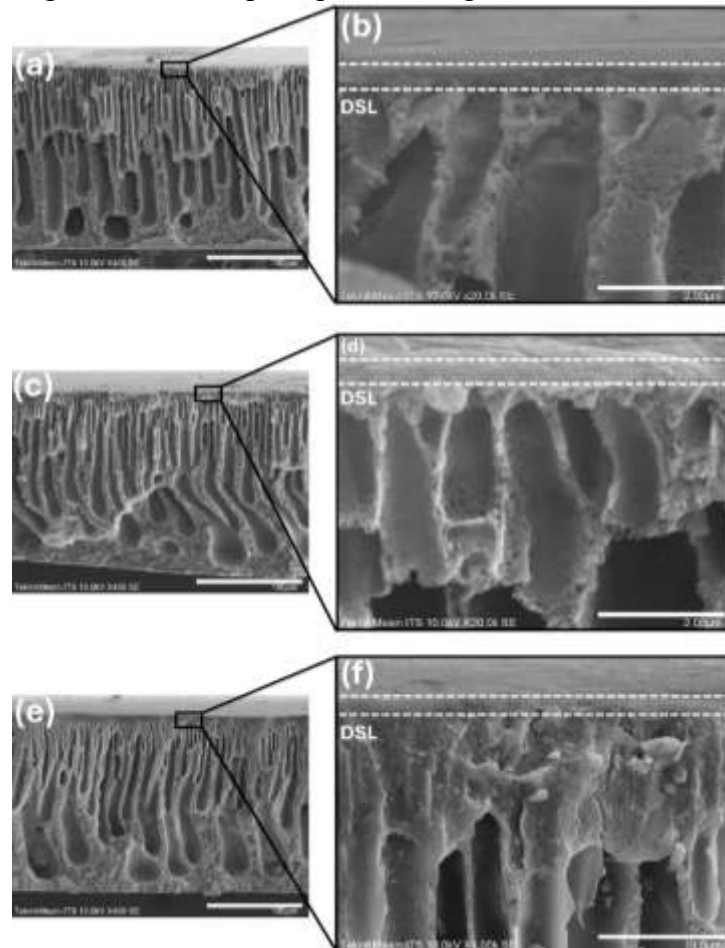
Gambar 4.11 Spektra FTIR membran dengan perlakuan *annealing*

Hasil karakterisasi SEM penampang melintang membran PSf C-ZIF-L 1% sebelum dan sesudah perlakuan *annealing*, yang ditampilkan pada Gambar 4.12, memperlihatkan perubahan struktur yang sesuai dengan fenomena yang diamati dengan FTIR dan XRD. Pada membran yang dikenai *annealing*, lapisan DSL tampak mengalami penebalan dibandingkan membran tanpa perlakuan *annealing*. Hal ini terjadi karena proses *annealing* pada suhu mendekati T_g menyebabkan densifikasi rantai polimer akibat meningkatnya afinitas terhadap permukaan padat, sehingga matriks PSf secara bertahap berubah menjadi struktur yang lebih rapat. Diperkirakan bahwa peningkatan karakteristik polimer ini akan meningkatkan kinerja membran. Nilai *d-spacing* disajikan pada Lampiran 6.

Tabel 4.2 Nilai *d-spacing* dan DSL membran dengan perlakuan *annealing*

Jenis Membran	<i>d-spacing</i> (nm)	DSL (μm)
MMM PSf C-ZIF-L 1%	0,526	0,29+0,06
MMM 120	0,516	0,31+0,08
MMM 150	0,502	0,32+0,06
MMM 190	0,499	1,27+0,13

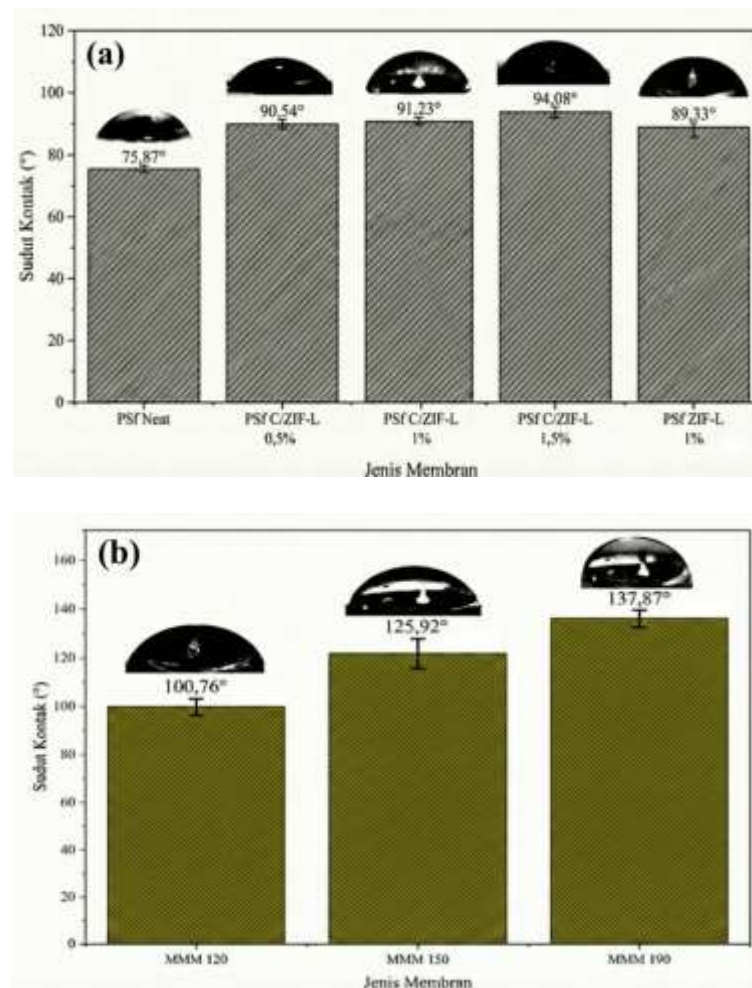
Peningkatan kerapatan matriks yang terlihat pada penampang melintang ini juga sejalan dengan laporan sebelumnya oleh Caralin dkk., (2021) bahwa perlakuan termal dapat meningkatkan densitas polimer. Hasil citra SEM ini juga sejalan dengan XRD, di mana penurunan *d-spacing* setelah *annealing* menunjukkan berkurangnya jarak antarsegmen rantai PSf, selaras dengan meningkatnya kerapatan matriks polimer pada DSL yang teramati pada citra SEM. Kesamaan antara hasil SEM dan XRD ini menegaskan bahwa *annealing* mendorong densifikasi polimer, sehingga menghasilkan membran dengan lapisan selektif yang lebih padat dan berpotensi meningkatkan kemampuan pemisahan gas.



Gambar 4.12 Citra SEM *cross section* membran dengan perlakuan *annealing* (a-b) MMM 120, (c-d) MMM 150, dan (e-f) MMM 190

Hasil pengukuran WCA ditampilkan pada Gambar 4.13, menunjukkan perubahan sifat permukaan membran PSf setelah penambahan *filler* dan perlakuan *annealing*. Membran PSf *neat* memiliki nilai WCA sebesar $75,87^\circ$, yang mengindikasikan sifat permukaan relatif netral cenderung hidrofobik lemah. Setelah penambahan *filler*, nilai WCA meningkat untuk PSf C-ZIF-L 0,5%, PSf C-ZIF-L 1%, PSf C-ZIF-L 1,5%, dan PSf ZIF-L 1% secara berurutan

menjadi 90,54; 91,23; 94,08; dan 89,33°. Peningkatan ini menunjukkan bahwa keberadaan *filler* C-ZIF-L berkontribusi terhadap meningkatnya sifat hidrofobik permukaan membran yang berasal dari karakter hidrofobik material karbon serta perubahan morfologi permukaan akibat distribusi *filler*. Selanjutnya, perlakuan *annealing* menyebabkan peningkatan WCA yang lebih lanjut, masing-masing menjadi 100,76 (MMM 120), 125,92 (MMM 150), dan mencapai nilai tertinggi 137,87° (MMM 190). Tren ini menunjukkan bahwa kenaikan suhu *annealing* memperkuat sifat hidrofobik membran. Fenomena tersebut dapat dikaitkan dengan densifikasi matriks polimer, yang menyebabkan terbentuknya permukaan yang lebih rapat dan halus. Selain itu, meningkatnya kompatibilitas antara polimer dan *filler* serta tertutupnya *void* turut berkontribusi terhadap peningkatan sudut kontak air.



Gambar 4.13 Nilai sudut kontak membran (a) sebelum perlakuan *annealing* dan (b) sesudah perlakuan *annealing*

4.4 Performa Pemisahan Gas

Pengujian kinerja pemisahan gas pada membran dilakukan dengan mengevaluasi dua parameter utama, yaitu permeabilitas serta selektivitas, sebagaimana telah dibahas pada bab sebelumnya. Proses pengujian memanfaatkan sistem *bubble flow meter* yang memungkinkan pemantauan laju aliran gas secara akurat. Salah satu aspek penting yang memengaruhi efisiensi pemisahan adalah ukuran diameter kinetik masing-masing gas. Gas hidrogen memiliki diameter kinetik sekitar 0,289 nm, lebih kecil dibandingkan CO₂ yang bernilai 0,33 nm, sehingga H₂ cenderung lebih mudah melewati struktur membran. Pada MMM, performa pemisahan juga bergantung pada kontribusi material pengisi, yang dapat menyediakan jalur difusi tambahan

atau interaksi selektif dengan molekul gas. Sebelum diuji, membran dikeringkan hingga seluruh pelarut menguap sempurna. Setelah itu, membran dipotong dalam bentuk cakram sesuai ukuran ruang uji pada reaktor. Membran kemudian ditempatkan di dalam reaktor dan disegel menggunakan *O-ring* untuk mencegah kebocoran pada sisi lateral. Gas tunggal H₂ maupun CO₂ dialirkan melalui jalur *feed*. Waktu pengukuran dicatat saat gelembung pada buret mulai bergerak secara konsisten untuk setiap volume yang telah ditetapkan.

Pengujian performa pemisahan pada membran PSf dengan variasi pengisi C-ZIF-L sebesar 0,5; 1; dan 1,5 %b/b dilakukan pada kondisi penambahan rendah untuk mengevaluasi pengaruh *filler* terhadap mekanisme transport gas. Hasil pengujian yang disajikan secara lengkap pada Tabel 4.3, menunjukkan bahwa permeabilitas H₂ meningkat secara signifikan seiring dengan penambahan jumlah C-ZIF-L. Dibandingkan dengan membran PSf *neat* yang memiliki permeabilitas H₂ sebesar 83,16 ± 3,80 Barrer, penambahan C-ZIF-L pada penambahan 0,5; 1; dan 1,5 %b/b masing-masing menghasilkan peningkatan permeabilitas gas H₂ sebesar 32,11; 193,78; dan 396,04 %. Peningkatan permeabilitas yang konsisten hingga penambahan 1,5% ini mengindikasikan bahwa C-ZIF-L berperan efektif sebagai jalur difusi tambahan di dalam matriks PSf. Tren serupa juga diamati pada permeabilitas CO₂, dengan peningkatan berturut-turut sebesar 0,46; 41,05; dan 327,13% relatif terhadap membran PSf *neat*.

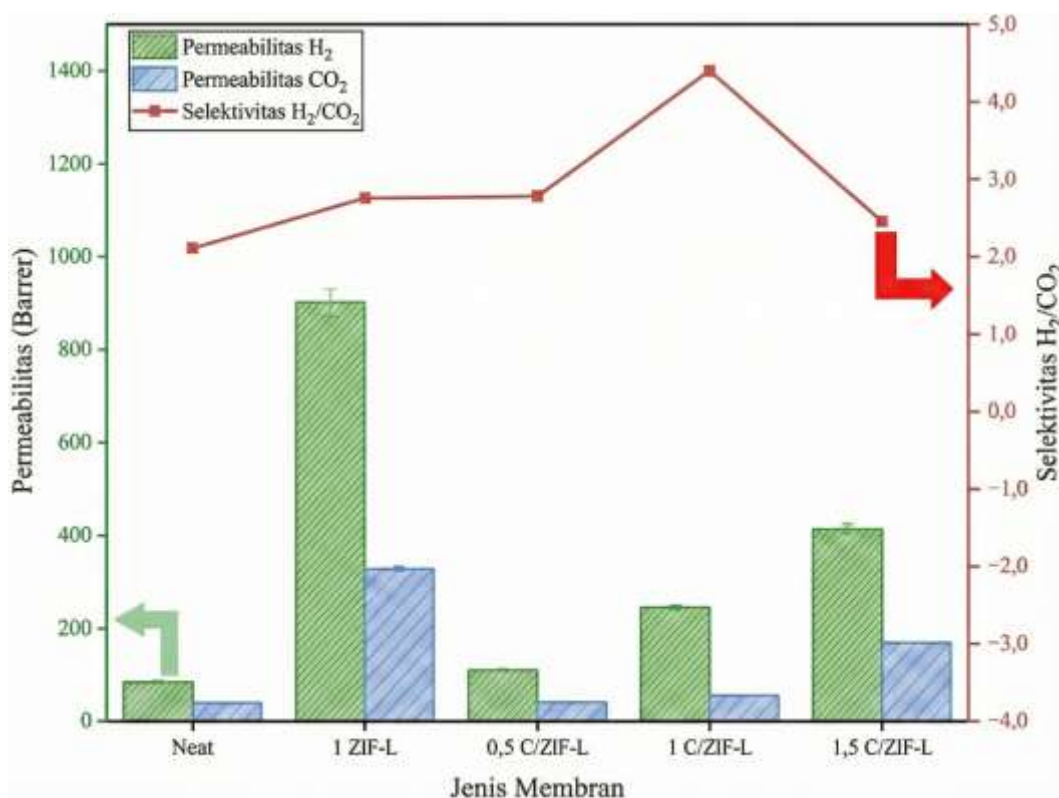
Tabel 4.3 Hasil pengujian gas tanpa perlakuan *annealing*

Jenis Membran	Permeabilitas H ₂ (Barrer)	Permeabilitas CO ₂ (Barrer)	Selektivitas H ₂ /CO ₂
PSf <i>Neat</i>	83,16 ± 3,80	39,37 ± 0,09	2,11 ± 0,10
PSf C-ZIF-L 0,5%	109,86 ± 1,74	39,55 ± 0,47	2,77 ± 0,06
PSf C-ZIF-L 1%	244,31 ± 4,32	55,53 ± 0,66	4,40 ± 0,09
PSf C-ZIF-L 1,5%	412,51 ± 11,90	168,16 ± 0,69	2,45 ± 0,07
PSf ZIF-L 1%	901,33 ± 28,50	327,36 ± 5,10	2,75 ± 0,10

Apabila dikaitkan dengan hasil karakterisasi, struktur pori C-ZIF-L yang terbentuk setelah proses karbonisasi menunjukkan bahwa kerangka utama ZIF-L rusak dan sebagian porinya tertutup oleh lapisan karbon hasil degradasi *linker* organik. Kondisi ini membuat aliran gas menjadi lebih terbatas, sehingga C-ZIF-L berfungsi sebagai penghalang selektif yang memaksa gas melewati jalur transport yang lebih sempit dan teratur. Selain itu, residu ZnO yang tetap berada di dalam kerangka karbon setelah karbonisasi juga berperan penting dalam mekanisme pemisahan gas, khususnya terhadap CO₂. ZnO diketahui memiliki afinitas kimia yang tinggi terhadap molekul CO₂ melalui mekanisme adsorpsi fisik dan interaksi permukaan. Dengan demikian, keberadaan ZnO di dalam karbon ZIF-L mampu meningkatkan interaksi CO₂ dengan material pengisi, sehingga difusi CO₂ melalui membran menjadi lebih teratur dan selektif. Interaksi ini dapat meningkatkan waktu tinggal CO₂, yang dapat menghasilkan peningkatan selektivitas. Selain itu, perubahan *d-spacing* akibat adanya C-ZIF-L, seperti ekspansi kisi kristal pada polimer membran, dapat meningkatkan jalur bebas rata-rata (*mean free path*) untuk gas yang memiliki interaksi lebih lemah (H₂).

Selektivitas gas H₂/CO₂ pada membran PSf yang dimodifikasi dengan C-ZIF-L ditampilkan pada Gambar 4.14. Dibandingkan dengan membran PSf *neat* yang memiliki selektivitas sebesar 2,11, penambahan C-ZIF-L menghasilkan peningkatan selektivitas hingga mencapai kondisi optimum pada penambahan 1 %b/b, dengan kenaikan sebesar 31,28 % pada penambahan 0,5 %b/b dan meningkat tajam hingga 108,53 % pada penambahan 1 %b/b. Namun, pada penambahan yang lebih tinggi (1,5 %b/b), selektivitas mengalami penurunan, dengan peningkatan yang hanya tersisa sebesar 16,11 %b/b terhadap membran *neat*. Pola ini

menunjukkan bahwa distribusi partikel pengisi berada pada kondisi paling efektif dalam rentang penambahan tertentu, di mana struktur membran masih mampu mempertahankan jalur difusi gas yang kontinu tanpa terjadinya penyumbatan atau pembentukan aglomerat yang menghambat transport molekul gas. Perilaku ini sejalan dengan perubahan struktur membran yang teridentifikasi melalui karakterisasi sebelumnya, di mana partikel C-ZIF-L yang bermorfologi tidak beraturan, berpermukaan berpori, serta keberadaan kristal ZnO berkontribusi dalam meningkatkan konektivitas jalur difusi gas di dalam matriks PSf, yang diperkuat oleh sifat kimia residu anorganik ZnO hasil karbonisasi ZIF-L.



Gambar 4.14 Permeabilitas dan selektivitas membran tanpa perlakuan *annealing*

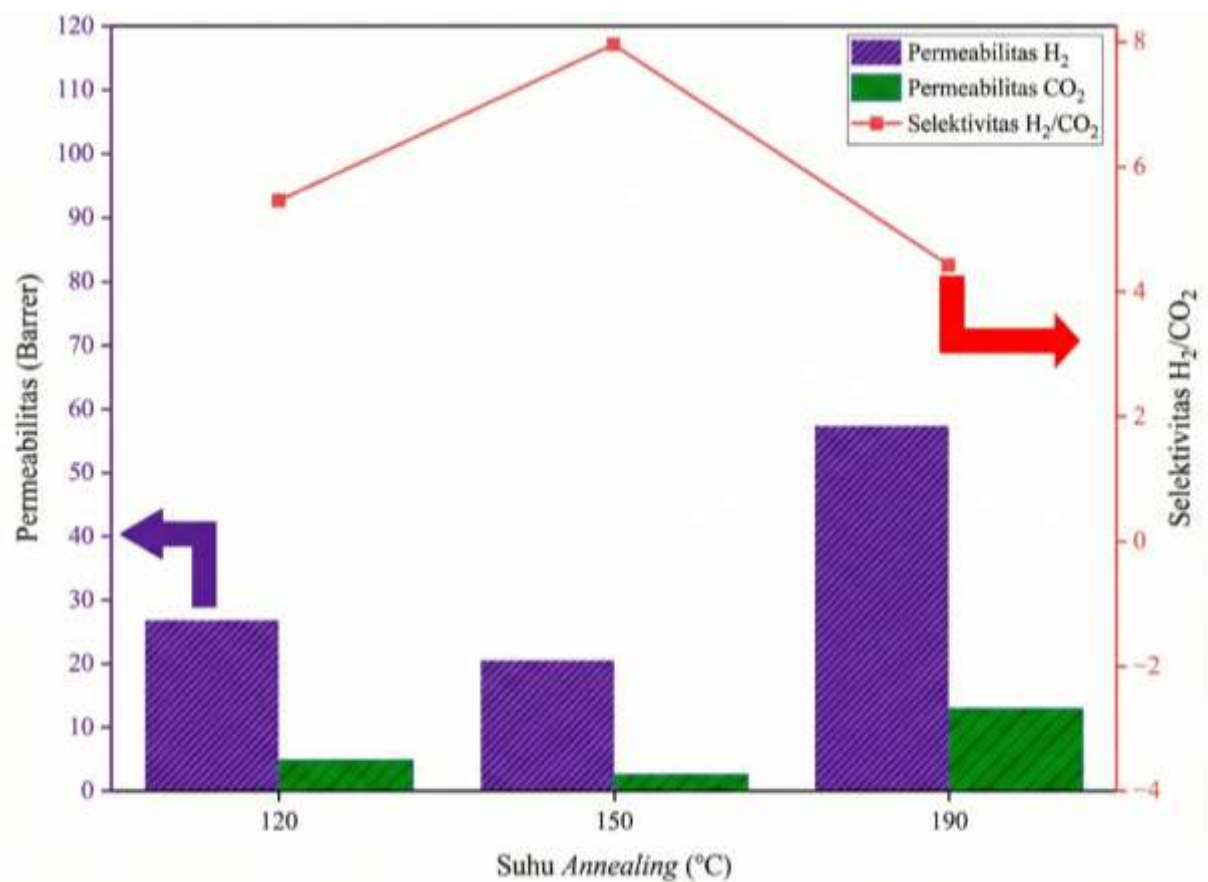
Kinerja permeabilitas dari MMM yang diberikan perlakuan *annealing* dievaluasi dan terdapat pada Tabel 4.4. Permeabilitas gas H₂ menunjukkan trend penurunan jika dibandingkan dengan membran tanpa perlakuan *annealing*. MMM 120, 150, dan 190 memiliki nilai penurunan permeabilitas gas H₂ masing-masing sebesar -88,99; -91,58; dan -76,48 %. Hal yang serupa juga terjadi pada permeabilitas gas CO₂ yang menunjukkan penurunan lebih signifikan dibandingkan dengan permeabilitas gas H₂, dengan MMM 120, 150, dan 190 memiliki nilai persentase penurunan permeabilitas CO₂ masing-masing sebesar -91,13; -95,35; dan -76,66 %.

Tabel 4.4 Hasil pengujian gas dengan perlakuan *annealing*

Jenis Membran	Permeabilitas H ₂ (Barrer)	Permeabilitas CO ₂ (Barrer)	Selektivitas H ₂ /CO ₂
MMM 120	26,89 ± 0,13	4,92 ± 0,04	5,46 ± 0,05
MMM 150	20,55 ± 0,02	2,58 ± 0,01	7,97 ± 0,03
MMM 190	57,46 ± 0,15	12,91 ± 0,05	4,45 ± 0,02

Turunnya kedua nilai permeabilitas gas ini disebabkan oleh DSL yang teramati pada karakterisasi SEM pada MMM dengan perlakuan *annealing* memiliki ketebalan yang lebih

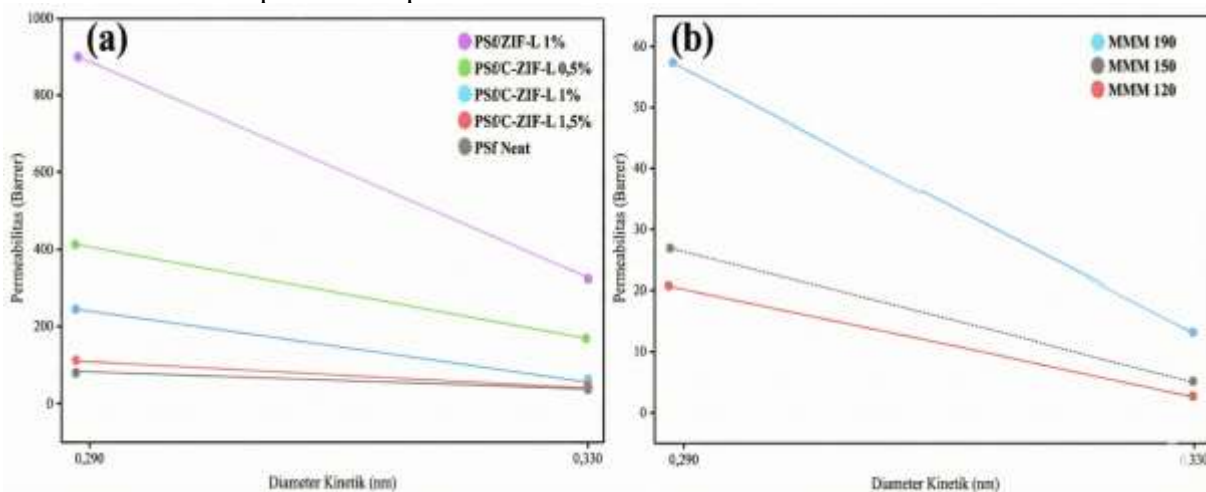
besar dibandingkan dengan MMM tanpa perlakuan *annealing* (PSf C-ZIF-L 1%). Peningkatan ketebalan DSL menyebabkan hambatan difusi gas menjadi lebih besar, sehingga laju transport gas menurun dan nilai permeabilitas cenderung berkurang. Namun, DSL yang lebih tebal juga berperan penting dalam meningkatkan selektivitas, karena proses utama pemisahan gas berlangsung pada lapisan selektif ini. Hal ini juga berlaku pada penelitian ini, dengan peningkatan selektivitas yang ditampilkan pada Gambar 4.15, untuk masing masing MMM 120, 150, dan 190°C secara berurutan sebesar 24,09; 80,68; dan 0,68% dibandingkan membran tanpa perlakuan *annealing*. Selain dipengaruhi oleh ketebalan DSL, perlakuan *annealing* juga menyebabkan berkurangnya jarak antar rantai polimer. Hal ini selaras dengan hasil analisis XRD yang menunjukkan penurunan nilai *d-spacing*, yang mengindikasikan terjadinya densifikasi matriks polimer selama proses *annealing*. Densifikasi ini turut meningkatkan kompatibilitas antara material pengisi dan matriks polimer menjadi lebih baik, serta berkontribusi pada tertutupnya *void* pada membran yang mengalami perlakuan *annealing*. Hasil ini sejalan dengan penelitian Widiastuti dkk. (2022), yang melaporkan penurunan permeabilitas 99% dan peningkatan selektivitas 102% pada membran PSf dengan perlakuan *annealing*.



Gambar 4.15 Permeabilitas dan selektivitas membran dengan perlakuan *annealing*

Hubungan antara diameter kinetik gas dengan permeabilitasnya ditunjukkan pada Gambar 4.16. *Slope* dari kurva permeabilitas memperlihatkan bahwa peningkatan perbedaan permeabilitas antara H₂ (0,289 nm) dan CO₂ (0,33 nm) menjadi indikator kuat bahwa mekanisme pemisahan didominasi oleh *molecular sieving*. Ketika struktur membran lebih selektif terhadap ukuran molekul, jalur transport yang sempit akan lebih mudah dilalui oleh H₂ yang berukuran lebih kecil, sementara CO₂ mengalami hambatan tidak hanya karena ukuran yang lebih besar tetapi juga karena kecenderungannya berinteraksi dengan situs polar pada permukaan pengisi. Membran dengan penambahan C-ZIF-L sebesar 1% menunjukkan *slope*

paling curam, menandakan kontribusi paling optimum antara mekanisme penyaringan ukuran dan hambatan adsorptif terhadap CO₂.



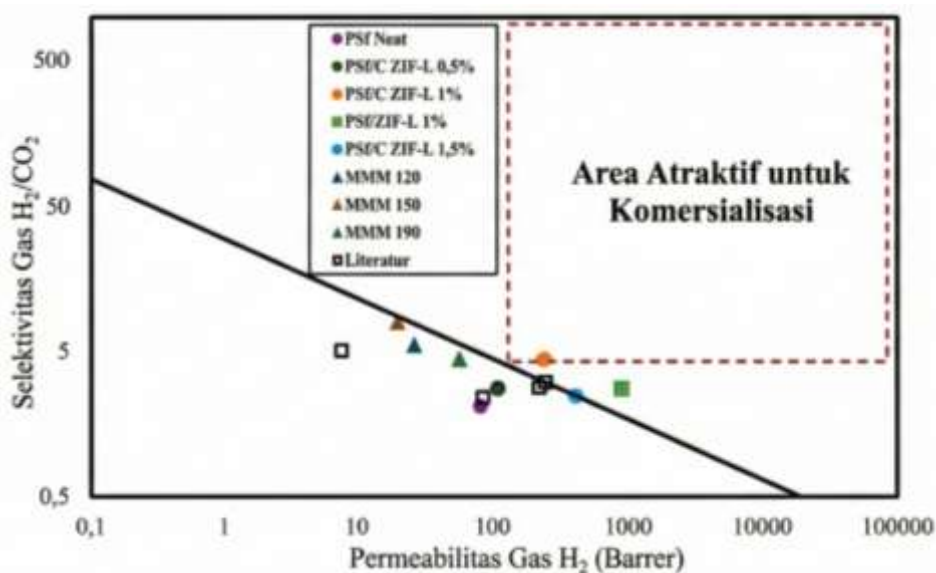
Gambar 4.16 Grafik perbandingan diameter kinetik dengan permeabilitas dari masing-masing membran (a) membran tanpa perlakuan *annealing*, (b) membran dengan perlakuan *annealing*

Kinerja pemisahan gas yang diperoleh pada membran PSf/C-ZIF-L sangat dipengaruhi oleh sifat struktural material pengisi yang telah dikarakterisasi sebelumnya. Berdasarkan hasil difraksi XRD setelah proses karbonisasi, tidak terlihat lagi puncak karakteristik ZIF-L pada $2\theta = 7^\circ$, yang menandakan bahwa struktur berlapis khas ZIF-L telah sepenuhnya runtuh selama perlakuan suhu tinggi. Hilangnya puncak ini menunjukkan bahwa kerangka organik ZIF-L mengalami dekomposisi total dan tidak mempertahankan konfigurasi kristalnya. Pola XRD yang muncul setelah karbonisasi didominasi oleh puncak-puncak ZnO kristalin, yang mengonfirmasi terbentuknya fase oksida logam dalam matriks karbon. Dengan demikian, jalur difusi gas pada material pengisi dipengaruhi oleh kombinasi karbon amorf dan distribusi kristalit ZnO, bukan lagi oleh struktur berlapis ZIF-L.

Pengamatan pada bidang penampang melintang juga menunjukkan bahwa membran dengan fraksi C-ZIF-L 1%, yang optimal memiliki ketebalan *dense selective layer* (DSL) yang ideal. Semakin tinggi DSL, jalur transport molekul gas menuju lapisan berpori menjadi lebih panjang, sehingga proses penyaringan berlangsung lebih selektif. Pada kasus MMM C-ZIF-L, peningkatan ketebalan DSL berkaitan erat dengan tingkat kompatibilitas material karbon terhadap matriks polimer. Ketika material pengisi terdispersi secara homogen tanpa membentuk jalur difusi cepat berupa *void*, maka penetrasi air sebagai non-pelarut selama proses inversi fasa berlangsung lebih lambat. Perlambatan laju difusi air ini menghambat pertukaran pelarut dan nonpelarut, sehingga mendorong pembentukan DSL yang lebih tebal, sebagaimana dilaporkan oleh Zhang dkk. (2022). Sebaliknya, ketika terjadi aglomerasi partikel C-ZIF-L atau ketika pengisi berada terlalu dekat dengan permukaan membran, terbentuknya *void* menjadi lebih mungkin. Keberadaan *void* menyebabkan air dengan mudah masuk menuju lapisan atas membran selama proses fabrikasi, sehingga lapisan selektif yang terbentuk menjadi lebih tipis dan tidak seragam. Akibatnya, jalur difusi gas menjadi kurang terkontrol dan menurunkan efisiensi pemisahan. Selain itu, karakter karbon hasil karbonisasi ZIF-L yang bersifat berpori dan memiliki residu ZnO juga memberikan kontribusi terhadap morfologi. Pada konsentrasi C-ZIF-L yang rendah, partikel karbon berukuran kecil dapat tersusun dengan orientasi yang mendukung pembentukan antarmuka yang rapat dengan polimer, sementara pada konsentrasi tinggi kecenderungan partikel untuk saling menumpuk meningkat sehingga interaksi dengan

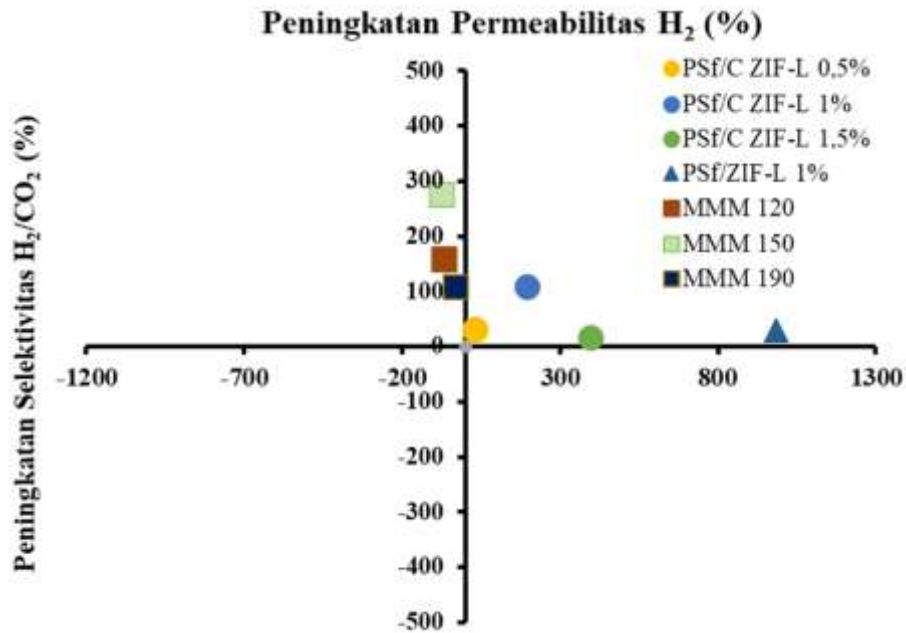
matriks melemah. Aglomerasi ini dapat menjadi titik awal terbentuknya defek yang berpengaruh langsung terhadap penurunan permeabilitas dan selektivitas.

Peningkatan permeabilitas umumnya beriringan dengan penurunan selektivitas. Hubungan keduanya divisualisasikan melalui plot permeabilitas dan selektivitas dalam skala log yang dibandingkan dengan batas atas Robeson (Robeson, 2008). Kurva Robeson berfungsi sebagai acuan untuk menilai kualitas kinerja membran, di mana titik data yang semakin mendekati garis batas menunjukkan performa yang lebih baik. Jika suatu membran mampu melampaui batas atas tersebut, maka membran tersebut dianggap memiliki potensi tinggi untuk dikomersialisasikan. Plot kinerja membran dalam penelitian ini dapat dilihat dalam Gambar 4.17. MMM PSf/C-ZIF-L tanpa dan dengan perlakuan *annealing* menunjukkan bahwa sebagian besar formulasi berada dekat atau melampaui *Robeson Upper Bound* untuk pasangan gas H_2/CO_2 , yang menandakan peningkatan performa yang signifikan. Membran dengan penambahan C-ZIF-L 1% tanpa *annealing* menempati posisi terbaik, menunjukkan potensi tinggi untuk aplikasi yang lebih lanjut.



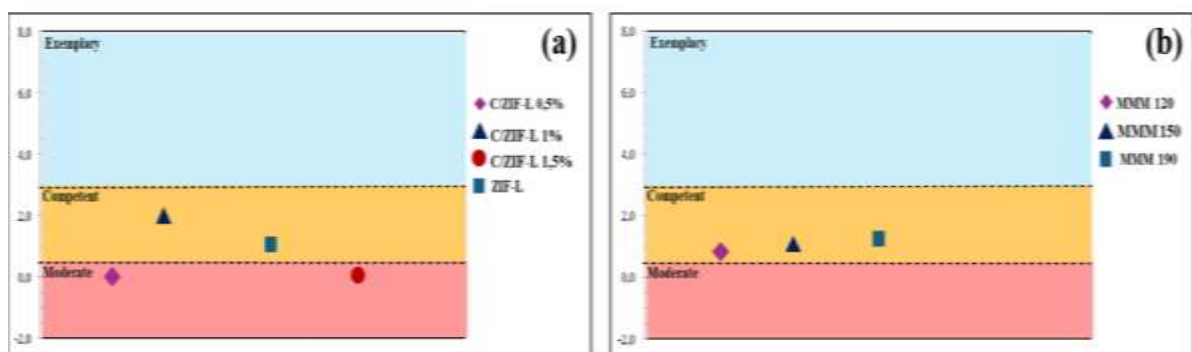
Gambar 4.17 Perbandingan kinerja membran yang diteliti terhadap kurva Robeson 2008 dan literatur (Eden & Daramola, 2021; Mei dkk., 2020; Wijiyanti dkk., 2019c, 2023)

Peningkatan kinerja pemisahan gas pada membran PSf C-ZIF-L dibandingkan dengan PSf *neat* dapat dilihat pada diagram kartesius (Gambar 4.18), yang menunjukkan perubahan permeabilitas dan selektivitas. Berdasarkan grafik tersebut, membran dengan perlakuan *annealing*, khususnya pada suhu 120 dan 150°C, menunjukkan peningkatan selektivitas paling signifikan secara berurutan sebesar 158,50 dan 276,30. Seluruh titik data membran tanpa perlakuan *annealing* berada pada kuadran I, yang menunjukkan bahwa penambahan material pengisi C-ZIF-L mampu meningkatkan permeabilitas dan selektivitas dibandingkan membran PSf *neat*. Sebaliknya, pada membran yang mengalami perlakuan *annealing*, titik-titik performanya berpindah ke kuadran II, mengindikasikan bahwa proses solidifikasi termal menyebabkan penurunan permeabilitas meskipun selektivitas tetap meningkat (Goh dkk., 2011).



Gambar 4.18 Diagram kartesius peningkatan permeabilitas dan selektivitas membran

Analisis efektivitas penambahan C-ZIF-L dalam meningkatkan kualitas pemisahan gas juga dievaluasi dengan F index yang dapat dilihat pada Gambar 4.19. Berdasarkan klasifikasi F index (<0: tidak berpengaruh; 0–1,5: cukup; 1,5–4: kompeten; 4–8: baik; >8: ideal), seluruh membran PSf/C-ZIF-L tanpa perlakuan *annealing* berada pada kategori moderat hingga kompeten, menunjukkan bahwa penambahan *filler* secara langsung mampu meningkatkan transport dan selektivitas gas dalam matriks PSf. Sementara itu, membran yang dikenai perlakuan *annealing* pada 120, 150, dan 190°C cenderung berada pada kategori kompeten, akibat proses densifikasi rantai yang menyebabkan penurunan permeabilitas, tetapi meningkatkan selektivitas. Temuan ini menunjukkan bahwa *filler* C-ZIF-L memberikan kontribusi positif terhadap kinerja pemisahan, baik sebelum maupun setelah *annealing*.



Gambar 4.19 Plot F index material pengisi (a) MMM tanpa *annealing* dan (b) MMM dengan *annealing*

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini berhasil difabrikasi membran *flat sheet* berbasis Polisulfon (PSf) dengan material pengisi karbon ZIF-L (C-ZIF-L) melalui variasi *penambahan* sebesar 0,5; 1; dan 1,5 %b/b, serta dikaji pengaruh perlakuan *annealing* pada suhu 120, 150, dan 190 °C terhadap struktur, morfologi, dan kinerja pemisahan gas H₂/CO₂. Material C-ZIF-L hasil sintesis menunjukkan transformasi struktur menjadi material berbasis karbon dengan keberadaan fase ZnO sebagai akibat proses karbonisasi, yang terkonfirmasi melalui karakterisasi SEM, FTIR, dan XRD. Secara kinerja, penambahan C-ZIF-L 1 %b/b mampu meningkatkan permeabilitas gas H₂ hingga 193,81 % dan selektivitas H₂/CO₂ hingga 108,53 % dibandingkan membran PSf *neat*. Lebih lanjut, MMM yang dikenai perlakuan *annealing* menunjukkan peningkatan selektivitas H₂/CO₂ hingga 277,72 %, meskipun disertai penurunan permeabilitas H₂ akibat fenomena *trade-off* pada membran. Evaluasi dengan Kurva Robeson 2008 menunjukkan bahwa kinerja membran PSf/C-ZIF-L sebelum dan sesudah *annealing* berada di sekitar batas atas kurva, dengan satu kondisi mampu melampaui batas tersebut. Sementara itu, analisis F-index mengindikasikan bahwa material pengisi berada dalam kategori kinerja moderat hingga kompeten. Hasil ini menegaskan bahwa membran PSf/C-ZIF-L memiliki potensi yang menjanjikan untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai membran pemisahan gas hidrogen yang stabil dan efektif.

5.2 Saran

Pada penelitian ini, perlakuan *annealing* difokuskan pada kondisi membran dengan komposisi material pengisi yang menunjukkan kinerja terbaik. Sementara itu, variasi *penambahan* C-ZIF-L lainnya belum dievaluasi dengan perlakuan *annealing*. Mengingat hasil penelitian menunjukkan adanya pengaruh signifikan *annealing* terhadap densifikasi matriks polimer, penebalan DSL, serta peningkatan selektivitas pemisahan gas, maka diperlukan kajian lanjutan mengenai penerapan perlakuan *annealing* pada variasi penambahan C-ZIF-L yang berbeda untuk memperoleh kondisi optimum secara menyeluruh. Selain itu, karakterisasi tambahan seperti analisis termal (TGA/DSC), uji sifat mekanik, serta uji stabilitas jangka panjang terhadap uap air perlu dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan dan kelayakan membran PSf/C-ZIF-L untuk aplikasi pemisahan gas hidrogen pada kondisi operasional yang sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbaspour, N., Jordan, C., Tondl, G., Wąsik, P., Gholizadeh, T., Tomasetig, D., Szłek, A., Pfeifer, C., Harasek, M., Korus, A., & Winter, F. (2025). Activated biochars from heavy metal-contaminated biomass for CO₂ capture: Adsorption performance and dominant mechanisms. *Journal of CO₂ Utilization*, 101, 103217. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2025.103217>
- Akhaier, S. H. M., Harun, Z., Basri, H., Ahmad, R. A. R., Rashid, A. Q. A., & Azhar, F. H. (2018). Hydrophobicity properties of graphite and reduced graphene oxide of the polysulfone (PSf) mixed matrix membrane. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 31(8), 1381–1388. <https://doi.org/10.5829/ije.2018.31.08b.29>
- An, E. J., Jeon, S., Noh, G.-Y., Lee, J., Kim, Y., Choi, H., Lee, C. S., Park, S., & Chi, W. S. (2025). Isatin-based microporous polymer membranes with tunable building blocks: Understanding structural effects on gas transport properties and plasticization behavior. *Polymer Testing*, 146, 108775. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.108775>
- Arnal-Herault, C., Arzoumanian, T., Velasco Rueda, M. V., Belaissaoui, B., Ponçot, M., Steunou, N., Biswas, S., Espuche, E., & Jonquieres, A. (2025). “High-performance mixed matrix membranes with very-high ZIF-8 penambahan for efficient CO₂ capture.” *Polymer*, 336, 128858. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.128858>
- Baraj, E., Ciahotný, K., & Hlinčík, T. (2022). Advanced Catalysts for the Water Gas Shift Reaction. *Crystals*, 12(4), 509. <https://doi.org/10.3390/cryst12040509>
- Cao, H., Jiang, Z., Tang, J., & Zhou, Q. (2023). Effects of ZIF-L Morphology on PI@PDA@PEI/ZIF-L Composite Membrane’s Adsorption and Separation Properties for Heavy Metal Ions. *Polymers*, 15(23), 4600. <https://doi.org/10.3390/polym15234600>
- Caralin, I. S., Widyanto, A. R., Widiastuti, N., Wijiyanti, R., Gunawan, T., Karim, Z. A., Nomura, M., & Yoshida, Y. (2021). *Annealing treatment for enhancing of H₂/C₃H₈ separation performance on polysulfone membrane*. 020065. <https://doi.org/10.1063/5.0052177>
- Chen, C.-C., Tseng, H.-H., Lin, Y.-L., & Chen, W.-H. (2017). Hydrogen production and carbon dioxide enrichment from ethanol steam reforming followed by water gas shift reaction. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1430–1441. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.149>
- Chung, T.-S., Jiang, L. Y., Li, Y., & Kulprathipanja, S. (2007). Mixed matrix membranes (MMMs) comprising organic polymers with dispersed inorganic fillers for gas separation. *Progress in Polymer Science*, 32(4), 483–507. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.01.008>
- Cychy, S., Lechler, S., Huang, Z., Braun, M., Brix, A. C., Blümmler, P., Andronescu, C., Schmid, F., Schuhmann, W., & Muhler, M. (2021). Optimizing the nickel boride layer thickness in a spectroelectrochemical ATR-FTIR thin-film flow cell applied in glycerol oxidation. *Chinese Journal of Catalysis*, 42(12), 2206–2215. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(20\)63766-4](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(20)63766-4)
- Ding, B., Wang, X., Xu, Y., Feng, S., Ding, Y., Pan, Y., Xu, W., & Wang, H. (2018). Hydrothermal preparation of hierarchical ZIF-L nanostructures for enhanced CO₂ capture. *Journal of Colloid and Interface Science*, 519, 38–43. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.02.047>
- Ding, R., Li, Z., Dai, Y., Li, X., Ruan, X., Gao, J., Zheng, W., & He, G. (2022). Boosting the CO₂/N₂ selectivity of MMMs by vesicle shaped ZIF-8 with high amino content. *Separation and Purification Technology*, 298, 121594. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121594>
- Dischinger, S. M., Miller, D. J., Vermaas, D. A., & Kingsbury, R. S. (2024). Unifying the Conversation: Membrane Separation Performance in Energy, Water, and Industrial Applications. *ACS ES&T Engineering*, 4(2), 277–289. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.3c00475>
- Ebrahimi, P., Kumar, A., & Khraisheh, M. (2020). A review of recent advances in water-gas shift catalysis for hydrogen production. *Emergent Materials*, 3(6), 881–917. <https://doi.org/10.1007/s42247-020-00116-y>
- Eden, C. L., & Daramola, M. O. (2021). Evaluation of silica sodalite infused polysulfone mixed matrix membranes during H₂/CO₂ separation. *Materials Today: Proceedings*, 38, 522–527. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.393>
- El-Eskandarany, M. S. (2020). Characterizations of mechanically alloyed powders. In *Mechanical Alloying* (pp. 13–18). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818180-5.00002-9>

- Goh, P. S., Ismail, A. F., Sanip, S. M., Ng, B. C., & Aziz, M. (2011). Recent advances of inorganic fillers in mixed matrix membrane for gas separation. *Separation and Purification Technology*, 81(3), 243–264. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.07.042>
- Gong, Y., Chen, X., & Wu, W. (2024). Application of fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy in sample preparation: Material characterization and mechanism investigation. *Advances in Sample Preparation*, 11, 100122. <https://doi.org/10.1016/j.sampre.2024.100122>
- Govindan, S., Ghosh, R. N., Chaithra, Basavakumar Roopa, V., Joseph, A. T., Gupta, A., Moorkoth, S., Namboothiri, P. K., & Peter, M. (2025). Evaluation of the Antimicrobial and Organic Dye Removal Properties of Silver-Incorporated ZIF-L Metal–Organic Framework Nanoparticles. *ACS Omega*, 10(21), 21334–21349. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c11412>
- Gumustas, M., Sengel-Turk, C. T., Gumustas, A., Ozkan, S. A., & Uslu, B. (2017). Effect of Polymer-Based Nanoparticles on the Assay of Antimicrobial Drug Delivery Systems. In *Multifunctional Systems for Combined Delivery, Biosensing and Diagnostics* (pp. 67–108). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-52725-5.00005-8>
- Gunawan, T., Romadiansyah, T. Q., Wijiyanti, R., Wan Salleh, W. N., & Widiastuti, N. (2019). Zeolite templated carbon: Preparation, characterization and performance as filler material in co-polyimide membranes for CO₂/CH₄ separation. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 15(3), 407–413. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v15n3.1461>
- Hazarika, G., & Ingole, P. G. (2024). Polymer-based hollow fiber membranes: A modern trend in gas separation technologies. *Materials Today Chemistry*, 38, 102109. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.102109>
- He, T., Si, B., Gundersen, T., Lin, W., Chen, L., & Zhang, K. (2025). High ethane content enables efficient CO₂ capture from natural gas by cryogenic distillation. *Separation and Purification Technology*, 352, 128153. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128153>
- Ilicak, I., Boroglu, M. S., Durmus, A., & Boz, I. (2021). Influence of ZIF-95 on structure and gas separation properties of polyimide-based mixed matrix membranes. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 91, 103941. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103941>
- Imtiaz, A., Othman, M. H. D., Jilani, A., Khan, I. U., Kamaludin, R., & Samuel, O. (2022). ZIF-filler incorporated mixed matrix membranes (MMMs) for efficient gas separation: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108541. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108541>
- Jasrotia, S., Puttaiahgowda, Y. M., & Praveen, B. M. (2025). Polysulfone-based membranes for industrial CO₂ capture: Advanced fabrication strategies, performance enhancement, and commercial viability – A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 203, 107964. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107964>
- Javad Jafari, M., Golabi, M., & Ederth, T. (2024). Antimicrobial susceptibility testing using infrared attenuated total reflection (IR-ATR) spectroscopy to monitor metabolic activity. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 304, 123384. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.123384>
- Jia, Y., Yang, J., Liu, P., Chen, K., Li, J., Pi, X., Han, C., & Zhang, Y. (2024). Mixed matrix membranes containing oriented two-dimensional ZIF-L nanosheets for efficient H₂/CO₂ separation. *Separation and Purification Technology*, 338, 126589. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126589>
- Jiang, H., & Caro, J. (2017). Interfacial Au/MoC Catalyst for Low-Temperature Water-Gas Shift Reaction. *Chem*, 3(2), 209–210. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2017.07.016>
- Jonnalagedda, A., & Kuncharam, B. V. R. (2025a). Novel mixed matrix membranes with indium-based 2D and 3D MOFs as fillers and polysulfone for CO₂/CH₄ mixed gas separation. *RSC Advances*, 15(4), 2996–3007. <https://doi.org/10.1039/D4RA08557D>
- Jumah, A. bin. (2024). A comprehensive review of production, applications, and the path to a sustainable energy future with hydrogen. *RSC Advances*, 14(36), 26400–26423. <https://doi.org/10.1039/D4RA04559A>
- Karim, S. S., Farrukh, S., Hussain, A., Younas, M., & Noor, T. (2022). The influence of polymer concentration on the morphology and mechanical properties of asymmetric polyvinyl alcohol (PVA) membrane for O₂/N₂ separation. *Polymers and Polymer Composites*, 30. <https://doi.org/10.1177/09673911221090053>

- Kariman, H., Khiadani, M., & Mohammed, H. A. (2026). Comparing and optimizing hollow fibre and flat sheet vacuum membrane distillation. *Desalination*, 618, 119500. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119500>
- Khan, I. U., Othman, M. H. D., Ismail, A. F., Ismail, N., Jaafar, J., Hashim, H., Rahman, M. A., & Jilani, A. (2018). Structural transition from two-dimensional ZIF-L to three-dimensional ZIF-8 nanoparticles in aqueous room temperature synthesis with improved CO₂ adsorption. *Materials Characterization*, 136, 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.01.003>
- Kim, S., Hou, J., Choudhury, N. R., & Kentish, S. E. (2024). Composite nanofibrous membranes with two-dimensional ZIF-L and PVDF-HFP for CO₂ separation. *Chemical Engineering Journal*, 480, 148124. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.148124>
- Komilian, S. (2019). *Investigation into Device Optimisation of Organic Solar Cells Using Narrow Bandgap Polymer and the Role of Acceptor Material*.
- Lai, W.-H., Zhuang, G.-L., Tseng, H.-H., & Wey, M.-Y. (2019). Creation of tiny defects in ZIF-8 by thermal annealing to improve the CO₂/N₂ separation of mixed matrix membranes. *Journal of Membrane Science*, 572, 410–418. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.11.010>
- Latifi, S., & Ravindi, M. (2015). Kinetic Modeling of the High Temperature Water Gas Shift Reaction on a Novel Fe-Cr Nanocatalyst by Using Various Kinetic Mechanisms. *Journal of Particle Science and Technology*, 65, 13–19.
- Lee, J.-Y., Park, C.-Y., Moon, S.-Y., Choi, J.-H., Chang, B.-J., & Kim, J.-H. (2019). Surface-attached brush-type CO₂-philic poly(PEGMA)/PSf composite membranes by UV/ozone-induced graft polymerization: Fabrication, characterization, and gas separation properties. *Journal of Membrane Science*, 589, 117214. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117214>
- Lee, S.-W., Park, J.-S., Lee, C.-B., Lee, D.-W., Kim, H., Ra, H. W., Kim, S.-H., & Ryi, S.-K. (2014). H₂ recovery and CO₂ capture after water–gas shift reactor using synthesis gas from coal gasification. *Energy*, 66, 635–642. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.043>
- Levikhin, A. A., & Boryaev, A. A. (2024). Physical properties and thermodynamic characteristics of hydrogen. *Heliyon*, 10(17), e36414. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36414>
- Liu, X., Li, Z., Du, Z., Wang, C., Zhang, H., Luo, S., & Zhang, S. (2025). Emerging innovations in polymeric hollow fiber membranes for sustainable natural gas valorization. *Journal of Materials Chemistry A*, 13(39), 33080–33103. <https://doi.org/10.1039/D5TA04814A>
- Mei, X., Yang, S., Lu, P., Zhang, Y., & Zhang, J. (2020). Improving the Selectivity of ZIF-8/Polysulfone-Mixed Matrix Membranes by Polydopamine Modification for H₂/CO₂ Separation. *Frontiers in Chemistry*, 8. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00528>
- Moghadam, F., Lee, T. H., Park, I., & Park, H. B. (2020). Thermally annealed polyimide-based mixed matrix membrane containing ZIF-67 decorated porous graphene oxide nanosheets with enhanced propylene/propane selectivity. *Journal of Membrane Science*, 603, 118019. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118019>
- Mohanty, S., & Geetha, M. (2017). Metallic nanofiber composites. In *Nanofiber Composites for Biomedical Applications* (pp. 79–94). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100173-8.00004-1>
- Nandiyanto, A. B. D., Ragadhita, R., & Fiandini, M. (2023). Interpretation of Fourier Transform Infrared Spectra (FTIR): A Practical Approach in the Polymer/Plastic Thermal Decomposition. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 8(1), 113–126. <https://doi.org/10.17509/ijost.v8i1.53297>
- Park, J., Lee, C. O., Kim, J. W., Jo, J. H., Chi, W. S., & Kim, H. (2022). Poly(benzyl ether)-type additive to engineer glassy polyimide membranes for enhanced gas separations. *Chemical Communications*, 58(27), 4364–4367. <https://doi.org/10.1039/D1CC07017G>
- Qiao, L., Peng, L., Pang, J., Zhang, C., Yu, L., Cui, X., Fan, L., Kang, Z., & Sun, D. (2025). Pre-assembly and post-annealing of ZIF-7-NH₂-based mixed matrix membranes for improved interfacial compatibility. *Journal of Membrane Science*, 723, 123967. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2025.123967>
- Rahaman, M. A., Mousavi, B., Naz, F., & Verpoort, F. (2022). Two-Dimensional Zeolitic Imidazolate Framework ZIF-L: A Promising Catalyst for Polymerization. *Catalysts*, 12(5), 521. <https://doi.org/10.3390/catal12050521>

- Raval, N., Maheshwari, R., Kalyane, D., Youngren-Ortiz, S. R., Chougule, M. B., & Tekade, R. K. (2019). Importance of Physicochemical Characterization of Nanoparticles in Pharmaceutical Product Development. In *Basic Fundamentals of Drug Delivery* (pp. 369–400). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817909-3.00010-8>
- Rubio, F., Llopis-Albert, C., & Besa, A. J. (2023). Optimal allocation of energy sources in hydrogen production for sustainable deployment of electric vehicles. *Technological Forecasting and Social Change*, 188, 122290. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122290>
- Sabouri, R., Ladewig, B. P., & Prasetya, N. (2026). Mixed matrix membranes for hydrogen separation: a comprehensive review and performance analysis. *Journal of Materials Chemistry A*. <https://doi.org/10.1039/D5TA00834D>
- Safak Boroglu, M., & Yumru, A. B. (2017). Gas separation performance of 6FDA-DAM-ZIF-11 mixed-matrix membranes for H₂/CH₄ and CO₂/CH₄ separation. *Separation and Purification Technology*, 173, 269–279. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.09.037>
- Santosh, M. S., Sherugar, P., Balaji, K. R., Ahmad Khan, A., Padaki, M., Klyamkin, S., Galim, E., Singh, P., & Rtimi, S. (2024). Tuning the assembly of MgNiO₂ nanoparticles-infused polysulfone membranes for efficient gas separation: The selectivity-permeability conundrum. *Chemical Engineering Science*, 293, 120074. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120074>
- Sarfraz, M. (2020). *Carbon Capture via Mixed-Matrix Membranes Containing Nanomaterials and Metal–Organic Frameworks* (pp. 45–94). https://doi.org/10.1007/978-3-030-33978-4_2
- Sholl, D. S., & Lively, R. P. (2016). Seven chemical separations to change the world. *Nature*, 532(7600), 435–437. <https://doi.org/10.1038/532435a>
- Singh, S., Varghese, A. M., Reddy, K. S. K., Romanos, G. E., & Karanikolos, G. N. (2021). Polysulfone Mixed-Matrix Membranes Comprising Poly(ethylene glycol)-Grafted Carbon Nanotubes: Mechanical Properties and CO₂ Separation Performance. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(30), 11289–11308. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c02040>
- Sohail, A., Sarfraz, M., Nawaz, S., & Tahir, Z. (2023). Enhancing carbon capture efficiency of zeolite-embedded polyether sulfone mixed-matrix membranes via annealing process. *Journal of Cleaner Production*, 399, 136617. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136617>
- Stewart, M. I. (2014). Gas Sweetening. In *Surface Production Operations* (pp. 433–539). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382207-9.00009-3>
- Sultana, S., Chakraborty, D., Parvez, M. A., Chandan, M. R., & Rahaman, M. (2025). Polymeric Membranes for Advanced Separation and Sensing: Materials and Mechanisms for Emerging Applications—A Review. *Chemistry – An Asian Journal*, 20(18). <https://doi.org/10.1002/asia.202500714>
- Sun, S., Li, S., Wang, S., & Chen, Y. (2024). Design and development of highly selective and permeable membranes for H₂/CO₂ separation—A review. *Chemical Engineering Journal*, 494, 152972. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152972>
- Tao, Y., Wang, L., Li, B., Huang, J., & Pan, Y. (2025). Engineering gas-permeable MOF/polymer interfaces in mixed-matrix membranes for advanced CO₂ separation. *Journal of Membrane Science*, 735, 124588. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2025.124588>
- Temiz, C. (2022). Retracted: Scanning Electron Microscopy. In *Electron Microscopy*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.103956>
- Valencia, L., & Abdelhamid, H. N. (2019). Nanocellulose leaf-like zeolitic imidazolate framework (ZIF-L) foams for selective capture of carbon dioxide. *Carbohydrate Polymers*, 213, 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.03.011>
- Wang, H., & Chu, P. K. (2013). Surface Characterization of Biomaterials. In *Characterization of Biomaterials* (pp. 105–174). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415800-9.00004-8>
- Wang, M., Huang, S., Liao, G., & Yu, H. (2025). Recent Developments in Polysulfone Studies. *Journal of Polymer Science*. <https://doi.org/10.1002/pol.20250762>
- Widiastuti, N., Caralin, I. S., Widyanto, A. R., Wijiyanti, R., Gunawan, T., Karim, Z. A., Nomura, M., & Yoshida, Y. (2022). Annealing and TMOS coating on PSF/ZTC mixed matrix membrane for enhanced CO₂/CH₄ and H₂/CH₄ separation. *Royal Society Open Science*, 9(6). <https://doi.org/10.1098/rsos.211371>

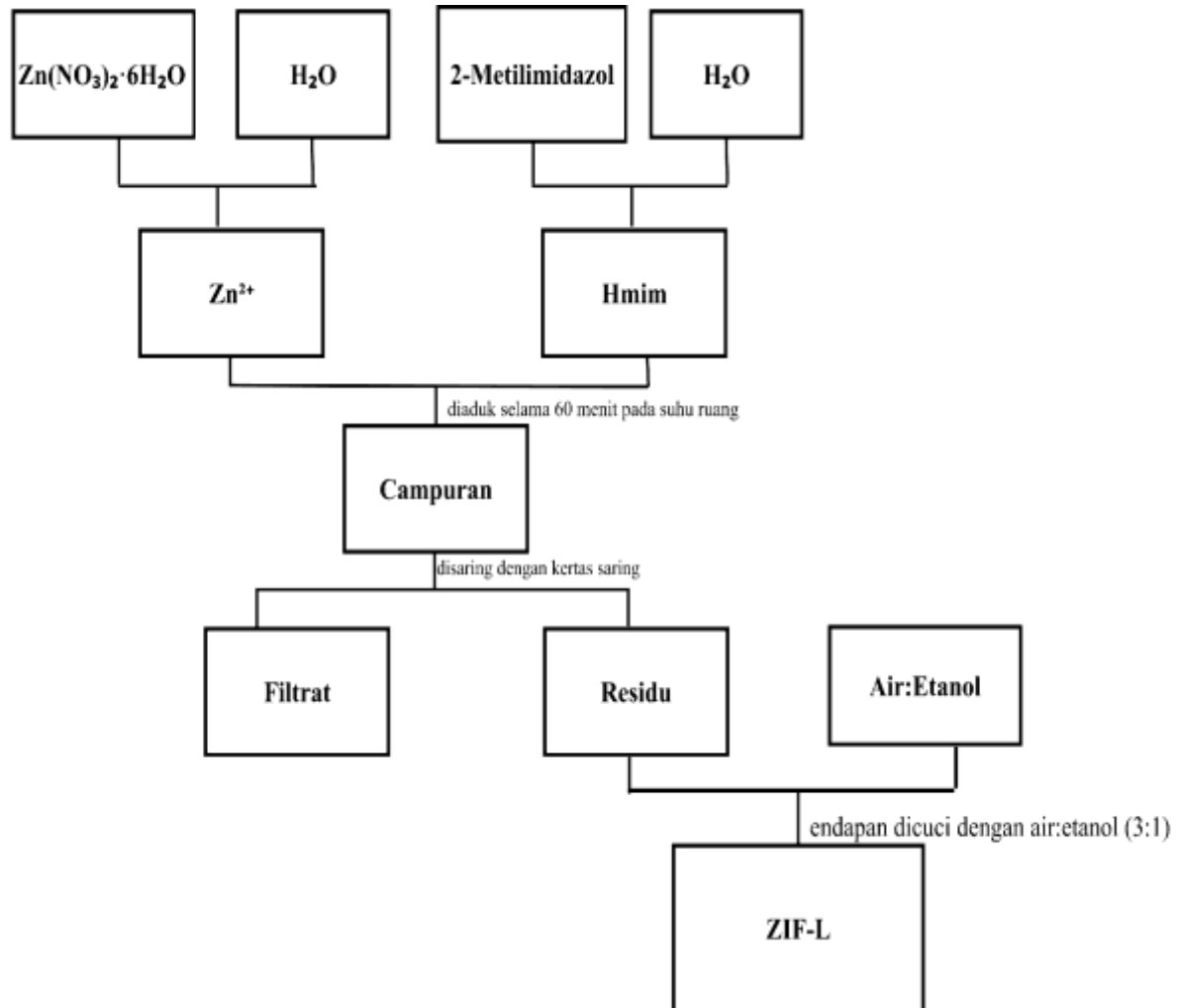
- Widiastuti, N., Gunawan, T., Fansuri, H., Salleh, W. N. W., Ismail, A. F., & Sazali, N. (2020). P84/ZCC Hollow Fiber Mixed Matrix Membrane with PDMS Coating to Enhance Air Separation Performance. *Membranes*, 10(10), 267. <https://doi.org/10.3390/membranes10100267>
- Wijaya, C. J., Ismadji, S., Aparamarta, H. W., & Gunawan, S. (2021a). Facile and Green Synthesis of Starfruit-Like ZIF-L, and Its Optimization Study. *Molecules*, 26(15), 4416. <https://doi.org/10.3390/molecules26154416>
- Wijenayake, S. N., Panapitiya, N. P., Versteeg, S. H., Nguyen, C. N., Goel, S., Balkus, K. J., Musselman, I. H., & Ferraris, J. P. (2013). Surface Cross-Linking of ZIF-8/Polyimide Mixed Matrix Membranes (MMMs) for Gas Separation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(21), 6991–7001. <https://doi.org/10.1021/ie400149e>
- Wijiyanti, R., Caralin, I. S., Widyanto, A. R., Gunawan, T., Karim, Z. A., Ismail, A. F., Nomura, M., & Widiastuti, N. (2023). Evaluation of different carbon-modified zeolite derivatives preparation methods as a filler in mixed matrix membrane on their gas separation performance. *Microporous and Mesoporous Materials*, 359, 112650. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2023.112650>
- Wijiyanti, R., Kumala Wardhani, A. R., Roslan, R. A., Gunawan, T., Abdul Karim, Z., Ismail, A. F., & Widiastuti, N. (2020). Enhanced gas separation performance of polysulfone membrane by incorporation of zeolite-templated carbon. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 16(2), 128–134. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v16n2.1472>
- Wijiyanti, R., Ubaidillah, A. N., Gunawan, T., Karim, Z. A., Ismail, A. F., Smart, S., Lin, R., & Widiastuti, N. (2019a). Polysulfone mixed matrix hollow fiber membranes using zeolite templated carbon as a performance enhancement filler for gas separation. *Chemical Engineering Research and Design*, 150, 274–288. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.08.004>
- Wijiyanti, R., Ubaidillah, A. N., Gunawan, T., Karim, Z. A., Ismail, A. F., Smart, S., Lin, R., & Widiastuti, N. (2019b). Polysulfone mixed matrix hollow fiber membranes using zeolite templated carbon as a performance enhancement filler for gas separation. *Chemical Engineering Research and Design*, 150, 274–288. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.08.004>
- Wijiyanti, R., Ubaidillah, A. N., Gunawan, T., Karim, Z. A., Ismail, A. F., Smart, S., Lin, R., & Widiastuti, N. (2019c). Polysulfone mixed matrix hollow fiber membranes using zeolite templated carbon as a performance enhancement filler for gas separation. *Chemical Engineering Research and Design*, 150, 274–288. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.08.004>
- Wu, K., Song, Z., Chen, H., Zhang, Y., & Gu, X. (2024). Synthesis of all-silica ZSM-58 zeolite membranes on hollow fibers for CO₂/H₂ separation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 78, 524–533. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.320>
- Xu, H., Jiang, L., Hu, Y., Lin, J., Zhou, C., Zhong, Z., Li, X., Yin, C., Tang, C., & Zhou, L. (2025). Layer-by-layer assembled PI@ZIF-67/PDMS/PEI@ZIF-67 composite membranes with multilayer synergies for efficient H₂/CO₂ separation. *Separation and Purification Technology*, 379, 134933. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134933>
- Yang, Z., Guo, W., Mahurin, S. M., Wang, S., Chen, H., Cheng, L., Jie, K., Meyer, H. M., Jiang, D., Liu, G., Jin, W., Popovs, I., & Dai, S. (2020). Surpassing Robeson Upper Limit for CO₂/N₂ Separation with Fluorinated Carbon Molecular Sieve Membranes. *Chem*, 6(3), 631–645. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2019.12.006>
- Ye, Y., Zhao, L., Liu, Z., Wang, Z., & Niu, Q. J. (2024). Recent advances in novel membranes for improved anti-wettability in membrane distillation: A mini review. *Desalination*, 571, 117066. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117066>
- Yu, C., Kim, Y. J., Kim, J., & Eum, K. (2022). ZIF-L to ZIF-8 Transformation: Morphology and Structure Controls. *Nanomaterials*, 12(23), 4224. <https://doi.org/10.3390/nano12234224>
- Zeeshan, M. H., Yeong, Y. F., & Chew, T. L. (2025). Enhancing CO₂/CH₄ and CO₂/N₂ gas separation performance of cellulose triacetate/polysulfone dual-layer hollow fiber mixed matrix membrane encompassing ZIF-90 filler. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(6), 119629. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119629>
- Zhang, F., Dou, J., & Zhang, H. (2018). Mixed Membranes Comprising Carboxymethyl Cellulose (as Capping Agent and Gas Barrier Matrix) and Nanoporous ZIF-L Nanosheets for Gas Separation Applications. *Polymers*, 10(12), 1340. <https://doi.org/10.3390/polym10121340>

- Zhang, X., Li, H., Miao, W., Shen, Q., Wang, J., Peng, D., Liu, J., & Zhang, Y. (2019). Vertically zeolitic imidazolate framework-L coated mesh with dagger-like structure for oil/water separation. *AIChE Journal*, 65(6). <https://doi.org/10.1002/aic.16596>
- Zhong, S., Li, S., Su, W., Di, Z., Liu, W., & Li, J. (2025). Construction of NH₂-ZIF-7/g-C₃N₄/Pebax mixed matrix membranes with heterostructures for flue gas decarbonization. *Chemical Engineering Journal*, 526, 171389. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.171389>
- Zhong, Z., Yao, J., Low, Z.-X., Chen, R., He, M., & Wang, H. (2014). Carbon composite membrane derived from a two-dimensional zeolitic imidazolate framework and its gas separation properties. *Carbon*, 72, 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.01.072>
- Zhu, J., Guo, Z., Wang, Z., & Liu, X. (2025). Improvement of H₂/CO₂ selectivity at high pressure and temperature of benzimidazole-linked hybrid membranes via post treatment. *Journal of Membrane Science*, 727, 124096. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2025.124096>
- Zhu, W., Li, X., Sun, Y., Guo, R., & Ding, S. (2019a). Introducing hydrophilic ultra-thin ZIF-L into mixed matrix membranes for CO₂/CH₄ separation. *RSC Advances*, 9(40), 23390–23399. <https://doi.org/10.1039/C9RA04147H>
- Zhuang, G.-L., Wey, M.-Y., & Tseng, H.-H. (2015). The density and crystallinity properties of PPO-silica mixed-matrix membranes produced via the in situ sol-gel method for H₂/CO₂ separation. II: Effect of thermal annealing treatment. *Chemical Engineering Research and Design*, 104, 319–332. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.08.020>

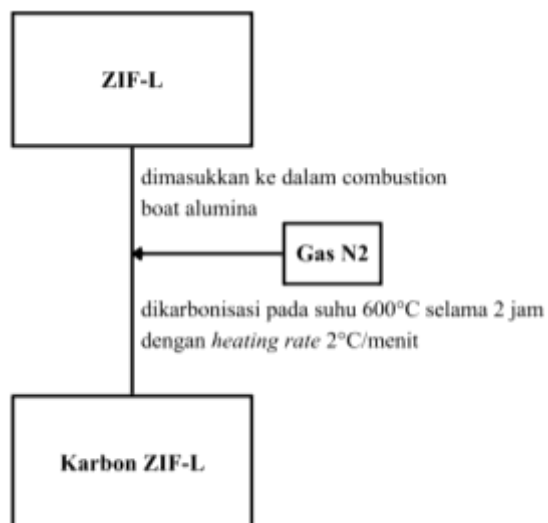
LAMPIRAN

Lampiran 1. Diagram Alir Penelitian

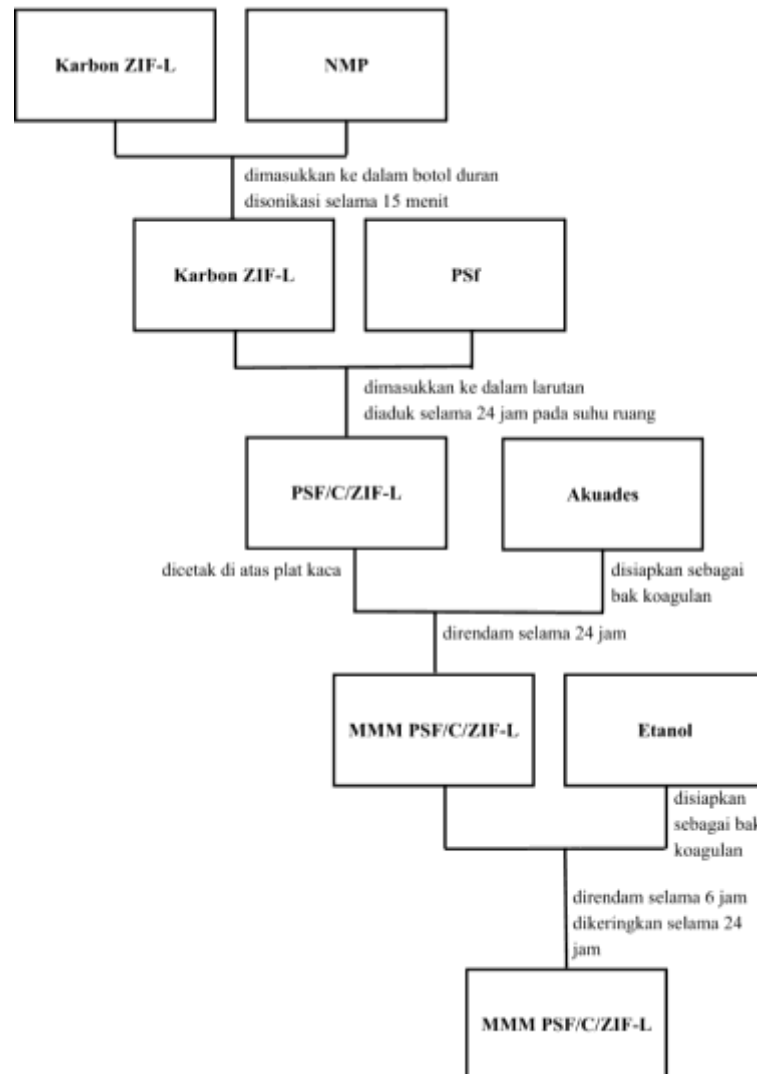
1.1 Sintesis ZIF-L



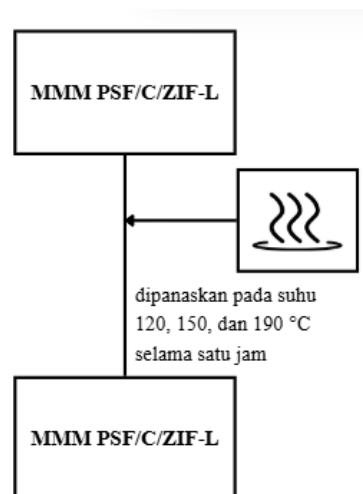
1.2 Karbonisasi ZIF-L



1.3 Fabrikasi MMM

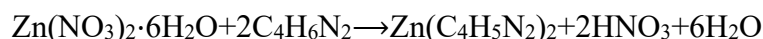


1.4 Proses *Annealing* MMM



Lampiran 2. Perhitungan dalam Penelitian ini

1. Sintesis ZIF-L



Pada sintesis ini digunakan 2,95 g (10 mmol) $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan 6,5 g (80 mmol) Hmim, sehingga Zn^{2+} bertindak sebagai pereaksi pembatas karena jumlah Hmim yang digunakan jauh melebihi kebutuhan stoikiometrinya. Dengan asumsi seluruh ion Zn^{2+} bereaksi sempurna, jumlah ZIF-L yang dapat terbentuk secara teoritis adalah 10 mmol. Berdasarkan rumus empiris ZIF-L, yaitu $\text{Zn}(\text{C}_4\text{H}_5\text{N}_2)_2$, dengan massa molar sekitar 227,38 g/mol, maka massa ZIF-L teoritis maksimum yang dihasilkan adalah sekitar 2,27 g. Pada hasil sintesis didapatkan berat ZIF-L sebesar 1,997 gram.

Persentase *yield* dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\text{yield ZIF-L} = \frac{\text{Massa sebenarnya (gram)} \times 100\%}{\text{Massa teoritis (gram)}}$$

$$\text{yield ZIF-L} = \frac{1,997 \text{ gram} \times 100\%}{2,27 \text{ gram}}$$

$$\text{yield ZIF-L} = 87,97\%$$

2. Karbonisasi ZIF-L

Pada proses karbonisasi ZIF-L dihitung untuk menentukan massa dari C-ZIF-L yang didapatkan berdasarkan gravimetri, dengan data yang didapatkan sebagai berikut:

Sebelum karbonisasi,

$$\text{Massa Combustion Boat} = 25,7250 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Combustion Boat} + \text{ZIF-L} = 26,0759 \text{ gram}$$

$$\text{Massa ZIF-L} = 26,0759 \text{ gram} - 25,7250 \text{ gram} = 0,3509 \text{ gram}$$

Setelah karbonisasi,

$$\text{Massa Combustion Boat} = 25,7250 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Combustion Boat} + \text{Massa C-ZIF-L} = 25,8118 \text{ gram}$$

$$\text{Massa C-ZIF-L} = 0,0868 \text{ gram}$$

$$\text{yield C-ZIF-L} = \frac{\text{Massa C-ZIF-L} \times 100\%}{\text{Massa ZIF-L}}$$

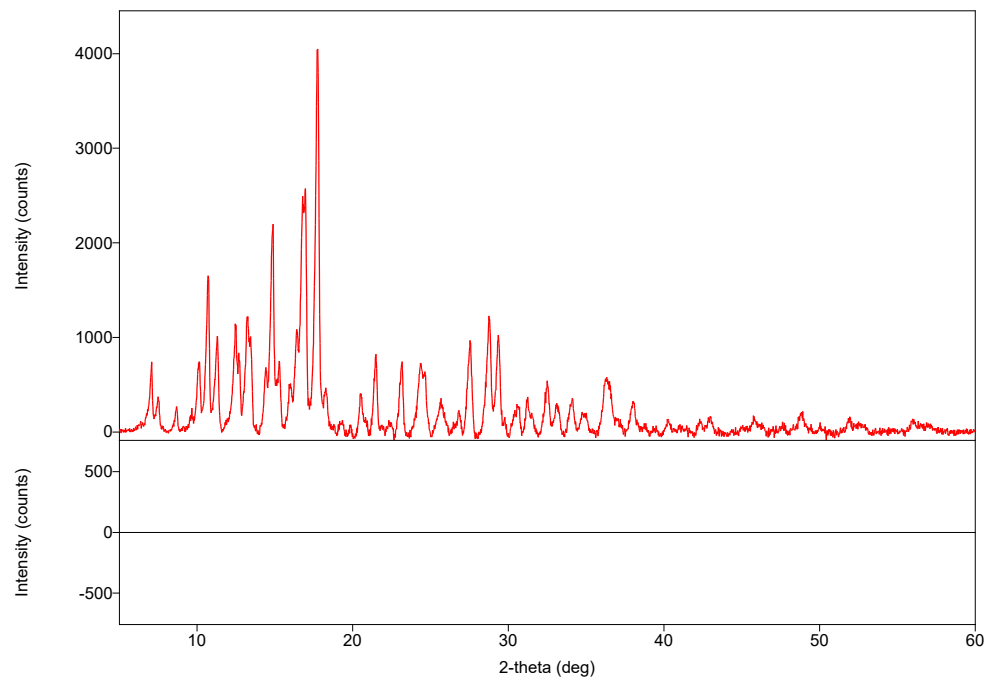
$$\text{yield C-ZIF-L} = \frac{0,0868 \text{ gram} \times 100\%}{0,3509 \text{ gram}}$$

$$\text{yield C-ZIF-L} = 24,73\%$$

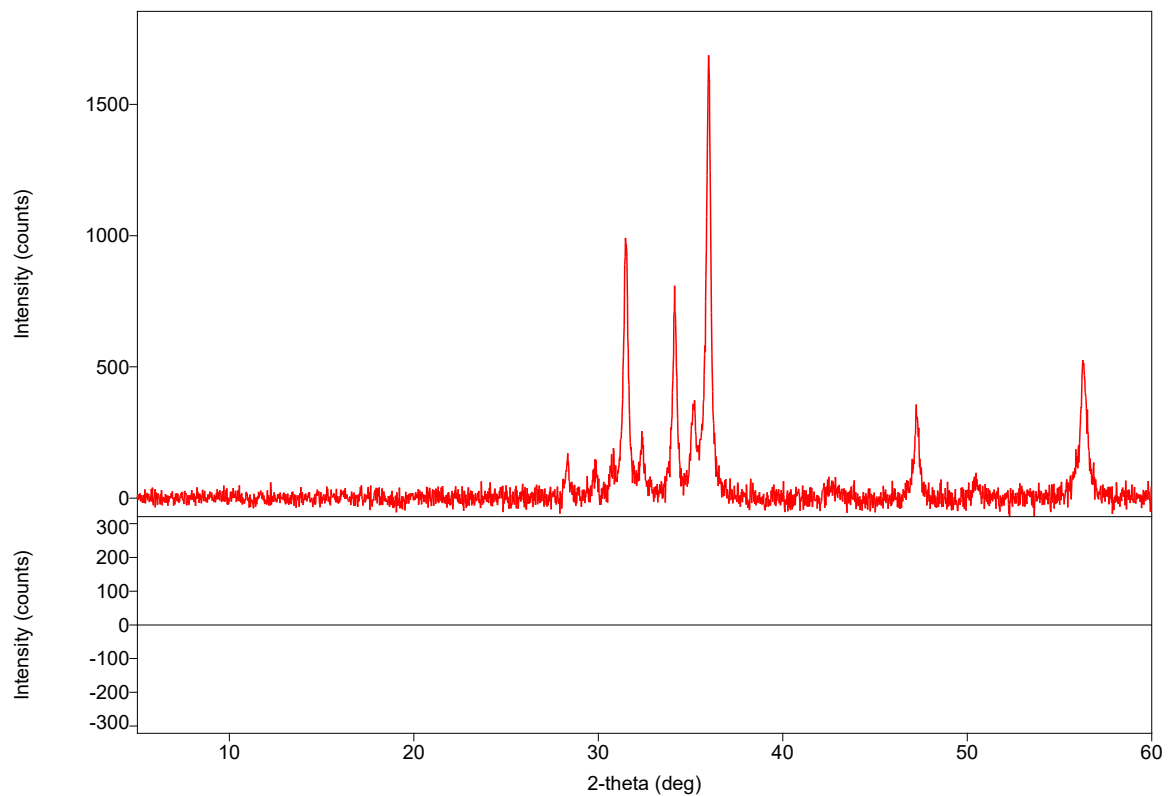
Lampiran 3. Data Mentah Karakterisasi

1. XRD

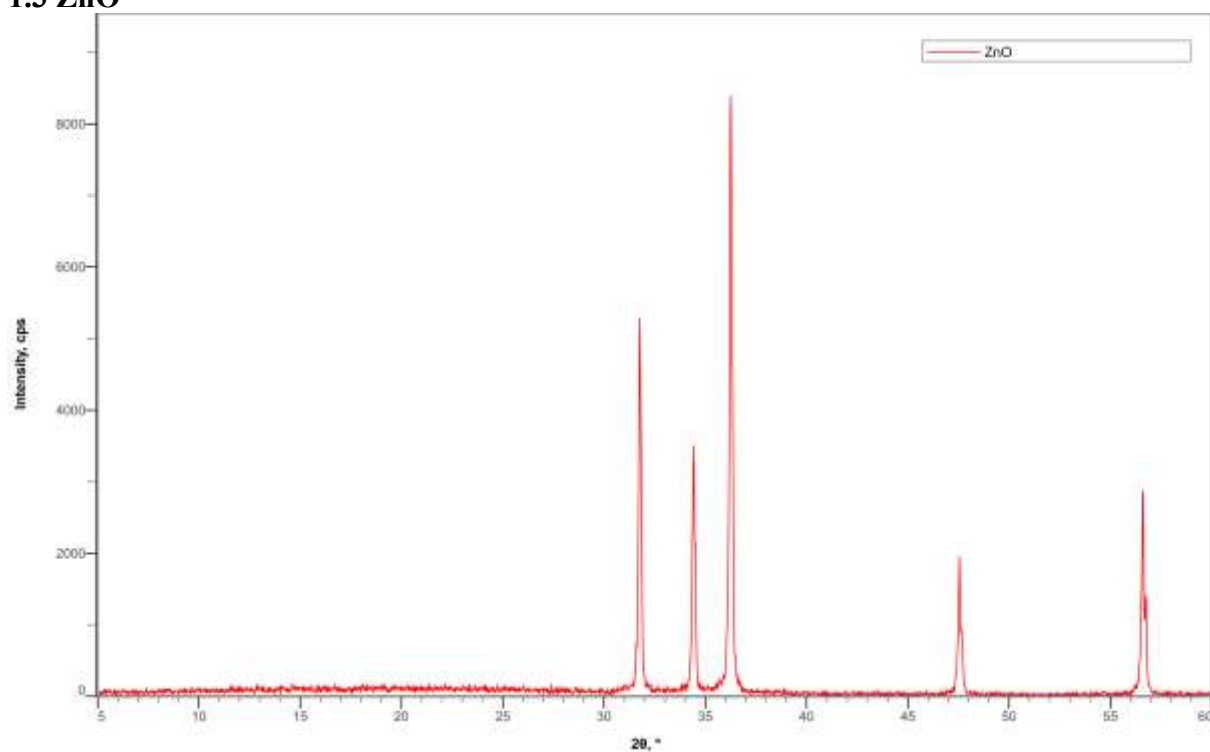
1.1 ZIF-L



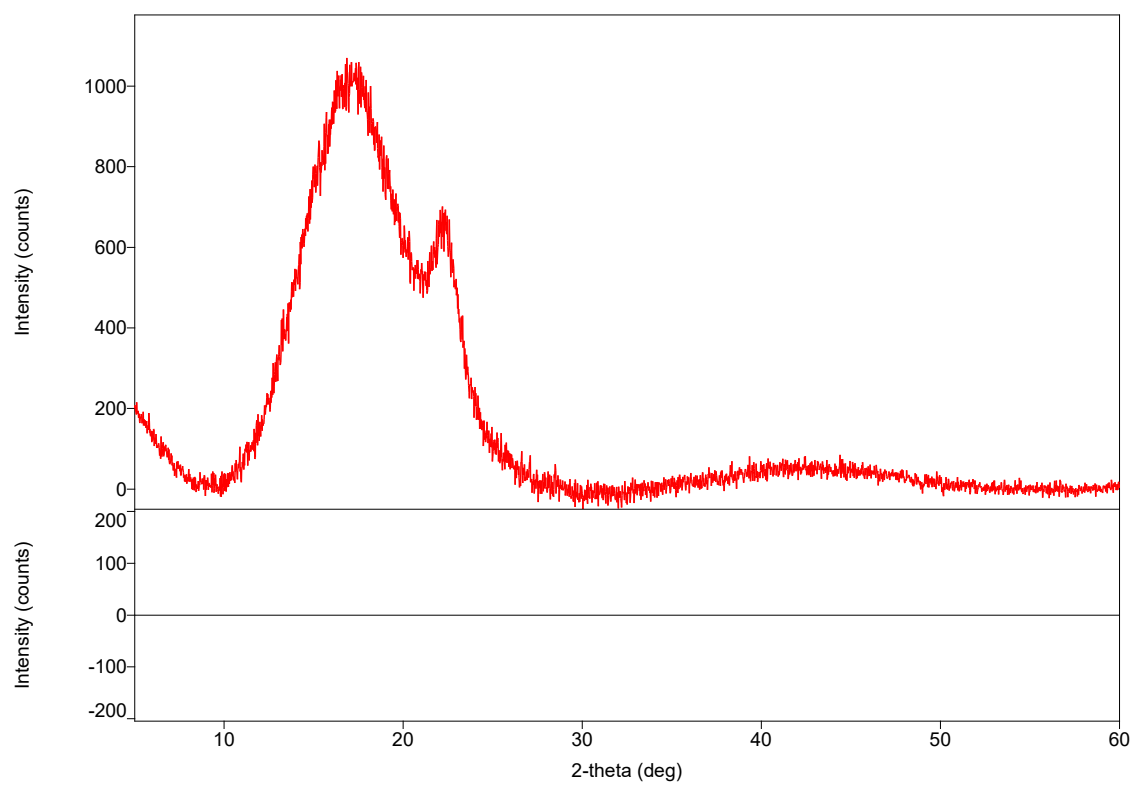
1.2 C-ZIF-L



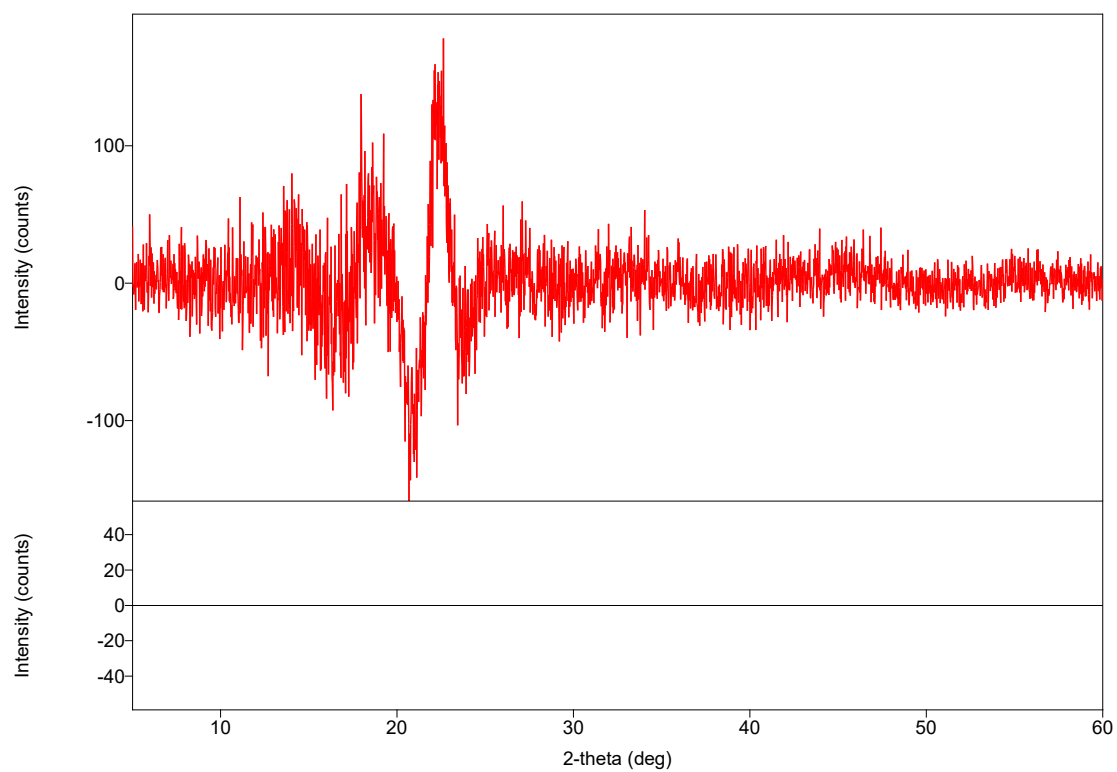
1.3 ZnO



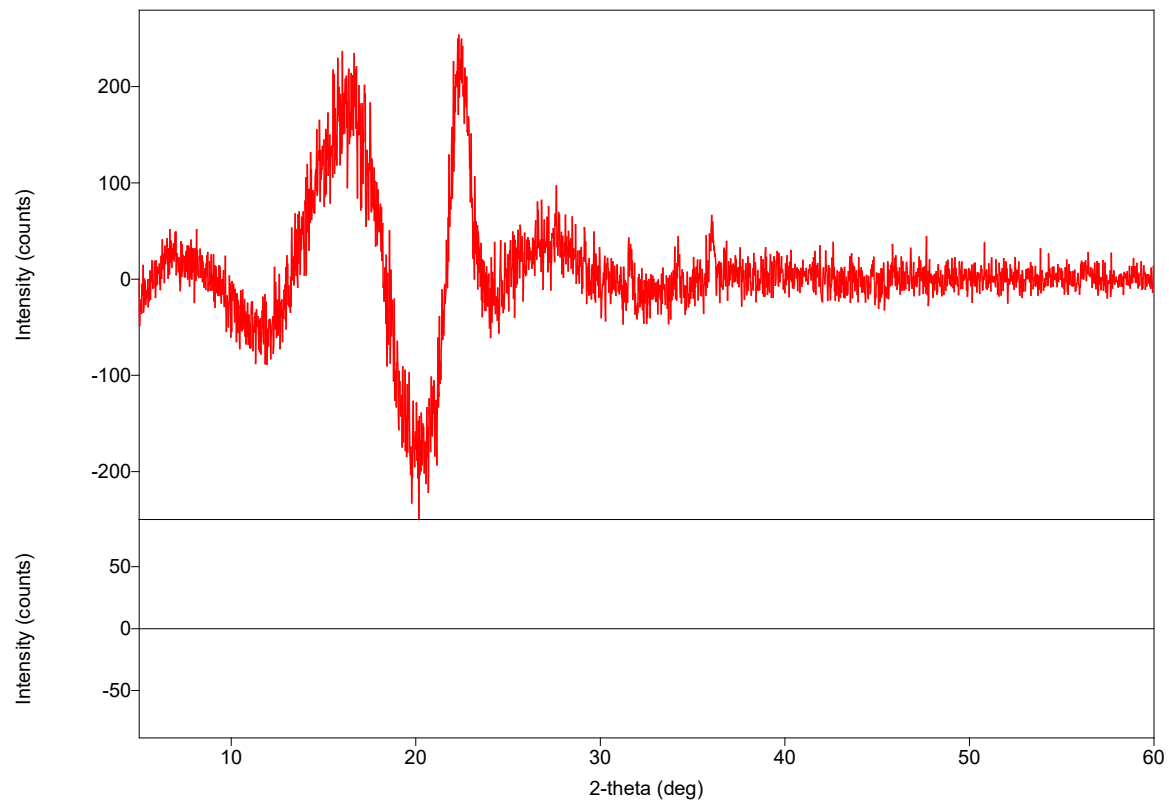
1.3 PSf Neat



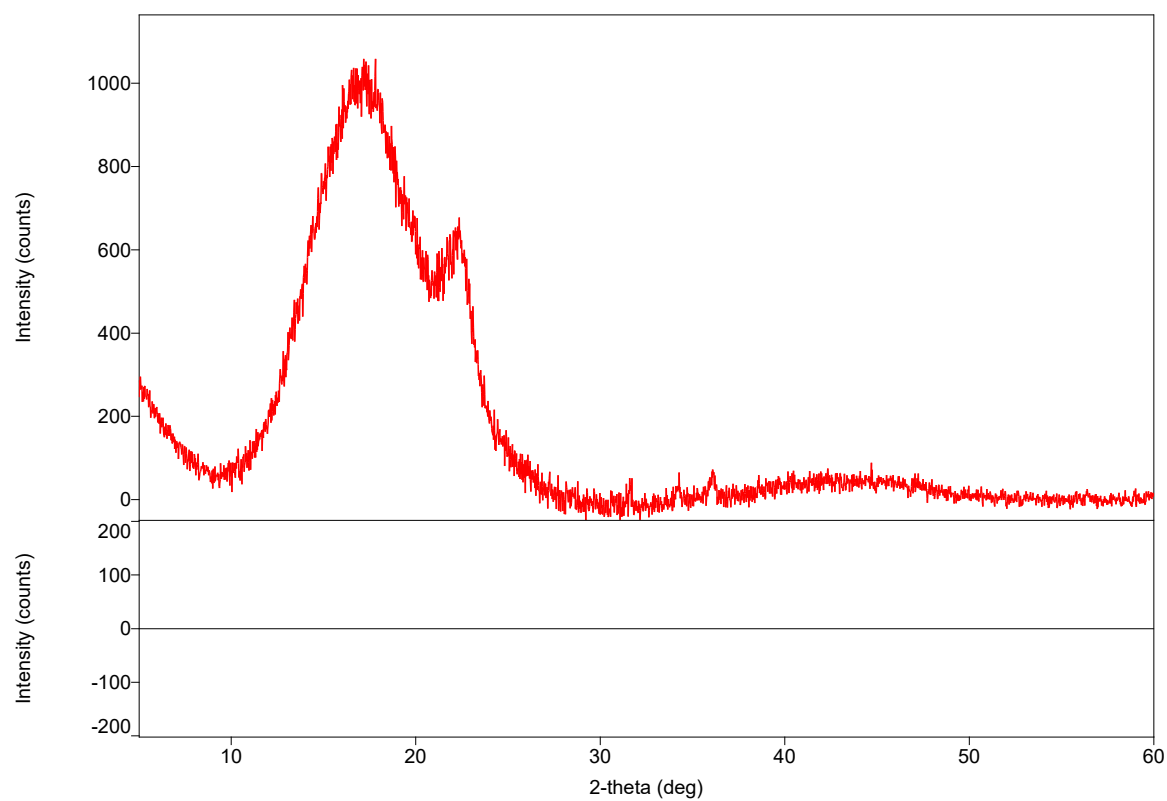
1.3 PSf C/ZIF L 0,5%



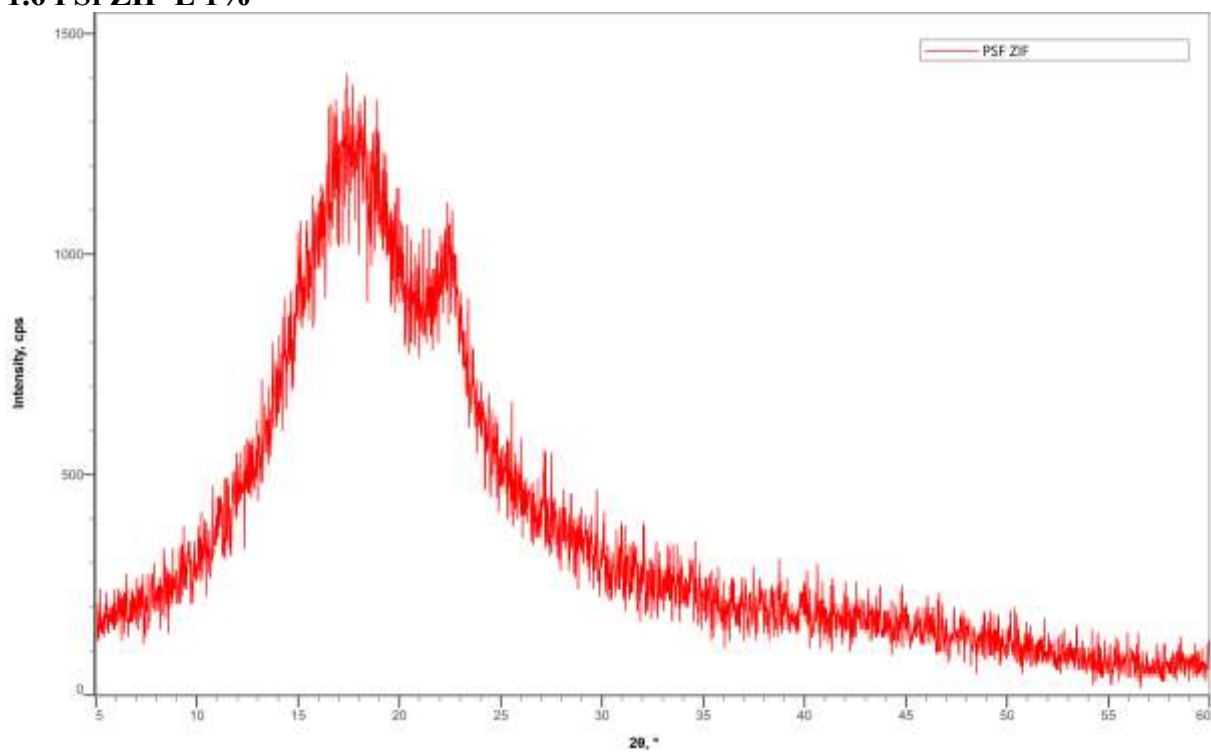
1.4 PSf C/ZIF L 1%



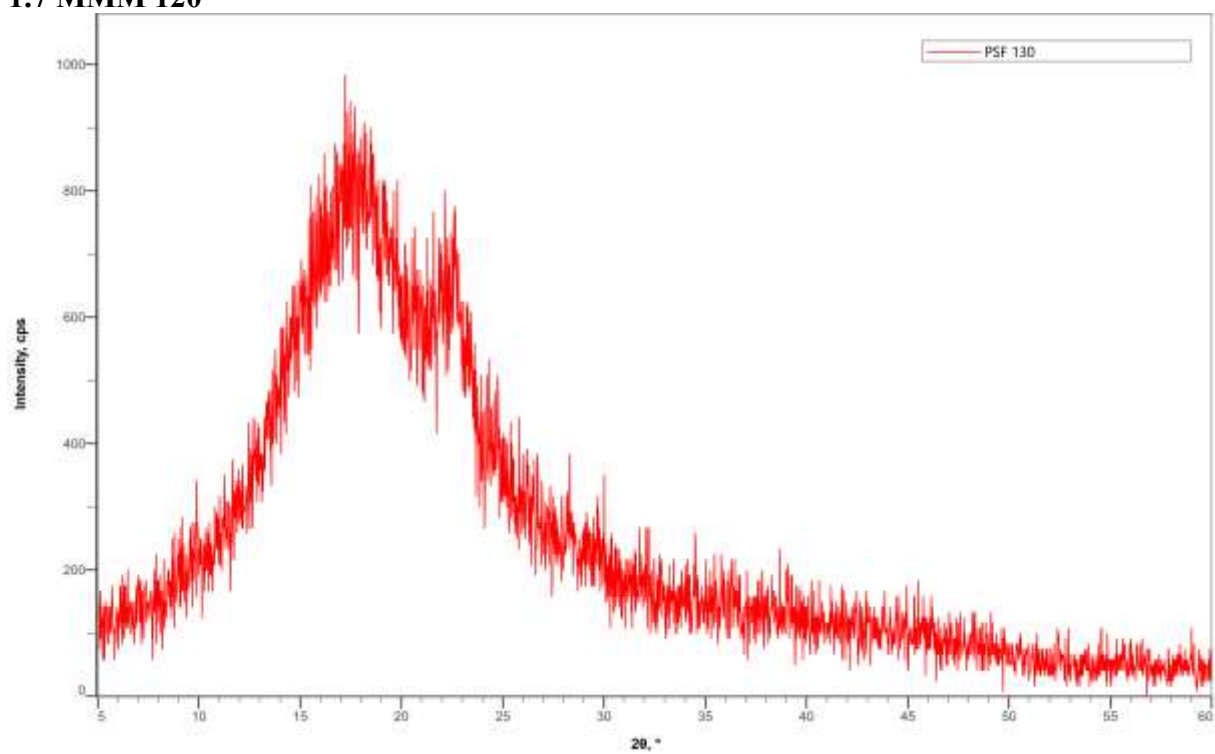
1.5 PSf C/ZIF L 1,5%



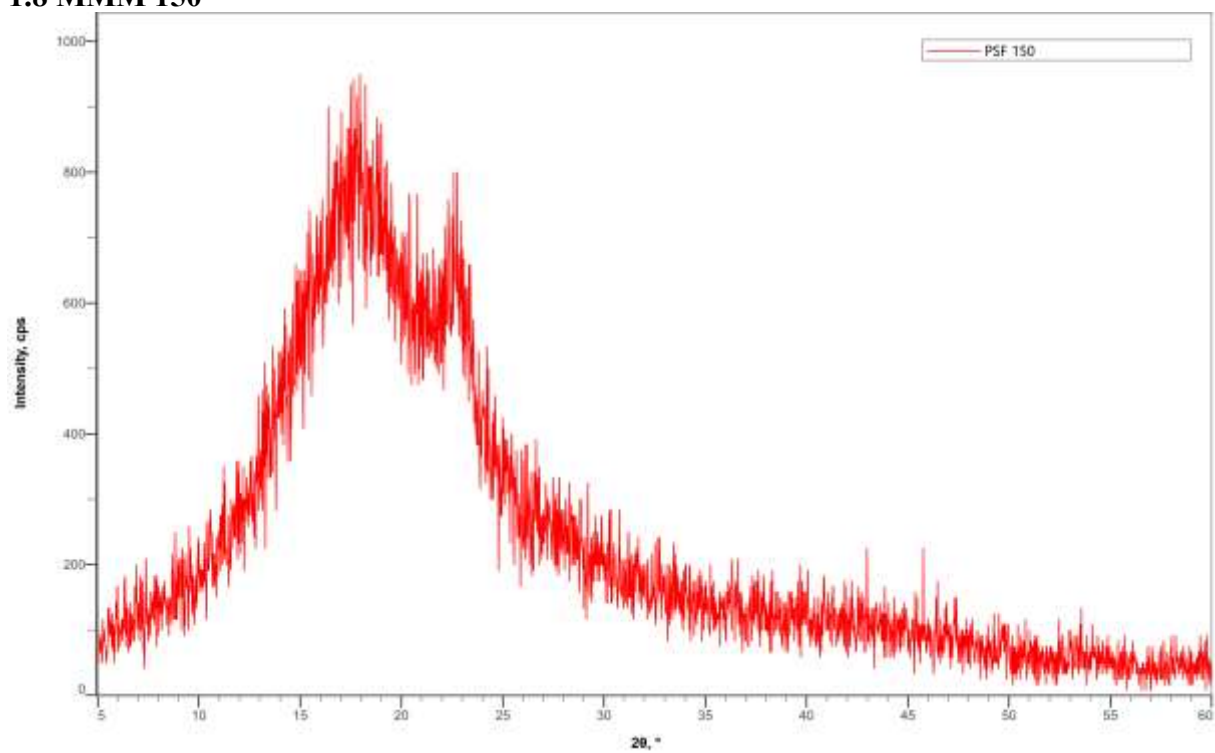
1.6 PSf ZIF-L 1%



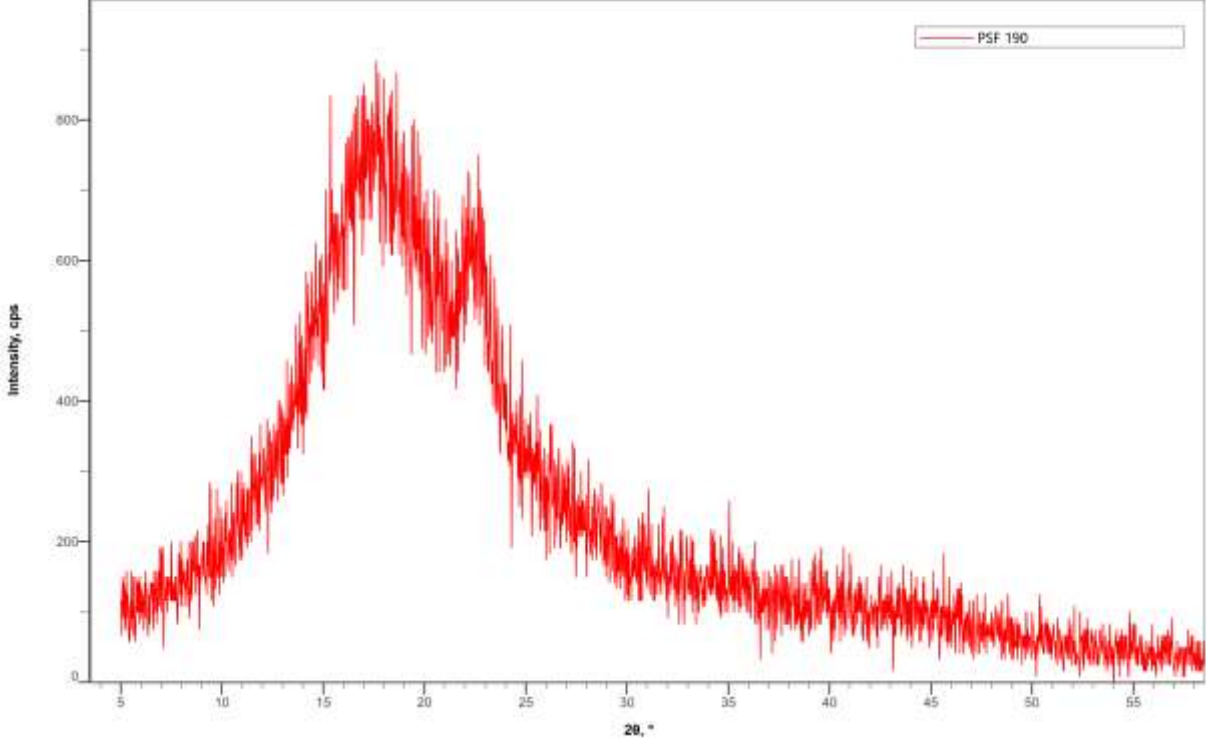
1.7 MMM 120



1.8 MMM 150

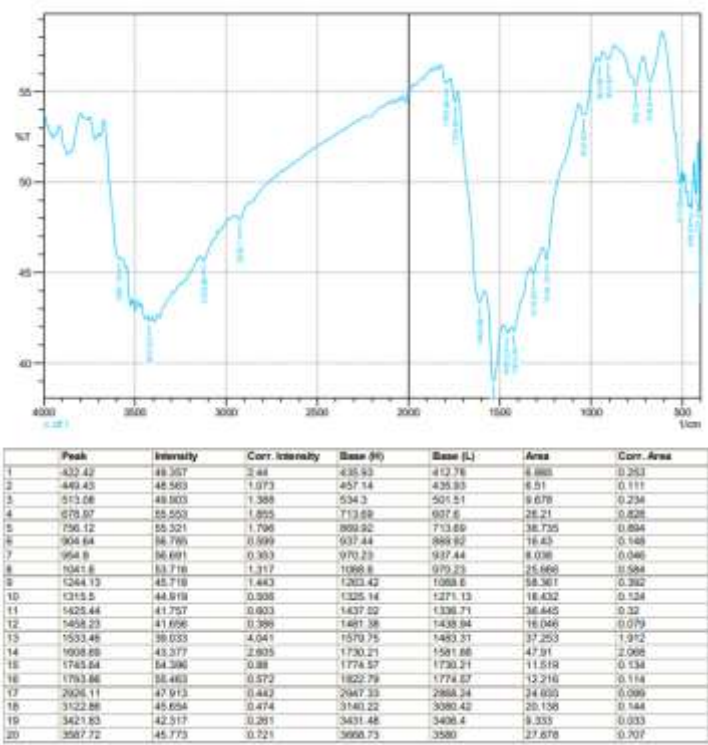


1.9 MMM 190

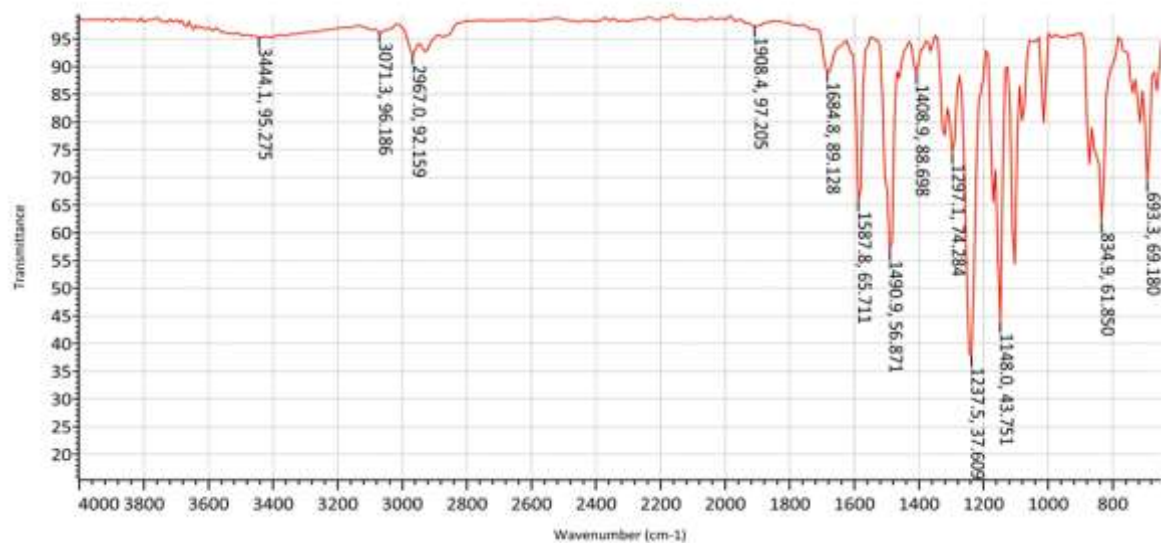


2. FTIR

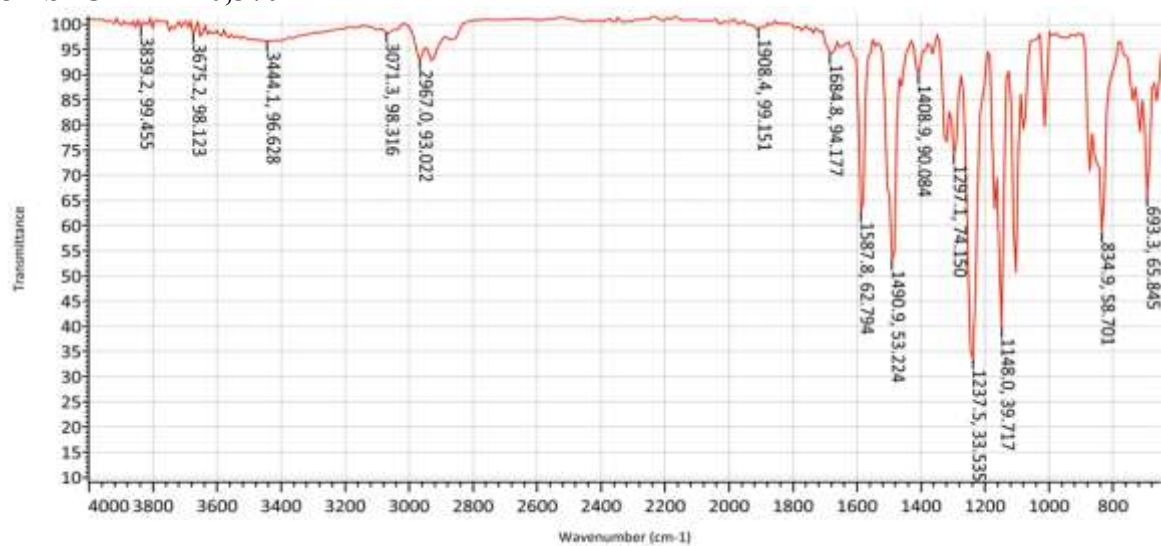
2.1 C-ZIF-L



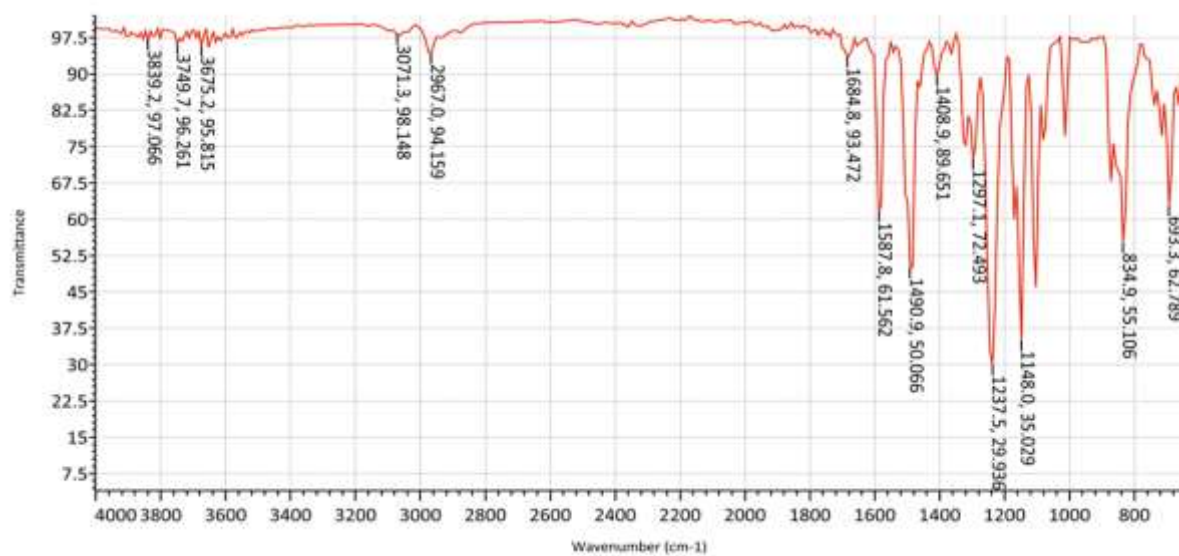
2.2 PSf Neat



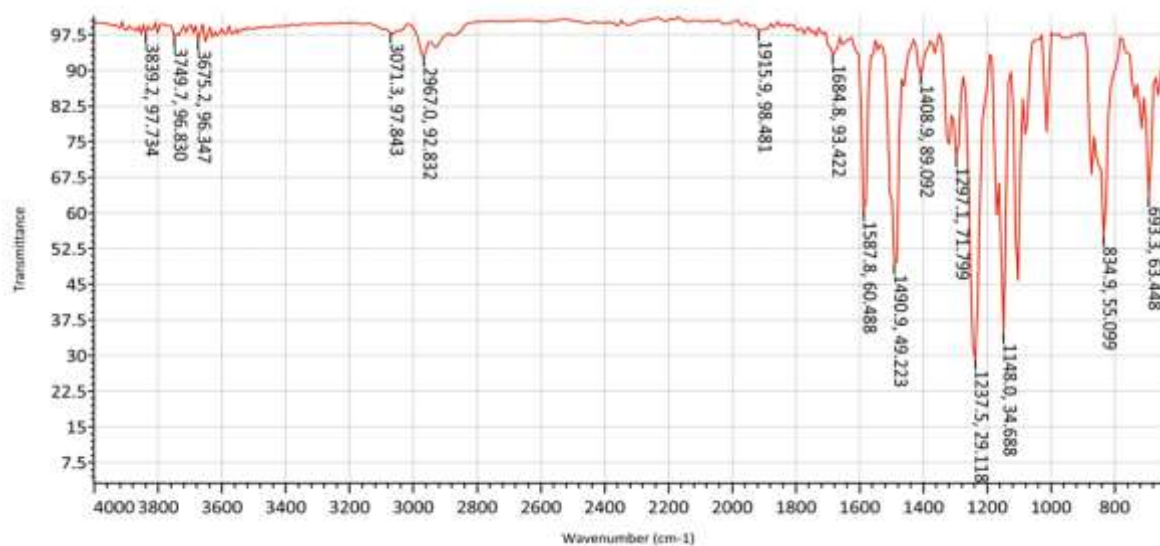
2.3 PSf C-ZIF-L 0,5%



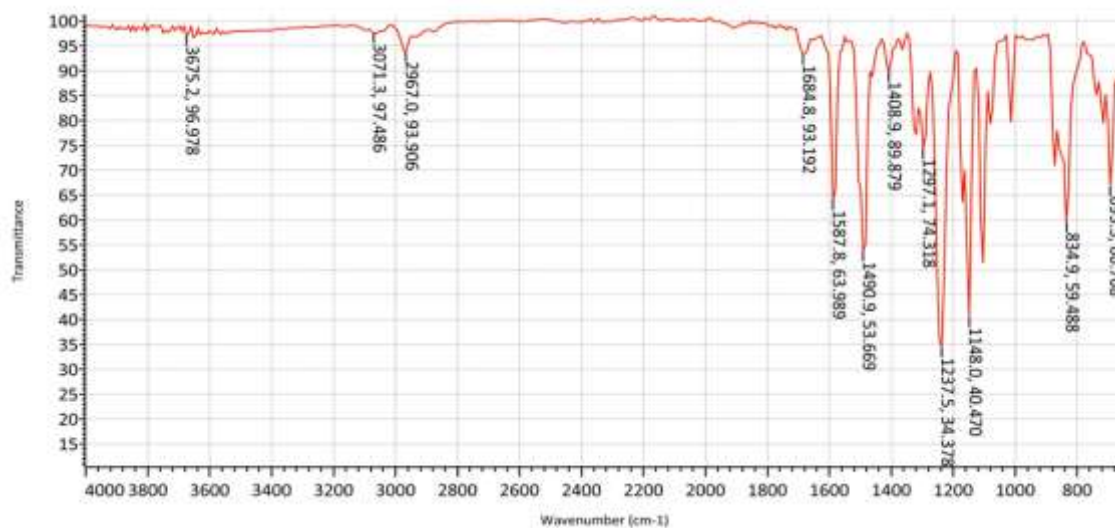
2.4 PSf C-ZIF-L 1%



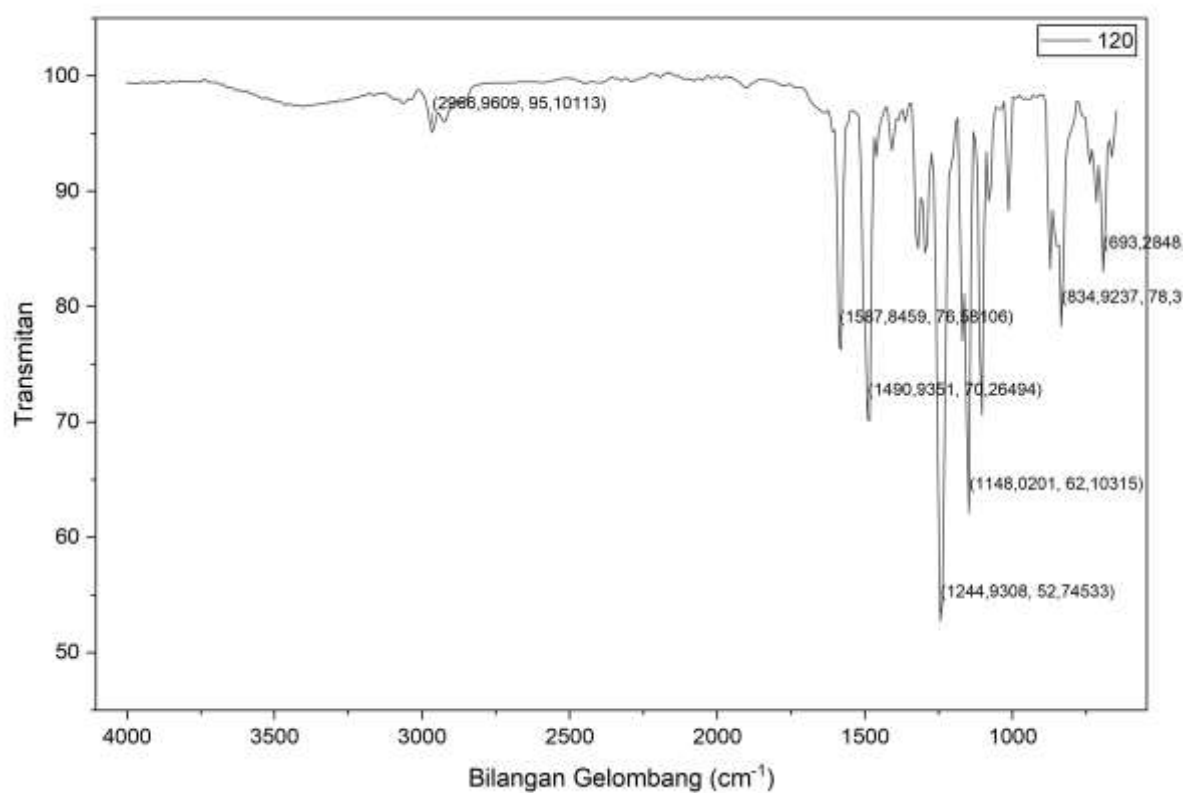
2.5 PSf C-ZIF-L 1,5%



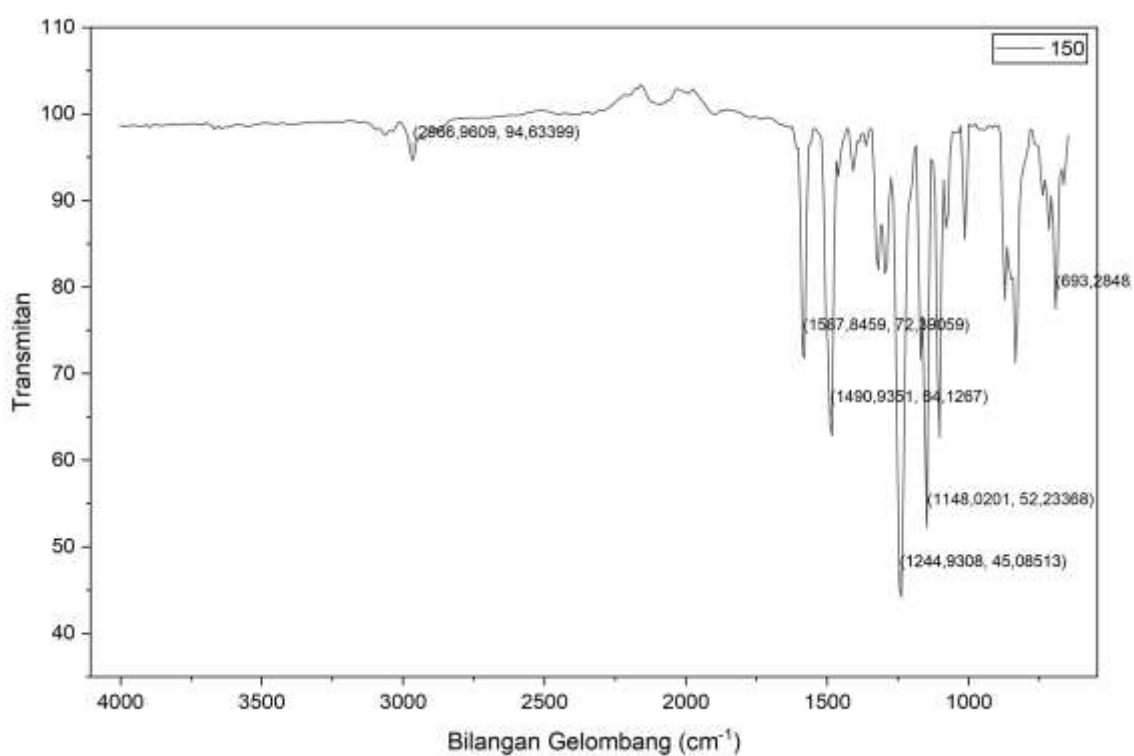
2.6 PSf ZIF-L 1%



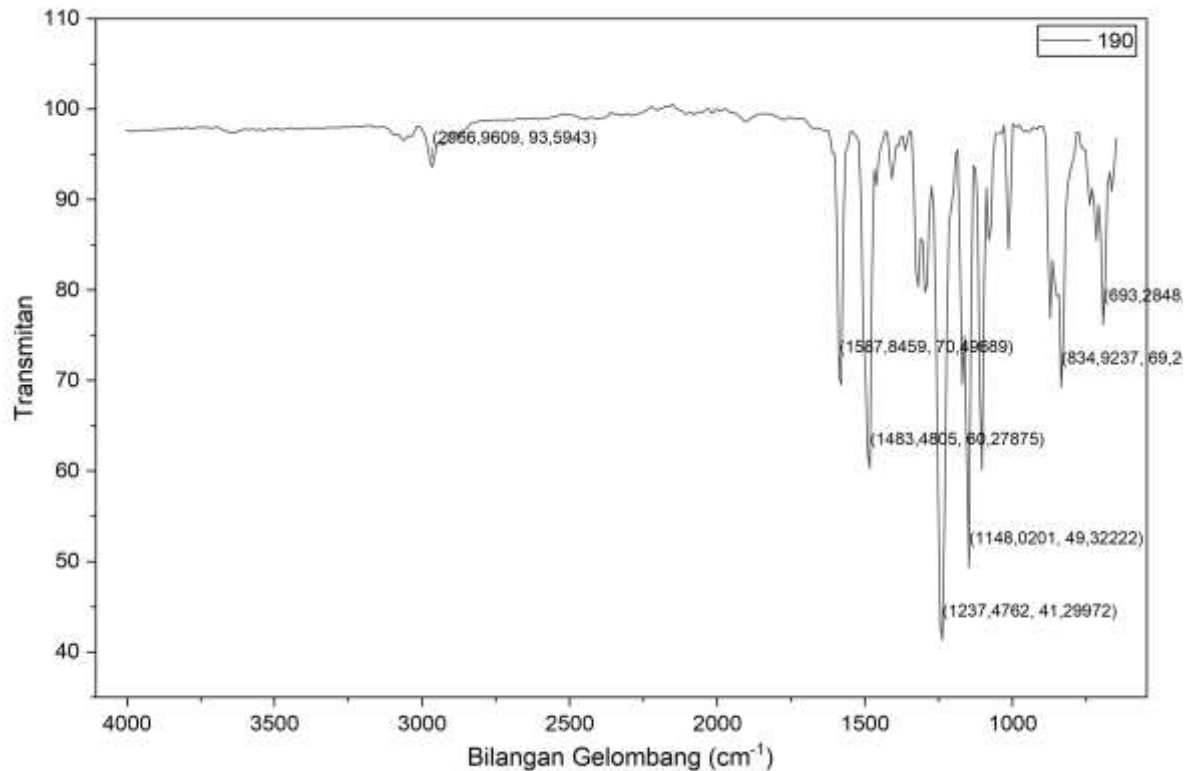
2.7 MMM 120



2.8 MMM 150



2.9 MMM 190



Lampiran 3. Contoh Perhitungan Performa Membran

Diketahui parameter pengujian gas tunggal yakni:

Tekanan (P) = 151,512 cmHg

Luas Permukaan Membran (A) = 16,62 cm²

Diketahui data hasil pengujian gas tunggal sebagai berikut:

dV = 25 mL

Waktu (t) = 32,68 detik

Pi = Permeabilitas

Diketahui DSL membran berdasarkan hasil SEM *cross section* (l) = 0,13 μm = 1,3 × 10⁻⁵ cm

Maka,

$$P_i = \frac{Q \times l}{A \times \Delta P} \times 10^{10}$$

$$P_i = \frac{\frac{dV}{dt} \times l}{A \times \Delta P} \times 10^{10}$$

$$P_i = \frac{\frac{25}{32,68} \times 1,3 \times 10^{-5}}{16,62 \times 151,512} \times 10^{10}$$

$$P_i = 39,49 \text{ Barrer}$$

Lampiran 4. Contoh Data Pengujian

1. PSf Neat

H ₂								
V (mL)	t (s)	Q (cm ³ /s)	l (cm)	dP cmHg	P (GPU)	P rata-rata (GPU)	P rata rata (Barrer)	Stdev (Barrer)
25	15,06	1,66	0,000013	152	657,11	639,76	83,19	0,09
	15,06	1,66			657,11			
	15,18	1,65			651,92			
	15,36	1,63			644,28			
	16,82	1,49			588,35			

2. PSf C-ZIF-L 1%

H ₂								
V (mL)	t (s)	Q (cm ³ /s)	l (cm)	dP cmHg	P (GPU)	P rata-rata (GPU)	P rata rata (Barrer)	Stdev (Barrer)
25	12,2	2,05	0,000031	152	811,16	788,10	244,31	4,32
	12,6	1,98			785,41			
	12,8	1,95			773,14			
	12,6	1,98			785,41			
	12,6	1,98			785,41			

Lampiran 5. Contoh foto pengujian gas tunggal



Lampiran 6. Contoh perhitungan *d-spacing* menggunakan hukum Bragg
Diketahui :

Lambda (λ) Cu K α = 1,5406 Å

Orde n = 1

$2\theta = 7,08^\circ$

$\theta = 3,04^\circ$

Sin (θ)= 0,053

Maka,

$$d = \frac{\lambda \cdot n}{2 \cdot \sin(\theta)}$$

$$d = \frac{1,5406 \cdot 1}{2 \cdot \sin 3,04^\circ}$$

$$d = \frac{1,5406}{0,1236} = 12,46 \text{ Å}$$

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Sidoarjo, 10 Oktober 2003, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Hidayatul Islam Krian, SDN 4 Krian, SMPN 1 Krian, dan SMAN 1 Krian. Setelah lulus dari SMA tahun 2022, Penulis mengikuti SNMPTN dan diterima di Departemen Kimia FSAD-ITS pada tahun 2022 dan terdaftar dengan NRP 5004221017. Di Departemen Kimia ini, Penulis mengambil bidang penelitian kimia fisik yang berfokus pada teknologi membran dalam pemisahan gas. Penulis sempat aktif di beberapa perlombaan yang diadakan oleh berbagai universitas dan instansi umum. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik (email) dengan alamat tifanidjilhamm@gmail.com.