

**OPTIMASI PEMISAHAN *MALACHITE GREEN* MENGGUNAKAN POLI
BISFENOL A DIGLISIDIL ETER (POLI-BADGE) 4:1 SEBAGAI
CARRIER BERBASIS *POLYMER INCLUSION MEMBRANE***

(Skripsi)

Oleh

**DIAN NOPITA SARI
NPM 2217011012**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

OPTIMASI PEMISAHAN *MALACHITE GREEN* MENGGUNAKAN POLI BISFENOL A DIGLISIDIL ETER (POLI-BADGE) 4:1 SEBAGAI *CARRIER* BERBASIS *POLYMER INCLUSION MEMBRANE*

Oleh

DIAN NOPITA SARI

Malachite green (MG) merupakan zat warna sintetis bermuatan kationik yang banyak digunakan dalam industri tekstil, namun berpotensi mencemari lingkungan karena bersifat toksik dan sulit terurai secara alami. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan pemisahan MG menggunakan *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) dengan Poli-Bisfenol A Diglisidil Eter (Poli-BADGE) 4:1 sebagai *carrier*. Membran dipreparasi menggunakan metode *solvent casting* dengan polivinil klorida (PVC) sebagai polimer dasar, dibenzil eter (DBE) sebagai *plasticizer*, dan tetrahidrofur (THF) sebagai pelarut. Karakterisasi membran dilakukan menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Parameter yang dioptimalkan meliputi pH fasa sumber, konsentrasi HNO₃ pada fasa penerima, ketebalan membran, konsentrasi *carrier*, waktu transpor, dan studi kompetisi logam Cu(II) dan Pb(II) pada limbah buatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Poli-BADGE 4:1 efektif sebagai *carrier* dalam membran PIM untuk pemisahan MG sebesar 90,67%. Kondisi optimum diperoleh pada pH 7, konsentrasi HNO₃ 0,75 M, ketebalan membran T₅₄, konsentrasi *carrier* 0,07 M dan waktu transpor optimum dicapai pada 9 jam. Studi kompetisi pada limbah buatan yang mengandung ion Cu(II) dan Pb(II) menunjukkan adanya penurunan efisiensi transpor, namun membran tetap selektif terhadap MG. Analisis FTIR menunjukkan tidak adanya perubahan gugus fungsi utama sebelum dan sesudah transpor, sedangkan hasil SEM menunjukkan permukaan membran menjadi lebih kasar setelah transpor akibat kemungkinan terjadinya leaching komponen membran.

Kata kunci: *Malachite green*, Membran PIM, Poli-BADGE 4:1

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF *MALACHITE GREEN* SEPARATION USING POLY-BISPHENOL A DIGLYCIDYL ETHER (POLY-BADGE) 4:1 AS A *CARRIER* BASED ON POLYMER INCLUSION MEMBRANE

By

DIAN NOPITA SARI

Malachite green (MG) is a cationic synthetic dye widely used in the textile industry; however, it has the potential to contaminate the environment due to its toxic nature and resistance to natural degradation. This study aimed to optimize the separation of MG using a Polymer Inclusion Membrane (PIM) with Poly-Bisphenol A Diglycidyl Ether (Poly-BADGE) 4:1 as the carrier. The membrane was prepared using the solvent-casting method, with polyvinyl chloride (PVC) as the base polymer, dibenzyl ether (DBE) as the plasticizer, and tetrahydrofuran (THF) as the solvent. Membrane characterization was performed using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM). The parameters optimized included the source phase pH, HNO₃ concentration in the receiving phase, membrane thickness, carrier concentration, transport time, and a competition study involving Cu(II) and Pb(II) ions in a synthetic wastewater matrix. The results demonstrated that Poly-BADGE 4:1 was an effective carrier in the PIM system, achieving an MG separation efficiency of 90.67%. The optimum conditions were obtained at pH 7, an HNO₃ concentration of 0.75 M, membrane thickness T₅₄, a carrier concentration of 0.07 M, and an optimum transport time of 9 hours. The competition study using synthetic wastewater containing Cu(II) and Pb(II) ions showed a decrease in transport efficiency; however, the membrane remained selective toward MG. FTIR analysis indicated no significant changes in the main functional groups before and after transport, while SEM observations revealed that the membrane surface became rougher after transport, possibly due to the leaching of membrane components.

Keywords: Malachite green, PIM membrane, Poly-BADGE 4:1

**OPTIMASI PEMISAHAN *MALACHITE GREEN* MENGGUNAKAN POLI
BISFENOL A DIGLISIDIL ETER (POLI-BADGE) 4:1 SEBAGAI
CARRIER BERBASIS *POLYMER INCLUSION MEMBRANE***

Oleh

Dian Nopita Sari

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS

Pada

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



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

Judul : **OPTIMASI PEMISAHAN *MALACHITE GREEN* MENGGUNAKAN POLI BISFENOL A DIGLISIDIL ETER (POLI-BADGE) 4:1 SEBAGAI *CARRIER* BERBASIS *POLYMER INCLUSION MEMBRANE***

Nama : **Dian Nopita Sari**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2217011012**

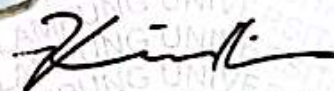
Jurusan : **Kimia**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



1. Komisi Pembimbing


Dr. Agung Abadi Kiswandono, S.Si., M.Sc.
NIP. 197007052005011003


Dr. Rinawati, S.Si., M.Si.
NIP. 197104142000032001

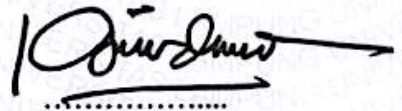
2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung


Prof. Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.
NIP. 1972053020000332001

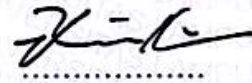
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc.



Sekretaris : Dr. Rinawati, M.Si.



Anggota : Prof. Drs. Andi Setiawan, M.Sc., PhD.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 21 Mei 2026

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Dian Nopita Sari
Nomor Pokok Mahasiswa : 2217011012
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul ***Optimasi Pemisahan Malachite green Menggunakan Poli Bisfenol A Diglisidil Eter (Poli-BADGE) 4:1 sebagai Carrier Berbasis Polymer Inclusion Membrane*** adalah benar karya sendiri, baik gagasan, hasil, dan analisisnya. Saya tidak keberatan jika data dalam skripsi ini digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi sesuai dengan kesepakatan sebelum dilakukan publikasi.

Bandar Lampung, 8 Juni 2026

Yang Menyatakan



Dian Nopita Sari
NPM. 2217011012

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Dian Nopita Sari dan lahir di Peraduan Waras, 17 Juni 2004 sebagai anak Pertama dari Bapak Junaidi Iskandar dan Ibu Mery Santini. Penulis menyelesaikan pendidikan di SMP Negeri 4 Kotabumi pada tahun 2016-2019 dan SMA Negeri 1 Abung Timur pada tahun 2019-2022. Pada tahun 2022, penulis melanjutkan pendidikan sebagai mahasiswa Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Lampung (Unila) dan menyelesaikan studinya pada tahun 2026.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif menjadi pengurus muda Himpunan Mahasiswa Kimia (Himaki) pada tahun 2023, kemudian menjadi pengurus inti pada tahun 2024 di bidang kaderisasi dan pengembangan organisasi. Penulis aktif menjadi pengurus Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) sebagai anggota pengembangan sumber daya manusia pada tahun 2024. Pada tahun 2024, penulis juga mengikuti kegiatan Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) program Membangun Desa di Desa Rejomulyo, Kabupaten Lampung Selatan. Selain itu penulis juga memenangkan pendanaan dan menjadi seorang ketua terkait Program Kreativitas Mahasiswa Riset Eksakta (PKM-RE) yang diadakan oleh Kemendikisaintek.

Penulis mengikuti kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Bandar Agung, Kecamatan Sragi, Lampung Selatan pada 9 Januari-9 Februari 2025. Pada tahun 2025 penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Laboratorium Kimia Analitik dan Instrumentasi, Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Lampung. Penulis pernah menjadi asisten Praktikum Kimia Dasar pada tahun 2025. Pada tahun 2026 penulis telah menyelesaikan tugas akhir untuk mendapatkan gelar sarjana dengan membuat skripsi yang berjudul “Optimasi Pemisahan *Malachite green* Menggunakan Poli Bisfenol A Diglisidil Eter (Poli-BADGE) 4:1 sebagai *Carrier* Berbasis *Polymer Inclusion Membrane* ”.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan menyebut nama Allah yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang

Dengan mengucapkan

Alhamdulillahirabbil'alamin dan dengan segala kerendahan hati,

Ku persembahkan karya ini teruntuk:

Kedua orang tuaku tercinta, Bapak Junaidi Iskandar dan Ibu Mery Santini yang telah membesarkan, mendidik, mendo'akan, mendukung, dan memberikan cinta dan kasih yang sangat besar sehingga putrimu dapat menyelesaikan studi ini.

Ku ucapkan terima kasih atas segala materi, nasihat, kasih sayang, keringat, dan air mata serta segala sesuatu yang telah kalian diberikan. Kepada seluruh keluarga besar yang selalu memberikan dukungan, bantuan, dan perhatian untukku.

Dengan segala rasa hormat kepada Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc., Ibu Dr. Rinawati, M.Si., dan Bapak Prof. Drs. Andi Setiawan, M.Sc., PhD., serta seluruh Dosen Pengajar yang telah membimbing dan mendidikku sampai menyelesaikan pendidikan Sarjana. Seluruh kerabat yang telah memberikan banyak dukungan, bantuan, dan saran.

Almamater Tercinta Universitas Lampung

MOTTO

“Allah tidak mengatakan hidup ini mudah. Tetapi Allah berjanji, bahwa sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.”

(Q. S. *Al-Insyirah*; 5-6)

“Hidup bukan untuk saling mendahului, bayangan yang diciptakan oleh mentari, ada karena matahari bermaksud terpuji, untukmu cintai diri sendiri.”

(Mata Air-Hindia)

“Bisa jadi yang paling cantik dari dirimu adalah cara kamu bertahan.”

(Penulis)

“Melangkahlah kedepan dengan Doa, karena Doa akan mendorong harapan dan semangat akan cita-cita dan keinginan kita tercapai, ibarat payung yang melindungi kita dari air hujan, walau masih terkena percikan hujan, tetapi kita tetap optimis melangkah kedepan menuju tujuan.”

(*Muh. Agung A Kiswando*)

SANWACANA

Puji syukur ke hadirat Allah Subhanahu *wa Ta'ala* atas segala limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis diberikan kekuatan, kesehatan, serta kesempatan untuk menyelesaikan skripsi yang berjudul “Optimasi Pemisahan *Malachite green* Menggunakan Poli Bisfenol A Diglisidil Eter (Poli-BADGE) 4:1 sebagai *Carrier* Berbasis *Polymer Inclusion Membrane*”. Penyusunan skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad *Shalallahu 'alaihi wa Salam*, yang telah membawa umat manusia menuju kehidupan yang penuh dengan ilmu pengetahuan dan nilai-nilai kebaikan. Penulis menyadari bahwa dalam proses penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari berbagai tantangan dan hambatan. Namun demikian, berkat doa, semangat, serta dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua penulis Bapak Junaidi Iskandar dan Ibu Mery Santini, dua orang yang sangat berjasa dalam hidup penulis, dua orang yang selalu mengusahakan anak pertamanya ini menempuh pendidikan. Terima kasih atas segala pengorbanan, kasih sayang, cinta, nasihat, dukungan, dan materi yang telah diberikan selama ini sehingga penulis mampu menghadapi segala hambatan yang ada dan skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Tak lupa kepada adik adik tercinta Dani Saputra dan Daffa Saputra yang selalu menjadi pelita semangat dalam setiap langkah, serta seluruh keluarga besar yang senantiasa memberikan do'a dan dukungan.

2. Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc. selaku dosen pembimbing I yang telah dengan penuh kesabaran memberikan arahan, bimbingan, ilmu pengetahuan, serta motivasi kepada penulis selama proses penelitian, hingga penyusunan skripsi ini, sehingga penulis dapat menyelesaikannya dengan baik.
3. Ibu. Dr. Rinawati, M.Si. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan, dan segala ilmu selama proses penyelesaian skripsi.
4. Bapak Prof. Drs. Andi Setiawan, M.Sc., PhD. selaku dosen pembimbing akademik sekaligus dosen pembahas yang telah memberikan ilmu, arahan, bimbingan, ilmu pengetahuan serta berbagai masukan dan saran yang membangun selama proses studi, penelitian dan penyusunan skripsi, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
5. Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, M.Si. selaku ketua Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
7. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, pengalaman, dan motivasi selama penulis menjalankan studi di Universitas Lampung.
8. Seluruh staf administrasi dan pegawai di lingkungan Jurusan Kimia, Dekanat Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, serta Universitas Lampung yang senantiasa membantu dalam sistem akademik, perkuliahan, penelitian, serta penyusunan skripsi sehingga dapat diselesaikan dengan baik.
9. Sahabat sahabat penulis, Ratu Shindy, Lia, Vera, dan Nisa. Terima kasih atas segala warna dan cerita selama ini, semoga selalu diberikan warna-warna cantik di kehidupan ini.
10. Teman seperjuangan penulis selama penelitian, Alma, Rana, There, Jb, dan Bagus atas bantuan, dukungan, dan kerja sama selama penelitian yang telah dilakukan bersama.

11. Teman seperjuangan penulis selama perkuliahan, Mikro Elusi; Alma, Nabilah, Erlyn, Muthi, dan Maula. Terima kasih telah menemani, memberikan berbagai cerita, sudut pandang, dukungan, dan bantuan selama masa perkuliahan ini.
12. Keluarga besar *Membrane Research*, Mba Icha, Mba Kharisma, Kak Annur, Kak fadhil, kakak kakak *membrane*'21, dan adik adik *membrane*'23 yang telah kebersamai dan memberikan bantuan, dukungan, serta pengalamannya.
13. Keluarga besar KKN Desa Bandar Agung atas cerita baru, warna baru, dan pengalaman baru.
14. Teman teman seperjuangan selama PKM-RE, Alma, Vivin, dan Dian. Terima kasih atas pengalamannya.
15. Penghuni Kosan Srikasih atas cerita, tawa dan canda.
16. Teman teman Himaki Periode 2023 dan 2024, terkhusus untuk KPO Periode 2023 dan 2024. Terima kasih telah berbagi cerita dan pengalamannya.
17. Teman-teman Kimia Angkatan 2022, khususnya kelas A atas segala cerita dan pengalaman barunya.
18. Seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung dalam menyelesaikan skripsi penulis dan tidak dapat disebutkan satu per satu, serta almamater Universitas Lampung.
19. Teruntuk diriku, Dian Nopita Sari. Terima kasih atas kesabaran, ketekunan, dan semangat dalam menjalani proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini belum sempurna. Oleh karena itu, penulis memohon maaf dan memohon kritik serta saran yang membangun dari pembaca untuk perbaikan penelitian selanjutnya. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan di masa depan.

Bandar Lampung,
Penulis

Dian Nopita Sari

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Manfaat Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Malachite green</i> (MG).....	5
2.2 Eugenol dan Bisfenol A Diglisidil Eter (BADGE)	7
2.3 Teknologi Membran	10
2.4 <i>Polymer Inclusion Membrane</i> (PIM).....	12
2.5 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	13
2.6 Spektrofotometri <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR)	16
2.7 Spektrofotometri <i>Ultra Violet-Visible</i> (UV-Vis).....	19
III. METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1 Waktu dan Tempat.....	22
3.2 Alat dan Bahan	22
3.2.1 Alat.....	22
3.2.2 Bahan	23
3.3 Pembuatan Membran <i>Polymer Inclusion Membrane</i> (PIM).....	23
3.4 Uji Porositas dan Serapan Air Membran	24
3.5 Optimasi Transpor <i>Malachite green</i> (MG)	25

3.5.1 Variasi pH <i>Malachite green</i> (MG) pada Fasa Sumber	25
3.5.2 Variasi Konsentrasi HNO ₃ pada Fasa Penerima	25
3.5.3 Variasi Ketebalan Membran.....	26
3.5.4 Variasi Konsentrasi <i>Carrier</i>	26
3.5.5 Variasi Waktu Transpor.....	27
3.5.6. Studi Kompetisi Transpor <i>Malachite green</i> (MG) pada Limbah Buatan.....	27
3.5.7 Analisis Parameter Transpor	27
3.6 Diagram Alir Penelitian	29
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	30
4.1 Pembuatan Membran <i>Polymer Inclusion Membrane</i> (PIM)	30
4.2 Uji Porositas dan Serapan Air Membran	37
4.3 Optimasi Transpor <i>Malachite green</i> (MG).....	40
4.3.1 Variasi pH <i>Malachite green</i> (MG) pada Fasa Sumber	41
4.3.2 Variasi Konsentrasi HNO ₃ pada Fasa Penerima.....	42
4.3.3 Variasi Ketebalan Membran.....	44
4.3.4 Variasi Konsentrasi <i>Carrier</i>	45
4.3.5 Variasi Waktu Transpor.....	47
4.3.6 Studi Kompetisi Transpor <i>Malachite green</i> (MG) pada Limbah Buatan.....	48
V. KESIMPULAN DAN SARAN	54
5.1 Kesimpulan	54
5.2 Saran	54
DAFTAR PUSTAKA.....	55
LAMPIRAN.....	60

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi penyusun membran	23
2. Variasi konsentrasi <i>carrier</i>	26
3. Massa total komponen membran, massa membran, dan rata-rata ketebalan membran sebelum transpor	32
4. Bilangan gelombang membran PIM sebelum dan sesudah transpor	34
5. Hubungan antara waktu transpor MG, removal MG dan LM Loss	48
6. Absorbansi larutan standar MG pada variasi pH fasa sumber	70
7. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pH fasa sumber.....	71
8. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pH fasa sumber	72
9. Absorbansi larutan standar MG pada variasi konsentrasi HNO ₃ di fasa penerima	72
10. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi HNO ₃ di fasa penerima	73
11. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi HNO ₃ di fasa penerima	74
12. Absorbansi larutan standar MG pada variasi ketebalan membran.....	74
13. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi ketebalan membran	75
14. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi ketebalan membran.....	76
15. Absorbansi larutan standar MG pada variasi konsentrasi <i>carrier</i>	76
16. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi <i>carrier</i>	77
17. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi <i>carrier</i>	78
18. Absorbansi larutan standar MG pada variasi waktu transpor	78
19. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi waktu transpor.....	79
20. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi waktu transpor	80
21. Absorbansi larutan standar MG pada studi kompetisi pada limbah buatan....	80
22. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada studi kompetisi pada limbah buatan.....	81

23. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada studi kompetisi pada limbah buatan	82
24. Data Transpor Waktu	83
25. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi pH fasa sumber	90
26. Massa membran setelah transpor MG pada Variasi pH fasa sumber.....	90
27. %LM <i>Loss</i> transpor MG pada variasi pH fasa sumber	91
28. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	91
29. Massa membran setelah transpor MG pada variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	91
30. %LM <i>Loss</i> tranpor MG pada variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima .	92
31. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi ketebalan membran.....	92
32. Massa membran setelah transpor MG pada variasi ketebalan membran	92
33. %LM <i>Loss</i> transpor MG pada variasi ketebalan membran.....	93
34. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi konsentrasi <i>carrier</i>	93
35. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi konsentrasi <i>carrier</i>	93
36. %LM <i>Loss</i> transpor MG pada variasi konsentrasi <i>carrier</i>	94
37. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi waktu transpor	94
38. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi waktu transpor	94
39. % LM <i>Loss</i> transpor MG pada variasi waktu transpor	95
40. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi kompetisi limbah buatan	95
41. Massa membran setelah transpor MG pada variasi kompetisi limbah buatan	95
42. % LM <i>Loss</i> transpor MG pada variasi kompetisi limbah buatan.....	96
43. Ketebalan membran PIM pada variasi pH fasa sumber	97
44. Ketebalan membran PIM pada variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima	97
45. Ketebalan membran PIM pada variasi ketebalan membran.....	97
46. Ketebalan membran PIM pada variasi konsentrasi <i>carrier</i>	98
47. Ketebalan membran PIM pada variasi waktu transpor	98
48. Ketebalan membran PIM pada variasi kompetisi pada limbah buatan	98

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Struktur kimia <i>Malachite green</i> (MG) (Kusumaningrum dkk., 2022).....	5
2. Serbuk MG (Khairil dan Etika, 2022).....	6
3. Struktur eugenol (Faruq and Ibrahim., 2025)	8
4. Reaksi polimerisasi eugenol menjadi polieugenol (Kiswandono et al., 2020) ...	9
5. Prediksi struktur polieugenol-BADGE (Kiswandono et al., 2020)	9
6. Perbedaan membran BLM, ELM dan SLM (Djunaidi dkk., 2023)	11
7. Komponen perangkat SEM (Alqaheem and Alomair, 2020).....	15
8. Hasil SEM membran PIM; a). Sebelum transpor; b). Sesudah transpor (Kiswandono et al., 2023)	15
9. Bagan alat spektrofotometer FTIR (Setianingsih dan Prananto, 2020)	17
10. Spektrum FTIR (a) membran sebelum dan (b) sesudah transpor (Kiswandono et al., 2023).....	18
11. Skema spektrofotometer UV-Vis (Double-beam) (Ningrum dkk., 2023)	20
12. Panjang gelombang maksimum <i>Malachite green</i> (MG) (Medidi et al., 2018)20	
13. Alat transpor 1) fasa sumber, 2) fasa penerima, 3) membran PIM (Kiswandono et al., 2024).....	24
14. Diagram alir	29
15. Membran PIM yang telah dicetak dengan <i>carrier</i> Poli-BADGE 4:1 dengan variasi ketebalan (a) T ₂₇ (b) T ₅₄ (c) T ₁₀₈	31
16. Perbandingan spektra FTIR (a) membran PIM sebelum transpor dan (b) membran PIM setelah transpor	33
17. Morfologi permukaan membran PIM sebelum transpor perbesaran (a) 500x, dan (b) 2500x, dan setelah transpor perbesaran (c) 500x, dan (d) 2500x.....	36
Gambar 18. Hasil uji porositas membran PIM.....	37
Gambar 19. Hasil uji serapan air membran PIM.....	39
Gambar 20. Pengaruh pH MG pada fasa sumber terhadap konsentrasi MG yang tertranspor	41
21. Pengaruh konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima terhadap konsentrasi MG yang tertranspor	43
22. Pengaruh ketebalan membran terhadap konsentrasi MG yang tertranspor.....	44
23. Pengaruh konsentrasi <i>carrier</i> terhadap konsentrasi MG yang tertranspor.....	46
24. Pengaruh waktu transpor terhadap konsentrasi MG yang tertranspor	47
25. Pengaruh logam Pb(II) dan Cu(II) terhadap konsentrasi MG yang tertranspor 50	
26. Morfologi permukaan membran setelah transpor MG pada limbah buatan ...	52
27. Hasil spektrum EDX dari membran setelah transpor pada limbah buatan	52

28. Hasil analisis kadar logam dengan ICP-OES.....	53
29. Kurva kalibrasi MG pada variasi pH fasa sumber	70
30. Kurva kalibrasi MG pada variasi konsentrasi HNO ₃ di fasa penerima.....	72
31. Kurva kalibrasi MG pada variasi ketebalan membran	74
32. Kurva kalibrasi MG pada variasi konsentrasi <i>carrier</i>	76
33. Kurva kalibrasi MG pada variasi waktu transpor	78
34. Kurva kalibrasi MG pada studi kompetisi pada limbah buatan	80
35. Membran PIM sebelum transpor.....	99
36. Membran PIM setelah transpor.....	99
37. Transpor MG pada limbah buatan sebelum transpor	100
38. Transpor MG pada variasi pH di fasa sumber	100
39. Skema fasa sumber, fasa membran, dan fasa penerima dalam transpor MG	101

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan industri di negara berkembang memberikan kontribusi terhadap peningkatan ekonomi dan devisa negara. Namun, di sisi lain, aktivitas industri juga menjadi salah satu sumber utama pencemaran lingkungan akibat meningkatnya emisi dan limbah yang dihasilkan (Wang *et al.*, 2022). Zat pencemar dapat berasal dari limbah industri dalam bentuk padat, gas maupun cair yang dihasilkan oleh berbagai sektor industri seperti makanan, kesehatan dan tekstil (Kiswandono *et al.*, 2024). Salah satu zat pencemar yang berbahaya yang berasal dari industri tekstil adalah zat pewarna sintetis. Pewarna sintetis dalam limbah industri tekstil umumnya bersifat resisten terhadap proses degradasi alami di perairan, mengingat kandungan utamanya berupa senyawa organik kompleks (Kusumlata *et al.*, 2024). Jika dibuang ke lingkungan perairan, zat warna sintetis dapat meningkatkan kebutuhan oksigen untuk proses oksidasi senyawa organik kompleks, yang ditunjukkan oleh tingginya nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) sebesar 150–12.000 mg/L dan *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) sebesar 80–6000 mg/L, sehingga berpotensi menurunkan kadar oksigen terlarut di perairan (Yaseen *and* Scholz, 2019).

Malachite green (MG) adalah contoh zat pewarna sintetis yang banyak digunakan pada industri tekstil dan kertas. Hal ini karena, harga MG terjangkau, daya tahannya yang tinggi, ketersediaannya yang luas, kemudahan dalam penggunaannya, dan efektif dibandingkan dengan pewarna lainnya (Kiswandono *et al.*, 2024). MG juga banyak dipakai untuk mewarnai kulit, wol, kapas, untuk mengobati protozoa dan infeksi jamur pada ikan (Yang *et al.*, 2021). Namun, MG

juga termasuk pewarna yang kontroversial karena efeknya terhadap sistem kekebalan dan reproduksi serta sifat genotoksik dan karsinogeniknya pada tubuh manusia. Adanya MG dalam air dapat menyebabkan karsinogenesis, mutagenesis, teratogenisitas, kerusakan kromosom, dan toksisitas pernapasan (Kiswando et al., 2024). Sehingga MG termasuk sebagai polutan di lingkungan perairan.

Salah satu teknik dalam mengatasi polutan zat warna MG di perairan yaitu teknologi membran cair. Salah satu metode membran cair yaitu *Polymer Inclusion Membrane* (PIM). PIM merupakan jenis membran yang lentur dan mudah dicetak dari campuran larutan yang mengandung polimer dasar sebagai komponen pendukung, *carrier*, serta *plasticizer* sebagai pemlastis (Kiswando et al., 2022). Penggunaan polimer dasar seperti polivinil klorida (PVC) dipercaya mampu meningkatkan kestabilan sistem membran dengan mengurangi potensi kebocoran dari *carrier* dan *plasticizer* (Kiswando et al., 2024) Membran PIM memiliki banyak keunggulan, termasuk kemudahan dalam sistem operasinya, kemampuan untuk mengurangi penggunaan bahan kimia, serta struktur yang fleksibel dan selektif, sehingga mendukung proses pemisahan secara efektif. Salah satu bagian membran adalah *carrier*, yang membantu senyawa target bergerak melalui membran, memungkinkan proses pemisahan berlangsung (Kiswando et al., 2023).

Keberhasilan proses transpor dalam membran PIM sangat dipengaruhi oleh jenis *carrier* yang digunakan. *Carrier* yang ada pada membran berinteraksi dengan senyawa target MG pada fasa sumber dan dilepaskan di fasa penerima (Kiswando et al., 2023). Oleh karena itu, diperlukan *carrier* yang memiliki gugus fungsi aktif yang mampu berinteraksi secara efektif dengan MG. Salah satu *carrier* yang berpotensi digunakan adalah Poli-BADGE 4:1, yang memiliki gugus hidroksil ($-OH$) dan struktur aromatik yang memungkinkan terjadinya interaksi hidrogen maupun interaksi $\pi-\pi$ dengan molekul MG. Poli-BADGE 4:1 dipilih sebagai *carrier* karena memiliki kestabilan yang baik serta kemampuan interaksi yang tinggi terhadap senyawa organik aromatik seperti MG. Struktur polimer yang relatif kaku dan adanya gugus aktif dalam Poli-BADGE memungkinkan proses transpor berlangsung lebih efektif melalui mekanisme kompleksasi

sementara. Oleh karena itu, penggunaan Poli-BADGE 4:1 dalam sistem PIM diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pemisahan MG dari larutan.

Berdasarkan pada latar belakang yang telah diuraikan, penelitian ini difokuskan pada proses transpor MG dengan memanfaatkan Poli-Bisfenol A Diglisidil Eter (Poli-BADGE) 4:1 sebagai *carrier* dalam membran PIM. Untuk mendukung hasil transpor membran, dilakukan karakterisasi menggunakan spektrofotometer *Fourier Transform Infrared* (FTIR) guna mengidentifikasi keberadaan gugus aktif pada permukaan membran, serta *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengamati morfologi dan struktur pori membran sebelum dan sesudah proses transpor berlangsung. Spektrofotometer UV-*Vis* digunakan untuk mengukur absorbansi dan menentukan konsentrasi MG pada panjang gelombang maksimum, sedangkan konsentrasi logam Cu(II) dan Pb(II) dalam fasa penerima dianalisis menggunakan metode *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy* (ICP-OES). Parameter transpor yang akan dikaji meliputi sintesis membran PIM, pengukuran konsentrasi MG dalam sampel, variasi pH pada fasa sumber, variasi konsentrasi HNO₃ pada fasa penerima, ketebalan membran, konsentrasi *carrier*, waktu transpor, serta studi kompetisi transpor MG dalam limbah buatan.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah:

1. Melakukan karakterisasi membran PIM berbasis Poli-BADGE 4:1 sebelum dan sesudah proses transpor menggunakan FTIR untuk analisis gugus fungsi dan SEM untuk analisis morfologi membran.
2. Mengoptimalkan proses transpor MG menggunakan PIM dengan *carrier* Poli-BADGE 4:1 melalui variasi (pH, konsentrasi HNO₃, ketebalan membran, konsentrasi *carrier*, dan waktu transpor).
3. Mengkaji pengaruh keberadaan ion logam berat Cu(II) dan Pb(II) dalam limbah buatan terhadap kompetisi transpor MG.

1.3 Manfaat Penelitian

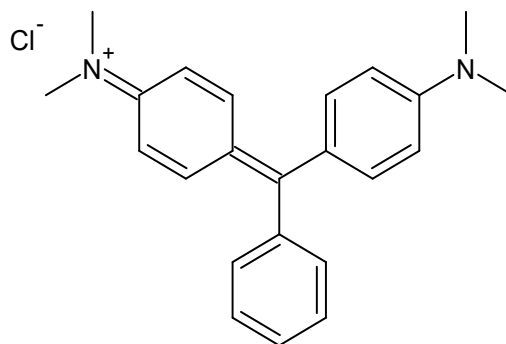
Penelitian ini diharapkan memberikan:

1. Memberikan informasi mengenai efektivitas Poli-BADGE 4:1 sebagai *carrier* dalam membran *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) untuk proses transpor *Malachite green* (MG).
2. Menyajikan data pengaruh parameter operasional (pH, konsentrasi HNO_3 , ketebalan membran, konsentrasi *carrier*, dan waktu transpor) terhadap efisiensi pemisahan *Malachite green* (MG).
3. Memberikan pemahaman mengenai pengaruh keberadaan ion logam Cu(II) dan Pb(II) terhadap kompetisi transpor *Malachite green* (MG) dalam membran *Polymer Inclusion Membrane* (PIM).

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Malachite green* (MG)

Malachite green (MG) merupakan salah satu zat pewarna sintetis golongan triarilmetana yang banyak digunakan dalam berbagai industri, terutama tekstil, kertas, kulit, dan perikanan, karena memiliki keunggulan berupa warna yang cerah, biaya produksi rendah, kemudahan aplikasi, serta stabilitas warna yang tinggi (Khairil dan Etika, 2022). Secara kimia, MG memiliki rumus molekul $C_{23}H_{25}ClN_2$ dengan massa molekul sekitar 364,9 g/mol dan dalam larutan berair berada dalam kesetimbangan antara bentuk kationik berwarna dan karbinol tidak berwarna yang dipengaruhi oleh pH (Sharma *et al.*, 2023). MG banyak digunakan sebagai zat warna kationik untuk proses pewarnaan serat akrilik, wol, dan sutra serta juga diaplikasikan sebagai antiseptik, antibakteri, dan agen antifungal dalam bidang akuakultur (Imtiaz *et al.*, 2022). Meskipun memiliki banyak manfaat, penggunaan MG menimbulkan dampak negatif karena sifatnya yang sulit terdegradasi secara alami di lingkungan (Kiswandono *et al.*, 2024). Struktur MG dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur kimia *Malachite green* (MG) (Kusumaningrum dkk., 2022)

MG termasuk golongan bahan berbahaya dan beracun (B3) karena dapat menimbulkan berbagai efek toksik, seperti genotoksik, mutagenik, dan karsinogenik, serta memberikan dampak negatif terhadap organisme akuatik dan lingkungan perairan (Sharma *et al.*, 2023). Paparan MG dilaporkan menimbulkan stres oksidatif yang memicu kerusakan DNA, mutasi genetik, serta bersifat karsinogenik dan teratogenik (He *et al.*, 2023). Pada hewan percobaan, MG dapat mengakibatkan kerusakan organ hati, ginjal, dan paru-paru, serta gangguan sistem imun (Qian *et al.*, 2024). Dalam ekosistem akuatik, keberadaan MG dapat mengurangi kadar oksigen terlarut, menghambat proses metabolisme ikan, menurunkan pertumbuhan, bahkan menyebabkan kematian pada konsentrasi tertentu (Pramanik *and* Biswas, 2024). Lebih jauh lagi, sifat persisten MG membuatnya dapat terakumulasi dalam rantai makanan (bioakumulasi) sehingga pada akhirnya membahayakan kesehatan manusia sebagai konsumen akhir (Kiswandono *et al.*, 2024). MG biasanya ditemukan dalam bentuk kristal hijau atau serbuk hijau yang larut dalam air, menghasilkan larutan berwarna hijau cerah, yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Serbuk MG (Khairil dan Etika, 2022)

Kandungan MG dalam limbah industri tekstil dilaporkan bervariasi, umumnya pada kisaran 10–50 mg/L, bahkan dalam beberapa kasus dapat mencapai lebih dari 100 mg/L, sementara ambang batas yang diperbolehkan untuk air permukaan menurut standar WHO hanya sekitar 0,1 mg/L (Khairil dan Etika, 2022). Perbedaan konsentrasi yang sangat signifikan ini menunjukkan bahwa keberadaan MG dalam limbah industri jelas berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak

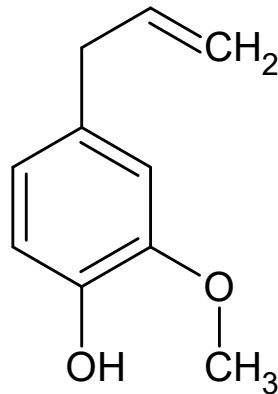
diolah terlebih dahulu. Selain itu, intensitas warna MG yang tinggi menyebabkan senyawa ini mudah terdeteksi bahkan pada konsentrasi rendah, serta dapat menghambat penetrasi cahaya ke dalam perairan sehingga mengganggu proses fotosintesis organisme akuatik (Sharma *et al.*, 2023). Oleh karena itu, MG tidak hanya berdampak pada kesehatan manusia, tetapi juga dapat menurunkan kualitas ekosistem akuatik secara keseluruhan.

Berdasarkan uraian tersebut, jelas bahwa MG merupakan salah satu polutan organik yang sangat berbahaya dan perlu mendapat perhatian khusus. Berbagai metode pengolahan limbah telah dikembangkan untuk mengurangi atau menghilangkan MG dari perairan, mulai dari adsorpsi, fotodegradasi katalitik, biosorpsi, hingga teknologi membran. Namun, masing-masing metode memiliki kelebihan dan keterbatasan. Adsorpsi misalnya, meskipun sederhana dan murah, seringkali membutuhkan material adsorben yang regenerasinya sulit.

Fotodegradasi katalitik dapat efektif tetapi memerlukan sumber cahaya dan katalis khusus. Sementara itu, teknologi membran berkembang sebagai alternatif yang menjanjikan karena menawarkan selektivitas tinggi, efisiensi pemisahan yang baik, serta berpotensi ramah lingkungan (Kiswandono *et al.*, 2024). Oleh karena itu, MG tidak hanya penting ditinjau dari sisi toksisitas dan dampaknya, tetapi juga dari sisi strategi penanganannya melalui inovasi teknologi pemisahan yang efektif.

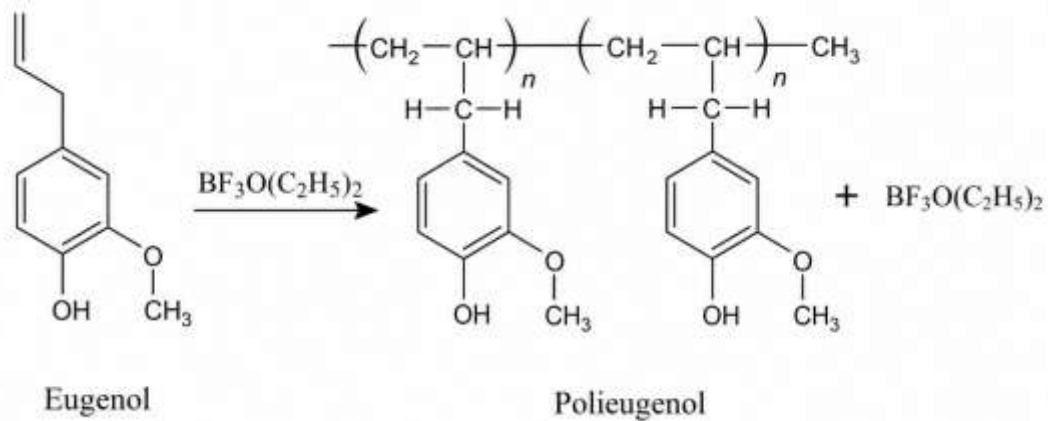
2.2 Eugenol dan Bisfenol A Diglisidil Eter (BADGE)

Eugenol merupakan senyawa fenilpropanoid utama dalam minyak atsiri cengkeh (*Syzygium aromaticum*), yang memiliki struktur aromatik dengan substituen gugus hidroksil (-OH), metoksi (-OCH₃), dan rantai alil. Gugus-gugus fungsional tersebut menjadikan eugenol reaktif terhadap reaksi polimerisasi maupun modifikasi kimia, sehingga banyak digunakan sebagai prekursor dalam sintesis polimer berbasis biomaterial (Kowalewska *and* Smolarek, 2023). Secara alami eugenol bersifat cair, mudah menguap, dan memiliki aktivitas biologis seperti antibakteri dan antioksidan (Elbestawy *et al.*, 2023). Struktur eugenol dapat dilihat pada Gambar 3.



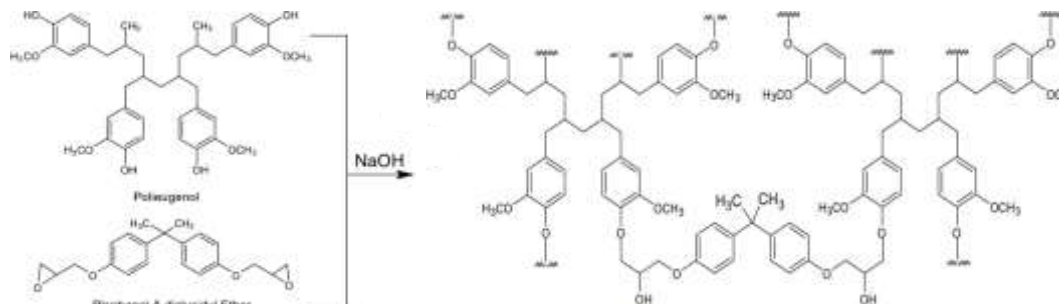
Gambar 3. Struktur eugenol (Faruq *and* Ibrahim., 2025)

Namun, sifat mekanik eugenol murni rendah sehingga tidak memungkinkan penggunaannya langsung sebagai material polimer struktural. Untuk meningkatkan sifatnya, dilakukan polimerisasi eugenol menjadi polieugenol menggunakan katalis asam Lewis, salah satunya $\text{BF}_3 \cdot \text{OEt}_2$. Proses polimerisasi ini menghasilkan rantai polimer dengan keterulangan unit aromatik, tetapi polieugenol murni masih memiliki keterbatasan berupa berat molekul relatif rendah dan stabilitas termal yang kurang baik (Effendi, 2021). Keterbatasan polieugenol dapat diatasi dengan strategi modifikasi kimia melalui taut silang (*crosslinking*). BADGE merupakan salah satu agen taut silang yang banyak digunakan dalam kimia. BADGE adalah turunan epoksi dari bisfenol A yang memiliki dua gugus epoksida terminal, menjadikannya sangat reaktif terhadap gugus hidroksil dalam polieugenol. Reaksi antara polieugenol dan BADGE menghasilkan struktur jaringan tiga dimensi yang disebut Poli-BADGE, dengan peningkatan signifikan pada sifat mekanik, ketahanan termal, serta jumlah situs aktif (Kiswandono *et al.*, 2024). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa Poli-BADGE memiliki titik leleh di atas 380°C , jauh lebih tinggi dibandingkan polieugenol biasa yang umumnya terdegradasi pada suhu lebih rendah (Hussein *and* Atiyah, 2024). Hal ini membuktikan bahwa modifikasi dengan BADGE mampu memperbaiki stabilitas termal polimer berbasis eugenol. Proses polimerisasi eugenol untuk membentuk polieugenol dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Reaksi polimerisasi eugenol menjadi polieugenol (Kiswandono *et al.*, 2020)

Selain peningkatan stabilitas, taut silang dengan BADGE juga memperluas aplikasi polieugenol dalam bidang teknologi membran. Gugus hidroksil dan aromatik pada Poli-BADGE memberikan situs aktif yang berpotensi berinteraksi melalui gaya elektrostatis maupun ikatan hidrogen dengan molekul organik bermuatan, termasuk zat warna kationik seperti MG. Dengan demikian, Poli-BADGE diprediksi dapat berfungsi sebagai *carrier* dalam PIM, di mana keberadaan situs aktif memfasilitasi pembentukan kompleks sementara antara MG dan polimer sebelum dilepaskan ke fasa penerima. Hal ini memberikan keunggulan selektivitas yang lebih baik dibandingkan polieugenol murni (Kiswandono *et al.*, 2022). Prediksi struktur polimer taut silang polieugenol-BADGE dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Prediksi struktur polieugenol-BADGE (Kiswandono *et al.*, 2020)

Meskipun memiliki banyak potensi, penelitian mengenai pemanfaatan Poli-BADGE dalam aplikasi pemisahan masih terbatas. Sebagian besar studi terdahulu lebih menitikberatkan pada penggunaannya dalam material resin epoksi, pelapis, dan perekat industri. Studi yang mengarahkan pemanfaatan Poli-BADGE sebagai *carrier* dalam PIM untuk transpor zat warna organik, khususnya MG, masih jarang dilakukan. Oleh karena itu, riset ini diharapkan mampu mengisi *research gap* tersebut dengan mengkaji efektivitas Poli-BADGE rasio tertentu (misalnya 4:1) dalam sistem membran, sekaligus menguji pengaruh variasi parameter operasional seperti pH, ketebalan membran, konsentrasi HNO₃, waktu transpor, dan kompetisi ion logam.

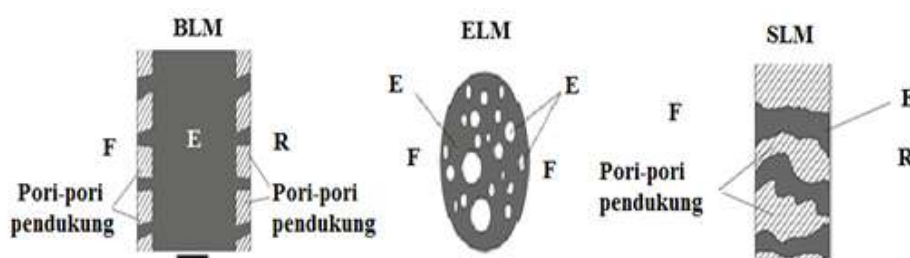
2.3 Teknologi Membran

Membran pada dasarnya berfungsi sebagai penghalang selektif yang memisahkan dua fase, baik dalam bentuk heterogen maupun homogen, dengan ketebalan serta ukuran pori tertentu untuk memisahkan material seperti partikel, molekul, senyawa, atau ion, termasuk berdasarkan perbedaan berat molekul (Kiswandono *et al.*, 2025). Oleh sebab itu, membran dapat dianggap sebagai media filtrasi yang mampu menyaring komponen berukuran antara 1 μm hingga 0,0001 μm . Prinsip kerja filtrasi membran didasarkan pada aliran umpan melewati membran berpori tertentu, sehingga menghasilkan dua fraksi, yaitu permeat sebagai hasil penyaringan dan retentat sebagai sisa yang tertahan. Mekanisme pemisahan terjadi melalui proses transpor, baik aktif maupun pasif. Transpor aktif ditandai dengan pergerakan langsung zat yang dipisahkan, sedangkan transpor pasif dipicu oleh perbedaan gradien konsentrasi, tekanan, atau suhu antara kedua sisi membran (Purwayantie dkk., 2022).

Teknologi membran berkembang sangat pesat dan menjadi salah satu metode penting dalam pemisahan komponen larutan maupun gas (Osman *et al.*, 2024). Aplikasinya memiliki nilai komersial tinggi dan memberi pengaruh besar terhadap berbagai sektor industri. Fungsi utama membran adalah menyaring molekul berdasarkan ukuran dan bentuk, di mana molekul dengan dimensi lebih besar akan

tertahan, sementara molekul kecil dapat melewatinya (Sahu *et al.*, 2024). Salah satu jenis teknologi yang banyak dikembangkan adalah membran cair (*liquid membrane*). Teknologi ini menunjukkan potensi signifikan dalam proses transpor selektif, misalnya ion logam pada konsentrasi tinggi yang dapat melintasi membran. Walaupun pembuatan lapisan tipis membran cair relatif sederhana, tantangan muncul dalam mempertahankan stabilitas film serta karakteristiknya selama berlangsungnya proses pemisahan massa. Oleh karena itu, diperlukan media pendukung untuk memperkuat struktur membran yang sifatnya cenderung rapuh. Cairan yang digunakan dalam membran harus memenuhi beberapa persyaratan, yaitu larut dalam fase membran, tidak bercampur dengan fase umpan, mampu melepaskan kembali analit ke fase penerima, serta mampu membentuk ikatan sementara dengan analit yang dapat dilepaskan kembali.

Berdasarkan struktur dan mekanisme pemisahannya, membran cair dapat digolongkan menjadi beberapa tipe, antara lain membran cair ruah *Bulk Liquid Membrane* (BLM), membran cair emulsi *Emulsion Liquid Membrane* (ELM), serta membran cair berpendukung *Supported Liquid Membrane* (SLM). Proses pemisahan dalam membran cair mengintegrasikan tahapan ekstraksi cair-cair dan proses penerimaan secara berkesinambungan, sehingga senyawa target yang umumnya berupa larutan berair dapat ditransfer secara efisien (Apriyanti dkk., 2024). Perbedaan ketiga jenis membran BLM, ELM, dan SLM dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Perbedaan membran BLM, ELM dan SLM (Djunaidi dkk., 2023)

2.4 Polymer Inclusion Membrane (PIM)

Polymer Inclusion Membrane (PIM) merupakan salah satu inovasi teknologi membran yang berkembang dari konsep membran cair (*liquid membrane*) dengan memadukan sifat mekanik polimer padat dan selektivitas tinggi dari *carrier* dalam fase cair. Secara umum, PIM tersusun dari tiga komponen utama, yaitu:

1. Polimer dasar seperti polivinil klorida (PVC) atau selulosa triasetat (CTA) yang berfungsi sebagai matriks penopang membran.
2. *Plasticizer* seperti *2-nitrophenyl octyl ether* (NPOE) atau *dioctyl phthalate* (DOP) yang memberikan fleksibilitas, homogenitas, dan meningkatkan mobilitas molekul di dalam membran.
3. *Carrier* atau agen pengangkut selektif yang bertugas mengikat senyawa target melalui interaksi spesifik, lalu melepaskannya ke fasa penerima (Ghaderi *et al.*, 2021).

Kombinasi ketiga komponen ini menghasilkan membran yang stabil secara fisik, selektif, dan dapat digunakan berulang kali dibandingkan membran cair konvensional seperti BLM atau SLM yang rentan terhadap kebocoran *carrier* (Soo *et al.*, 2021)

Mekanisme kerja PIM didasarkan pada prinsip pembentukan kompleks sementara antara senyawa target dan *carrier*. Proses ini umumnya terjadi dalam tiga tahap: (1) difusi senyawa target dari larutan fasa sumber ke permukaan membran, (2) pembentukan kompleks senyawa-*carrier* di dalam membran yang ditopang polimer, dan (3) difusi kompleks tersebut hingga mencapai sisi fasa penerima, di mana senyawa target dilepaskan karena perbedaan gradien konsentrasi atau perubahan pH (Soo *et al.*, 2021). Dengan mekanisme ini, PIM mampu melakukan pemisahan dengan selektivitas tinggi terhadap molekul atau ion tertentu.

Dalam konteks pemisahan zat warna, PIM menunjukkan prospek yang menjanjikan. Soo *et al* (2021) mengembangkan PIM berbasis PVDF-HFP untuk transpor MG dan melaporkan hasil yang signifikan dengan kestabilan membran yang baik. Penelitian Kiswandono *et al* (2024), menunjukkan bahwa PIM berbasis polieugenol dapat digunakan sebagai *carrier* efektif untuk transpor MG dengan

stabilitas yang memadai, menegaskan bahwa biomaterial lokal dapat dikembangkan sebagai komponen membran. Selain itu, Soo *et al* (2021) melaporkan bahwa PIM berbasis CTA dengan berbagai *carrier* organik mampu memisahkan beragam zat warna berbahaya dengan efisiensi tinggi.

Meskipun banyak penelitian menunjukkan keberhasilan PIM, tantangan masih ada terutama dalam hal kestabilan jangka panjang, kemampuan menghadapi limbah nyata yang kompleks, serta biaya produksi skala besar. PIM yang dibuat di laboratorium umumnya diuji dalam kondisi terkontrol, misalnya hanya mengandung satu jenis zat warna atau ion logam, padahal limbah industri biasanya merupakan campuran multi-polutan. Oleh karena itu, penelitian terkini mulai mengarah pada optimasi kondisi operasi (pH, konsentrasi fasa penerima, ketebalan membran, konsentrasi *carrier*, dan waktu transpor) untuk memperoleh efisiensi yang lebih tinggi serta kestabilan yang lebih lama.

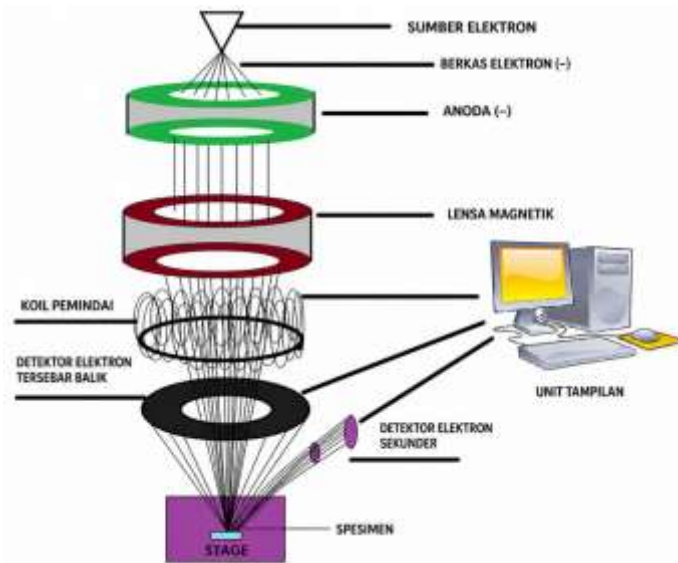
PIM dipilih sebagai sistem pemisahan karena memiliki keunggulan berupa fleksibilitas komposisi, selektivitas tinggi, dan kemungkinan untuk memanfaatkan biomaterial sebagai *carrier* (Kiswandono *et al.*, 2022). Penggunaan Poli-BADGE 4:1 sebagai *carrier* diharapkan dapat meningkatkan interaksi selektif dengan MG sekaligus memberikan kestabilan membran lebih baik. Oleh karena itu, riset ini tidak hanya memberikan kontribusi teoretis pada pengembangan PIM, tetapi juga berpotensi mendukung implementasi teknologi pemisahan limbah berbahaya yang lebih ramah lingkungan pada skala lebih luas.

2.5 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan suatu teknik mikroskopi yang menggunakan sinar elektron yang difokuskan dan dipindai melintasi permukaan sampel untuk memperoleh gambaran morfologi, topografi, dan komposisi unsur dari permukaan tersebut (Chadha *et al.*, 2024). Proses kerja SEM melibatkan percepatan elektron menuju objek, di mana interaksi antara elektron dan sampel menghasilkan berbagai sinyal seperti elektron sekunder, elektron balik (*backscattered*), dan sinar-X khas yang kemudian ditangkap oleh detektor untuk

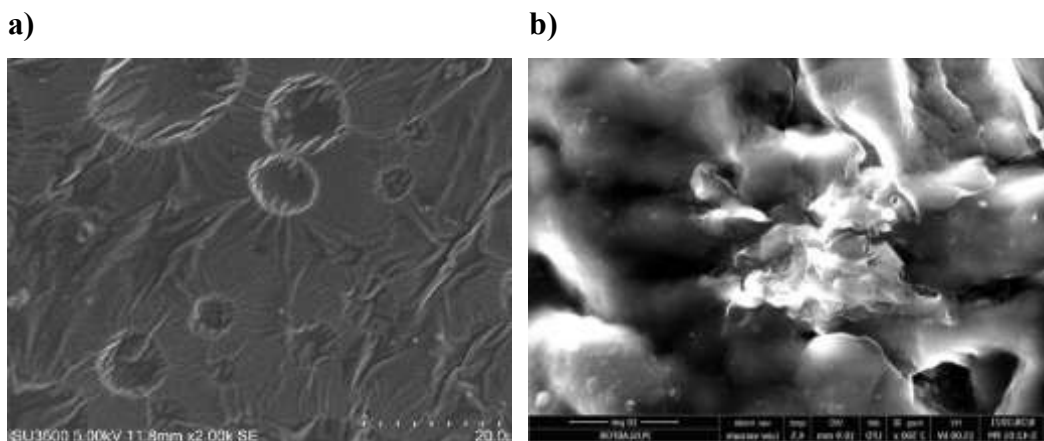
menghasilkan citra dengan resolusi tinggi. Dengan kemampuan pembesaran yang sangat tinggi dan kedalaman fokus yang luar biasa, SEM memungkinkan pengamatan struktur permukaan hingga tingkat mikrometer bahkan nanometer. Sampel yang tidak menghantarkan listrik biasanya memerlukan pelapisan tipis menggunakan bahan konduktif seperti emas atau karbon guna mencegah akumulasi muatan yang dapat mengganggu kualitas gambar (Alqaheem *and* Alomair, 2020).

Prinsip kerja SEM berlandaskan pada interaksi antara berkas elektron berenergi tinggi dengan permukaan sampel. Elektron yang dihasilkan oleh *electron gun* dipercepat menggunakan tegangan tinggi dan diarahkan ke sampel melalui sistem lensa elektromagnetik serta *scanning coil*, sehingga dapat memindai permukaan secara sistematis. Ketika berkas elektron mengenai permukaan, terjadi interaksi yang menghasilkan berbagai sinyal, seperti elektron sekunder (SE) yang memberikan informasi tentang topografi, elektron balik (BSE) yang menghasilkan kontras berdasarkan nomor atom, serta sinar-X karakteristik yang memungkinkan analisis komposisi unsur melalui teknik *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS). Sinyal-sinyal ini ditangkap oleh detektor, diubah menjadi sinyal listrik, dan diproses menjadi citra resolusi tinggi yang ditampilkan pada layar monitor. Mekanisme tersebut memungkinkan SEM menyajikan detail morfologi, struktur permukaan, dan komposisi material hingga skala nanometer, sehingga menjadikannya alat penting dalam berbagai bidang penelitian dan industri (Grover *et al.*, 2022). Komponen perangkat SEM dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Komponen perangkat SEM (Alqaheem *and* Alomair, 2020)

Penggunaan SEM dalam penelitian membran memiliki peranan yang sangat penting karena mampu memberikan informasi detail mengenai morfologi permukaan, ketebalan lapisan, distribusi pori, serta adanya cacat struktural yang terbentuk selama proses fabrikasi (Wu *et al.*, 2024). Menurut Kiswandono *et al* (2023) karakterisasi SEM dilakukan untuk mengamati morfologi permukaan membran PIM sebelum dan sesudah proses transpor fenol. Hasil penelitian dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil SEM membran PIM; a). Sebelum transpor; b). Sesudah transpor (Kiswandono *et al.*, 2023)

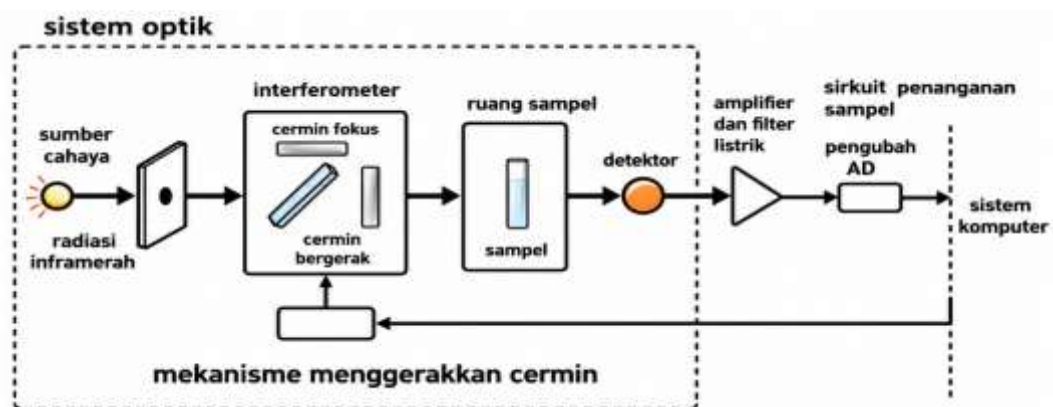
Gambar 8 menunjukkan perubahan morfologi membran PIM sebelum dan sesudah transpor fenol. Sebelum transpor, permukaan membran terlihat lebih halus dan pori-porinya kecil serta relatif merata. Setelah proses transpor, permukaan membran menjadi lebih tidak rata dengan ukuran pori yang lebih besar. Perubahan ini terjadi akibat proses *leaching* atau hilangnya sebagian komponen membran selama transpor fenol sehingga struktur pori membran membesar.

Melalui karakterisasi ini, peneliti dapat memperoleh gambaran langsung tentang homogenitas membran, termasuk tingkat distribusi *carrier* dalam matriks polimer dan kemungkinan terbentuknya aglomerasi partikel yang berpotensi menurunkan efisiensi proses pemisahan (Alqaheem *and* Alomair, 2020). Hal ini relevan karena sifat fisik dari membran berhubungan erat dengan kinerjanya. Membran dengan pori berukuran terlalu besar cenderung menyebabkan kebocoran *carrier* sehingga menurunkan selektivitas pemisahan, sementara membran dengan distribusi pori yang seragam lebih stabil dan umumnya menunjukkan kinerja pemisahan yang lebih optimal (Zajac *and* Sabadash, 2025). Oleh karena itu, SEM tidak hanya berfungsi sebagai alat visualisasi, tetapi juga sebagai sarana penting untuk menghubungkan struktur mikro membran dengan fungsi dan proses pemisahan.

2.6 Spektrofotometri *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

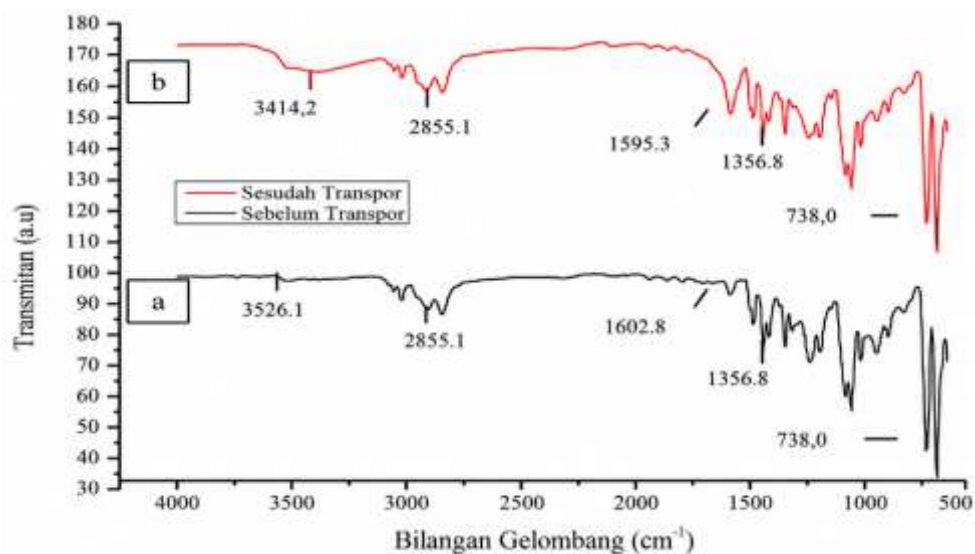
Spektrofotometri *Fourier Transform Infrared* (FTIR) merupakan teknik Spektrofotometri yang digunakan untuk mengenali gugus fungsional dan struktur molekul suatu bahan dengan menganalisis penyerapan radiasi inframerah. Ketika molekul terkena cahaya inframerah, ikatan-ikatan kimia di dalamnya seperti vibrasi peregangan (*stretching*) dan tekukan (*bending*) yang akan menyerap energi pada bilangan gelombang tertentu yang khas bagi masing-masing jenis ikatan (Tkachenko *and* Niedzielski, 2022). FTIR memiliki keunggulan karena tidak memerlukan banyak persiapan sampel, dapat diaplikasikan pada berbagai bentuk padat, cair, gas, maupun film tipis dan tidak merusak sampel. Karena fleksibilitas dan keakuratannya, FTIR menjadi alat yang sangat berguna dalam analisis

material, termasuk untuk .mengevaluasi perubahan kimia pada membran akibat proses modifikasi, degradasi, atau penambahan zat aditif (Abidi, 2021). Prinsip kerja FTIR berawal dari interaksi antara radiasi inframerah dan molekul dalam sampel, di mana energi inframerah diserap pada frekuensi tertentu yang sesuai dengan jenis getaran ikatan kimia, seperti peregangan dan tekukan (Smith, 2011). Sumber cahaya inframerah diarahkan ke dalam interferometer *Michelson*, yang berfungsi untuk membagi dan menggabungkan kembali berkas cahaya guna menghasilkan pola interferensi. Berkas ini kemudian difokuskan ke sampel, dan sebagian panjang gelombang akan diserap tergantung pada gugus fungsional yang terkandung di dalamnya (Abidi, 2021). Hasil dari proses ini berupa interferogram data dalam domain waktu yang kemudian diolah menggunakan transformasi *Fourier* untuk menghasilkan spektrum inframerah. Spektrum tersebut menunjukkan puncak-puncak serapan pada bilangan gelombang tertentu (cm^{-1}), yang menjadi ciri khas molekul tertentu (Smith, 2011). Melalui pendekatan ini, FTIR mampu mengidentifikasi gugus fungsional, memantau perubahan kimia, serta membandingkan struktur molekul pada berbagai jenis bahan, termasuk polimer dan membran (Patkowska *et al.*, 2025). Bagan alat spektrofotometer FTIR dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Bagan alat spektrofotometer FTIR (Setianingsih dan Prananto, 2020)

Kiswando *et al* (2023), karakterisasi membran PIM dilakukan menggunakan analisis FTIR untuk mengetahui perubahan gugus fungsi pada membran sebelum dan sesudah proses transpor fenol. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa hasil FTIR dari membran PIM memiliki perbedaan pada hasil spektra sebelum dan setelah transpor (Gambar 10).



Gambar 10. Spektrum FTIR (a) membran sebelum, dan (b) sesudah transpor (Kiswandono *et al.*, 2023)

Gambar 10 adalah hasil spektrum FTIR membran sebelum dan sesudah transpor yang mengandung *carrier* CO-EDVB 8%. Spektrum menunjukkan bahwa membran PIM memiliki beberapa gugus fungsi utama, yaitu gugus hidroksil ($-OH$), regangan Csp^3-H , cincin aromatik ($C=C$), gugus vinil ($CH_2=CH-$), serta gugus $C-H$ aromatik. Perbandingan spektrum FTIR sebelum dan sesudah proses transpor menunjukkan bahwa gugus fungsi yang teridentifikasi pada membran tidak mengalami perubahan jenis, namun terjadi pergeseran bilangan gelombang serta perubahan intensitas puncak pada beberapa gugus fungsi, terutama pada gugus $-OH$. Pergeseran bilangan gelombang tersebut mengindikasikan adanya interaksi antara gugus hidroksil yang terdapat pada *carrier* Co-EDVB dalam membran dengan gugus hidroksil pada molekul fenol selama proses transpor berlangsung. Selain itu, perubahan intensitas spektrum juga menunjukkan kemungkinan terjadinya penurunan sebagian situs aktif pada membran akibat proses *leaching* selama proses transpor, sehingga analisis FTIR dapat memberikan informasi penting mengenai interaksi kimia serta stabilitas struktur membran sebelum dan sesudah digunakan dalam proses pemisahan.

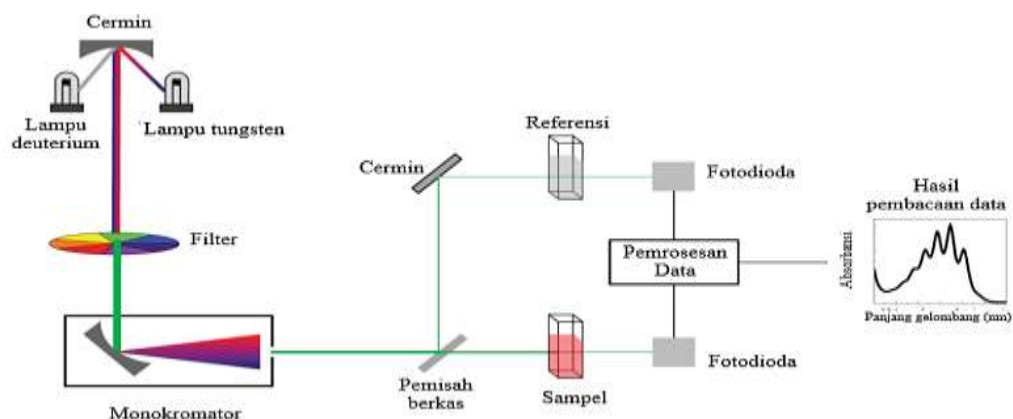
Selain itu beberapa penelitian telah menunjukkan kegunaan FTIR dalam analisis membran. Misalnya, FTIR untuk mengonfirmasi keberadaan gugus amina kuarterner dari *carrier* Aliquat 336 dalam PIM berbasis CTA (Soo *et al.*, 2021),

sementara Arunachalam (2021) mengamati perubahan spektrum FTIR pada kitosan yang dihasilkan dari limbah kulit udang *Fenneropenaeus indicus* setelah berinteraksi dengan *methylene blue*, sehingga terlihat pergeseran dan perubahan intensitas pita pada gugus hidroksil dan gugus lain, menunjukkan adanya interaksi spesifik antara polimer kitosan dan zat warna tersebut. Dalam penelitian ini, FTIR akan digunakan untuk mengkarakterisasi membran PIM berbasis Poli-BADGE 4:1 baik sebelum maupun sesudah transpor MG. Hasil FTIR sebelum transpor akan memberikan informasi mengenai keberadaan gugus fungsional khas dari Poli-BADGE (seperti gugus aromatik, hidroksil, dan sisa epoksida), sedangkan hasil FTIR setelah transpor dapat menunjukkan adanya perubahan intensitas atau pergeseran pita akibat interaksi dengan MG. Sebagai contoh, ikatan elektrostatik antara gugus aromatik bermuatan positif dari MG dengan gugus hidroksil atau aromatik Poli-BADGE dapat menyebabkan pergeseran pita serapan tertentu. Hasil analisis menunjukkan bahwa FTIR tidak hanya berfungsi untuk mengonfirmasi struktur polimer, tetapi juga menjadi bukti adanya interaksi spesifik antara *carrier* dan senyawa target, yaitu MG.

2.7 Spektrofotometri *Ultra Violet-Visible* (UV-Vis)

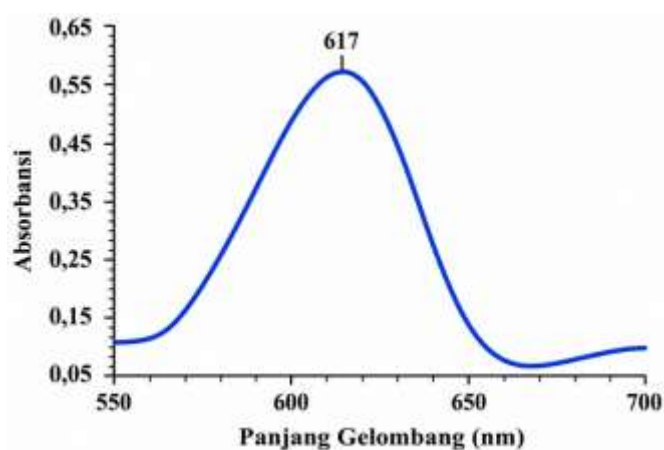
Spektrofotometri UV-Vis (*Ultra Violet-Visible*) adalah metode analisis instrumental yang digunakan untuk mengukur intensitas cahaya (200–400 nm) dan cahaya tampak (400–800 nm) yang diserap atau dilewatkan oleh suatu sampel dibandingkan dengan larutan acuan (blanko) (Yudono, 2017). Molekul yang memiliki kromofor atau struktur ikatan rangkap terkonjugasi akan menyerap cahaya pada panjang gelombang tertentu, sehingga memicu perpindahan elektron dari keadaan dasar ke tingkat energi yang lebih tinggi (Ghosh *and* Nandi, 2024). Pengukuran dilakukan menggunakan kuvet dengan panjang lintasan tertentu agar sesuai dengan prinsip Hukum *Lambert-Beer*, yang menyatakan bahwa nilai absorbansi sebanding dengan konsentrasi zat dan panjang lintasan cahaya ($A = \epsilon \cdot b \cdot c$) dimana (A) absorbansi, (b) tebal sel, tebal kuvet atau tebal larutan, (c) konsentrasi zat terlarut, dan (ϵ) koefisien absorptivitas molar pada panjang gelombang tertentu (Toledo, 2025). Skema spektrofotometer UV-Vis (*Double-*

beam) dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Skema spektrofotometer UV-Vis (*Double-beam*) (Ningrum dkk., 2023)

Hasil penelitian Medidi et al. (2018) menunjukkan bahwa nilai panjang gelombang maksimum (λ_{maks}) yang diperoleh adalah sebesar 617 nm, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Khairil dan Etika, 2022) yang mendapatkan λ_{maks} MG sebesar 618 nm. Sebaliknya, Khairati et al. (2025) memperoleh nilai sedikit berbeda, yaitu 613 nm. Variasi kecil pada hasil tersebut dapat disebabkan oleh perbedaan konsentrasi larutan, kondisi alat, maupun parameter eksperimental lainnya. Panjang gelombang maksimum MG dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Panjang gelombang maksimum *Malachite green* (MG) (Medidi et al., 2018)

Oleh karena itu, konsentrasi suatu zat dapat ditentukan secara akurat melalui pengukuran absorbansi pada panjang gelombang tertentu. Dalam konteks analisis

zat warna sintetis, MG merupakan salah satu senyawa yang memiliki karakteristik spektrum khas pada daerah sinar tampak. MG memiliki λ_{maks} sekitar 617 nm, yang berasal dari transisi elektronik $\pi \rightarrow \pi$ pada cincin aromatik terkonjugasi (Medidi *et al.*, 2018). Keberadaan puncak serapan yang tajam dan spesifik pada $\lambda_{\text{maks}} \approx 618$ nm menjadikan spektrofotometri UV-*Vis* sebagai metode utama dalam penentuan konsentrasi MG pada fase sumber maupun fase penerima (Apolônio *et al.*, 2020). Teknik ini mampu mendeteksi MG hingga konsentrasi skala mikromolar, dengan limit deteksi tercatat sekitar $0,41 \mu\text{mol L}^{-1}$ dan limit kuantifikasi $1,37 \mu\text{mol L}^{-1}$, sehingga sangat sesuai digunakan untuk memantau efisiensi proses pemisahan berbasis membran (El-Sheekh *et al.*, 2023).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2025 – Februari 2026 di Laboratorium Kimia Analitik dan Instrumentasi, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Karakterisasi *carrier* Poli-BADGE 4:1 dan membran PIM menggunakan instrumen *Fourier Transform Infrared* (FTIR *Agilent Cary 650*), *Scanning Electron Microscopy* (SEM *zeiss EVO 10M*), dan *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy* (ICP-OES *Varian 715/ES*) dilakukan di UPA Laboratorium Terpadu Universitas Lampung. Analisis menggunakan Spektrofotometer UV-*Vis* (*Shimadzu UV- 1780 Double Beam*) dilakukan di Laboratorium Kimia Analitik dan Instrumentasi, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Adapun alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah neraca digital analitik (*Galaxy HR-150A* 152 gram x 0,1 mg), oven, botol gelap, pipet tetes, *magnetic stirrer*, gelas ukur, batang pengaduk, *magnetic bar*, spatula, tabung reaksi, chamber berdiameter 3,5 cm dengan kapasitas 50 mL, pH meter, cawan petri, gelas beaker, pinset, labu takar, *thickness gauge* (Mitutoyo 7301 *Dial Thickness Gauge* 0-10 mm), FTIR, SEM, UV-*Vis*, ICP-OES, dan cetakan membran.

3.2.2 Bahan

Adapun bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah Polivinil klorida (PVC), MG, Poli-BADGE 4:1, Dibenzil Eter (DBE), Tetrahidrofuran (THF), akuabides, asam nitrat (HNO_3), tisu, plastik *wrap*, aluminium foil, timbal(II) karbonat (PbCO_3), dan tembaga(II) sulfat pentahidrat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

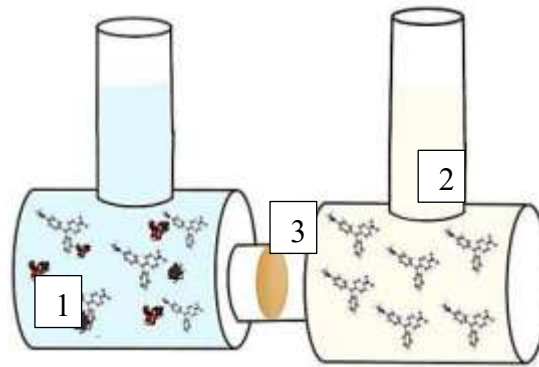
3.3 Pembuatan Membran *Polymer Inclusion Membrane* (PIM)

Dicetak membran PIM menggunakan tiga variasi berat, yaitu 0,2700 g, 0,5400 g, dan 1,0800 g dilengkapi dengan *magnetic stirrer* (Tabel 1). Pada masing-masing cetakan, campurkan polimer PVC, DBE, dan Poli-BADGE 4:1 dalam pelarut THF sebanyak 10 mL. Setelah proses penguapan pelarut selama tiga hari, diperoleh membran polimer dengan variasi berat cetak.

Tabel 1. Komposisi penyusun membran

Membran	Carrier		PVC		DBE		Total	
	g ($\times 10^{-2}$)	mol ($\times 10^{-3}$)	g ($\times 10^{-2}$)	mol ($\times 10^{-3}$)	g ($\times 10^{-2}$)	Mol ($\times 10^{-3}$)	g ($\times 10^{-2}$)	mol ($\times 10^{-3}$)
T ₂₇	2,7	0,0793	8,64	1,38	15,56	0,785	26,90	2,24
T ₅₄	5,4	0,159	17,28	2,76	31,32	1,58	54,00	4,50
T ₁₀₈	10,8	0,317	34,56	5,53	62,64	3,16	108,00	9,01

Membran PIM ditimbang sebelum digunakan pada proses transpor. MG sebanyak 25 ppm sebagai fasa sumber dan HNO_3 sebagai fasa penerima berfungsi sebagai senyawa pengikat. SEM dan spektrofotometer FTIR menjadi instrumen yang akan digunakan untuk mengkarakterisasi membran sebelum dan sesudah transpor. Alat transpor yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Alat transpor 1) fasa sumber, 2) fasa penerima, 3) membran PIM (Kiswando *et al.*, 2024)

3.4 Uji Porositas dan Serapan Air Membran

Porositas membran diuji melalui perendaman membran PIM dalam 10 mL akuabides selama 24 jam pada suhu ruang. Setelah perendaman, membran dikeringkan menggunakan tisu untuk menghilangkan air pada permukaan, kemudian ditimbang untuk memperoleh berat membran basah (W_1). Selanjutnya, membran dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C selama 6 jam hingga mencapai berat konstan, didinginkan pada suhu ruang, dan ditimbang kembali untuk memperoleh berat membran kering (W_2). Data berat yang diperoleh digunakan untuk menghitung persentase porositas membran berdasarkan Persamaan 1 (Suryandari, 2020).

$$\text{Porositas} = \frac{W_1 - W_2}{\rho_w \times V_t} \quad (1)$$

Keterangan :

W_1 : berat membran basah (g)

W_2 : berat membran kering (g)

ρ_w : densitas air (1 g/cm^3)

ρ_p : densitas Poli-BADGE 4:1 ($1,12 \text{ g/cm}^3$)

V_1 : volume membran basah (cm^3)

Selain porositas, kemampuan membran dalam menyerap air juga dievaluasi melalui uji serapan air. Membran PIM ditimbang untuk memperoleh berat awal atau berat kering (W_d), kemudian direndam dalam 10 mL akuabides selama 6 jam pada suhu ruang. Setelah perendaman, membran dikeringkan menggunakan tisu untuk menghilangkan air pada permukaan dan ditimbang kembali untuk

memperoleh berat membran basah (W_w). Nilai yang diperoleh digunakan untuk menghitung persentase serapan air membran berdasarkan Persamaan 2 (Lusiana dkk., 2020).

$$\text{Serapan Air} = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan :

W_w : berat membran basah (g)

W_d : berat membran kering (g)

3.5 Optimasi Transpor *Malachite green* (MG)

3.5.1 Variasi pH *Malachite green* (MG) pada Fasa Sumber

Lima membran PIM dengan ketebalan standar (T_{54}) dipasang masing-masing pada lima pipa transpor (*chamber*) berdiameter 3,5 cm. Setiap chamber diisi dengan 50 mL larutan HNO_3 1 M sebagai fase penerima dan 50 mL larutan MG berkonsentrasi 25 ppm sebagai fase sumber. pH dari fase sumber divariasikan secara bertahap menjadi pH 5, 6, 7, 8, dan 9. Pipa transpor ditutup dan diaduk selama 5 jam menggunakan pengaduk magnet. Setelah diaduk, 5 mL sampel diambil dari fasa sumber dan fasa penerima. Konsentrasi MG dalam fasa sumber dan fasa penerima dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-*Vis* pada λ_{maks} 617 nm.

3.5.2 Variasi Konsentrasi HNO_3 pada Fasa Penerima

Membran PIM dengan ketebalan medium diletakan di bagian tengah pipa transpor. Sebanyak 50 mL larutan MG dengan konsentrasi 25 ppm dimasukkan ke dalam fase sumber yang telah disesuaikan pada pH optimum. Sementara itu, fase penerima diisi masing-masing dengan 50 mL larutan asam nitrat (HNO_3) pada lima variasi konsentrasi: 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, dan 1,50 M. Tutup pipa transpor dan diaduk selama 5 jam dengan pengaduk magnet. Setelah diaduk, fasa sumber dan fasa penerima diambil sebanyak 5 mL. Sampel dari fasa sumber dan fasa penerima diukur menggunakan spektrofotometer UV-*Vis* pada λ_{maks} 617 nm.

3.5.3 Variasi Ketebalan Membran

Membran PIM yang telah dicetak dalam tiga variasi ketebalan tipis (T_{27}), medium (T_{54}), dan tebal (T_{108}) diletakkan di bagian tengah pipa transpor. Masing-masing chamber diisi dengan 50 mL larutan HNO_3 pada kondisi optimum sebagai fase penerima, serta 50 mL larutan MG berkonsentrasi 25 ppm dengan pH optimum sebagai fase sumber. Pipa transpor ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet selama 5 jam. setelah diaduk, sampel 5 mL diambil dari fasa penerima dan fasa sumber. Analisis dilakukan dengan spektrofotometer UV-*Vis* pada λ_{maks} 617 nm.

3.5.4 Variasi Konsentrasi Carrier

Membran PIM dengan komposisi optimum dicetak dengan variasi konsentrasi *carrier* (Tabel 2), kemudian dipasang di bagian tengah pipa transpor. Sebanyak 50 mL larutan HNO_3 pada kondisi optimum digunakan sebagai fase penerima, sementara 50 mL larutan MG berkonsentrasi 25 ppm dengan pH optimum digunakan sebagai fase sumber. Pipa transpor ditutup dan pengaduk magnet digunakan untuk mengaduk larutan selama 5 jam. 5 mL sampel dari fasa sumber dan penerima diambil, dianalisis dengan spektrofotometer UV-*Vis* pada λ_{maks} 617 nm.

Tabel 2. Variasi konsentrasi *carrier*

Membran	Konsentrasi (M)	Poli-BADGE 4:1 (g)	PVC (g)	DBE (g)	Total (g)
1	0,06	0,0067	0,1728	0,3132	0,5261
2	0,07	0,0134	0,1728	0,3132	0,5346
3	0,08	0,0201	0,1728	0,3132	0,5400
4	0,09	0,0267	0,1728	0,3132	0,5462
5	0,1	0,0334	0,1728	0,3132	0,5529

3.5.5 Variasi Waktu Transpor

Membran PIM yang telah dicetak dengan ketebalan optimum dan mengandung *carrier* diletakkan di bagian tengah pipa transpor. Sebanyak 50 mL larutan HNO₃ pada kondisi optimum digunakan sebagai fase penerima, sementara 50 mL larutan MG berkonsentrasi 25 ppm dengan pH optimum digunakan sebagai fase sumber. Setelah pipa transpor ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet selama 1, 3, 5, 7, 9 dan 13 jam. Ambil 5 mL dari fasa sumber dan fasa penerima untuk diukur konsentrasi MG. Analisis dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-*Vis* dengan λ_{maks} 617 nm.

3.5.6. Studi Kompetisi Transpor *Malachite green* (MG) pada Limbah Buatan

Untuk membuat sampel limbah buatan, ketiga larutan yaitu MG, CuSO₄.5H₂O dan PbCO₃ dengan konsentrasi masing-masing 25 ppm dicampurkan menjadi satu. Setelah itu, dilakukan transpor dengan menggunakan membran PIM yang telah dicetak. Membran PIM dengan ketebalan optimum diletakkan di tengah pipa transpor, ditambahkan 50 mL limbah buatan sebagai fasa sumber dan 50 mL HNO₃ kondisi optimum dimasukkan sebagai fasa penerima. Setelah itu, pipa transpor ditutup dan pengaduk magnet digunakan untuk mengaduk fasa sumber dan fasa penerima pada suhu kamar dengan waktu optimum. Untuk mengetahui kada unsur logam pada fasa penerima diukur dengan ICP-OES. Kehadiran logam Cu(II) dan Pb(II) dilihat dari hasil karakterisasi dengan spektrofotometer FTIR.

3.5.7 Analisis Parameter Transpor

Hasil dan data transpor yang diperoleh, lalu ditetapkan kinetika transpor yang terdiri dari orde reaksi, permeabilitas (P), fluks (J), koefisien rejeksi (R), *%recovery*, dan *%removal* pada transpor MG. Perhitungan seperti terlihat pada Persamaan 3, 4, 5, 6, dan 7 (Gherasim *et al.*, 2011).

$$\%Recovery = \frac{C_{penerima}}{C_0 \text{ sumber}} \times 100 \quad (3)$$

Keterangan:

$\%Recovery$ = %MG pada fasa penerima
 C_0 sumber = Konsentrasi awal MG pada fasa sumber (ppm)
 C_1 penerima = Konsentrasi MG pada fasa penerima (ppm)

$$\%Removal = \frac{(C_0 \text{ sumber} - C_1 \text{ sumber})}{C_0 \text{ sumber}} \times 100 \quad (4)$$

Keterangan:

$\%Recovery$ = %MG pada fasa penerima
 C_0 sumber = Konsentrasi awal MG pada fasa sumber (ppm)
 C_1 sumber = Konsentrasi MG pada fasa sumber (ppm)

$$\text{Permeabilitas membran } P \left(\frac{m}{s} \right) = - \frac{V_f}{A \times t} \ln \frac{[C]_t}{[C]_0} \quad (5)$$

Keterangan:

V_f = Volume fluida (m^3)
 A = Luas permukaan membran (m)
 T = Waktu (jam)
 $[C]_0$ = Konsentrasi awal fasa sumber (ppm)
 $[C]_t$ = Konsentrasi MG yang ada pada fasa penerima (ppm)

$$\text{Fluks } (J) \quad J = \frac{V}{A \times t} \quad (6)$$

Keterangan:

J = Fluks (L/m^2 Jam)
 V = Volume sampel (L)
 A = Luas permukaan membran (m^2)
 t = Waktu (jam)

$$\text{Koefisien Rejeksi } (R) = \left(1 - \frac{C_p}{C_0} \right) \times 100\% \quad (7)$$

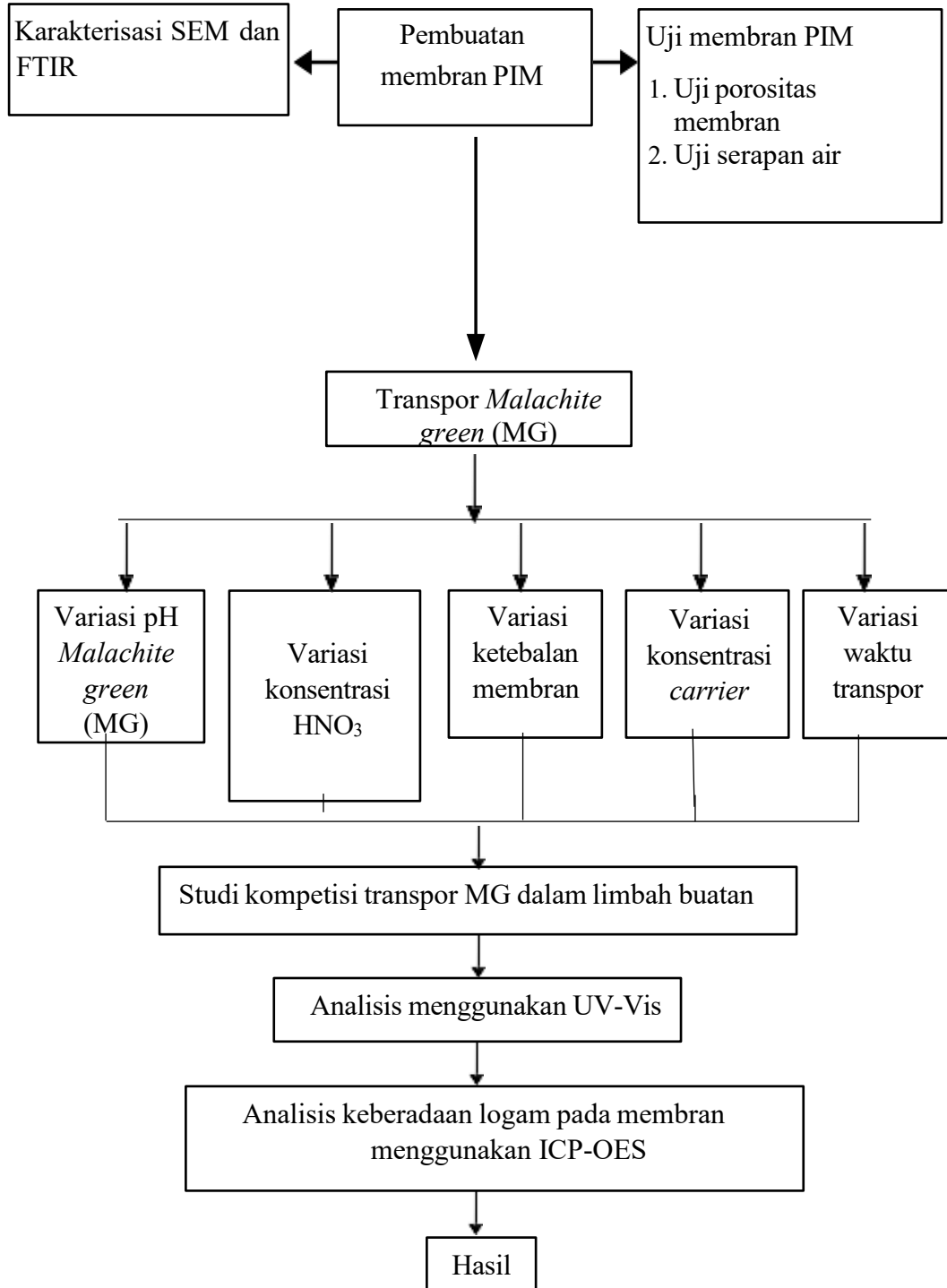
Keterangan:

R = Koefisien rejeksi (%)
 C_p = Konsentrasi MG pada fasa penerima (ppm)
 C_0 = Konsentrasi awal fasa sumber saat t optimum (ppm)

Selanjutnya, analisis membran PIM sebelum dan setelah transpor menggunakan spektrofotometer FTIR untuk gugus fungsi dan SEM untuk melihat morfologi permukaan pada membran.

3.6 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Diagram alir

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil karakterisasi FTIR dan SEM menunjukkan bahwa membran PIM berbasis Poli-BADGE 4:1 tetap stabil secara kimia setelah transpor MG, namun mengalami perubahan morfologi. Analisis FTIR mengindikasikan tidak adanya gugus fungsi baru, sedangkan SEM menunjukkan permukaan yang lebih kasar disertai munculnya pori dan retakan akibat proses difusi.
2. Transpor MG mencapai kondisi optimum pada pH fasa sumber 7, konsentrasi HNO_3 fasa penerima 0,75 M, ketebalan membran medium (T_{54}) dan konsentrasi *carrier* 0,07 M selama waktu transpor 9 jam dengan %*removal* sebesar 90,67%.
3. Kehadiran ion Pb(II) dan Cu(II) dalam limbah buatan menyebabkan penurunan efisiensi transpor MG akibat terjadinya kompetisi pada situs aktif *carrier*. Meskipun demikian, membran PIM masih memiliki selektivitas yang baik terhadap MG, yang ditunjukkan oleh nilai faktor pemisahan MG/Pb(II) sebesar 33,45 dan MG/Cu(II) sebesar 47,14.

5.2 Saran

Saran dari penelitian ini adalah untuk melakukan uji stabilitas dan penggunaan ulang membran guna mengetahui ketahanan serta konsistensi kinerja transpor dalam siklus berulang. Selain itu, pengujian pada limbah industri nyata dengan komposisi yang lebih kompleks perlu dilakukan untuk mengevaluasi selektivitas dan efektivitas membran dalam kondisi aplikasi sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidi, N. 2021. *FTIR Microspectroscopy*. Springer Nature. New York.
- Alqaheem, Y., and Alomair, A. A. 2020. Microscopy and spectroscopy techniques for characterization of polymeric membranes. *Membranes*. 10(2): 33.
- Apolônio, L. F., de Oliveira, A. F., Almeida, C. A., Neves, A. A., de Queiroz, M. E. L. R., and Zampier, L. M. 2020. Direct determination of *malachite green* and *leucomalachite green* in natural waters by exploiting solid-phase sorption and digital image. *Orbital*. 12(4): 193–204.
- Aprilia, K. C., Safitri, N. U., Rakhman, K. A., and Abadi, A. 2025. *Malachite green* transport using polymer inclusion membrane method with co-EDVB as carrier. *Walisongo Journal of Chemistry*. 8(1): 87–97.
- Arunachalam, K. D. 2021. Bio-adsorption of methylene blue dye using chitosan extracted from *Fenneropenaeus indicus* shrimp shell waste. *Journal of Aquaculture & Marine Biology*. 10(4): 146–150.
- Chadha, V., Miller, N. C., Ding, R., Beschoner, K. E., and Jacobs, T. D. B. 2024. Evaluating scanning electron microscopy for the measurement of small-scale topography. *Surface Topography: Metrology and Properties*. 12(3).
- Djunaidi, M.C., Hudiyanti, D., Gunawan., Khabibi., dan Maharani, N.D. 2023. *Seri Buku Ajar Pemisahan Kimia: Membran Cair*. CV. Bintang Semesta Media. Yogyakarta.
- El-Sheekh, M. M., Deyab, M. A., Hassan, N. I., and Abu Ahmed, S. E. 2023. Bioremediation of *malachite green* dye using sodium alginate, *Sargassum latifolium* extract, and their silver nanoparticles. *BMC Chemistry*. 17(1): 1–15.
- Effendi, M. C. 2021. *Monograf Nanopartikel Zinc Oxide Propolis Sebagai Liner Untuk Proteksi Pulpa Gigi Terhadap Bakteri Streptococcus Mutans*. UMM Press. Malang.
- Elbestawy, M. K. M., El-Sherbiny, G. M., and Moghannem, S. A. 2023. Antibacterial, antibiofilm and anti-inflammatory activities of eugenol clove essential oil against resistant *Helicobacter pylori*. *Molecules*. 28(6).

- Faruq A. U., and Ibrahim, I. M. 2025. Comprehensive Overview of Eugenol: Focusing on Sources, Structure, Pharmacological Activities, Mechanisms of Action, Safety Profile, and Applications. *Journal of Drug Design and Medicinal Chemistry*. 11 (3): 33-47.
- Feng, X., Zhu, J., Jin, J., Wang, Y., Zhang, Y., and Van, B. 2024. Polymers of intrinsic microporosity for membrane-based precise separations. *Progress in Materials Science*. 144: 101285–101285.
- Ghaderi, N., Dolatyari, L., Kazemi, D., Sharafi, H. R., Shayanijam, H., and Yaftian, M. Z. 2021. Application of A Polymer Inclusion Membrane Made of Cellulose Triacetate Base Polymer and Trioctylamine For the Selective Extraction of Bismuth(III) From Chloride Solutions. *Journal of Applied Polymer Science*. 1-13.
- Ghosh, S., and Nandi, S. 2024. A comprehensive review on UV-visible spectroscopy and its application. *International Journal of All Research Education and Scientific Methods*. 12(1).
- Grover, A., Sinha, R., Jyoti, D., and Faggio, C. 2022. Imperative role of electron microscopy in toxicity assessment: A review. *Microscopy Research and Technique*. 85(5): 1976–1989.
- Hussein, A. S., and Atiyah, A. J. 2024. Removal of *Malachite green* Dye by Adsorption over the Synthesized Composites of Iron Oxide and Nickel Oxide Nanoparticles. 14(1): 295-310.
- He, J., Mo, P., Luo, Y. S., and Yang, P. H. 2023. Strategies for solving the issue of *malachite green* residues in aquatic products: A review. *Aquaculture Research*.
- Imtiaz, T., Shah, A., Ullah, N., Iftikhar, F.J., Shah, I., Shah, S.M., and Shah, S.S. 2022. Electrochemical nanosensor for ultrasensitive detection of *malachite green* and monitoring of its photocatalytic degradation. *NPJ Clean Water*. 5(1): 1–13.
- Khairati, R. M., Kiswandono, A. A., Rinawati, and Maruf, D. I. 2025. Application of Polymer Inclusion Membrane in the Transport of *Malachite green* Dye Using Copolymer(Eugenol-Diallyl Phthalate) 2% as a *Carrier*. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 28(1): 8-15.
- Khairil, D. F., and Etika, S. B. 2022. Optimasi penyerapan *malachite green* menggunakan C-sinamalkaliks[4]resorsinarena hasil sintesis sebagai adsorben. *Jurnal Periodic Jurusan Kimia UNP*. 11(2): 56.
- Kiswandono, A. A., Antika, W., Rahmawati, A., and Rinawati, R. 2023. Investigating phenol transport using copoly(eugenol-DVB) 8% as a *carrier* with the supported liquid membrane method. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*.

26(10): 372–380.

- Kiswandono, A. A., Ningsih, N., Sindiani, A.V., Rinawati, and Qudus, H. I. 2024. Phenol solutions recovery as water pollutants with eugenol cross-linked diallyl phthalate using supported liquid membrane. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 10(SI): 53–70.
- Kiswandono, A. A., Mudasir, Siswanta, D., Aprilita, N. H., Santosa, S. J., and Hadi, S. L. 2020. Synthesis of a New Crosslinked Poly-Bisphenol A Diglycidyl Ether (Poly-BADGE) as a *Carrier* in Phenol Transport. *Kuwait J. Sci.* 47(4):39-48.
- Kiswandono, A. A., Nusantari, C. S., Rinawati, R., and Hadi, S. 2022. Optimization and evaluation of polymer inclusion membranes based on PVC containing copoly-EDVB 4% as a *carrier* for the removal of phenol solutions. *Membranes*. 12(3).
- Kiswandono, A. A., Rahmawati, A., Fadillah, N., Rinawati, R., Ferdias, P., and Putra, H. E. 2025. Effect of salt on the stability of PIM membranes containing poly-BADGE *carrier* for phenol transport.
- Kiswandono, A. A., Rahmawati, A., Oktalina, N. R., Sindiani, A.V., Nurhasanah, Utama, W. T., Lusiana, R. A., Suharso, and Rinawati. 2023. Utilization of the polymer inclusion membrane method for phenol transport using co-EDVB 8% as a *carrier*. *Rasayan Journal of Chemistry*. 16(3): 1637–1645.
- Kiswandono, A. A., Rahmawati, A., Rafi, F. M., Dewi, N. P., Ferdias, P., Putra, H. E., and Rinawati. 2024. The effect of comparative concentrations of poly-BADGE as a *carrier* on the polymer inclusion membrane method of phenol transport. *Rasayan Journal of Chemistry*. 17(1): 221–229.
- Kiswandono, A. A., Sindiani, A. V., Khotimah, R. K., Rabbani, M. B., Kurniawan, B., Rinawati, R., and Putra, H. E. 2024. Transport of *malachite green* using the polyeugenol-based polymer inclusion membrane (PIM) method. *Journal of Membrane Science and Research*. 10(1): 1–5.
- Kowalewska, A., and Majewska-Smolarek, K. 2023. Eugenol-based polymeric materials—antibacterial activity. *Antibiotics*. 12(1570): 1–24.
- Kusumaningrum, D. I. P., Sudarni, D. H. A., and Wahyuningsih, S. 2022. Optimasi pengaruh waktu kontak dan dosis adsorben limbah daun kayu putih (*Melaleuca cajuputi*) dengan metode isoterm adsorpsi Langmuir. *Jurnal Teknik Kimia USU*. 11(2): 72–79.
- Kusumlata, Ambade, B., Kumar, A., and Gautam, S. 2024. Sustainable solutions: Reviewing the future of textile dye contaminant removal with emerging biological treatments. *Limnological Review*. 24(2): 126–149.
- Mawarnis, E. R., dan Umar, A. A. 2024. Kimia Analisis Instrumen. Deepublish

Digital. Yogyakarta.

- Margareta, M. A. H., and Wonorahardjo, S. 2023. Optimasi metode penetapan senyawa eugenol dalam minyak cengkeh menggunakan gas chromatography–mass spectrum dengan variasi suhu injeksi. *Jurnal Sains dan Edukasi Sains*. 6(2): 95–103.
- Medidi, S., Markapurapu, S., Kotupalli, M. R., Chinnam, R. K. R., Susarla, V. M., Gandham, H. B., and Sanasi, P. D. 2018. Visible light photocatalytic degradation of methylene blue and *malachite green* dyes with CuWO₄-GO nano composite. *Modern Research in Catalysis*. 7(2): 17–34.
- Ningrum, D. M., Permana, D. A. S., Harahap, M. R., Ulandari, A. S., dan Suhada, A. 2023. *Buku Ajar Kimia Farmasi*. Buku Elektronik. Yogyakarta.
- Nowik-Zajac, A., and Sabadash, V. 2025. Recent developments in polymer inclusion membranes: Advances in selectivity, structural integrity, environmental applications and sustainable fabrication. *Membranes*. 15(8).
- Osman, A. I., Nasr, M., Farghali, M., Bakr, S. S., Eltaweil, A. S., Rashwan, A. K., and Abd El-Monaem, E.M. 2024. Machine learning for membrane design in energy production, gas separation, and water treatment: A review. *Environmental Chemistry Letters*. 22(2).
- Pasieczna-Patkowska, S., Cichy, M., and Flieger, J. 2025. Application of Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy in characterization of green synthesized nanoparticles. *Molecules*. 30(3): 1–36.
- Pramanik, S., and Biswas, J. K. 2024. Histopathological fingerprints and biochemical changes as multi-stress biomarkers in fish confronting concurrent pollution and parasitization. *Science*. 27(12): 111432.
- Purwayantie, S., Saputri, N. E., dan Priyono, S. 2022. Metode Pemisahan Senyawa Fenolat Dengan Filtrasi Membran. NEM. Pekalongan.
- Qian, W., Deng, Y., Zhang, Y., Li, Y., Fang, Y., Li, X., Liang, J., and Liu, H. 2024. Dyeing sludge-derived biochar for efficient removal of *malachite green* from dyeing wastewater. *Water Emerging Contaminants and Nanoplastics*. 3(3).
- Rahim, E. A., Istiqomah, N., Almilda, G., Ridhay, A., Sumarni, N. K., and Indriani. 2020. Antibacterial and antioxidant activities of polyeugenol with high molecular weight. *Indonesian Journal of Chemistry*. 20(3): 722–728.
- Rensini, W. A., Kadang, L., Lapailaka, T., Naat, J. N., Pingak, R. K., Kapitan, O. B. and Nitti, F. 2024. Uji Stabilitas Polymer Inclusion Membrane dari Polimer Pendukung PVC, Ekstraktan D2EHPA, dan Plasticizer Asam Oleat pada Kondisi Asam. *Jurnal Beta Kimia*. 4(1): 1–18.

- Sahu, L. R., Yadav, D., Borah, D., Gogoi, A., Goswami, S., Hazarika, G., Karki, S., Borpatra Gohain, M., Sawake, S. V., Jadhav, S. V., Chatterjee, S., and Ingole, P. G. 2024. Polymeric membranes for liquid separation: Innovations in materials, fabrication, and industrial applications. *Polymers*. 16(23).
- Setianingsih, T., dan Prananto, Y. P. 2020. Spektroskopi Inframerah Untuk Karakterisasi Material Anorganik. UB Press. Malang.
- Sharma, J., Sharma, S. and Soni, V. 2023. Toxicity of *malachite green* on plants and its phytoremediation: A review. *Regional Studies in Marine Science*. 62. 102911.
- Smith, B. C. 2011. *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy*. CRC Press. Boca Raton.
- Soo, J. A. L., Shoparwe, N. F., Otitoju, T. A., Mohamad, M., Tan, L. S., Li, S., and Makhtar, M. M. Z. 2021. Characterization and kinetic studies of poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) polymer inclusion membrane for the *malachite green* extraction. *Membranes*. 11(9).
- Tkachenko, Y., and Niedzielski, P. 2022. FTIR as a method for qualitative assessment of solid samples. *Molecules*. 27(24): 8846.
- Toledo, M. 2025. *UV/VIS Spectrophotometry*. Mettler-Toledo International.
- Wang Y., Kuang S., and Wang M. 2022. Effect of Hydrothermal Pretreatment on Anaerobic Digestion of Erythromycin Fermentation Dregs: Biogas Production, Antibiotic Resistance Gene Evolution, and Microbial Community Dynamics. *Front. Environ. Sci.* 10: 905494.
- Wu, J., Xiao, M., Quezada-Renteria, J. A., Hou, Z., and Hoek, E. M. V. 2024. Sample preparation matters: Scanning electron microscopic characterization of polymeric membranes. *Journal of Membrane Science Letters*. 4(1): 100073.
- Yang, C. W., Chang, Y. T., Hsieh, C. Y., and Chang, B. V. 2021. Effects of *malachite green* on the microbiomes of milkfish culture ponds. *Water (Switzerland)*. 13(4).
- Yaseen, D. A., and Scholz, M. 2019. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: A critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 16(2).
- Yudono, B. 2017. Spektrometri. *Simetri*. Palembang.
- Yonel, S. H., Nasra, E., Oktavia, B., and Etika, S. B. 2021. Optimasi penyerapan zat warna *malachite green* menggunakan karbon aktif dari kulit pisang kepok (*Musa balbisiana* Colla). *Periodic*. 10(2): 28–32.