

**OPTIMASI DAN EVALUASI KINERJA *POLYMER INCLUSION MEMBRANE*
(PIM) YANG MENGANDUNG SENYAWA PEMBAWA KOPOLI EUGENOL
DIALIL FTALAT 10% UNTUK TRANSPOR *MALACHITE GREEN* (MG)**

(Tesis)

Oleh

**RUSYDA MAULIDA KHAIRATI
2327011001**



**PROGRAM STUDI MAGISTER KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

OPTIMASI DAN EVALUASI KINERJA *POLYMER INCLUSION MEMBRANE* (PIM) YANG MENGANDUNG SENYAWA PEMBAWA KOPOLI EUGENOL DIALIL FTALAT 10% UNTUK TRANSPOR *MALACHITE GREEN* (MG)

Oleh

RUSYDA MAULIDA KHAIRATI

Malachite Green adalah senyawa pewarna yang umum digunakan untuk mewarnai sutra, wol, kapas, dan kertas, serta berfungsi sebagai pewarna bakteri dalam analisis mikroskopis sel dan jaringan. Penelitian ini mengeksplorasi proses transpor *Malachite Green* menggunakan membran *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) berbasis kopolimer eugenol dialil ftalat (Ko-EDAF) 10%. Penelitian difokuskan pada beberapa parameter optimasi, meliputi pH fasa sumber, konsentrasi HNO_3 pada fasa penerima, ketebalan membran, serta waktu transpor. Membran PIM disintesis dengan melarutkan Co-EDAF 10%, polivinil klorida (PVC), dan dibenzil eter (DBE) dalam pelarut *tetrahydrofuran* (THF). Konsentrasi *Malachite Green* setelah transpor dianalisis menggunakan spektrofotometri UV-Vis pada panjang gelombang 614 nm. Hasil menunjukkan efisiensi transpor mencapai 84,60% pada kondisi optimal pH fasa sumber 9, konsentrasi HNO_3 0,75 M, ketebalan membran T_{54} , dan durasi transpor 12 jam. Evaluasi terhadap jenis garam menunjukkan bahwa penambahan NaNO_3 0,1 M pada fasa sumber menghasilkan efisiensi transpor sebesar 86,34%, sedangkan pada variasi konsentrasi garam penambahan NaNO_3 0,001 M pada fasa sumber dan penerima menghasilkan efisiensi masing-masing sebesar 86,68% dan 88,39%. Uji pemakaian berulang membran menunjukkan efisiensi transpor tertinggi pada pemakaian berulang tanpa pencucian sebesar 91,68%. Membran PIM memiliki masa pakai hingga 69 hari, terutama saat ditambahkan garam NaNO_3 dalam fasa sumber.

Kata kunci: Ko-EDAF, *Malachite Green*, PIM, Optimasi, Evaluasi

ABSTRACT

OPTIMIZATION AND PERFORMANCE EVALUATION OF POLYMER INCLUSION MEMBRANE (PIM) CONTAINING 10% EUGENOL-DIALLYL PHTHALATE COPOLYMER AS A CARRIER FOR THE TRANSPORT OF MALACHITE GREEN (MG)

By

RUSYDA MAULIDA KHAIRATI

Malachite Green is a dye compound commonly used to color silk, wool, cotton, and paper, and also functions as a bacterial stain in microscopic analysis of cells and tissues. This study explores the transport process of Malachite Green using a Polymer Inclusion Membrane (PIM) based on 10% eugenol-diallyl phthalate copolymer (Co-EDAF). The research focuses on several optimization parameters, including the pH of the source phase, HNO_3 concentration in the receiving phase, membrane thickness, and transport duration. The PIM membrane was synthesized by dissolving 10% Co-EDAF, polyvinyl chloride (PVC), and dibenzyl ether (DBE) in tetrahydrofuran (THF). The concentration of Malachite Green after transport was analyzed using UV-Vis spectrophotometry at a wavelength of 614 nm. The results showed a transport efficiency of 84.60% under optimal conditions: source phase pH of 9, HNO_3 concentration of 0.75 M, membrane thickness of T_{54} , and transport duration of 12 hours. Evaluation of salt type revealed that the addition of 0.1 M NaNO_3 to the source phase resulted in a transport efficiency of 86.34%. For salt concentration variations, the addition of 0.001 M NaNO_3 to both the source and receiving phases yielded transport efficiencies of 86.68% and 88.39%, respectively. Reusability tests of the membrane showed the highest efficiency (91.68%) in repeated use without washing. The PIM membrane demonstrated a lifespan of up to 69 days, particularly when NaNO_3 was added to the source phase.

Keywords: Co-EDAF, Malachite Green, PIM, Optimization, Evaluation

**OPTIMASI DAN EVALUASI KINERJA *POLYMER INCLUSION MEMBRANE*
(PIM) YANG MENGANDUNG SENYAWA PEMBAWA KOPOLI EUGENOL
DIALIL FTALAT 10% UNTUK TRANSPOR *MALACHITE GREEN* (MG)**

Oleh
Rusyda Maulida Khairati

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER SAINS**

Pada

**Program Studi Magister Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung**



**PROGRAM STUDI MAGISTER KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Tesis : OPTIMASI DAN EVALUASI KINERJA
POLYMER INCLUSION MEMBRANE (PIM)
YANG MENGANDUNG SENYAWA
PEMBAWA KOPOLI EUGENOL DIALIL
FTALAT 10% UNTUK TRANSPOR
MALACHITE GREEN (MG)

Nama Mahasiswa : Rusyda Maulida Khairati

Nomor Pokok Mahasiswa : 2327011001

Program Studi : Magister Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



1. Komisi Pembimbing

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Agung'.

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

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rinawati'.

Rinawati, Ph.D
NIP. 197104142000032001

2. Ketua Prodi Magister Kimia FMIPA Unila

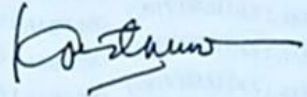
A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ilim'.

Prof. Dr. Ilim, M.S.
NIP. 196505251990032002

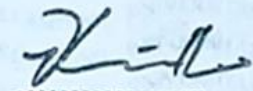
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc

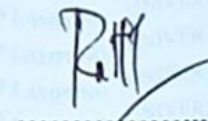

.....

Sekretaris : Rinawati, Ph.D

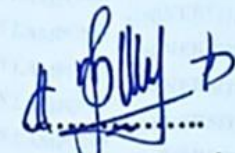
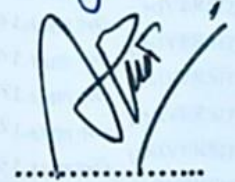

.....

Penguji

Bukan Pembimbing 1 : Dr. Eng. Ni Luh Gede Ratna Juliasih, M.Si


.....

Bukan Pembimbing 2 : Prof. Dr. Mita Rilyanti, M.Si



.....

Bukan Pembimbing 3 : Prof. Dr. Ilim, M.S

.....

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam


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

3. Direktur Program Pascasarjana


Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si
NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 25 Juli 2025

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rusyda Maulida Khairati
Nomor Pokok Mahasiswa : 2327011001
Program Studi : Magister Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejuurnya, bahwa tesis yang berjudul:

“OPTIMASI DAN EVALUASI KINERJA *POLYMER INCLUSION MEMBRANE* (PIM) YANG MENGANDUNG SENYAWA PEMBAWA KOPOLI EUGENOL DIALIL FTALAT 10% UNTUK TRANSPOR *MALACHITE GREEN* (MG)”

tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain, dan sepengetahuan saya tidak ada karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah inui sebagaimana disebutkan dalam daftar Pustaka. Apabila ada pernyataan yang tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 25 Juli 2025
Yang Menyatakan



Rusyda Maulida Khairati
NPM. 2327011001

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Muara Labuh Kabupaten Solok Selatan, Sumatera Barat, pada tanggal 28 September 1997, sebagai anak ketiga dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Drs. Fairuzabadi dan Ibu Dra. Husnidar. Pendidikan formal diawali pada tahun 2003 di TK Islam Amar Ma'ruf Pasir Talang Muara Labuh dan diselesaikan pada tahun 2004, SDN 2 Sumberejo Bandar Lampung diselesaikan pada tahun 2010, SMPN 14 Bandar Lampung diselesaikan pada tahun 2013, dan SMA N 14 Bandar Lampung diselesaikan pada tahun 2016. Pada tahun 2016 terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi Pendidikan Kimia, Jurusan Pendidikan MIPA, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri) dan meraih gelar Sarjana Pendidikan (S.Pd). Selama menjadi mahasiswa Strata-1 pernah mengikuti Unit Kegiatan Mahasiswa Himpunan Mahasiswa Pendidikan Eksakta (HIMASAKTA) serta aktif sebagai pengurus di Forum Silaturahmi Mahasiswa Pendidikan Kimia (FOSMAKI) sebagai kepala bidang media center pada tahun 2017-2018. Pada tahun 2023, penulis tercatat sebagai mahasiswa Pascasarjana Program Studi Magister Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Penulis melakukan penelitian sebagai bahan penyusun tugas akhir di Laboratorium Kimia Analitik dan Instrumentasi Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Saat ini penulis bekerja sebagai guru jurusan Teknik Kimia Industri di SMK Negeri 8 Bandar Lampung.



Alhamdulillahirabbil'alamin

Ku persembahkan karya sederhana ini kepada

Suamiku tercinta Herdiyanto, Gr., M.Pd terimakasih atas segala perhatian, pendampingan, kesabaran, motivasi, dan doa-doa yang tulus demi menuntaskan pendidikan ini.

Almarhum Papa Drs. Fairuzabadi dan Mama Dra. Husnidar tersayang yang selalu menjadi semangat, yang selalu memanjatkan doa demi kesuksesanku, memberikan nasihat yang bermanfaat untuk kebaikanku.

Kakak tersayang Idea Brilliana, S.Pd dan M.Fajrul Falah, S.H terimakasih karena selalu memberikan senyum, dukungan, canda tawa, dan kebahagiaan. Serta keponakanku tercinta Muhammad Shawqi Vernando, Muhammad Arshaka Vernando, dan Kanasya Aruni Jasmine yang selalu memberikan kebahagiaan.

Semua dosen Jurusan Kimia FMIPA Unila yang telah membimbing, mendidik, memberikan banyak ilmu dan pengalamannya kepadaku.

Rekan dan sahabat yang selalu ada di saat senang maupun duka, terima kasih atas doa dan dukungannya.

Almamater Tercinta Universitas Lampung

MOTTO

“Jangan takut jatuh, karena yang tidak pernah memanjatlah yang tidak pernah jatuh. Jangan takut gagal, karena yang tidak pernah gagal hanyalah orang-orang yang tidak pernah melangkah. Jangan takut salah, karena dengan kesalahan yang pertama kita dapat menambah pengetahuan untuk mencari jalan yang benar pada langkah yang kedua”

(BUYA HAMKA)

“Setelah kita berusaha dan berdoa, terkadang apa yang didapat tidak seperti yang diinginkan, tapi percayalah itu yang terbaik untukmu.”

(A. A. KISWANDONO)

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kehadiran Allah SWT Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga tesis yang berjudul “Optimasi dan Evaluasi Kinerja *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) yang Mengandung Kopoli Eugenol Dialil Ftalat 10% untuk Transpor *Malachite Green* (MG)” dapat terselesaikan. Tesis ini tidak akan selesai tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak. Dalam kesempatan ini diucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc., selaku pembimbing satu yang telah sabar membimbing dan memberi masukan serta saran dan semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan baik.
2. Ibu Rinawati, Ph.D selaku pembimbing dua yang telah membimbing, memberikan ilmu, motivasi dan semangat kepada penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
3. Ibu Dr. Eng Ni Luh Gede Ratna Juliasih, M.Si., Ibu Dr. Mita Rilyanti, M.Si., dan Ibu Prof. Dr. Ilim, M.Si., selaku dosen penguji atas segala kritik, saran dan ilmu yang bermanfaat yang telah diberikan kepada penulis, sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik. Semoga Allah memberikan keberkahan atas semua yang sudah diberikan.
4. Ibu Prof. Dr. Ilim, M.S., selaku Ketua Program Studi Magister Kimia, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
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 yang telah memberikan ilmu pengetahuan yang sangat bermanfaat kepada penulis selama menjadi mahasiswa program studi magister kimia.
8. Keluarga besar “*Membrane Research*” yang selama ini memberikan semangat dan saling membantu dalam proses penyusunan tesis.
9. Semua pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan tesis ini. Terima kasih atas segala ketulusan, kebaikan dan do’a. Mohon maaf jika penulis tidak bisa menyebutkan satu persatu. Semoga Allah SWT membalas kebaikan yang telah diberikan kepada penulis.

Semoga Allah SWT Membalas semua kebaikan yang telah diberikan berupa rahmat dan hidayah-Nya kepada kita semua. Penulis sangat berharap tesis ini dapat bermanfaat dan berguna bagi kita semua khususnya para pembaca.

Bandar Lampung, 25 Juli 2025
Penulis,

Rusyda Maulida Khairati

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	5
1.3 Manfaat Penelitian.....	6
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 <i>Malachite Green</i>	7
2.2 Penanggulangan Limbah <i>Malachite Green</i>	9
2.3 Teknologi Membran Cair	11
2.4 Teknik <i>Polymer Inclusion Membrane</i>	12
2.5 Senyawa Kopolimer Eugenol Dialil Ftalat (Ko-EDAF).....	14
2.6 Karakterisasi dan Analisis	16
2.6.1 Spektrofotometri <i>Ultra Violet-Visible</i> (UV-Vis)	16
2.6.2 Spektrofotometer <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR).....	18
2.6.3 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	21
III. METODE PENELITIAN.....	26
3.1 Waktu dan Tempat.....	26
3.2 Alat dan Bahan	26
3.3 Metode.....	27
3.3.1 Pembuatan Membran <i>Polymer Inclusion Membrane</i> (PIM)	27
3.3.2 Pembuatan Larutan Induk <i>Malachite Green</i> , Pembuatan Limbah Buatan dan Pengukuran Konsentrasi <i>Malachite Green</i>	28
3.3.3 Variasi pH <i>Malachite Green</i> pada Fasa Sumber	28
3.3.4 Variasi Konsentrasi HNO ₃ pada Fasa Penerima	29
3.3.5 Variasi Ketebalan Membran	29
3.3.6 Variasi Konsentrasi Senyawa Pembawa	30
3.3.7 Variasi Waktu Transpor.....	30
3.3.8 Studi Transpor <i>Malachite Green</i> pada Limbah Buatan.....	32
3.3.9 Variasi Jenis Garam.....	33
3.3.10 Variasi Konsentrasi Garam pada Fasa Sumber	33
3.3.11 Variasi Konsentrasi Garam pada Fasa Penerima	34
3.3.12 Pemakaian Berulang PIM.....	34
3.3.13 <i>Lifetime</i>	35
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	36
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1 Pembuatan Membran PIM	37

4.2	Penentuan Panjang Gelombang Maksimum <i>Malachite Green</i>	38
4.3	Transpor <i>Malachite Green</i> dengan Variasi pH pada Fasa Sumber.....	40
4.4	Transpor <i>Malachite Green</i> dengan Variasi Konsentrasi HNO ₃ pada Fasa Penerima.....	44
4.5	Transpor <i>Malachite Green</i> dengan Variasi Ketebalan Membran PIM .	47
4.6	Transpor <i>Malachite Green</i> dengan Variasi Konsentrasi Senyawa Pembawa.....	51
4.7	Transpor <i>Malachite Green</i> dengan Variasi Waktu Transpor.....	54
4.8	Studi Kompetisi Transpor <i>Malachite Green</i> pada limbah buatan.....	57
4.9	Transpor <i>Malachite Green</i> dengan Variasi Jenis Garam	60
4.10	Pengaruh Variasi Konsentrasi Garam pada Fasa Sumber terhadap Transpor MG	61
4.11	Pengaruh Variasi Konsentrasi Garam pada Fasa Penerima terhadap ...	62
4.12	Pemakaian Berulang Membran PIM.....	63
4.13	<i>Lifetime</i>	65
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	70
5.1	Kesimpulan	70
5.2	Saran.....	71
	DAFTAR PUSTAKA	72

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Karakteristik zat warna MG.....	8
2. Daftar bilangan gelombang FT-IR dari berbagai jenis ikatan.....	20
3. Perbandingan berat komponen pembentuk membran (10:32:58).....	27
4. Variasi konsentrasi senyawa pembawa	30
5. Massa total komponen, massa membran dan ketebalan membran PIM sebelum transpor.	38
6. Hasil % <i>removal</i> variasi pH MG fasa sumber.....	41
7. Perbandingan gugus fungsi PIM Ko-EDAF sebelum dan setelah transpor.....	43
8. Hasil % <i>removal</i> variasi konsentrasi fasa penerima HNO ₃	45
9. Perbandingan gugus fungsi PIM Ko-EDAF sebelum dan setelah transpor.....	47
10. Hasil % <i>removal</i> variasi ketebalan membran.....	48
11. Perbandingan gugus fungsi PIM Ko-EDAF sebelum dan setelah transpor pada variasi ketebalan membran.....	50
12. Hasil % <i>removal</i> variasi konsentrasi senyawa pembawa	52
13. Perbandingan gugus fungsi PIM Ko-EDAF sebelum dan setelah transpor pada variasi konsentrasi senyawa pembawa	53
14. Hasil % <i>removal</i> variasi waktu transpor	55
15. Lifetime membrane PIM.....	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Struktur <i>Malachite Green</i>	8
2. Reaksi polimerisasi dialil ftalat (DAF)	15
3. Prediksi struktur turunan polieugenol hasil taut silang dengan DAF	16
4. Skema alat Spektrofotometri UV-Vis.....	18
5. Hasil spektra FT-IR polieugenol	20
6. Spektra IR dari PIM yang mengandung polieugenol.....	21
7. Skema SEM.....	23
8. Hamburan elektron yang jatuh pada lembaran tipis.....	24
9. Hasil SEM membran PIM (a) sebelum transpor (b) setelah transpor	25
10. Diagram alir penelitian.....	36
11. Membran PIM yang mengandung Ko-EDAF 10% (a) T ₂₇ (b) T ₅₄ (c) T ₁₀₈	38
12. Panjang gelombang maksimum <i>malachite green</i>	39
13. Pengaruh pH MG pada fasa sumber terhadap transpor MG	40
14. Spektra FTIR membran (a) sebelum transpor (b) setelah transpor variasi pH pada fasa sumber	42
15. Pengaruh konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima terhadap konsentrasi MG yang tertranspor	44
16. Spektra FTIR (b) sebelum transpor (a) setelah transpor variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	46
17. Pengaruh ketebalan membran PIM terhadap konsentrasi MG.....	48
18. Spektra FTIR membran (a) sebelum transport (a) setelah transpor pada ketebalan membran T ₅₄	50
19. Pengaruh konsentrasi senyawa pembawa terhadap konsentrasi MG.....	51

20. Spektra FTIR membran (b) sebelum transpor (a) setelah transpor variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	53
21. Pengaruh variasi waktu terhadap konsentrasi <i>malachite green</i> yang tertranspor.....	54
22. Morfologi permukaan membran PIM (a) sebelum transpor (b) sesudah transpor 12 jam.....	56
23. Perbandingan konsentrasi MG, logam Cu(II) dan logam Pb(II) yang terdapat pada fasa sumber dan fasa penerima	58
24. Spektra FTIR membran (a) MG control (b) MG dan logam Cu(II) (c) MG dan logam Pb(II) (d) MG, logam Cu(II) dan logam Pb(II)	59
25. Grafik Pengaruh Jenis Garam Terhadap Transpor MG	60
26. Grafik Pengaruh Variasi Konsentrasi Garam NaNO ₃ pada Fasa Sumber terhadap transpor MG	61
27. Grafik Pengaruh Variasi Konsentrasi Garam NaNO ₃ pada Fasa Penerima terhadap transpor MG	62
28. Grafik pengaruh pemakaian berulang tanpa pencucian, pencucuan dengan aquades dan pencucian dengan HNO ₃	64
29. Grafik Pengukuran pH lifetime.....	66
30. Spektra FTIR lifetime membran (a) MG Kontrol (b) MG dan garam NaNO ₃ (c) MG dan garam Na ₂ SO ₄ (d) MG dan garam NaCl (e) MG dan garam KNO ₃	67

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan pesat dalam sektor industri tidak hanya menghasilkan dampak positif terhadap pertumbuhan ekonomi, kemajuan sosial, dan perkembangan teknologi bagi masyarakat, tetapi juga mengakibatkan dampak negatif berupa produksi limbah, termasuk limbah cair. Sektor industri tekstil yang menggunakan pewarna menjadi salah satu penyumbang utama pencemaran lingkungan karena aktivitas industri yang meningkat menghasilkan limbah industri yang signifikan. Pewarna adalah senyawa kimia yang digunakan untuk memberikan warna pada larutan dengan menyerap atau mengendap pada permukaannya. Selain mencemari lingkungan, pewarna juga berpotensi merusak ekosistem, mengancam keanekaragaman hayati, dan membahayakan kesehatan manusia. Zat pewarna *malachite green* (MG) sering digunakan dalam industri tekstil. Pembuangan limbah yang mengandung MG menyebabkan perubahan warna yang tidak diinginkan pada limbah, mengurangi penetrasi cahaya matahari ke dalam sungai atau danau, dan mengancam kehidupan ekosistem perairan dengan menyebabkan hipoksia. Senyawa nitrogen yang terkandung dalam MG juga memiliki sifat karsinogenik, genotoksik, mutagenik, dan teratogenik terhadap organisme hidup (Ling *et al.*, 2017).

Konsentrasi normal pewarna MG dalam air limbah sebenarnya sekitar 0,01 ppm. Berdasarkan batas kinerja minimum yang ditetapkan oleh Keputusan Komisi 2004/25/EC17, kadar MG dalam daging dan produk makanan laut diizinkan hingga 2,0 g/kg. Selain itu, laporan dari *the Water Research Centre for the*

Department of the Environment, Transport, and the Regions of the United Kingdom menyebutkan bahwa standar kualitas lingkungan merekomendasikan kadar MG rata-rata sebesar 500 µg/L untuk melindungi kehidupan air tawar, meskipun tidak ada standar yang direkomendasikan untuk air minum (Mohamad *et al.*, 2021).

Perlakuan khusus terhadap pewarna ini menjadi sangat penting untuk mengatasi dampak lingkungan yang dihasilkannya, terutama karena kandungan MG yang sangat berbahaya. Metode konvensional seperti adsorpsi, degradasi fotokatalitik, dan oksidasi kimia telah menjadi solusi umum dalam pengolahan limbah industri tekstil karena dapat diterapkan dalam skala besar. Namun, metode-metode tersebut sering kali memiliki kelemahan dalam hal biaya produksi, operasi, dan pemeliharaan yang tinggi. Penggunaan teknik adsorpsi untuk pemisahan MG dengan menggunakan berbagai bahan penyerap seperti zeolit, silika gel, karbon aktif, grafit, kitosan, dan bentonit umumnya dianggap tidak ekonomis dan membutuhkan penggunaan bahan serta energi yang signifikan (Fangidae *et al.*, 2020).

Salah satu cara yang efektif untuk mengatasi limbah MG adalah dengan menggunakan teknologi pemisahan berbasis membran cair. Terdapat beberapa jenis utama membran cair, termasuk *Bulk Liquid Membrane* (BLM), *Emulsion Liquid Membrane* (ELM), *Supported Liquid Membrane* (SLM), dan *Polymer Inclusion Membrane* (PIM). Metode membran cair yang dikenal sebagai *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) telah menjadi pilihan yang lebih stabil dibandingkan dengan pendekatan membran cair lainnya untuk memisahkan dan membersihkan senyawa MG dari air limbah dengan menggunakan pembawa yang berbeda (Benosmane *et al.*, 2018; Kiswandono *et al.*, 2012; Saka *et al.*, 2020).

Metode PIM sering dipilih karena memiliki kemampuan pemisahan yang luas dan selektif, serta sederhana dalam penggunaannya, membutuhkan sedikit energi, dapat mengekstraksi logam dan non-logam secara selektif, mengurangi penggunaan bahan kimia, dan memiliki fleksibilitas dalam komposisi membran (Bonggotgetsakul *et al.*, 2016). Teknik pemisahan menggunakan membran PIM

melibatkan penggunaan senyawa pembawa yang efektif, mudah disiapkan, serbaguna, stabil, serta memiliki sifat kimia dan mekanik yang baik.

Menurut Kiswandono *et al.*, (2022), membran PIM menunjukkan kemampuan kestabilan yang sangat baik jika dibandingkan dengan teknologi membran cair lainnya. Kelebihan lainnya dari membran PIM yaitu memiliki permukaan interfisial yang lebih luas, sangat selektif, kuat, mampu memisahkan senyawa secara efisien, dan proses pemisahan yang mudah. Membran PIM memiliki masa hidup yang lebih lama, dibandingkan dengan membran SLM. Hal ini disebabkan karena mekanisme transpor membran PIM bergantung dari komposisi membran dan homogenitas permukaan membran. Penelitian Sun *et al.*, (2017), penggunaan membran PIM dipilih karena termasuk metode ramah lingkungan yang mendukung *green chemistry*. Hal ini dikarenakan tidak menggunakan jumlah pelarut dalam jumlah besar dan hanya menggunakan pembawa dalam jumlah relatif sedikit.

Proses transportasi dalam membran PIM melibatkan tiga fasa yaitu fasa sumber yang mengandung senyawa target, fasa membran yang berisi senyawa pembawa dalam pelarut organik, dan fasa penerima yang bertindak sebagai agen pelepas dari kompleks senyawa pembawa. Senyawa pembawa menjadi salah satu komponen penting dalam membran, memungkinkan terjadinya proses pemisahan yang efisien (Kiswandono *et al.*, 2014).

Pemisahan MG menggunakan membran cair didasarkan pada perbedaan kelarutan MG di dalam larutan dan fasa organik. Ini sesuai dengan definisi membran cair sebagai lapisan tipis yang bersifat semipermeabel yang memisahkan dua fasa cair atau gas. Prinsip pemisahan dalam membran cair tidak ditentukan oleh membran itu sendiri, tetapi oleh sifat molekul pembawa spesifik. Senyawa pembawa tetap berada di dalam membran dan dapat bergerak jika terlarut dalam cairan (Wang *et al.*, 2017).

Syarat polimer dalam proses membran cair untuk fasa membran yaitu harus mempunyai berat molekul yang tinggi, bersifat lipofilik dan mempunyai struktur yang memungkinkan terjadinya pembentukan ikatan, interaksi atau kompleks

dengan senyawa yang akan ditranspor. Salah satu bahan alam yang potensial untuk dikembangkan menjadi suatu jenis polimer yaitu eugenol.

Eugenol adalah salah satu komponen kimia yang terdapat dalam minyak daun cengkeh. Senyawa ini dapat digunakan sebagai bahan awal dalam sintesis karena mengandung tiga gugus fungsional: alil, eter, dan MG (Anwar, 2007). Dengan sifat-sifat tersebut, eugenol dapat dipolimerisasi menjadi polieugenol dan senyawa turunannya. Polieugenol yang terbentuk memenuhi kriteria sebagai membran, karena memiliki berat molekul tinggi serta memiliki kelompok aktif -OH dan cincin benzena, sehingga diharapkan dapat berfungsi sebagai media transport yang selektif.

Senyawa pembawa yang dapat digunakan adalah Kopoli Eugenol Dialil Ftalat (Ko-EDAF). Ko-EDAF merupakan hasil modifikasi kopolimerisasi dari senyawa eugenol yang bertujuan untuk meningkatkan jumlah sisi aktif pada polimer yang berperan sebagai senyawa pembawa dalam proses transpor MG. Dalam proses transpor MG, senyawa pembawa memfasilitasi pergerakan senyawa target melalui membran. Membran merupakan lapisan antara dua fasa yang berdekatan yang bertindak sebagai penghalang selektif yang mengatur transportasi komponen kimia yang berada pada sisi yang terpisah (Zhang *et al.*, 2019).

Membran PIM dibuat dengan mencampur suatu senyawa pembawa, *plasticizer*, dan polimer pendukung dalam larutan tertentu, kemudian mencetaknya dalam satu cetakan hingga membentuk film yang tipis, stabil, dan fleksibel (Ling *et al.*, 2017). Keunggulan membran PIM didasarkan pada dua faktor utama: pertama, polimer dasar seperti polivinil klorida (PVC) yang diharapkan mampu mengatasi kebocoran senyawa pembawa, dan kedua, penggunaan *plasticizer* yang bertujuan untuk meningkatkan stabilitas sistem membran. Membran PIM memiliki beberapa keunggulan, termasuk kemudahan dalam operasionalnya, kemampuan untuk mengurangi penggunaan bahan kimia, dan komposisi membran yang fleksibel dan selektif, yang sejalan dengan efisiensi proses pemisahan yang tinggi.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Kiswando *et al* (2024) mengenai “Studi *Malachite Green* Transport Menggunakan Metode *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) Dengan Polieugenol sebagai Senyawa Pembawa”. Hasil penelitian menunjukkan bahwa membran PIM dengan senyawa pembawa polieugenol mampu mentransportasi MG secara efektif sebesar 91,30%. Hasil tersebut menandakan bahwa metode PIM efektif untuk memisahkan senyawa MG.

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan studi optimasi kinerja PIM meliputi parameter variasi pH pada fasa sumber, variasi konsentrasi HNO_3 pada fasa penerima, variasi ketebalan membran, variasi konsentrasi senyawa pembawa, variasi waktu transpor, dan studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan. Evaluasi kinerja PIM meliputi variasi konsentrasi *plasticizer*, variasi jenis garam, variasi konsentrasi garam pada fasa sumber dan fasa penerima, uji pemakaian berulang, dan uji *lifetime* transpor MG pada limbah buatan menggunakan membran PIM dengan senyawa pembawa Kopoli Eugenol Dialil Ftalat (Ko-EDAF) 10%.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan optimasi kinerja PIM untuk transport MG dengan parameter variasi pH pada fasa sumber, variasi konsentrasi HNO_3 pada fasa penerima, variasi ketebalan membran, variasi konsentrasi senyawa pembawa, variasi waktu transpor.
2. Melakukan uji kompetisi transpor antara MG dengan logam berat Cu(II) dan Pb(II) pada limbah buatan.
3. Melakukan uji evaluasi kinerja PIM untuk transpor MG meliputi variasi jenis garam, variasi konsentrasi garam pada fasa sumber dan fasa penerima, uji pemakaian berulang, dan uji *lifetime*.

4. Melakukan karakterisasi membran PIM sebelum dan sesudah transpor menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR).

1.3 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian yang akan diperoleh diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

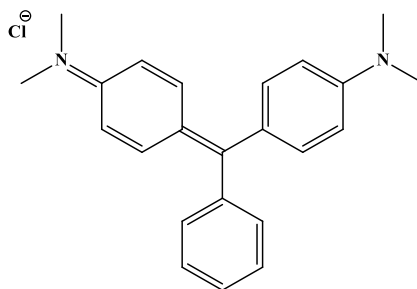
1. Menambah pemanfaatan polimer tertaut silang Ko-EDAF10 % sebagai senyawa pembawa.
2. Memberikan wacana baru dalam pemanfaatan polimer dalam bidang analisis kimia serta meningkatkan nilai ekonomis dari eugenol.
3. Meningkatkan aplikasi metode membran cair terutama PIM dalam upaya pengurangan polutan organik, khususnya senyawa *malachite green* pada lingkungan perairan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Malachite Green*

Malachite green (MG) merupakan komponen dasar dari zat warna untuk proses pencelupan, yang terdiri dari garam dari warna dasar organik yang mengandung kelompok amino dan imino, serta dikombinasikan dengan asam seperti asam klorida. Warna yang dihasilkan oleh MG cenderung lebih cemerlang dibandingkan dengan bahan pewarna sintetis lainnya. Bahan pewarna dasarnya bersifat kationik dengan muatan positif dan biasanya digunakan untuk pencelupan pada kain yang bersifat anionik, seperti wol, sutra, dan nilon. Pewarna kimia ini umumnya digunakan untuk pewarnaan pada kain sutra, kulit, dan kertas (Sukmawati dan Utami, 2014). Dalam industri tekstil, MG merupakan salah satu bahan baku utama untuk pewarnaan, namun sekitar 10-15% dari pewarna yang digunakan tidak dapat digunakan kembali dan harus dibuang.

Selain berdampak pada lingkungan, zat tersebut juga memiliki potensi untuk merusak keanekaragaman hayati dan menimbulkan gangguan kesehatan, seperti iritasi pada kulit dan mata, serta risiko kanker. Bahkan, zat pewarna juga dapat menyebabkan mutasi genetik (Shivaji *et al.*, 2004). Struktur dari MG dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur *Malachite Green* (Ling *et al.*, 2017)

Pewarna MG termasuk zat warna dasar tekstil. MG mempunyai warna yang paling cemerlang dibandingkan pewarna sintetis lainnya dan termasuk pewarna yang berbahaya jika terdapat di lingkungan. MG memiliki warna dasar yang bersifat kationik yang mempunyai muatan positif. Berikut adalah sifat fisikokimia dari pewarna MG yang tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik zat warna MG (Ling *et al.*, 2017).

Parameter	Nilai
Rumus molekul	$C_{23}H_{25}N_2Cl$
Berat molekul	364,9 g/mol
Indeks warna	42000
Nomor CAS	2437-29-8
Sifat	Zat warna kationik
Ph	8,5
Warna	Biru kehijauan

MG yang diubah menjadi metabolitnya, yaitu *leucomalachite green*, dapat dimanfaatkan dalam metode pendeteksian darah tersembunyi dalam kasus kriminal. Hemoglobin bertindak sebagai katalisator dalam reaksi antara *leucomalachite green* dan hidrogen peroksida, mengubah *leucomalachite green* yang tidak berwarna menjadi MG yang berwarna. Oleh karena itu, munculnya warna hijau menunjukkan adanya darah. Selain itu, MG terbukti efektif dalam memerangi jamur *Saprolegnia* yang sering menginfeksi telur ikan dalam industri perikanan komersial. MG juga dapat digunakan dalam pengobatan penyakit ikan

yang disebabkan oleh parasit dan bakteri. Dengan demikian, MG memiliki potensi sebagai agen antijamur, antiparasit, dan antibakteri (Muna dan Nailal, 2014).

Ternyata MG dan metabolitnya, *leucomalachite green*, diduga memiliki sifat mutagenik dan karsinogenik (Muna dan Nailal, 2014). Perkiraan ini diperoleh dari studi pada tikus yang diberi MG dengan konsentrasi 100 ppb selama 2 tahun, yang menunjukkan adanya tanda-tanda tumor, anemia, dan abnormalitas tiroid.

Meskipun dampaknya pada manusia belum diketahui secara pasti saat ini karena konsentrasi MG dan *leucomalachite green* dalam ikan yang dikonsumsi relatif kecil, diperkirakan bahwa akumulasi dalam tubuh manusia akibat konsumsi berkelanjutan dapat menyebabkan peningkatan risiko kanker. Efek MG pada telur ikan telah diuji pada ikan mas, dan hasilnya menunjukkan bahwa semakin rendah dosis dan semakin lama perendaman MG, semakin banyak telur ikan yang menetas. Namun, semakin tinggi dosisnya, semakin banyak telur ikan yang tidak menetas atau mati. Hal ini menunjukkan bahwa MG bersifat toksik terhadap beberapa spesies ikan, terutama telur ikan. Karena perkiraan toksisitas MG dan metabolitnya, beberapa negara seperti Amerika Serikat, Kanada, dan Uni Eropa telah melarang penggunaannya dalam pengobatan ikan. Namun, di beberapa negara, termasuk Indonesia, MG masih sering digunakan karena mudahnya mendapatkannya dan harganya yang murah (Sukmawati dan Utami, 2014).

2.2 Penanggulangan Limbah *Malachite Green*

Salah satu metode penanganan limbah untuk degradasi MG dilakukan menggunakan metode ozonolisis (Bhernama, 2017). Proses ini melibatkan penggunaan katalis TiO_2 -anatase dan ZnO . Setelah degradasi, residu MG disentrifugasi dan diukur menggunakan spektroskopi UV-Vis dalam rentang 200-800 nm. Dalam penelitian tersebut, ozonolisis dilakukan pada larutan MG dengan konsentrasi awal 6 mg/L selama 5 menit. Ditemukan bahwa pH optimum untuk degradasi adalah pada pH 7,6 mg/L. Penambahan katalis TiO_2 -anatase sebanyak 0,025 mg, dan ZnO sebanyak 0,025 mg pada pH 7 memberikan hasil optimum,

dengan waktu optimum 5 menit. Hasil menunjukkan bahwa degradasi dengan penambahan TiO₂-anatase lebih efektif dibandingkan dengan penambahan ZnO, hal ini disebabkan oleh stabilitas yang tinggi dari TiO₂-anatase.

Selanjutnya, dilakukan penelitian mengenai absorpsi zat pewarna tekstil MG menggunakan adsorben kulit buah kakao (*Theobroma cacao*) yang diaktivasi dengan HNO₃. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji potensi limbah kulit kakao sebagai adsorben untuk zat warna tekstil MG, mengevaluasi sifat adsorpsi zat warna tekstil MG oleh adsorben dari kulit kakao, menentukan waktu kontak optimal adsorben kulit kakao terhadap zat warna MG, dan menentukan massa optimal adsorben kulit kakao untuk penyerapan zat warna MG (Bhernama, 2017).

Adsorben yang digunakan adalah kulit kakao dengan ukuran 100 mesh yang diaktivasi menggunakan larutan HNO₃ 0,6 M. Penelitian dilakukan dengan variasi massa adsorben yang digunakan sebesar 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; dan 0,30 g. Variasi waktu kontak adsorben dengan zat warna meliputi 10, 20, 30, 40, 50, dan 60 menit, sedangkan variasi konsentrasi zat warna adalah 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 ppm. Volume larutan zat warna yang digunakan untuk setiap variasi adalah 25 ml. Dengan melakukan variasi ini, diharapkan dapat ditentukan kondisi optimal untuk penyerapan zat warna MG oleh adsorben kulit kakao (Pathy *et al.*, 2022).

Berbagai cara lain yang telah dikembangkan untuk mengolah limbah MG, seperti adsorpsi oleh biochar mikroalga (AB), degradasi warna MG oleh aktivitas fotokatalitik dari FA-Ag₂O NAP (Mazumder and Ruma, 2022). Alternatif parasitisida seperti asam humat, klorin dioksida dan pyceze untuk menggantikan penggunaan MG (Shivaji *et al.*, 2004), pemisahan MG menggunakan PIM (Ling *et al.*, 2017), dan penguraian zat warna MG telah banyak dilakukan seperti koagulasi, flokulasi, dan karbon aktif. Selain itu, perlakuan konvensional seperti adsorpsi, pertukaran ion, aerobik dan anaerobik, oksidasi, koagulasi, dan flokulasi diketahui memiliki efektivitas yang lebih rendah dalam mengolah air limbah yang mengandung MG. Hal ini disebabkan beberapa cincin benzena yang terdapat dalam struktur MG memiliki ketahanan yang tinggi terhadap perlekatan mikroba,

fiksasi, dan tahan luntur (stabilitas dalam cahaya dan pencucian). Beberapa proses penanganan limbah zat warna ini memiliki kelemahan, seperti memerlukan bahan kimia yang mahal, menghasilkan limbah baru dari proses pemisahan bahan kimia dengan air limbah zat warna, proses kimia yang tidak ramah lingkungan, serta kompleksitas proses biologis (Pang and Abdullah, 2013). Metode PIM dianggap efektif dalam menangani limbah MG, seperti yang ditunjukkan oleh Ling and Suah (2017), karena berhasil mengekstrak MG dari limbah dengan berhasil.

2.3 Teknologi Membran Cair

Membran adalah sebuah struktur tipis yang semi-permeabel dan bertindak sebagai penghalang antara dua fasa. Jika senyawa dalam campuran bergerak melalui membran dengan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan senyawa lain dalam campuran, maka penggunaan membran ini akan meningkatkan efisiensi dalam proses pemisahan (Kislik, 2010).

Salah satu teknologi membran yang ada adalah membran cair. Berbagai jenis membran cair telah digunakan dalam berbagai bidang seperti teknik kimia, kimia anorganik, analitik, bioteknologi, dan biomedis. Proses pemisahan menggunakan membran cair dapat dilakukan pada suhu ruang, tanpa merusak bahan, dan dapat diintegrasikan dengan proses lain tanpa tambahan zat lainnya. Terdapat tiga jenis utama membran cair, yaitu *Bulk Liquid Membranes* (BLM), *Emulsion Liquid Membranes* (ELM), dan *Supported Liquid Membranes* (SLM) (Mulder, 1996). Kelima jenis membran cair tersebut mencakup ELM, *Gelled Supported Liquid Membrane* (GSLM), *Polymer Liquid Membrane* (PLM), membran cair ruah (BLM), dan SLM (Wang *et al.*, 2000; Kislik, 2010).

Prinsip pemisahan pada membran cair tidak sepenuhnya ditentukan oleh sifat membran itu sendiri, melainkan lebih oleh sifat molekul pembawa (*carrier*) yang spesifik. Molekul pembawa tetap berada di dalam membran dan memiliki kemampuan untuk bergerak jika terlarut dalam cairan. Pentingnya molekul pembawa adalah kemampuannya untuk menunjukkan afinitas yang sangat spesifik

terhadap satu komponen tertentu dalam fasa umpan, sehingga dapat mencapai tingkat selektivitas yang tinggi. Selain itu, tingkat selektivitas komponen juga sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat khusus dari bahan molekul pembawa tersebut. Komponen yang dapat dipisahkan dapat berupa gas atau cair, serta bersifat ionik atau non-ionik (Mulder, 1996).

2.4 Teknik *Polymer Inclusion Membrane*

Polymer Inclusion Membrane (PIM) merupakan jenis membran cair yang tipis, transparan, fleksibel, dan stabil. PIM merupakan perkembangan dari metode membran cair yang sudah ada sebelumnya, yaitu *Supported Liquid Membrane* (SLM). Komposisi PIM terdiri dari polimer dasar, *plasticizer*, dan senyawa pembawa. Teknik PIM dianggap efektif dalam meningkatkan stabilitas membran karena keberadaan polimer dasar dan *plasticizer*. Polimer dasar *polyvinyl chloride* (PVC) dalam membran diharapkan mampu mengatasi kebocoran senyawa pembawa. Sementara itu, *plasticizer* seperti dibenzileter (DBE) berperan dalam meningkatkan stabilitas sistem membran. Penelitian yang dilakukan oleh Almeida *et al.*, (2017) mengakui bahwa PIM menunjukkan stabilitas yang baik karena tingkat kebocoran senyawa pembawa selama proses transpor sangat rendah dibandingkan dengan membran cair *Supported Liquid Membrane* (SLM) (Nghiem *et al.*, 2006).

Pembuatan PIM umumnya dilakukan menggunakan teknik pencetakan dan penguapan pelarut. Teknik pencetakan melibatkan proses pelarutan komponen membran seperti polimer dasar dan komponen lainnya dalam pelarut yang sesuai, kemudian larutan ini dicetak dalam suatu cetakan. Penguapan pelarut merujuk pada proses di mana pelarut dibiarkan menguap secara alami setelah pencetakan. *Polyvinyl Chloride* (PVC) dan *Cellulose Triacetate* (CTA) sering digunakan sebagai polimer dasar karena memiliki kekuatan mekanik yang baik, ketahanan kimia yang tinggi, dan mudah larut dalam pelarut yang mudah menguap seperti *Tetrahydrofuran* (THF) untuk PVC dan diklorometana untuk CTA. Kedua

polimer ini juga kompatibel dengan berbagai ekstrak komersial dan *plasticizer*, yang membantu membentuk PIM yang homogen dan stabil.

Membran merupakan suatu lapisan tipis yang bersifat semipermeabel dan bertindak sebagai penghalang antara dua fasa. Jika senyawa dari suatu campuran dapat melewati membran dengan kecepatan lebih cepat dibandingkan dengan senyawa lainnya, penggunaan membran ini dapat meningkatkan proses pemisahan secara signifikan (Kislik *et al.*, 2010). Teknologi pemisahan menggunakan membran memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan teknologi pemisahan lainnya. Salah satu keunggulannya adalah penggunaan energi yang relatif rendah sehingga lebih ekonomis, karena proses pemisahan menggunakan membran tidak melibatkan perubahan fasa. Membran cair merupakan salah satu teknologi membran, di mana prinsip pemisahannya ditentukan oleh sifat molekul pembawa yang spesifik. Membran PIM menerapkan transpor selektif dan menargetkan zat terlarut (senyawa target) dari satu larutan melalui membran yang memisahkan antara fasa sumber dan fasa penerima. Struktur membran PIM terdiri dari polimer dasar, senyawa pembawa, dan *plasticizer*. Penggunaan PVC pada membran berperan dalam menstabilkan membran dengan menahan senyawa pembawa agar tetap berada dalam membran. Modifikasi menggunakan PVC untuk pembentukan gel merupakan keunggulan dari metode PIM (Kislik *et al.*, 2010).

Proses pembuatan membran dalam metode PIM melibatkan penggunaan komponen di atas untuk membentuk lapisan yang tipis, stabil, dan fleksibel. Hasilnya adalah membran yang mandiri dan dapat digunakan untuk memisahkan larutan yang diinginkan dengan cara yang serupa dengan SLM (Nghiem *et al.*, 2006). Meskipun membran PIM memiliki permeabilitas dan selektivitas yang relatif rendah, namun memiliki stabilitas yang lebih baik dan memadai dibandingkan dengan jenis membran cair lainnya.

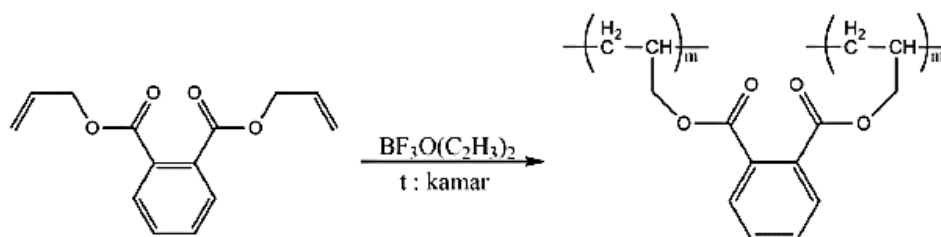
Teknologi pemisahan membran bersifat efisien, sederhana, memiliki selektivitas yang tinggi serta aman bagi lingkungan. Pemisahan dengan membran tergolong hal yang baru dan cepat berkembang. Membran tidak hanya penting dalam proses

biologi, namun telah berkembang dan digunakan dalam dunia industri, seperti dalam proses mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi (Kislik, 2010). Pada membran cair, proses transpor tidak dipengaruhi oleh membran atau material membran, melainkan oleh senyawa pembawa yang sangat spesifik. Senyawa pembawa yang mengandung membran berada di dalam pori membran. Selektifitas membran bergantung kepada senyawa pembawa yang digunakan (Elma, 2016).

2.5 Senyawa Kopoli Eugenol Dialil Ftalat (Ko-EDAF)

Kopoli Eugenol Dialil Ftalat (Ko-EDAF) merupakan hasil modifikasi dari senyawa eugenol melalui proses kopolimerisasi, di mana monomer diena ditambahkan sebagai agen penghubung silang. Proses ini menyebabkan terbentuknya kopolimer yang terhubung secara silang. Semakin banyak agen penghubung silang yang digunakan, maka berat molekul kopolimer akan meningkat, serta fraksi gel dan viskositas polimer juga akan meningkat. Eugenol memiliki ikatan rangkap dua yang memungkinkan untuk bereaksi dengan monomer diena sebagai agen penghubung silang, sehingga membentuk kopolimer tertaut silang. Meskipun eugenol memiliki sisi aktif -OH dan cincin benzena yang memungkinkannya untuk berinteraksi dengan MG, namun interaksi ini terbatas karena jumlah sisi aktif yang rendah akibat berat molekul eugenol yang kecil. Untuk mengatasi hal ini, dilakukan modifikasi eugenol menjadi senyawa turunan polieugenol melalui kopolimerisasi dengan ikatan rangkap dua. Senyawa turunan polieugenol ini memiliki berat molekul yang lebih besar dan lebih stabil dibandingkan eugenol asli karena tidak mengalami taut silang. Hal ini mengakibatkan peningkatan jumlah sisi aktif yang dapat berinteraksi dengan senyawa target MG, sehingga meningkatkan kecepatan transpor. Metode ini merupakan alternatif untuk meningkatkan jumlah sisi aktif pada eugenol, yang dapat dilakukan melalui kopolimerisasi dengan senyawa-senyawa diena (Kiswando *et al.*, 2014).

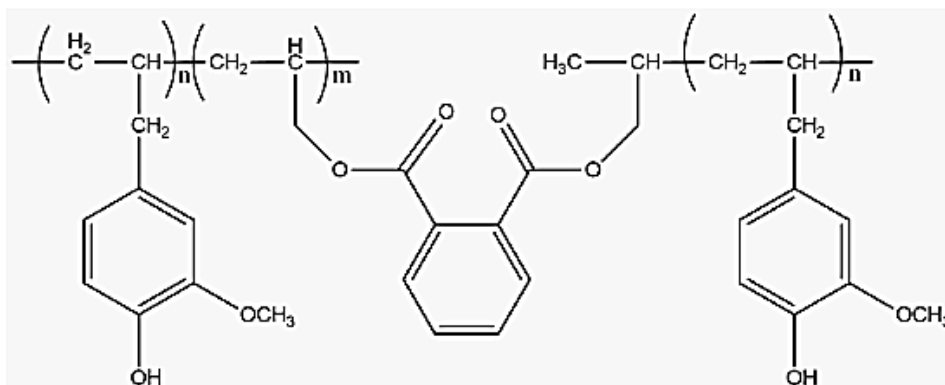
Senyawa diena yang sering digunakan dalam konteks ini adalah Dialil Ftalat (DAF). Ikatan rangkap dua pada senyawa diena memiliki sifat yang sangat reaktif, memungkinkan proses sintesis dapat dilakukan dengan mudah pada suhu kamar saja, dengan bantuan katalis asam lemah. Polimerisasi senyawa diena terjadi pada gugus alil, dan proses ini dapat diilustrasikan seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Reaksi polimerisasi dialil ftalat (DAF) (Kiswandono *et al.*, 2014)

Ko-EDAF memiliki struktur yang serupa dengan polieugenol, dengan keduanya memiliki gugus -OH dan senyawa benzena. Gugus hidroksi (-OH) ini memiliki kemampuan untuk membentuk ikatan hidrogen dengan molekul lain. Ikatan hidrogen terjadi ketika atom hidrogen yang sedikit positif ditarik oleh pasangan elektron bebas dari atom yang lebih elektronegatif di molekul lain. Ikatan ini, meskipun lemah dengan energi disosiasi sekitar 5-10 kkal/mol, relatif lebih kuat daripada banyak tarikan dipol-dipol lainnya, sehingga berfungsi seperti perekat antarmolekul. Meskipun ikatan hidrogen dalam dirinya sendiri lemah, molekul Ko-EDAF besar sehingga dapat membentuk banyak ikatan hidrogen dengan MG. Hal ini mengakibatkan peningkatan kekuatan ikatan hidrogen tersebut dan memperkuat interaksi antara kopoli Ko-EDAF dan MG (Kiswandono *et al.*, 2014).

Selain memiliki gugus -OH, Ko-EDAF juga memiliki struktur benzena yang memungkinkan terjadinya interaksi π - π^* dengan cincin benzena aromatis pada MG. Interaksi π - π^* ini terjadi antara dua cincin benzena atau lebih. Dalam konteks transport MG, interaksi yang terbentuk antara polieugenol dan MG meliputi ikatan hidrogen dan ikatan π (Kiswandono *et al.*, 2016).



Gambar 3. Prediksi struktur turunan polieugenol hasil taut silang dengan DAF (Kiswandono *et al.*, 2014)

Mekanisme transport MG melalui membran Ko-EDAF diperkirakan terjadi melalui dua jalur utama: ikatan hidrogen dan interaksi π - π^* antara MG dan Ko-EDAF. Selain itu, reaksi antara MG dan HNO_3 di fasa penerima menghasilkan anion MG yang tidak dapat kembali ke membran hidrofobik atau fasa sumber. Proses transpor terjadi saat komponen MG berada dalam keadaan tidak terdisosiasi di fasa sumber, dan sebagai ion MG di fasa penerima. Pada situasi ini, pH di fasa sumber dapat memengaruhi proses transpor (Kiswandono *et al.*, 2014).

2.6 Karakterisasi dan Analisis

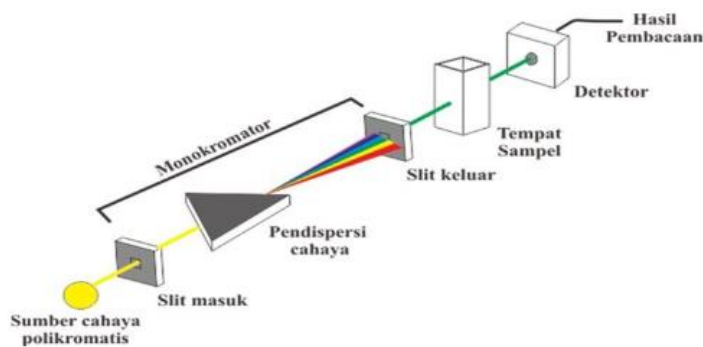
Penelitian ini akan dilakukan analisis hasil transport MG menggunakan Spektrofotometer UV-Vis, lalu karakterisasi membran menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy* (FTIR).

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

Spektrofotometri UV-Vis adalah teknik untuk mengukur panjang gelombang, intensitas cahaya ultraviolet, dan cahaya tampak yang diserap oleh sampel. Sinar ultraviolet dan cahaya tampak memiliki energi yang cukup untuk mendorong elektron dari kulit terluar sampel ke tingkat energi yang lebih tinggi. Metode ini

biasanya digunakan untuk menganalisis molekul dan ion anorganik atau kompleks dalam larutan. Spektra UV-Vis cenderung memiliki lebar yang bervariasi, dan sementara sedikit informasi struktural dapat diperoleh, seringkali digunakan untuk analisis kuantitatif. Panjang gelombang sinar ultraviolet berkisar antara 200-400 nm, sementara cahaya tampak berkisar antara 400-800 nm. Spektrofotometri UV-Vis sering diterapkan pada senyawa organik berdasarkan transisi elektron seperti $n-\pi^*$ atau $\pi-\pi^*$, yang membutuhkan keberadaan gugus kromofor dalam molekul tersebut. Transisi ini terjadi dalam rentang panjang gelombang yang nyaman untuk eksperimen, yaitu sekitar 200-700 nm (Nur dan Adijuawana, 1989).

Spektrofotometri UV-Vis komersial biasanya beroperasi dalam rentang panjang gelombang sekitar 175 nm hingga 200-1000 nm. Identifikasi kualitatif senyawa organik dalam rentang ini seringkali lebih terbatas dibandingkan dengan rentang inframerah, karena pita serapan cenderung lebih lebar dan kurang terinci. Namun, beberapa gugus fungsional tertentu seperti karbonil, nitro, atau sistem tergabung, dapat menunjukkan puncak yang karakteristik, yang memberikan informasi berguna tentang keberadaan gugus tersebut dalam molekul (Badan Standardisasi Nasional, 2004). Sumber sinar polikromatis untuk sinar UV biasanya menggunakan lampu deuterium, sedangkan untuk sinar tampak menggunakan lampu wolfram. Monokromator pada spektrofotometer UV-Vis menggunakan lensa prisma dan filter optik. Sampel disimpan dalam kuvet yang terbuat dari kuarsa atau gelas dengan berbagai lebar. Detektor pada spektrofotometer UV-Vis dapat berupa detektor foto, detektor panas, atau detektor dioda foto, yang berfungsi menangkap cahaya yang dilewatkan oleh sampel dan mengubahnya menjadi arus listrik. Arus listrik yang dihasilkan kemudian ditampilkan pada monitor. Skema spektrofotometer UV-Vis biasanya dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema alat Spektrofotometri UV-Vis (Skoog, 2000)

Serapan radiasi UV-Vis sering dikenal sebagai spektroskopi elektronik. Penggunaan spektrofotometri UV-Vis didasarkan pada hukum Lambert-Beer. Hukum Lambert-Beer didasarkan atas pengukuran absorbansi yang diserap sampel pada panjang gelombang tertentu sehingga konsentrasinya dapat diketahui.

Spektrofotometri UV-Vis adalah alat yang menggunakan sumber cahaya polikromatis untuk menghasilkan berbagai panjang gelombang. Lampu deuterium biasanya digunakan untuk daerah UV, sementara lampu tungsten, atau lampu wolfram, digunakan untuk daerah cahaya tampak. Alat ini dilengkapi dengan *photodiode* dan monokromator. Monokromator berperan memecah cahaya polikromatis menjadi komponen-komponen tunggal dengan panjang gelombang yang spesifik. Ini memungkinkan alat untuk menghasilkan radiasi monokromatis dari cahaya polikromatis yang dipancarkan oleh sumbernya. Susunan monokromator melibatkan celah masuk, filter, kisi, dan celah keluar untuk menghasilkan radiasi monokromatis yang tepat (Fessenden dan Fessenden, 1997).

2.6.2 Spektrofotometer *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

Spektrofotometer *Fourier Transform Infrared* (FT-IR) adalah alat yang digunakan untuk menganalisis struktur molekul dengan cara mengidentifikasi gugus fungsi dan ikatan yang ada dalam suatu molekul. Prinsip kerja alat ini adalah dengan merekam penyerapan energi radiasi elektromagnetik di daerah spektra inframerah,

yang mengakibatkan perubahan dalam rotasi dan getaran molekul pada tingkat energi elektronik yang rendah. Penggunaan FT-IR bertujuan untuk karakterisasi molekul dengan mengetahui pola vibrasi antar atom dalam molekul tersebut. FT-IR tidak hanya digunakan untuk menganalisis senyawa organik dan anorganik, tetapi juga untuk analisis kualitatif dan kuantitatif. Analisis kualitatif dilakukan dengan mengamati pola puncak pada spektra FT-IR, yang memiliki karakteristik sesuai dengan gugus fungsi yang ada dalam senyawa yang dianalisis. Sementara itu, analisis kuantitatif melibatkan penggunaan senyawa standar dengan berbagai konsentrasi yang berbeda, yang kemudian diukur spektranya untuk membuat kurva kalibrasi (Susila, 2019).

Karakterisasi senyawa polimer dapat dilakukan menggunakan spektrofotometer inframerah. Teknik ini digunakan untuk memperoleh spektra inframerah dari absorbansi, emisi, foto konduktivitas, atau penyebaran Raman dari sampel dalam bentuk padat, cair, atau gas. Prinsip kerja FT-IR melibatkan pengiriman sinar inframerah melalui celah menuju sampel, di mana celah ini berfungsi untuk mengatur jumlah energi yang diterima oleh sampel. Sebagian sinar inframerah akan diserap oleh sampel, sementara sisanya diteruskan melalui permukaan sampel, sehingga sinar inframerah yang tersisa mencapai detektor. Sinyal yang terukur kemudian dikirim ke komputer untuk dianalisis (Thermo, 2001).

Tujuan dari karakterisasi menggunakan FT-IR adalah untuk memahami jenis vibrasi antar atom dalam senyawa. Teknik FT-IR juga berguna untuk menganalisis baik senyawa organik maupun anorganik, serta untuk analisis kualitatif dan kuantitatif dengan mengamati kekuatan absorpsi senyawa pada panjang gelombang tertentu (Hindryawati dan Alimuddin, 2010). Radiasi elektromagnetik pada spektra inframerah akan diserap sebagian atau seluruhnya oleh senyawa organik. Penyerapan ini terkait dengan perubahan momen dipol pada ikatan kovalen selama proses vibrasi (Supriyanto, 1999).

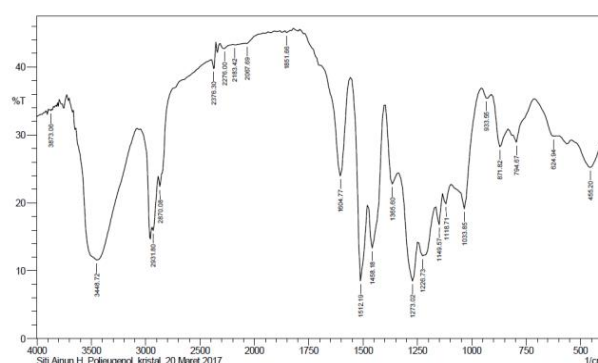
Senyawa organik memiliki gugus fungsi khusus yang menghasilkan bilangan gelombang tertentu pada spektra FT-IR. Dalam penelitian ini, eugenol dan divinil benzena digunakan sebagai bahan dasar untuk sintesis senyawa pembawa dalam

proses transportasi MG. Eugenol mengandung beberapa gugus fungsional, termasuk alil ($-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}_2$), hidroksi ($-\text{OH}$), dan metoksi ($-\text{OCH}_3$). Bilangan gelombang untuk berbagai gugus fungsi lainnya pada FT-IR dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Daftar bilangan gelombang FT-IR dari berbagai jenis ikatan (Litani *et al.*, 2008)

Bilangan Gelombang (cm^{-1})	Jenis Ikatan
3750-3000	Regangan O–H dan N–H
3000-2700	Regangan $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$, C–H dan C–H aldehyd
1900-1650	Regangan C=O (asam, aldehyd, keton, amida, ester dan anhidrida)
1675-1500	Regangan C=C (aromatik dan alifatik) dan C=N
1475-1300	C–H <i>bending</i>
1000-650	C=C–H dan Ar–H <i>bending</i>

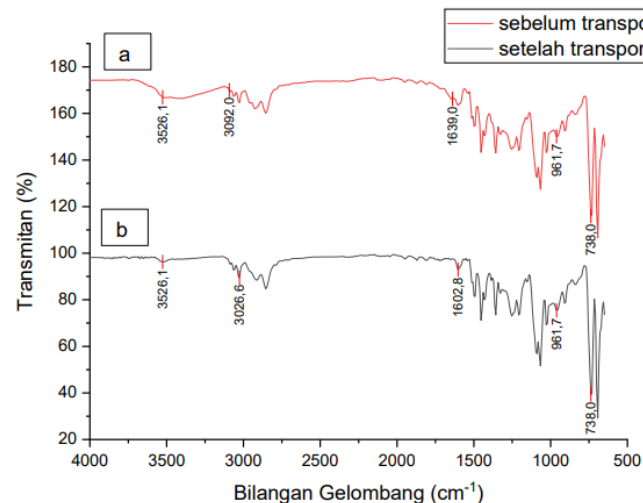
Menurut penelitian Hikmah *et al.* (2018), spektra FT-IR polieugenol (Gambar 5) menunjukkan penyerapan lebar pada bilangan gelombang 3448,72 cm^{-1} , yang mengindikasikan keberadaan gugus hidroksil ($-\text{OH}$). Sebagai perbandingan, pada spektra FT-IR eugenol, gugus $-\text{OH}$ terletak pada bilangan gelombang 3518,16 cm^{-1} .



Gambar 5. Hasil spektra FT-IR polieugenol (Hikmah *et al.*, 2018)

Karakterisasi FTIR dapat digunakan untuk menguji kemampuan transport MG menggunakan Ko-EDAF sebagai senyawa pembawa. Kehilangan komponen

membran juga dapat dideteksi dengan jelas dengan memeriksa spektra IR membran setelah tiga kali transport. Gambar 6 menunjukkan spektra FTIR membran PIM sebelum transport dan setelah tiga kali transport (Kiswandono *et al.*, 2024).



Gambar 6. Spektra IR dari PIM yang mengandung polieugenol (Kiswandono *et al.*, 2024)

Gambar 6 menunjukkan bahwa jumlah Ko-EDAF sebagai senyawa pembawa dalam membran mengalami penurunan yang signifikan. Persentase kehilangan membran pada setiap transpor menurun dengan peningkatan jumlah penggunaan berulang dari membran. Persentase kehilangan membran dihitung berdasarkan perbedaan bobot antara bobot awal dan bobot akhir membran setelah transpor. Penurunan persentase kehilangan membran dalam transpor kedua dan ketiga mungkin disebabkan oleh hilangnya komponen membran yang relatif besar pada transpor pertama, sehingga penggunaan kedua dan ketiga menyebabkan hanya sedikit kehilangan komponen (Kiswandono *et al.*, 2024).

2.6.3 Scanning Electron Microscope (SEM)

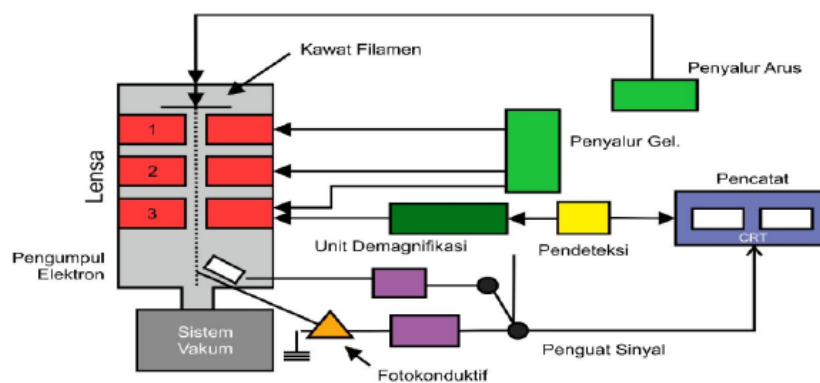
Scanning Electron Microscope (SEM), adalah jenis mikroskop elektron yang memanfaatkan berkas elektron untuk merekam bentuk permukaan material yang

sedang dianalisis. Prinsip kerja SEM melibatkan fokus berkas elektron pada permukaan objek dan pencitraannya dengan mendeteksi elektron yang dipantulkan dari permukaan tersebut. Proses pemindaian pada permukaan material yang diinginkan dikendalikan oleh generator dan gulungan pemindaian. Elektron sekunder yang dihasilkan dari interaksi antara berkas elektron dan permukaan sampel ditangkap oleh detektor *Secondary Electron* (SE). Sinyal yang diperoleh kemudian diperkuat dan diproses oleh amplifier sebelum divisualisasikan pada layar monitor sinar katoda (CRT) (Osman *et al.*, 2014).

Setiap kali sinar dari CRT mengenai target, terjadi fenomena ionisasi saat berkas elektron dengan energi tinggi menembus permukaan target. Proses ini menyebabkan atom dalam sampel padatan terionisasi, melepaskan elektron yang kemudian tersebar keluar dari aliran sinar utama. Akibatnya, terbentuk lebih banyak elektron bebas yang bergerak bebas sebelum kehilangan energi dan akhirnya dilepaskan dari target. Elektron ini kemudian dialirkan ke unit demagnifikasi, di mana mereka dideteksi oleh sensor dan direkam sebagai gambar. Salah satu aspek yang penting dalam PIM adalah struktur mikro dari membran, yang menggambarkan bagaimana ekstraktan didistribusikan di dalam matriks polimer dan mempengaruhi efisiensi transportasi membran. Hasil dari SEM secara konsisten menunjukkan dampak komposisi polimer terhadap morfologi membran (Nghiem *et al.*, 2006).

Prinsip kerja SEM adalah menggunakan berkas elektron dengan energi tinggi untuk memantulkan dan memvisualisasikan permukaan benda atau material. Ketika berkas elektron mengenai permukaan, sebagian besar dipantulkan kembali sebagai berkas elektron sekunder ke berbagai arah. Interaksi ini menciptakan pola difraksi elektron yang memberikan informasi tentang struktur permukaan dan distribusi unsur. Meskipun banyak elektron dipantulkan, hanya satu yang memiliki intensitas tertinggi. Detektor dalam SEM menangkap elektron ini untuk visualisasi. Elektron memiliki resolusi yang jauh lebih tinggi daripada cahaya, memungkinkan pengamatan hingga skala nano. Cahaya hanya memiliki resolusi sekitar 200 nm, sedangkan elektron dapat mencapai resolusi hingga 0,1 - 0,2 nm (Anwar, 1989).

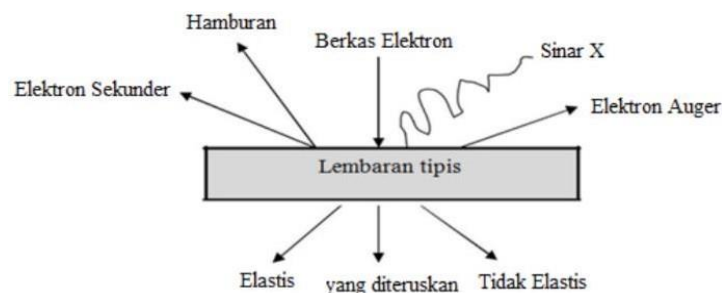
Menganalisis sampel menggunakan SEM, permukaan sampel harus memiliki konduktivitas yang tinggi. Polimer umumnya memiliki konduktivitas rendah, sehingga perlu dilapisi dengan lapisan tipis bahan konduktif, seperti perak, emas, atau campuran emas dan paladium. Berkas elektron diarahkan ke permukaan spesimen yang telah dilapisi dengan lapisan konduktor. Pelapisan ini memungkinkan polimer untuk menghantarkan arus listrik dan berinteraksi dengan berkas elektron. Interaksi berkas elektron dengan spesimen menghasilkan pola difraksi elektron yang memberikan informasi tentang kristalografi, jenis unsur, distribusi, dan morfologi permukaan bahan. Intensitas elektron yang berinteraksi dengan spesimen dikumpulkan oleh tabung televisi untuk visualisasi (Oxford, 2018). Skema SEM dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Skema SEM (Oxford, 2018).

Berkas elektron yang dihasilkan oleh penembak elektron pada SEM dikondensasikan oleh lensa kondensor dan difokuskan menjadi titik yang jelas oleh lensa objektif. Koil pemindai yang diberi energi menciptakan medan magnet untuk berkas elektron. Ketika berkas elektron menabrak sampel, ini menghasilkan elektron sekunder yang kemudian dikumpulkan oleh detektor sekunder atau detektor backscatter. Gambar yang dihasilkan terdiri dari ribuan titik dengan intensitas yang berbeda di layar CRT, menciptakan gambar topografi permukaan. Dalam sistem ini, berkas elektron difokuskan pada sampel, gambar bayangan dari sampel diperbesar oleh lensa objektif, dan diproyeksikan pada layar (Olasupo *et al.*, 2022).

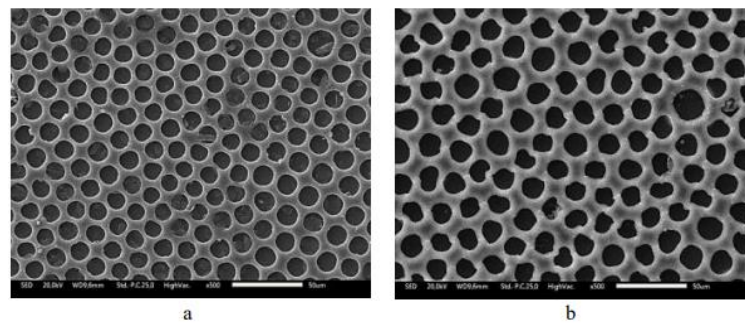
Struktur suatu material dapat dipelajari dengan menganalisis interaksi yang terjadi ketika sebuah benda padat terkena berkas elektron. Ketika berkas elektron jatuh pada sampel, sebagian akan dihamburkan dan sebagian lagi akan diserap atau menembus sampel. Jika sampelnya cukup tipis, sebagian besar berkas elektron akan ditransmisikan melalui sampel, sementara beberapa elektron akan dihamburkan secara tidak elastis. Interaksi ini dengan atom dalam sampel dapat menghasilkan pelepasan elektron dengan energi rendah, foton sinar-X, dan elektron Auger, yang semuanya dapat digunakan untuk mengkarakterisasi material. Gambaran interaksi hamburan elektron-elektron ketika bertemu dengan sampel diperlihatkan dalam Gambar 8.



Gambar 8. Hamburan elektron yang jatuh pada lembaran tipis (Smallman, 2000)

Interaksi antara elektron dan atom dalam sampel dapat menghasilkan pelepasan elektron dengan energi rendah, foton sinar-X, dan elektron Auger, yang semuanya dapat digunakan untuk mengkarakterisasi material. Elektron sekunder adalah elektron yang dipancarkan dari kulit atom terluar karena interaksi berkas elektron dengan padatan, yang menyebabkan loncatan elektron yang terikat lemah dari pita konduksi. Elektron Auger adalah elektron dari kulit orbit terluar yang dilepaskan dari atom ketika elektron tersebut menyerap energi yang dilepaskan oleh elektron lain yang turun ke tingkat energi yang lebih rendah (Smallman, 2000).

Kemampuan transpor MG juga dapat diamati menggunakan SEM, dimana jika membran sesudah transpor MG maka akan ada komponen membran cair yang hilang (*leaching*). Terjadinya kehilangan komponen membran pada transpor MG juga dapat diamati dengan melihat hasil SEM pada gambar 9.



Gambar 9. Hasil SEM membran PIM (a) sebelum transpor (b) setelah transpor (Kiswandono *et al.*,2024)

Membran sebelum proses transpor (Gambar 9a) dengan perbesaran 500x, permukaan membran masih tampak tertutup oleh plasticizer sebagai medium cair, yang menunjukkan bahwa pori-pori membran terlihat homogen. Setelah proses transpor MG (Gambar 9b) dengan perbesaran 500x, permukaan membran menjadi tidak rata dan terlihat adanya pori-pori, yang mengindikasikan bahwa selama proses transpor terjadi pelepasan komponen membran (leaching). Penggunaan membran dalam proses transpor memungkinkan terjadinya leaching terhadap komponen-komponen membran. Proses leaching ini menyebabkan permukaan PIM menjadi berpori dan tidak homogen. Komponen yang mengalami leaching bisa berasal dari hilangnya carrier, polimer dasar, maupun plasticizer.

III.METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini telah dilaksanakan pada bulan Juli 2024 sampai dengan Mei 2025 di Laboratorium Kimia Analitik dan Instrumentasi Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Karakterisasi membran PIM yang mengandung Ko-EDAF 10% menggunakan instrumen SEM dilakukan di Unit Penunjang Akademik (UPA) Laboratorium Terpadu Universitas Lampung, sedangkan karakterisasi menggunakan instrumen FTIR dilakukan di UPA Laboratorium Terpadu Universitas Lampung dan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Bandung. Analisis konsentrasi MG menggunakan Spektrofotometer UV-Vis dilakukan di Laboratorium Kimia Analitik SMKN 8 Bandar Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah Spektrofotometer UV-Vis (Lab Junction LJ-2371), SEM (ZEISS EVO MA 10), FTIR (Agilent Carry 630), *thickness* gauge (Mitutoyo 7301) magnetic stirrer, magnetic bar, neraca digital analitik (Mettler Toledo AB54-S), pH meter (pH 60 VioLab pH-Mv-Orp-T), pipet tetes, spatula, corong pisah, statif dan klem, *chamber* berdiameter 3,5 cm, mortal dan alu, gelas ukur, gelas beaker, alumunium foil, tisu, batang pengaduk, spatula, labu bundar, labu ukur, cetakan membran 5 cm, dan tisu.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini termasuk MG, Ko-EDAF 10%, aquabides, polivinil klorida (PVC), dibenzileter (DBE), tetrahidrofuran (THF), HNO_3 0,1M, aquades, PbCO_3 25 ppm, dan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 25 ppm.

3.3 Metode

3.3.1 Pembuatan membran *Polymer Inclusion Membrane* (PIM)

Membran PIM dibuat dengan berat total 0,27; 0,54 dan 1,08 g dalam suatu cetakan yang telah dilengkapi dengan *spin bar*. Jumlah bahan atau komponen penyusun membran yang diperlukan yaitu polieugenol sebagai senyawa pembawa, PVC sebagai polimer dasar, dan DBE sebagai *plasticizer* terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan berat komponen pembentuk membran (10:32:58)
(Nghiem *et al.*, 2006)

Membran	Ko-EDAF (g)	PVC (g)	DBE (g)	Berat Total (g)
T ₂₇	0,0270	0,0864	0,1556	0,2700
T ₅₄	0,0540	0,1728	0,3132	0,5400
T ₁₀₈	0,1080	0,3456	0,6264	1,0800

Tetrahidrofuran (THF) sebanyak 10 mL ditambahkan pada komponen membran PIM. THF berfungsi sebagai pelarut untuk menghomogenkan campuran (komponen membran) di dalam cetakan. Pelarutan berlangsung selama 30 menit. Membran hasil cetakan didiamkan selama 3 hari untuk menguapkan pelarut secara alami. Istilah T₂₇, T₅₄ dan T₁₀₈ diambil berdasarkan berat total membran (ketebalan membran) berturut-turut dari yang tipis sampai yang paling tebal.

3.3.2 Pembuatan larutan induk *malachite green*, pembuatan limbah buatan dan pengukuran konsentrasi *malachite green*

Proses pembuatan limbah buatan MG dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- a. Pembuatan Larutan Induk MG 1000 ppm
Larutan induk MG dengan konsentrasi 1000 ppm dibuat dengan melarutkan 1 g MG dalam 1000 mL akuabides.
- b. Pembuatan Limbah Buatan 25 ppm
Limbah buatan yang mengandung MG, logam Pb(II), dan logam Cu(II) disiapkan dengan menambahkan 0,0025 g MG, 0,0098 g Pb(NO₃)₂, dan 0,0032 g Cu(NO₃)₂ ke dalam labu ukur 100 mL, lalu menambahkannya dengan akuabides hingga mencapai tanda tera.
- c. Pengukuran Konsentrasi MG
Sebelum mengukur konsentrasi MG, panjang gelombang maksimum MG pada konsentrasi 25 ppm ditentukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis dalam rentang panjang gelombang 400 nm hingga 800 nm. Selanjutnya, konsentrasi MG dalam larutan standar, fasa sumber, dan fasa penerima diukur dengan mengambil masing-masing 5 mL dari larutan sampel dan mengukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum yang telah ditentukan.

3.3.3 Variasi pH *malachite green* pada fasa sumber

Membran PIM yang telah dicetak dengan ketebalan standar dan mengandung senyawa pembawa ditempatkan di tengah pipa transpor. Ke dalam pipa transpor ditambahkan 50 mL larutan HNO₃ 1 M sebagai fasa penerima, serta masing-masing 50 mL larutan MG 25 ppm sebagai fasa sumber dengan pH yang sudah diatur variasinya (5,0; 6,0; 7,0; 8,0; dan 9,0). Pipa transpor kemudian ditutup dan diaduk selama 12 jam menggunakan pengaduk magnet. Setelah proses pengadukan selesai, sampel diambil dari fasa sumber dan fasa penerima sebanyak

5 mL masing-masing. Konsentrasi MG yang terkandung dalam fasa sumber dan fasa penerima dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum yang telah ditentukan sebelumnya.

3.3.4 Variasi konsentrasi HNO_3 pada fasa penerima

Membran PIM dengan ketebalan normal yang sudah dicetak dan mengandung senyawa pembawa ditempatkan di tengah-tengah pipa transpor, kemudian ditambahkan 50 mL HNO_3 sebagai fasa penerima dan 50 mL MG 25 ppm dengan pH optimum sebagai fasa sumber. Variasi konsentrasi HNO_3 pada fasa penerima adalah 0,50; 0,75; 1,00; 1,25 dan 1,50 M. Pipa transpor ditutup dan diaduk selama 12 jam dengan pengaduk magnet. Setelah selesai diaduk, fasa sumber dan fasa penerima diambil sampelnya sebanyak 5 mL. Konsentrasi MG yang terdapat di dalam fasa sumber dan fasa penerima dianalisis dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.3.5 Variasi ketebalan membran

Membran PIM dengan variasi ketebalan tipis T_{27} , normal T_{54} , dan tebal T_{108} yang sudah dicetak dan mengandung senyawa pembawa ditempatkan di tengah-tengah pipa transpor, kemudian ditambahkan 50 mL HNO_3 konsentrasi optimum sebagai fasa penerima dan 50 mL MG 25 ppm dengan pH optimum sebagai fasa sumber. Pipa transpor ditutup dan diaduk selama 12 jam dengan pengaduk magnet. Setelah selesai diaduk, fasa sumber dan fasa penerima diambil sampelnya sebanyak 5 mL. Konsentrasi MG yang terdapat di dalam fasa sumber dan fasa penerima dianalisis dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.3.6 Variasi konsentrasi senyawa pembawa

Membran PIM dengan ketebalan standar T_{54} yang telah dicetak dan mengandung variasi konsentrasi senyawa pembawa ditempatkan di tengah pipa transport, kemudian ditambahkan 50 mL HNO_3 sebagai fasa penerima optimum dan 50 mL larutan MG 25 ppm sebagai fasa sumber optimum ke dalam pipa transpor. Pipa transpor kemudian ditutup dan diaduk selama 12 jam menggunakan pengaduk magnet. Setelah proses pengadukan selesai, diambil sampel dari fasa sumber dan fasa penerima masing-masing sebanyak 5 mL. Konsentrasi MG yang terkandung dalam fasa sumber dan fasa penerima dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

Tabel 4. Variasi konsentrasi senyawa pembawa

Membran	Ko-EDAF (g)	PVC (g)	DBE (g)	Berat Total (g)
1	0,0520	0,1728	0,3132	0,0887
2	0,0540	0,1728	0,3132	0,1774
3	0,0560	0,1728	0,3132	0,2661
4	0,0580	0,1728	0,3132	0,3548
5	0,0600	0,1728	0,3132	0,4435

3.3.7 Variasi waktu transpor

Membran PIM dengan ketebalan optimum yang telah dicetak dan mengandung senyawa pembawa ditempatkan di tengah pipa transport, kemudian ditambahkan 50 mL HNO_3 dengan konsentrasi optimum sebagai fasa penerima dan 50 mL MG 25 ppm dengan pH optimum sebagai fasa sumber. Pipa transpor kemudian ditutup dan diaduk dengan variasi waktu selama 6, 9, 12, 16, 18, dan 24 jam menggunakan pengaduk magnet. Setelah proses pengadukan selesai, diambil sampel dari fasa sumber dan fasa penerima masing-masing sebanyak 5 mL. Konsentrasi MG yang terkandung dalam fasa sumber dan fasa penerima dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

Setelah didapatkan hasil dan data transpor kemudian ditentukan kinetika transpor meliputi permeabilitas (P), fluks (J), koefisien rejeksi (R), persen *recovery* (%R) dan persen *removal* (%RE) pada transpor MG Perhitungan seperti terlihat pada Persamaan 1, 2, 3, 4, dan 5 (Gherasim *et al.*, 2011).

$$\% Recovery = \frac{C_{penerima}}{C_{0\ sumber}} \times 100 \quad (1)$$

Keterangan :

%*Recovery* = % *Malachite green* yang terdapat di dalam fasa penerima
 $C_{0\ sumber}$ = Konsentrasi awal *malachite green* di dalam fasa sumber (ppm)
 $C_{penerima}$ = Konsentrasi *malachite green* di dalam fasa penerima (ppm)

$$\% Removal = \left(\frac{C_{0\ sumber} - C_{sumber}}{C_{0\ sumber}} \right) \frac{C_{penerima}}{C_{0\ sumber}} \times 100 \quad (2)$$

Keterangan :

%*Removal* = % *Malachite green* yang terdapat di dalam fasa penerima
 $C_{0\ sumber}$ = Konsentrasi awal *malachite green* di dalam fasa sumber (ppm)
 C_{sumber} = Konsentrasi *malachite green* di dalam fasa sumber (ppm)

$$\text{Permeabilitas membran } P \left(\frac{m}{s} \right) = - \frac{V_f}{A \times t} \ln \frac{[C]_t}{[C]_0} \quad (3)$$

Keterangan:

V_f = Volume fluida (m³)
 A = Luas permukaan membran (m)
 T = Waktu (jam)
 $[C]_t$ = Konsentrasi fasa penerima pada waktu t
 $[C]_0$ = Konsentrasi permeat (konsentrasi *malachite green* yang ada pada fasa sumber)

$$\text{Fluks (J)} \quad J = V/A.t \quad (4)$$

Keterangan :

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

$$\text{Koefisien Rejeksi (R)} = \left(1 - \frac{C_p}{C_t} \right) \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan :

R	= Koefisien rejeksi
C_p	= Konsentrasi permeat (konsentrasi <i>malachite green</i> yang ada pada fasa penerima saat t optimum)
C_t	= Konsentrasi <i>malachite green</i> pada fasa sumber saat t optimum

3.3.8 Studi transpor *malachite green* pada limbah buatan

Dalam eksperimen ini, sampel limbah buatan yang berisi MG, $PbCO_3$, dan $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ dengan konsentrasi masing-masing 25 ppm disiapkan. Kemudian, transpor dilakukan menggunakan membran PIM dengan ketebalan optimum yang telah dicetak. Membran ditempatkan di tengah-tengah pipa transpor. Fasa sumber yang digunakan adalah 50 mL limbah buatan, sementara fasa penerima adalah 50 mL HNO_3 , sesuai dengan kondisi optimum. Pipa transpor kemudian ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet pada fasa sumber dan fasa penerima selama waktu optimum pada suhu kamar.

Setelah proses pengadukan selesai, sampel diambil dari fasa sumber dan fasa penerima sebanyak 5 mL. Konsentrasi MG di dalam fasa sumber dan fasa penerima dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk mengetahui tingkat transpornya.

3.3.9 Variasi jenis garam

Membran PIM seperti yang ditentukan dalam prosedur sebelumnya, ditimbang terlebih dahulu. Selanjutnya, membran PIM ditempatkan pada pipa transport MG. Pada masing-masing kolom fasa sumber (5 *chamber*), diisi dengan campuran 50 mL MG (25 ppm pH optimum) yang telah ditambahkan garam dengan konsentrasi 0,01 M. Jenis garam yang digunakan adalah NaCl, NaNO₃, Na₂SO₄, dan KNO₃. Sementara itu, pada fasa penerima dimasukkan 50 mL larutan HNO₃ 0,75 M.

Pipa transpor kemudian ditutup dan diaduk menggunakan pengaduk magnet selama waktu optimum pada suhu kamar. Setelah proses transpor selesai, membran PIM dilepas dan dikeringkan dengan cara dibiarkan di udara terbuka. Berat membran setelah proses transpor kemudian ditimbang untuk mengetahui perubahan massa yang terjadi, selanjutnya konsentrasi MG pada fasa penerima dan fasa sumber dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum untuk mengevaluasi efisiensi transpor MG melalui membran PIM dalam berbagai kondisi fasa sumber yang berbeda.

3.3.10 Variasi konsentrasi garam pada fasa sumber

Transpor MG dengan penambahan garam pada fasa sumber dilakukan dengan cara membran PIM dengan komposisi optimal jenis garam yang akan digunakan ditimbang terlebih dahulu. Membran PIM kemudian ditempatkan pada pipa transpor MG. Pada kolom fasa sumber, diisi dengan 50 mL larutan MG 25 ppm pH optimum yang telah ditambahkan jenis garam optimal dengan variasi konsentrasi, yaitu 0; 0,001; 0,01; 0,1; dan 1 M. Sedangkan pada kolom fasa penerima, diisi dengan 50 mL larutan HNO₃ 0,75 M. Pipa transpor ditutup dan diaduk menggunakan pengaduk magnet pada fasa sumber dan fasa penerima selama waktu optimum pada suhu kamar. Setelah proses transpor selesai, membran PIM dilepas, dikeringkan dengan cara dibiarkan di udara terbuka, dan ditimbang untuk mengetahui perubahan massa yang terjadi. Konsentrasi MG pada fasa penerima dan fasa sumber dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis

pada panjang gelombang maksimum untuk mengevaluasi efek penambahan garam terhadap transpor MG melalui membran PIM.

3.3.11 Variasi konsentrasi garam pada fasa penerima

Transpor MG dengan penambahan garam pada fasa penerima dilakukan dengan cara membran PIM dengan komposisi optimal jenis garam yang akan digunakan ditimbang terlebih dahulu. Membran PIM kemudian ditempatkan pada pipa transpor MG. Pada fasa sumber, diisi dengan 50 mL larutan MG 25 ppm dengan pH optimum, sedangkan pada fasa penerima diisi dengan larutan garam dengan variasi konsentrasi, yaitu 0; 0,001; 0,01; 0,1; dan 1 M dalam 50 mL HNO₃ 0,75 M. Pipa transpor ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet pada fasa sumber dan fasa penerima selama waktu optimum pada suhu kamar. Setelah proses transpor selesai, membran PIM dilepas, dikeringkan dengan cara dibiarkan di udara terbuka, dan ditimbang untuk mengetahui perubahan massa yang terjadi. Konsentrasi MG pada fasa penerima dan fasa sumber dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum untuk mengevaluasi efek penambahan garam pada transpor MG melalui membran PIM.

3.3.12 Pemakaian berulang PIM

Prosedur untuk menggunakan kembali membran PIM dalam transpor MG yaitu membran PIM dengan komposisi optimal sebelum digunakan ditimbang terlebih dahulu. Membran PIM kemudian ditempatkan pada pipa transpor MG. Pada kolom fasa sumber, diisikan dengan 50 mL larutan MG 25 ppm dengan pH optimum, sedangkan pada kolom fasa penerima diisikan dengan 50 mL HNO₃ 0,75 M. Pipa transpor ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet pada fasa sumber dan fasa penerima selama waktu optimum pada suhu kamar.

Setelah proses transpor selesai, membran PIM dilepas, dikeringkan dengan cara dibiarkan di udara terbuka selama waktu optimum, dan ditimbang untuk

mengetahui perubahan massa yang terjadi. Konsentrasi MG pada fasa penerima dan fasa sumber dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum. Membran PIM kemudian dapat digunakan kembali untuk transpor MG dengan lima kali pengulangan menggunakan larutan MG yang baru. Jika diperlukan, membran PIM dapat dicuci dengan aquades dan HNO_3 0,75 M selama 30 menit setelah itu sebelum digunakan kembali untuk transpor MG dengan lima kali pengulangan menggunakan larutan MG yang baru.

3.3.13 *Lifetime*

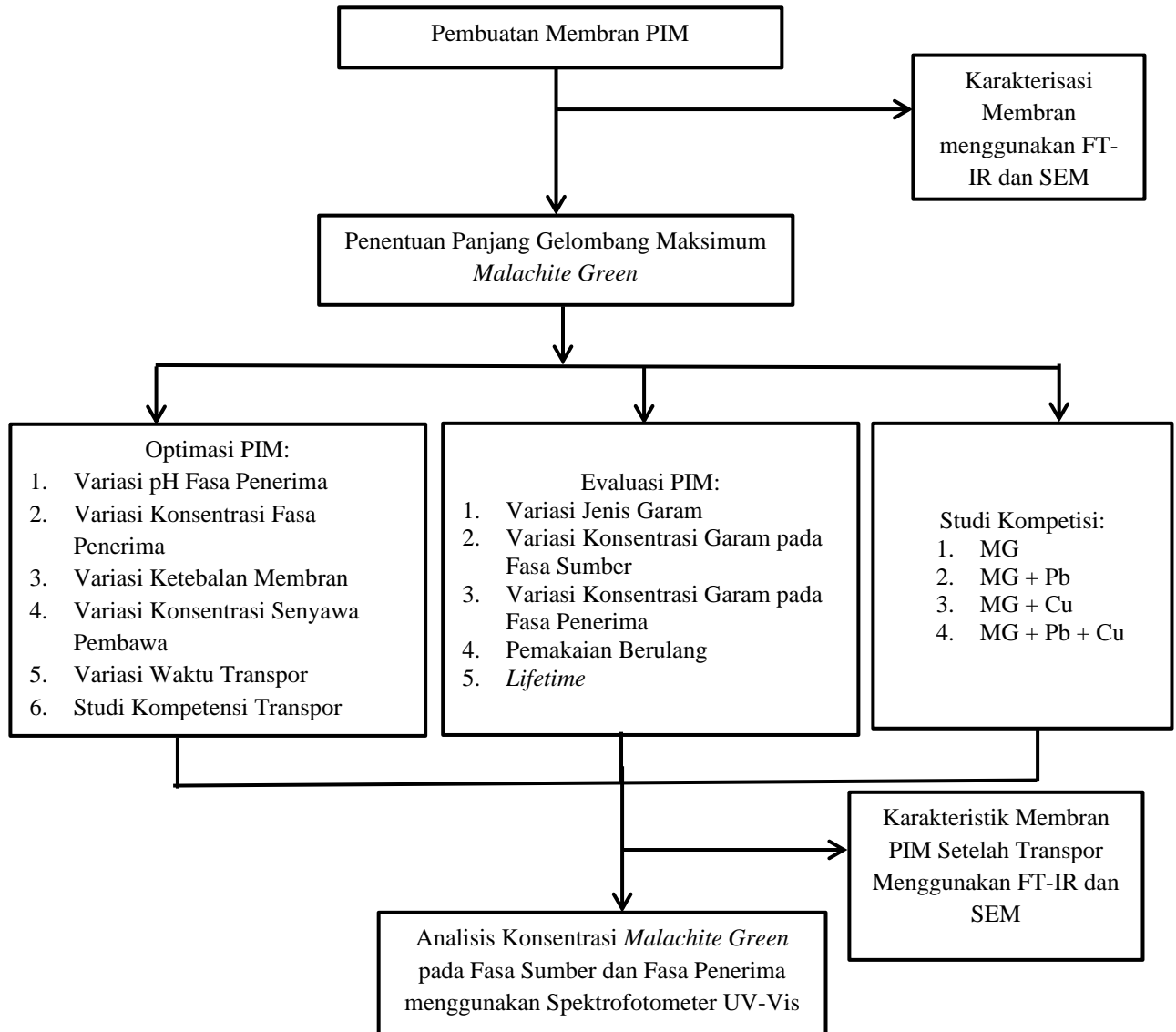
Prosedur untuk uji umur membran (*lifetime*) dengan lima variasi penggunaan garam yaitu membran PIM dengan komposisi optimum ditempatkan pada tengah pipa transpor MG. Pada kolom fasa sumber, diisi dengan 50 mL larutan MG 25 ppm dengan pH optimum dengan lima variasi, yaitu:

- a. Tanpa garam
- b. Menggunakan garam NaNO_3 0,1 M
- c. Menggunakan garam NaCl 0,1 M
- d. Menggunakan garam Na_2SO_4 0,1 M
- e. Menggunakan garam KNO_3 0,1 M

Pada kolom fasa penerima, diisi dengan 50 mL HNO_3 0,75 M. Pipa transpor ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet pada fasa sumber dan fasa penerima. Proses transpor dilakukan terus menerus dan dilakukan pengecekan pH setiap hari pada fasa sumber. *Lifetime* membran ditentukan dengan cara mengukur nilai pH pada fasa sumber secara berkala. Turunnya nilai pH pada fasa sumber menunjukkan bahwa membran PIM telah mengalami kebocoran dan artinya membran mengalami kerusakan.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Berikut adalah diagram alir dari penelitian dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Diagram alir penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa:

1. Kondisi transpor *Malachite Green* (MG) yang paling optimal diperoleh pada pH fasa sumber sebesar 9, dengan konsentrasi HNO_3 di fasa penerima sebesar 0,75 M, menggunakan membran dengan ketebalan normal (T_{54}), dan waktu transpor selama 12 jam. Dalam kondisi ini, jumlah MG yang berhasil ditranspor dari fasa membran ke fasa penerima mencapai 84,60% (%removal).
2. Kehadiran logam kompetitor Cu(II) dan Pb(II) mempengaruhi efisiensi transpor MG ke fasa penerima sebesar 15,86%. Hal ini dibuktikan dari nilai %removal MG dari 86,70% (kontrol) menjadi 70,84% (MG+Cu(II)+Pb(II)).
3. Kinerja maksimal dari membran PIM diperoleh pada penggunaan pertama tanpa dilakukan pencucian, dengan masa pakai membran mencapai 69 hari, terutama ketika garam NaNO_3 ditambahkan pada fasa sumber.
4. Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan menurunnya intensitas spektra membran sesudah proses transpor, yang menandakan adanya komponen membran yang hilang (*leaching*) selama proses berlangsung. Hal ini didukung dengan karakterisasi menggunakan SEM, yaitu munculnya pori-pori pada permukaan membran sesudah transpor, mengindikasikan adanya komponen membran yang hilang (*leaching*).

5.2 Saran

Saran dalam penelitian ini adalah perlunya dilakukan studi dan penelitian lanjutan terkait proses transpor *Malachite Green* (MG), khususnya dengan fokus pada peningkatan persen konsentrasi fasa penerima (%Cp) yang lebih tinggi. Selain itu, diperlukan pengujian yang lebih optimal terhadap sampel yang digunakan, baik untuk analisis maupun karakterisasi. Penelitian lanjutan juga direkomendasikan untuk mengeksplorasi transpor MG dengan keberadaan berbagai logam kompetitor lainnya, selain Cu(II) dan Pb(II), menggunakan membran inklusi polimer (*Polymer Inclusion Membrane*) yang mengandung senyawa pembawa Ko-EDAF sebesar 10%.

DAFTAR PUSTAKA

- Anwar, N. M. 1989. *Teknik Spektroskopi dalam Analisis Biologis*. Institut Pertanian Bogor Press. Bogor.
- Anwar, C. 2007. *The Conversion of Eugenol Into more Valuable Substances*. Disertasi FMIPA UGM. Yogyakarta.
- Benosmane, N., Boutemour, B., Hamdi, S. M., and Hamdi, M. 2018. Removal of Phenol from Aqueous Solution Using Polymer Inclusion Membrane Based On Mixture Of CTA And CA. *Applied Water Science*, 8(1) 3-8.
- Bhernama, B. G. 2017. Degradasi Zat Warna Malachite Green Secara Ozonolis Dengan Penambahan Katalis TiO₂ dan ZnO. *Elkawanie*, 3(1) 1-10.
- Bonggotgetsakul, Y. Y. N., Robert, Cattrall, R.W., and Kolev, S. 2013. A Method for the Coating of a Polymer Inclusion Membrane with a Monolayer of Silver Nanoparticles. *Journal of Membrane Science*, 428: 142-149.
- Elma, M. 2016. *Proses Pemisahan Menggunakan Teknologi Membran*. Universitas Lambung Mangkurat. Banjarmasin.
- Fangidae dan Theodorus. 2020. Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Study of Malachite Green Adsorption Using Tannin-Based Adsorbent (TBA) from Mangrove Bark (*Rhizophora Mucronata*). Jurusan Teknik Kimia: 14-15.
- Fan, Y., Li, N., Ma, C., Wang, C., and Zhang, Q. 2008. Transport of Zn(II) through polymer inclusion membranes using di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid as a carrier. *Journal of Membrane Science*, 310(1-2), 194-201.
- Febriasari, L. K. 2011. *Sintesis dan karakterisasi membran inklusi polimer untuk transpor logam berat Cu(II) dan Pb(II)*. Universitas Diponegoro, Semarang.
- Fessenden, R. J., dan Fessenden, J. S. 1997. *Dasar - Dasar Kimia Organik Terjemahan Oleh S. Waun*. Bina Aksara. Jakarta.
- Gherasim, C.V., Bourceanu, G., dan Timpu, D. 2011. Experimental and Modeling Studies of Lead (II) Sorption Onto a Polyvinyl-Chloride Inclusion Membrane. *Chemical Engineering Journal*, 172: 817 -827.

- Gusmiati. (2018). *Sintesis dan karakterisasi membran inklusi polimer untuk transpor ion logam Pb(II)*. Universitas Negeri Padang. Padang.
- Harimu, L. Matsjeh, S., Siswanta, D., dan Santosa, S. 2012. Sintesis Polieugenol Oksiasetat Sebagai Pengemban Untuk Pemisahan Ion Logam Berat Fe(III), Cr(III), Cu(II), Ni(II), Co(II) dan Pb(II) Menggunakan Metode Ekstraksi pelarut. *Indo.J. Chem.*, 9(2) 261-266
- Hikmah, S., Erwin, S., dan Musafira. 2018. Sintesis Dan Karakteristik Polieugenol Dari Eugenol Menggunakan Katalis $H_2SO_4 - CH_3COOH$. *Jurnal Kovalen*. 4(3) 285-296.
- Hindryawati, N., dan Alimuddin. 2010. Sintesis dan Karakterisasi Silika Gel dari Abu Sekam Padi dengan Menggunakan Natrium Hidroksida (HNO_3). *Jurnal Kimia Mulawarman*, 7: 75-77.
- Iqbal, M. (2011). *Studi transport logam berat Pb(II) menggunakan membran inklusi polimer (PIM) dengan pembawa D2EHPA*. Universitas Diponegoro, Semarang.
- Kislik, V.S. 2010. Liquid Membranes Principles and Applications in Chemical Separations and Wastewater Treatment. *Elsevier*. Inggris.
- Kiswandono, A. A., Siswanta, D., Aprilita, N. H., Santosa, S. J., and Hayashita, T. 2014. The Capability of Copoly (Eugenol-Divinylbenzene), Ko-EDAF As A Pembawa Of Phenol Transport With Polymer InclusionMembrane (PIM). *Journal of Environmentally Friendly Processes*, 2(2) 57-68.
- Kiswandono, A.A. 2016. Review Metode Membran Cair Untuk Pemisahan MG. *Analit: Analytical and Enviromental Chemistry*, 1(01) 74-91.
- Kiswandono, A. A., Supriyanto, Nuryaman, A., Siswanta, D., Aprilitia N,H., dan Santosa, S.J. 2017. Sintesis Dan Uji Kemampuan Senyawa Co-Eegdma Sebagai Senyawa Pembawa Pada Transport Fenol Menggunakan Metode Polymer Inclusion Membrane. *Jurnal Penelitian Saintek*, 22 (2) : 114-125
- Kiswandono, A. A., Mudasir, D.S., Aprilita, N.H., Santosa, S.J., and Hadi, S. 2019. Synthesis and Characterization of Ko-EDAF and its application test as a cacrier membrane for phenol transport using Polymer Inclusion Membrane (PIM). *Research Journal of Chemestry and Environment*, 23(5) 19-27.
- Kiswandono, A. A., Saka, C., and Hadi, S. 2020. Synthesis of Polymer Inclusion Membranes Based on PVC Containing Copoly-EDVB 4% As a Carrier for Removal of Phenol Solutions. *Envirobiotech Journals*, 39 (4) : 1009-1016.
- Kiswandono, A. A., Widiarto, S., Sari, D., Supriyanto, R., Qudus, H. I., Rinawati, R., Rahmawati, A., dan Devariani, W. 2022. Kompetisi MG Pada Limbah Buatan Menggunakan Kopoli-Eugenol Divinil Benzena 10% Sebagai Senyawa Pembawa. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 18(1) 1-9.

- 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 Poly Eugenol-Based Polymer Inclusion Membrane (PIM) Method. *Journal of Membrane Science and Research*, 10(1).
- Kozłowski, C. A., and Walkowiak, W. 2004. Removal of Toxic Metal Ions from Aqueous Solutions Using Polymer Inclusion Membranes. *Desalination*, 163(1–3), 287–296.
- Ling, Y., and Suah, F. 2017. Extraction of Malachite Green from Wastewater By Using Polymer Inclusion Membrane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1) 785-794.
- Litani, B., Sela, V., Bulatov, I., Zilberman, and Schechter, I. 2008. On Line Remote Prediction of Gasoline Properties by Combined Optical Methods. *Analytica Chimica Acta*, 2(1) 193-199.
- Mazumder, N.A., and Ruma, R. 2022. Preparation of Fly Ash-Ag₂O Nanoaggregates as Highly Capable Photocatalyst for Malachite Green Dye Degradation Under Solar Irradiation. *Materials Journal*, 65(5) 2889-2893.
- Mohamad, M., Wannahari, R., Mohammad, R., Shoparwe, N., Nawi, A., Lun, K., and Wei, L. 2021. Adsorption of Malachite Green Dye Using Spent Coffee Ground Biochar Optimisation Using Response Surface Methodology. *Jurnal Teknologi*, 83(1) 27-36.
- Mohd Suah, Faiz Bukhari and Yeoh Ying Ling. 2017. Extraction of malachite green from wastewater by using polymer inclusion membrane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, (20) 785-794
- Muktiarti, R. 2011. *Karakterisasi membran inklusi polimer (PIM) dengan D2EHPA sebagai pembawa untuk transpor ion logam berat Pb(II)*. Universitas Negeri Semarang, Semarang.
- Mulder, M. 1996. *Basic Principles of Membrane Technology*. 2nd Edition. Kluwer Academic Publisher. The Netherlands.
- Muna, dan Nailal. 2014. *Adsorpsi Zat Warna Malachite Green (MG) oleh Komposit Kitosan-Bentonit*. UIN Sunan Kalijaga. Yogyakarta.
- Nghiem, L., Mornane, P., Potter, J., Perera, R., Catrall, and S. D. Kolev. 2006. Extraction and Transport of Metal Ions and Small Organic Compounds Using Polymer Inclusion Membranes (PIMs). *Journal of Membrane Science*, 281: 7-41.
- Nur, M., dan Adijuawana, H. 1989. *Teknik Spektroskopi dalam Analisis Biologis*. Institut Pertanian Bogor. Bogor.

- Olasupo, A., Abubakar, C.S., Faiz, B., and Suah, M. 2022. A Novel Approach in the Removal of Ciprofloxacin Antibiotic in an Aquatic System Using Polymer Inclusion Membrane. *Environmental Technology and Innovation*, 27: 3-6.
- Pang, Y. L., and Abdullah, A. Z. 2013. Current Status of Textile Industry Wastewater Management and Research Progress in Malaysia. *Clean–Soil Air Water*, 41(8) 751–764.
- Pathy, A., Krishnamoorthy, N., Chang, S. X., and Paramasivan, B. 2022. Malachite Green Removal using Algal Biochar and its Composites with Kombucha Scoby: an Integrated Biosorption and Phycoremediation Approach. *Surfaces and Interfaces*, 30(3) 217-220.
- Purwasih, H. 2013. *Studi transpor ion logam berat Pb(II) dan Cd(II) menggunakan membran inklusi polimer berbasis PVC*. Universitas Diponegoro, Semarang.
- Saka, C., Kiswandono, A. A., and Hadi, S. 2020. Synthesis of Polymer Inclusion Membranes Based on PVC Containing Copoly-EDVB 4% As a Carrier for Removal of Phenol Solutions. *Pollution Research*, 39(4) 1009-1016.
- Skoog, H. 2000. *Principles of Instrumental Analysis*. Saunders College Publishing. USA.
- Smallman, R. E. 2000. *Metalurgi Fisik Modern Edisi Keempat*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- Shivaji, S., Sinha, R., and Roy, D. 2004. Toxicological Effects of Malachite Green. *Aquatic Toxicology*, 66(3) 319-329.
- Sukmawati, P., dan Utami, B. 2014. Adsorpsi Zat Pewarna Tekstil Malachite Green Menggunakan Adsorben Kulit Buah Kakao (*Theobroma cacao*) Teraktivasi HNO₃. *Prosiding Seminar Nasional Fisika Dan Pendidikan Fisika (SNFPF)*, 5(1) 19–25.
- Sun, H., Yao., Li, Q., Liu, B., Liu, S., Cong, H., Sjak, V., and Feng, C., 2017. Removal of Phenols from Coal Gasification Wastewater Through Polypropylene Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. *Chemical Engineering Research and Design*, 123: 277-283.
- Supriyanto, R. 1999. *Buku Ajar Kimia Analitik III*. FMIPA Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Suryani, A., dan Fitriyah, L. 2020. *Studi penggunaan membran inklusi polimer (PIM) untuk transpor ion logam berat Cu(II) dan Pb(II)*. Universitas Negeri Surabaya, Surabaya.
- Susila, K. 2019. *Pemisahan Dengan Membran*. Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta.
- Thermo, N. 2001. *Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry*.

Thermo Electron Co. USA.

- Utami, S. 2014. *Pengaruh Komposisi Membran Inklusi Polimer (PIM) terhadap Efisiensi Transpor Ion Logam Berat*. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Wang., Duo., and Cattrall, R.W. 2017. A Poly(Vinylidene Fluoride-Co-Hexafluoropropylene) (PVDF-HFP)-Based Polymer Inclusion Membrane (PIM) Containing LIX84I for the Extraction and Transport of Cu(II) from Its Ammonium Sulfate/Ammonia Solutions. *Journal of Membrane Science*, 542: 272-79.
- Wang, L., R. Paimin, R. W. Cattrall, W. Shen, and S. D. Kolev. 2000. The Extraction of Cadmium(II) and Copper(II) from Hydrochloric Acid Solutions Using an Aliquat 336/PVC Membrane. *Journal of Membrane Science*, 176: 105–111.
- Zhang, N.A. 2019. Polymer Inclusion Membrane (PIM) Containing Ionic Liquid as a Proton Blocker to Improve Waste Acid Recovery Efficiency in Electrodialysis Process. *Journal of Membrane Science*, 581: 18-27.
- Zha F, Sun C, Xu D, Wang D. 2011. Loss of liquid membrane components during transport process and its impact on membrane performance. *Journal of Membrane Science*, 375(1-2):123–129.
- Zheng, W., Nguyen, A. V., and Evans, G. M. 2009. Extraction of heavy metal ions by a polymer inclusion membrane using Di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid as the carrier. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2–3), 1029–1034.