

**TRANSPOR *MALACHITE GREEN* MENGGUNAKAN METODE
POLYMER INCLUSION MEMBRANE (PIM) DENGAN *Co-POLY*
EUGENOL DIVINYL BENZENE (Co-EDVB) 4% SEBAGAI SENYAWA
PEMBAWA**

(Skripsi)

Oleh

**TRIE CHOIRUNNISA DZILHAJ
NPM 2117011077**



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

ABSTRAK

TRANSPOR *MALACHITE GREEN* MENGGUNAKAN METODE *POLYMER INCLUSION MEMBRANE (PIM)* DENGAN *Co-POLY EUGENOL DIVINYL BENZENE (Co-EDVB)* 4% SEBAGAI SENYAWA PEMBAWA

Oleh

Trie Choirunnisa Dzilhaj

Malachite green (MG) merupakan pewarna sintetis yang banyak digunakan dalam industri tekstil, kertas, dan akuakultur, namun keberadaannya dalam limbah dapat mencemari lingkungan karena sifatnya yang toksik, karsinogenik, serta sulit terurai. Senyawa ini dapat membahayakan organisme akuatik dan berpotensi masuk ke rantai makanan melalui proses bioakumulasi. Oleh karena itu, diperlukan metode pemisahan yang efisien dan ramah lingkungan untuk mengurangi pencemaran akibat senyawa ini. Penelitian ini bertujuan untuk melihat beberapa parameter yang berpengaruh terhadap pemisahan MG menggunakan metode PIM dengan senyawa pembawa *copoly-eugenol divinylbenzen* (Co-EDVB) 4%. Membran dibuat dengan melarutkan polivinil klorida (PVC), senyawa pembawa Co-EDVB 4%, dan dibenzil eter (DBE) ke dalam pelarut tetrahidrofuran (THF). Konsentrasi MG setelah pemisahan diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum 617 nm. Karakterisasi membran PIM sebelum dan sesudah transpor dilakukan menggunakan FT-IR dan SEM. Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan bahwa membran PIM yang mengandung senyawa pembawa Co-EDVB 4% menunjukkan kinerja pemisahan MG yang tinggi, dengan efisiensi pemisahan mencapai 93,07% pada kondisi optimum, yaitu pH fasa sumber 7, konsentrasi HNO_3 1 M, ketebalan membran normal (T_{54}), waktu transpor selama 24 jam, dan konsentrasi senyawa pembawa sebesar 0,03 M. Hasil penelitian juga didapatkan bahwa keberadaan ion logam Pb(II) dan Cu(II) mengganggu proses pemisahan MG, yang ditunjukkan dengan menurunnya konsentrasi MG hasil transpor yaitu menjadi 88,93%.

Kata kunci: *malachite green*, *Polymer Inclusion Membrane*, Co-EDVB 4 %

ABSTRACT

MALACHITE GREEN TRANSPORT USING POLYMER INCLUSION MEMBRANE (PIM) METHOD WITH 4% Co-POLY EUGENOL DIVINYLBENZENE (Co-EDVB) AS A CARRIER COMPOUND

By

Trie Choirunnisa Dzilhaj

Malachite green (MG) is a synthetic dye widely used in the textile, paper, and aquaculture industries, but its presence in waste can pollute the environment due to its toxic, carcinogenic, and difficult to decompose properties. This compound can harm aquatic organisms and has potential to enter the food chain through bioaccumulation. Therefore, an efficient and environmentally friendly separation method is needed to reduce pollution caused by this compound. This study aims to examine several parameters that influence the separation of MG using the PIM method with a 4% copoly-eugenol divinylbenzene (Co-EDVB) carrier compound. The membrane was prepared by dissolving polyvinyl chloride (PVC), a 4% Co-EDVB carrier compound, and dibenzyl ether (DBE) in tetrahydrofuran (THF) solvent. The MG concentration after separation was measured using a UV-Vis spectrophotometer at a maximum wavelength of 617 nm. Characterization of the PIM membrane before and after transport was carried out using FT-IR and SEM. Based on the research results, it was found that the PIM membrane containing 4% Co-EDVB carrier compound showed high MG separation performance, with a separation efficiency reaching 93.07% under optimum conditions: source phase pH of 7, HNO_3 concentration of 1 M, normal membrane thickness (T_{54}), transport time of 24 hours, and carrier compound concentration of 0.03 M. The research results also showed that the presence of Pb(II) and Cu(II) metal ions interfered with the MG separation process, which was indicated by a decrease in the transported MG concentration to 88.93%.

Keywords: malachite green, PIM, Co-EDVB 4 %

**TRANSPOR *MALACHITE GREEN* MENGGUNAKAN METODE
POLYMER INCLUSION MEMBRANE (PIM) DENGAN *COPOLY*
EUGENOL DIVINYL BENZENE (CO-EDVB) 4% SEBAGAI SENYAWA
PEMBAWA**

Oleh

Trie Choirunnisa Dzilhaj

Skripsi

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar
SARJANA SAINS

Pada

Jurusan Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

Judul : **TRANSPOR MALACHITE GREEN
MENGUNAKAN METODE POLYMER
INCLUSION MEMBRANE (PIM) DENGAN
Co-POLYEUGENOL DIVINYL BENZENE (Co-
EDVB) 4% SEBAGAI SENYAWA PEMBAWA**

Nama Mahasiswa : **Frie Choirunnisa Dzilhaj**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2117011077**

Program Studi : **Kimia**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



MENYETUJUI,

1. Komisi Pembimbing


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


Dian Septiani Pratama, M.Si.
NIP. 198009082009122003

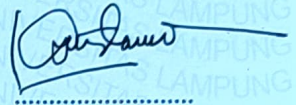
2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung


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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

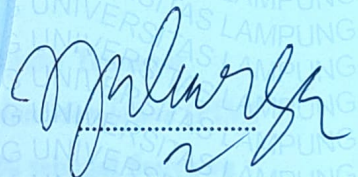
Ketua : **Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc.**



Sekretaris : **Dian Septiani Pratama, M.Si.**



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



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, M.Si.

NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 25 Juli 2025

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Trie Choirunnisa Dzilhaj

Nomor Pokok Mahasiswa : 2117011077

Jurusan : Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul **Transpor Malachite Green menggunakan Metode Polymer Inclusion Membrane (PIM) dengan Copoly Eugenol Divinyl Benzene (Co-EDVB) 4% sebagai Senyawa Pembawa** 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, 25 Juli 2025

Yang Menyatakan



Trie Choirunnisa Dzilhaj

NPM. 2117011077

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Trie Choirunnisa Dzilhaj dan lahir di Pasar Baru, 3 Februari 2003 sebagai anak ketiga dari lima bersaudara, putri dari pasangan Bapak Sumulat dan Ibu Sunarti. Penulis memulai pendidikan dari MIN 1 Pesawaran lulus pada tahun 2015, kemudian melanjutkan ke MTsN 1 Pesawaran dan lulus pada tahun 2018, selanjutnya melanjutkan di SMAS Al-Azhar 3 Bandar Lampung lulus pada tahun 2021. Pada tahun 2021 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa di Jurusan Kimia, penulis telah aktif berorganisasi. Organisasi yang pernah penulis diikuti adalah menjadi pengurus muda Himaki FMIPA Unila sebagai anggota Biro Penerbitan pada tahun 2022, menjadi pengurus inti Himaki FMIPA Unila sebagai ketua Biro Penerbitan pada tahun 2023. Pada tahun 2024 penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Laboratorium TPST Bantar Gebang. Penulis melaksanakan Merdeka Belajar Kampus Merdeka program Membangun Desa di Desa Rejomulyo, Kabupaten Lampung Selatan pada tahun 2023. Pada tahun 2024 penulis menjadi asisten Praktikum Kimia Dasar dan di tahun 2025 penulis dapat menyelesaikan penelitian yang dilakukan di Laboratorium Kimia Analitik FMIPA Universitas Lampung dengan judul “Transpor *Malachite Green* menggunakan Metode *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) dengan *Copoly Eugenol Divinyl Benzene* (Co-EDVB) 4% sebagai Senyawa Pembawa”.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan menyebut nama Allah yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang

Dengan mengucapkan Alhamdulillahil'alamina dan dengan segala kerendahan hati

Ku persembahkan karya sederhana ini kepada

Ayah dan Ibuku tercinta yang telah membesarkan, mendidik, mendo'akan, mendukung, dan memberikan kasih sayang yang tak terbatas serta cinta yang sangat besar dan tak ternilai.. Melalui karya sederhana ini, aku sebagai putrimu mengucapkan terima kasih atas segalanya. Seluruh keluarga besar terutama Kakak dan Adik-adikku yang selalu memberikan perhatian dan bantuan untukku.

Dengan segala rasa hormat kepada Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc., Ibu Dian Septiani Pratama, M.Si., dan Bapak Prof. Suharso, Ph.D., serta seluruh Dosen Pengajar yang telah membimbing dan mendidikku sampai menyelesaikan pendidikan Sarjana.

Sahabat dan seluruh rekan-rekan yang telah mengiringi perjalananku dan memberikan warna baru disetiap langkahnya.

Almamater Tercinta Universitas Lampung

MOTTO

“Indeed, with hardship (will be) ease” — Al-Insyirah [94:6]

“Letih, capek, sedih dan air mata merupakan aksesoris dalam menyelesaikan studi, tapi yakinlah pasti ada sesuatu yang menyenangkan diujung proses tersebut”

— Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc.

“And your Lord is never unaware of what you do ” — Hud [11:123]

“It’s not always easy, but that’s life. Be strong because there are better days ahead” —

Mark Lee

“Jadilah bintang di tengah kegelapan malam, walau terlihat kecil, namun memberikan kebermanfaatan yang besar bagi manusia” — Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc.

SANWACANA

Segala puji dan syukur dipanjatkan ke hadirat Allah subhanahu wa ta'ala atas limpahan rahmat, ridha, serta karunia-Nya yang tiada henti, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "*Transpor Malachite Green menggunakan Metode Polymer Inclusion Membrane (PIM) dengan Copoly Eugenol Divinyl Benzene (Co-EDVB) 4% sebagai Senyawa Pembawa*". Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis banyak menerima doa, dukungan moral, semangat, serta bimbingan dan saran berharga dari berbagai pihak yang sangat membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Oleh karena itu, dengan penuh kerendahan hati, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah subhanahu wa ta'ala, atas segala nikmat, kekuatan, dan kemudahan dalam setiap langkah penulis selama menyusun skripsi ini.
2. Ayah dan Ibu tercinta, atas doa yang tak pernah putus, kasih sayang, dukungan dan nasihat, serta motivasi yang menjadi sumber kekuatan bagi penulis.
3. Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc. selaku Dosen Pembimbing I atas kebaikan, bimbingan, arahan, masukan, dan seluruh ilmu pengetahuan yang diberikan selama proses perkuliahan sampai dengan penyelesaian skripsi

4. Ibu Dian Septiani Pratama, M.Si. selaku pembimbing II yang telah didedikasikan dengan penuh kelembutan, kesabaran, dan keikhlasan selama memberikan bimbingan penelitian. Sehingga penulis dapat menjalankan tanggung jawab terhadap diri sendiri dan orangtua.
5. Bapak Prof. Suharso, Ph.D. selaku Dosen Pembahas atas masukan dan saran yang diberikan dalam proses penyelesaian skripsi.
6. Bapak Dr. Syaiful Bahri, M.Si. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan dari awal penulis belajar hingga menyelesaikan studi di Jurusan Kimia FMIPA Unila.
7. Ibu Dr. Mita Rilyanti, M.Si. selaku Kepala Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung.
8. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung.
9. Bapak serta Ibu dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, pengalaman, dan motivasi selama penulis menjalankan pendidikan di kampus.
10. Seluruh staf administrasi dan pegawai di lingkungan Jurusan Kimia, Dekanat FMIPA, serta Universitas Lampung yang senantiasa membantu dalam sistem akademik, perkuliahan, penelitian, serta penyusunan skripsi sehingga dapat terselesaikan dengan baik.
11. Among, Mba Niken, Dian, Abang Rafi, Ses Diva, Adek Zivana serta keluarga besarku tercinta yang telah memberikan dukungan, nasihat, bantuan, serta mendoakan penulis.
12. Teman-teman seperjuanganku sedari semester awal, Jojo, Nadira, Naurah terima kasih atas kebersamaan, dukungan, bantuan, serta motivasi yang tak ternilai harganya.
13. Teman sekamar B307 Fildza dan Khairi, terima kasih telah menerima, memberikan dukungan, mendengarkan keluh kesah, serta memberikan bantuan selama masa perkuliahan ini.
14. Teman seperjuangan selama penelitian, Fildza, Marsa, dan Abe yang selalu kebersamai dalam segala situasi dan kondisi selama penelitian.

15. Keluarga besar *Membrane Research*, Mba Icha, Mba Kharisma, Kak Annur, Kak Fadhil, Kak Ibnah, Kak Ayu, serta adik-adik *Membrane*'22 karena telah kebersamai dan membimbing banyak hal dalam penelitian ini.
16. Keluarga besar Himaki Periode 2023, teman-teman pimpinan Talfa, Abe, Amel, Alya, Hafiz, Fildza, Govin, Ulma, Andra, Vira, Rima, Naurah, Radit, dan Fera. Terima kasih atas segala bantuan dan pengalamannya.
17. Nabila Puspitasari, Della Andanniawati, Anissa Dinanti Setiadi, dan Della Ramadhanti. Terima kasih atas segala dukungan, bantuan, do'a selama pertemanan ini berlangsung.
18. Teman-teman MBKM BKP Membangun Membangun Desa dan teman-teman Kimia Angkatan 2021 khususnya Kelas C. Terima kasih atas segala cerita dan pengalaman barunya.
19. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah turut memberikan kontribusi secara langsung maupun tidak langsung dalam proses penyusunan skripsi ini.
20. Penulis juga ingin menyampaikan rasa terima kasih dan apresiasi yang tulus kepada diri sendiri, Trie Choirunnisa Dzilhaj, terima kasih atas ketekunan, semangat pantang menyerah, dan kerja keras yang telah dicurahkan selama proses panjang penyusunan skripsi ini. Meskipun dihadapkan pada berbagai tantangan, kelelahan, dan keraguan, tetapi mampu bertahan, bangkit, dan terus melangkah hingga akhirnya mencapai tahap penyelesaian. Terima kasih telah percaya pada kemampuan diri sendiri dan terus berjuang hingga akhir. Semoga proses ini menjadi pijakan awal untuk terus tumbuh, belajar, dan berkontribusi lebih besar di masa depan.

Bandar Lampung, 25 Juli 2025

Penulis

Trie Choirunnisa Dzilhaj

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	vii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	4
1.3 Manfaat	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 <i>Malachite green</i>	6
2.2 Metode Pengolahan Limbah <i>Malachite green</i>	7
2.3 <i>Polymer Inclusion Membrane</i> (PIM)	9
2.4 Eugenol dan <i>Co-poly Eugenol Divinyl Benzene</i> (Co-EDVB) 4%	11
2.5 Analisis dan Karakterisasi	14
2.5.1 <i>Fourier Transform Infrared</i> (FT-IR)	14
2.5.2 Spektrofotometer UV-Vis	17
2.5.3 <i>Scanning Electron Microscope Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i> (SEM-EDX)	19
III. METODE PERCOBAAN	22
3.1 Waktu dan Tempat	22
3.2 Alat dan Bahan	22
3.3 Pembuatan Larutan Induk <i>Malachite Green</i> , Pembuatan Limbah Buatan, dan Pengukuran Konsentrasi <i>Malachite Green</i> dalam Fasa Sumber	23
3.4 Pembuatan Membran PIM	24
3.5 Uji Membran PIM	24
3.5.1 Uji Porositas Membran PIM	24
3.5.2 Uji Serapan Air Membran PIM	25
3.6 Optimasi Transpor <i>Malachite Green</i>	26
3.6.1 Variasi pH <i>Malachite Green</i> pada Fasa Sumber	26

3.6.2 Variasi Konsentrasi HNO_3 pada Fasa Penerima	26
3.6.3 Variasi Ketebalan Membran	27
3.6.4 Variasi Konsentrasi Senyawa Pembawa	27
3.6.5 Variasi Waktu Transpor.....	28
3.6.6 Studi Kompetisi Transpor <i>Malachite Green</i> pada Limbah Buatan.....	28
3.6.7 Analisis Parameter Transpor	29
3.7 Skema Penelitian.....	31
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1 Pembuatan Membran PIM Co-EDVB 4%	32
4.2 Penentuan Panjang Gelombang Maksimum <i>Malachite Green</i>	38
4.3 Uji Membran PIM.....	39
4.3.1 Uji Porositas Membran	39
4.3.2 Uji Serapan Air	41
4.4 Optimasi Transpor <i>Malachite Green</i>	42
4.4.1 Variasi pH <i>Malachite Green</i> pada Fasa Sumber	43
4.4.2 Variasi Konsentrasi HNO_3 pada Fasa Penerima	45
4.4.3 Variasi Ketebalan Membran	48
4.4.4 Variasi Konsentrasi Senyawa Pembawa	50
4.4.5 Variasi Waktu Transpor.....	52
4.4.6 Studi Kompetisi Transpor <i>Malachite Green</i> pada Limbah Buatan.....	55
V. SIMPULAN DAN SARAN.....	62
5.1 Kesimpulan	62
5.2 Saran	63
DAFTAR PUSTAKA.....	64
LAMPIRAN.....	68

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Sifat Fisik dan Kimia Eugenol	12
2. Komposisi Membran PIM.....	24
3. Variasi Konsentrasi Senyawa Pembawa.....	28
4. Berat total komponen, berat membran, dan ketebalan membran.....	33
5. Perbandingan bilangan gelombang hasil FT-IR membran PIM sebelum dan setelah transpor.....	35
6. Hasil transpor <i>malachite green</i> variasi pH fasa sumber.....	44
7. Hasil transpor <i>malachite green</i> variasi konsentrasi HNO ₃	47
8. Hasil transpor <i>malachite green</i> variasi ketebalan membran	49
9. Hasil transpor <i>malachite green</i> variasi konsentrasi senyawa pembawa	51
10. Hasil transpor <i>malachite green</i> variasi waktu transpor.....	54
11. Hasil transpor pada limbah buatan	56
12. Perbandingan bilangan gelombang membran setelah transpor <i>malachite green</i> pada limbah buatan.....	59
13. Absorbansi larutan standar <i>malachite green</i> pada variasi pH fasa sumber.....	78
14. Absorbansi dan konsentrasi <i>malachite green</i> di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pH fasa sumber.....	79
15. Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi <i>malachite green</i> di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pH fasa sumber.....	80
16. Absorbansi larutan standar <i>malachite green</i> pada variasi konsentrasi fasa penerima	80
17. Absorbansi dan konsentrasi <i>malachite green</i> di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi fasa penerima	81
18. Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi <i>malachite green</i> di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi fasa penerima	82
19. Absorbansi larutan standar <i>malachite green</i> pada variasi ketebalan membran.....	82
20. Absorbansi dan konsentrasi <i>malachite green</i> di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi ketebalan membran	83

21. Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi <i>malachite green</i> di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi ketebalan membran	84
22. Absorbansi larutan standar <i>malachite green</i> pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	84
23. Absorbansi larutan standar <i>malachite green</i> pada fasa sumber dan fasa penerima variasi konsentrasi senyawa pembawa	85
24. Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi <i>malachite green</i> di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	86
25. Absorbansi larutan standar <i>malachite green</i> pada variasi waktu transpor	86
26. Absorbansi dan konsentrasi <i>malachite green</i> di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi waktu	87
27. Data $\bar{x}$, SD dan %RSD konsentrasi <i>malachite green</i> di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi waktu	88
28. Absorbansi larutan standar <i>malachite green</i> pada limbah buatan.....	88
29. Absorbansi dan konsentrasi <i>malachite green</i> di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi transpor <i>malachite green</i> pada limbah buatan.....	89
30. Data $\bar{x}$, SD dan %RSD konsentrasi <i>malachite green</i> di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi transpor <i>malachite green</i> pada limbah buatan.....	90
31. Data Transpor Waktu.....	91
32. . Massa membran sebelum transpor <i>malachite green</i> pada variasi pH fasa sumber	98
33. Massa membran setelah transpor <i>malachite green</i> pada variasi pH fasa sumber	98
34. % LM loss transpor <i>malachite green</i> pada variasi pH fasa sumber.....	99
35. Massa membran sebelum transpor <i>malachite green</i> pada variasi konsentrasi HNO ₃ fasa penerima.....	99
36. Massa membran setelah transpor <i>malachite green</i> pada variasi konsentrasi HNO ₃ fasa penerima.....	99
37. %LM Loss transpor <i>malachite green</i> pada variasi konsentrasi HNO ₃ fasa penerima	100
38. Massa membran sebelum transpor <i>malachite green</i> pada variasi ketebalan membran.....	100
39. Massa membran setelah transpor <i>malachite green</i> pada variasi ketebalan membran.....	100
40. %LM Loss transpor <i>malachite green</i> pada variasi ketebalan membran.....	101
41. Massa membran sebelum transpor <i>malachite green</i> pada variasi konsentrasi senyawa pembawa	101
42. Massa membran setelah transpor <i>malachite green</i> pada variasi konsentrasi senyawa pembawa	101
43. %LM Loss transpor <i>malachite green</i> pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	102

44. Massa membran sebelum transpor <i>malachite green</i> pada variasi waktu transpor	102
45. Massa membran setelah transpor <i>malachite green</i> pada variasi waktu transpor	102
46. %LM <i>Loss</i> transpor <i>malachite green</i> pada variasi waktu transpor	103
47. Massa membran sebelum transpor <i>malachite green</i> pada variasi kompetisi limbah buatan	103
48. Massa membran setelah transpor <i>malachite green</i> pada variasi kompetisi limbah buatan	103
49. % LM <i>Loss</i> transpor <i>malachite green</i> pada variasi kompetisi limbah buatan	104
50. Ketebalan membran PIM pada variasi pH fasa sumber	105
51. Ketebalan membran PIM pada variasi konsentrasi HNO ₃ fasa penerima.....	105
52. Ketebalan membran PIM pada variasi ketebalan membran.....	105
53. Ketebalan membran PIM pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	106
54. Ketebalan membran PIM pada variasi waktu transpor	106
55. Ketebalan membran PIM pada variasi <i>malachite green</i> pada limbah buatan	106

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Struktur <i>malachite green</i>	6
2. Struktur eugenol	11
3. Prediksi Struktur kopoli (eugenol-DVB)	13
4. Skema komponen utama dari FTIR	15
5. Spektra IR (a) eugenol, (b) kopoli (eugenol-DVB) 2%	17
6. Spektrofotometer <i>single-beam</i>	18
7. Grafik panjang gelombang maksimum <i>malachite green</i>	18
8. SEM dari kopoli(eugenol-DVB) 12%. Sebelum transport (a) penampang melintang, 700x (b) penampang permukaan 100x. Setelah transport (c) penampang melintang 250x (d) penampang permukaan dan (e) penampang permukaan 80.	20
9. Skema penelitian	31
10. Membran PIM dengan Co-EDVB 4% (a) T ₂₇ (b) T ₅₄ (c) T ₁₀₈	33
11. Hasil karakterisasi (a) membran sebelum dan (b) setelah transpor menggunakan FT-IR.....	35
12. Morfologi permukaan membran PIM perbesaran (a) 500x, (b) 2500x dan membran PIM setelah transpor perbesaran (c) 500x, dan (d) 2500x	37
13. Panjang gelombang maksimum <i>malachite green</i>	39
14. Persentase porositas membran PIM	40
15. Persentase serapan air membran	41
16. Pengaruh pH MG pada fasa sumber terhadap konsentrasi MG yang tertransport	44

17. Pengaruh konsentrasi HNO_3 pada fasa sumber terhadap konsentrasi <i>malachite green</i> yang tertranspor	46
18. Pengaruh ketebalan membran terhadap konsentrasi <i>malachite green</i> yang tertranspor.....	49
19. Pengaruh konsentrasi senyawa pembawa terhadap konsentrasi <i>malachite green</i> yang tertranspor.....	51
20. Pengaruh waktu transpor terhadap konsentrasi <i>malachite green</i> yang tertranspor.....	53
21. Konsentrasi <i>malachite green</i> pada limbah buatan dengan Cu dan Pb sebagai kompetitor	56
22. Perbandingan spektra FT-IR membran (a) <i>malachite green</i> , (b) <i>malachite green</i> dan logam Pb(II), (c) <i>malachite green</i> dan logam Cu(II) dan (d) <i>malachite green</i> , logam Pb(II) dan logam Cu(II)	58
23. Morfologi permukaan membran (a) sebelum transpor dan (b) setelah transpor <i>malachite green</i> pada limbah buatan.....	59
24. Spektrum EDX membran setelah transpor pada limbah buatan	60
25. Kurva kalibrasi <i>malachite green</i> pada variasi pH fasa sumber.....	78
26. Kurva kalibrasi <i>malachite green</i> pada variasi konsentrasi fasa penerima	80
27. Kurva kalibrasi <i>malachite green</i> pada variasi ketebalan membran.....	82
28. Kurva kalibrasi <i>malachite green</i> pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	84
29. Kurva kalibrasi <i>malachite green</i> pada variasi waktu	86
30. Kurva kalibrasi <i>malachite green</i> pada variasi transpor <i>malachite green</i> pada limbah buatan	88
31. (a) Alat cetak membran (b) Membran PIM sebelum transpor	107
32. Transpor <i>malachite green</i> pada variasi pH fasa sumber (a) sebelum dan (b) sesudah	107
33. Transpor <i>malachite green</i> variasi HNO_3 (a) sebelum dan (b) sesudah.....	108
34. Membran PIM setelah transpor.....	108
35. Skema fasa sumber, fasa membran, dan fasa penerima dalam transpor <i>malachite green</i>	109

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring berkembang pesatnya sektor industri, aktivitas industri juga dapat menimbulkan dampak negatif seperti pencemaran lingkungan yang menyebabkan kerusakan sumber daya yang berasal dari limbah hasil aktivitas industri. Selain kerusakan sumber daya alam, limbah industri juga dapat membahayakan ekosistem sekitar hingga dapat mengancam kesehatan makhluk hidup yang lingkungannya tercemar. Industri tekstil merupakan salah satu sektor industri yang berkembang pesat di banyak negara, termasuk Indonesia. Namun, industri ini juga menjadi penyumbang utama pencemaran air akibat penggunaan berbagai bahan kimia, salah satunya adalah pewarna sintetis. *Malachite green* merupakan limbah pewarna yang umum ditemui. Pewarna ini tergolong garam pewarna dasar organik, yang mengandung zat amino. Berbeda dengan pewarna sintetis lainnya, *malachite green* memiliki ciri khas warnanya yang cerah. Akumulasi pewarna *malachite green* dalam tubuh organisme hidup menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan, termasuk karsinogenisitas, genotoksisitas, dan efek merugikan pada sistem kekebalan tubuh. Konsentrasi ambang batas *malachite green* yang diizinkan dalam lingkungan perairan ditetapkan maksimal 0,01 ppm.(Yonel *et al.*, 2021).

Salah satu tantangan utama dalam penanganan limbah yang mengandung *malachite green* adalah sifatnya yang sulit terurai secara alami, sehingga membutuhkan teknologi pengolahan yang efisien untuk menghilangkannya dari

badan air. Metode konvensional seperti koagulasi-flokulasi, adsorpsi menggunakan karbon aktif, serta proses oksidasi lanjutan memang telah banyak digunakan, namun seringkali memerlukan biaya yang tinggi, pemakaian bahan kimia dalam jumlah besar, serta menghasilkan limbah sekunder yang berpotensi menimbulkan masalah lingkungan baru. Sebagai solusi, teknologi membran cair muncul sebagai alternatif yang menjanjikan dalam pengolahan limbah cair beracun, termasuk pewarna *malachite green*. Membran cair memiliki keunggulan dalam hal selektivitas yang tinggi, kemampuan pemisahan yang baik, serta proses yang lebih ekonomis karena tidak membutuhkan energi tinggi seperti metode konvensional lainnya. Proses pemisahan dengan menggunakan teknologi membran cair memiliki beberapa keuntungan diantaranya pembuatannya relatif sederhana, penggunaan zat kimia relatif sedikit, proses pemisahan yang relatif sederhana, dapat diatur ulang dan mempunyai perubahan (fluks) yang tinggi (Amin, 2009). Teknologi ini bekerja dengan prinsip transportasi selektif melalui lapisan cairan yang berada di dalam pori-pori membran atau tersuspensi dalam sistem cair. Proses ini memungkinkan pemisahan *malachite green* dari limbah cair secara efektif, mengurangi konsentrasinya hingga batas yang aman sebelum dilepaskan kembali ke lingkungan. Salah satu teknologi pemisahan yang menawarkan potensi besar dalam hal ini adalah membran inklusi polimer atau *Polymer Inclusion Membrane* (PIM). Teknologi PIM memanfaatkan matriks polimer yang menginklusi senyawa pembawa (*carrier*) untuk memfasilitasi pemisahan selektif ion logam atau molekul target dari larutan. PIM dikenal memiliki keunggulan dalam hal selektivitas, stabilitas kimia, serta fleksibilitas dalam aplikasi, menjadikannya alternatif yang menarik dibandingkan metode konvensional seperti adsorpsi dan pengendapan kimia (Almeida *et al.*, 2012).

Salah satu senyawa pembawa yang sedang mendapat perhatian dalam pengembangan metode PIM adalah *Copoly-eugenol divinyl benzene* (Co-EDVB). *Copoly eugenol divinyl benzene* (Co-EDVB) adalah polimer yang dihasilkan melalui proses polimerisasi antara eugenol dan *divinyl benzene* (DVB), dengan menggunakan katalis asam lunak seperti $\text{BF}_3\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$. Proses ini melibatkan tahap inisiasi, propagasi, dan terminasi, di mana ion karbokation terbentuk dari

DVB dan berikatan dengan eugenol untuk membentuk Co-EDVB. Polimer ini memiliki karakteristik fisik yang menarik, termasuk titik lebur yang meningkat seiring dengan peningkatan persentase ikatan silang antara eugenol dan DVB, serta solubilitas dalam pelarut organik seperti kloroform dan tetrahydrofuran (THF). Analisis menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) menunjukkan adanya perubahan pada gugus fungsional, termasuk hilangnya gugus vinil dan alil, serta keberadaan gugus –OH dan aromatik. Co-EDVB banyak digunakan dalam aplikasi pemisahan fenol, khususnya dalam membran *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) (Saka *et al.*, 2022). Dengan karakteristik unik dan kemampuan pemisahan yang tinggi, Co-EDVB menjadi bahan yang menjanjikan dalam pengolahan limbah cair dan aplikasi lingkungan lainnya.

Efektivitas *Copoly-Eugenol Divinyl Benzene* (Co-EDVB) sebagai senyawa pembawa dalam membran *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) telah diteliti dan menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam pemisahan fenol dari limbah cair. Dalam penelitian yang dilakukan oleh (Kiswandono *et al.*, 2021), Co-EDVB disintesis dengan teknik polimerisasi menggunakan eugenol dan divinil benzena, yang kemudian digunakan sebagai salah satu komponen dalam pembentukan membran PIM. Karakterisasi menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) menunjukkan bahwa sintesis Co-EDVB berhasil, ditandai dengan hilangnya serapan spektra IR pada bilangan gelombang yang menunjukkan gugus vinil dan alil. Meskipun Co-EDVB menawarkan banyak keunggulan, optimasi membran PIM dengan Co-EDVB sebagai senyawa pembawa tetap diperlukan untuk memaksimalkan efisiensi pemisahan. Beberapa faktor kunci yang perlu dioptimalkan antara lain adalah komposisi polimer yang dapat mengakomodasi Co-EDVB secara efektif tanpa mengganggu selektivitas pemisahan, serta konsentrasi senyawa pembawa yang harus diatur agar terjadi keseimbangan antara kapasitas transporasi dan stabilitas membran. Selain itu, kondisi operasi seperti pH, suhu, dan tekanan juga harus dioptimalkan untuk memastikan performa maksimal dari membran PIM. Pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme transpor Co-EDVB dalam PIM juga penting untuk meningkatkan selektivitas dan efisiensi proses pemisahan. Dengan optimasi yang tepat,

penggunaan Co-EDVB sebagai senyawa pembawa dalam PIM dapat meningkatkan efektivitas teknologi ini dalam berbagai aplikasi, terutama dalam penanganan limbah industri yang mengandung logam berat.

Penelitian mengenai transpor *malachite green* menggunakan metode PIM dengan Co-EDVB telah dilakukan Kiswandono *et al.*, (2019) dengan penggunaan Co-EDVB dengan metode PIM melalui variasi konsentrasi Co-EDVB sebesar 2%, 6%, dan 12% dalam proses transportasi fenol. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi Co-EDVB memberikan pengaruh positif terhadap efisiensi pemisahan, di mana konsentrasi yang lebih tinggi cenderung meningkatkan kemampuan pemisahan fenol. Tetapi, pemanfaatan Co-EDVB 4% dalam transportasi *malachite green* belum pernah diteliti. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan optimasi pemisahan *malachite green* menggunakan Co-EDVB 4%. Pada penelitian ini mencakup pembuatan membran PIM, pengujian porositas membran PIM, uji serapan air membran, variasi pH *malachite green* pada fase sumber, variasi konsentrasi HNO_3 pada fase penerima, variasi ketebalan membran, variasi konsentrasi senyawa pembawa, variasi waktu transportasi, serta studi kompetisi transportasi *malachite green* pada limbah buatan menggunakan membran PIM dengan senyawa pembawa Co-EDVB 4%.

1.2 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui transpor *malachite green* menggunakan senyawa pembawa *Copoly Eugenol Divinyl Benzene* (Co-EDVB) 4% dengan metode *Polymer Inclusion Membrane* (PIM).
2. Mengetahui studi uji kompetisi transpor *malachite green* dengan logam berat pada limbah buatan.
3. Mengetahui karakterisasi membran PIM sebelum dan sesudah transpor menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Fourier Transform Infra Red* (FT-IR).

1.3 Manfaat

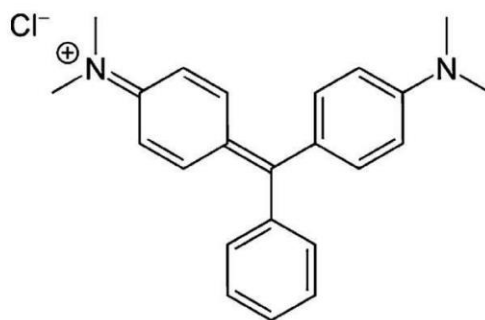
Hasil penelitian yang akan diperoleh diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menambah wawasan baru terkait pemanfaatan polimer tertaut silang Co-EDVB 4% sebagai senyawa pembawa dalam transpor *malachite green*.
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 *malachite green* dalam lingkungan perairan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Malachite Green*

Malachite green adalah pewarna dasar yang digunakan dalam proses pencelupan. Pewarna ini berupa garam dari zat warna organik dasar yang mengandung kelompok amino dan imino, dan sering dikombinasikan dengan asam seperti asam klorida. *Malachite green* dikenal sebagai pewarna yang paling cerah dibandingkan pewarna sintetis lainnya. Pewarna dasar ini bersifat kationik (bermuatan positif) dan umumnya digunakan pada kain yang bersifat anionik (bermuatan negatif) seperti wol, sutra, dan nilon. Pewarna ini biasa dipakai untuk mewarnai sutra, kulit, dan kertas. Namun, akumulasi *malachite green* dalam tubuh makhluk hidup dapat berdampak buruk pada sistem kekebalan dan reproduksi, serta bersifat karsinogenik dan gemotoksik. Meskipun penggunaannya dilarang di beberapa negara, termasuk oleh *US Food and Drug Administration*, pewarna ini masih banyak digunakan karena harganya murah, mudah didapatkan, dan memberikan hasil yang menarik (Sukmawati and Utami, 2014). Adapun struktur dari *malachite green* terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur *malachite green*

Paparan *malachite green* pada manusia dapat menyebabkan berbagai efek berbahaya, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Senyawa ini dikenal sebagai zat karsinogenik, mutagenik, dan teratogenik, yang berarti dapat menyebabkan kanker, kerusakan genetik, dan kelainan perkembangan. Dalam penelitian, *malachite green* telah terbukti mengakibatkan fraktur kromosom dan memiliki potensi untuk memicu tumor di berbagai organ, termasuk kelenjar tiroid, hati, dan testis pada hewan percobaan seperti tikus (Hamad, 2023). Efek toksik dari *malachite green* juga mencakup kerusakan multi-organ. Paparan senyawa ini dapat mengganggu fungsi organ vital dan menyebabkan perubahan signifikan dalam parameter biokimia darah (Srivastava *et al.*, 2004). Selain itu, inhalasi *malachite green* dapat menyebabkan peradangan pada saluran pernapasan, sedangkan konsumsi melalui saluran pencernaan dapat menyebabkan peradangan pada saluran pencernaan. Metabolisme *malachite green* dalam tubuh manusia menghasilkan bentuk-bentuk berbahaya seperti *leucomalachite green* dan carbinol, yang dapat bertahan lebih lama di dalam jaringan tubuh dan berpotensi menimbulkan efek toksik yang lebih besar (Kul *et al.*, 2023). Dengan demikian, meskipun *malachite green* digunakan secara luas dalam industri akuakultur dan tekstil, risiko kesehatan yang ditimbulkannya menuntut perhatian serius terhadap penggunaannya dan perlunya pengelolaan yang hati-hati untuk mengurangi paparan pada manusia dan lingkungan. Menurut Srivastava *et al.*, (2004), toleransi kadar *malachite green* yang diperbolehkan diperairan adalah 0,01 ppm, mengingat bahaya yang dapat ditimbulkan, maka diperlukan suatu pengolahan limbah untuk menurunkan kandungan *malachite green*.

2.2 Metode Pengolahan Limbah *Malachite Green*

Terdapat metode pengolahan limbah *malachite green* menggunakan adsorben kulit buah kakao (*Theobroma cacao*) yang telah dilakukan oleh Sukmawati and Utami, (2014) yang teraktivasi dengan HNO₃ dilakukan untuk menentukan apakah limbah kulit kakao dapat digunakan sebagai adsorben untuk zat warna tersebut. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi sifat adsorpsi zat warna *malachite green* oleh kulit kakao, serta mencari waktu dan massa optimum

adsorben yang diperlukan. Adsorben yang digunakan adalah kulit kakao berukuran 100 mesh yang diaktivasi dengan larutan HNO_3 0,6 M. Penentuan kondisi optimal dilakukan dengan variasi massa adsorben yaitu 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; dan 0,30 g, variasi waktu 10, 20, 30, 40, 50, dan 60 menit, serta variasi konsentrasi 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 ppm. Volume larutan zat warna yang digunakan untuk masing-masing variasi adalah 25 mL. Data dikumpulkan menggunakan metode spektrofotometri UV-Vis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kulit kakao (*Theobroma cacao*) dapat digunakan sebagai adsorben untuk zat warna tekstil *malachite green*, dengan massa optimum sebesar 0,25 g dan waktu kontak optimum 40 menit. Proses adsorpsi warna tekstil *malachite green* oleh kulit kakao berlangsung melalui mekanisme adsorpsi kimia. Namun, metode ini kurang efektif karena zat warna yang teradsorpsi masih terakumulasi dalam adsorben, yang dapat menimbulkan masalah di kemudian hari.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengolah limbah *malachite green*, seperti penguraian zat warna melalui koagulasi, flokulasi, dan penggunaan karbon aktif. Selain itu, metode konvensional seperti adsorpsi, pertukaran ion, proses aerobik dan anaerobik, oksidasi, serta koagulasi dan flokulasi memiliki efektivitas yang relatif rendah dalam pengolahan air limbah ini. Hal ini disebabkan oleh tingginya ketahanan cincin benzena terhadap degradasi mikroba, fiksasi, dan stabilitas zat warna terhadap cahaya dan pencucian. Beberapa metode pengolahan limbah zat warna ini juga memiliki kelemahan, seperti biaya bahan kimia yang tinggi, pemisahan zat kimia yang menghasilkan limbah baru, metode kimia yang tidak ramah lingkungan, serta proses biologis yang kompleks (Pang and Abdullah, 2013).

Metode *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) telah terbukti efektif dalam mengolah limbah *malachite green*, yang merupakan zat warna beracun yang banyak digunakan dalam industri tekstil. Penelitian yang dilakukan oleh Ling and Suah, (2017) menunjukkan bahwa penggunaan polyeugenol sebagai senyawa pembawa dalam membran PIM dapat menyerap *malachite green* dari larutan limbah dengan efisiensi tinggi. Metode PIM termasuk dalam kategori *green*

chemistry karena tidak memerlukan banyak pelarut dan hanya menggunakan sedikit jumlah pembawa, sehingga lebih berkelanjutan dibandingkan metode konvensional. Membran PIM berbasis polyeugenol memiliki stabilitas dan selektivitas yang sangat baik dalam proses pemisahan, memungkinkan penghilangan *malachite green* secara efisien dari air limbah. Mengingat *malachite green* dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, termasuk mutagenesis dan karsinogenesis, penghilangan senyawa ini dari perairan menjadi sangat penting.

2.3 Polymer Inclusion Membrane (PIM)

Teknologi pemisahan menggunakan membran cair seperti SLM (*Supported Liquid Membrane*) diterima secara luas sebagai teknologi yang berguna bagi banyak industri dibandingkan dengan pemisahan konvensional, namun dalam penerapannya membran ini masih memiliki kelemahan (Nghiem *et al.*, 2006). Salah satu cara untuk mengatasi kelemahan yang ada pada membran SLM ini adalah dengan menambahkan polimer pendukung dalam komposisi pembuatan membran, kemudian dicetak untuk membentuk membran film yang tipis, stabil, dan fleksibel. Jenis membran ini dikenal sebagai *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) (Kiswando *et al.*, 2021). Membran PIM memiliki kemampuan yang serbaguna dengan stabilitas yang jauh lebih baik dibandingkan teknologi membran cair lainnya. Kelebihan lain dari membran PIM adalah memiliki area antarmuka yang lebih luas, sangat selektif, kuat, efisien dalam memisahkan senyawa, serta proses pemisahannya mudah dilakukan (Ling and Suah, 2017).

PIM (*Polymer Inclusion Membranes*) mempertahankan banyak keunggulan dari SLM (*Supported Liquid Membranes*), sambil menawarkan stabilitas dan fleksibilitas yang lebih baik. Salah satu tantangan yang kerap muncul pada metode PIM adalah koefisien difusi yang lebih rendah, tetapi hal ini dapat diatasi dengan membuat membran yang jauh lebih tipis dibandingkan metode SLM. Bahkan, dalam beberapa kasus, PIM mampu mencapai tingkat fluks yang lebih tinggi daripada SLM. Perbedaan lain yang signifikan adalah PIM memungkinkan untuk meminimalkan kehilangan zat pembawa selama proses ekstraksi membran, yang

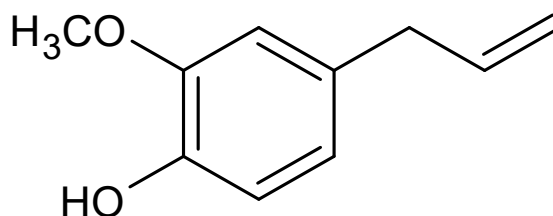
sering menjadi masalah pada SLM. Selain itu, PIM hanya memerlukan jumlah yang lebih sedikit dari reagen pembawa, sehingga ekstrak yang lebih mahal sebelumnya hanya digunakan untuk memproses logam atau senyawa organik bernilai tinggi bisa digunakan lebih efisien. Ini membuka peluang lebih besar untuk aplikasi dengan metode PIM di berbagai bidang (Nghiem *et al.*, 2006).

Proses membran yang paling inovatif adalah proses *Polymer Inclusion Membrane* (PIM). Ciri utama yang membedakan PIM dari proses lainnya adalah adanya dispersi pembawa organik dalam matriks polimer, yang meningkatkan efisiensi transportasi. Dengan selektivitas yang tinggi, penerapannya yang sederhana, dan konsumsi energi rendah, PIM menawarkan keunggulan besar dalam pemisahan dan pemurnian ion logam. Selain itu, kemampuan untuk menggunakan kembali membran dan rasio luas permukaan terhadap volume yang besar menjadi faktor penting yang membuat proses ini lebih unggul dalam aplikasi industri. PIM terdiri dari polimer dasar, pembawa, dan *plasticizer* yang membentuk struktur tipis, fleksibel, dan stabil. *Plasticizer* berfungsi untuk melunakkan matriks polimer dan bertindak sebagai pelarut bagi pembawa. Sifat kimia dan mekanik *plasticizer* memberikan stabilitas dan fleksibilitas pada membran, sekaligus meningkatkan kinerja membran. Peran pembawa adalah memastikan pengangkutan ion tertentu melalui membran (Keskin *et al.*, 2021).

Polymer Inclusion Membrane (PIM) dibuat dari larutan yang mengandung senyawa pembawa, *plasticizer*, dan polimer dasar seperti selulosa triasetat (CTA) atau *polyvinyl chloride* (PVC), menghasilkan film yang tipis, stabil, dan fleksibel. Membran PIM ditempatkan di antara fasa umpan sebagai sumber analit dan fasa penerima sebagai hasil pemisahan. Proses transportasi logam dalam membran terjadi karena adanya gaya dorong berupa gradien konsentrasi antara fasa umpan dan fasa penerima. Semakin banyak kompleks yang terbentuk, semakin banyak logam yang terangkut ke fasa penerima. Senyawa pembawa memainkan peran penting dalam proses pemisahan logam menggunakan PIM, di mana senyawa ini akan membentuk kompleks dengan spesies di fasa penerima (Ulfia *et al.*, 2011).

2.4 Eugenol dan *Co-poly Eugenol Divinyl Benzene (Co-EDVB) 4%*

Eugenol adalah senyawa fenolik yang dapat diperoleh dari berbagai sumber tanaman, termasuk minyak cengkeh, minyak pala, ekstrak kayu manis, dan banyak tanaman lainnya. Senyawa ini memiliki fungsi promosi kesehatan yang kuat, menjadikannya bahan alami yang serbaguna. Pertama kali, eugenol diekstraksi dari daun dan tunas *Eugenia caryophyllata*, yang dikenal sebagai cengkeh. Saat ini, eugenol juga dapat disintesis melalui alilasi guaiakol dengan alil klorida, yang memiliki sifat fungsional serupa. Eugenol ditemukan dalam jumlah signifikan dalam ekstrak berbagai ramuan obat, sehingga menarik perhatian para peneliti dan membuka peluang untuk penelitian lebih lanjut mengenai pemanfaatannya sebagai obat untuk berbagai penyakit. Eugenol diakui memiliki beberapa sifat farmakologis, termasuk aktivitas anestesi, potensi antioksidan, peran antimikroba, efek anti-inflamasi, aktivitas anti-karsinogenik, kemampuan neuroprotektif, efisiensi hipolipidemia, dan efektivitas anti-diabetes. Eugenol juga dinyatakan sebagai GRAS (*Generally Recognized As Safe*) oleh Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) dan dianggap non-mutagenik (Khalil *et al.*, 2017). Eugenol merupakan turunan guaiakol yang mendapat tambahan rantai alil, dikenal dengan nama IUPAC 2-metoksi-4-(2-propenil) fenol. Eugenol dapat dikelompokkan dalam keluarga alilbenzena dari senyawa-senyawa fenol (Salsabila *et al.*, 2023). Struktur eugenol dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur eugenol

Eugenol adalah salah satu senyawa alami yang menarik perhatian karena memiliki beberapa gugus aktif, seperti hidroksil, cincin aromatik, dan alil, yang memudahkan proses modifikasi kimia menjadi senyawa turunan eugenol lainnya. Senyawa turunan eugenol banyak digunakan dalam industri farmasi, kosmetik, dan makanan sebagai perasa, contohnya termasuk metil eugenol, isoeugenol, dan

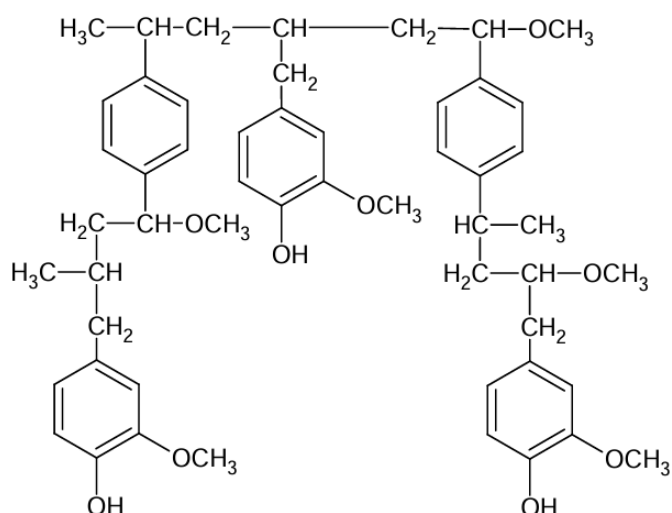
vanili sintetis. Modifikasi lain dari eugenol yang juga memiliki banyak manfaat adalah bentuk polimernya, yang dikenal sebagai polieugenol (Hikmah *et al.*, 2019). Adapun sifat fisik dan kimia dari senyawa eugenol ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Fisik dan Kimia Eugenol

Parameter	Nilai
Kelas	Fenilpropanoid
Nama IUPAC	4-Alil-2-metoksifenol
Rumus Kimia	C ₁₀ H ₁₂ O ₂
Berat Molekul (g/mol)	164.2
Kelarutan dalam Air	Larut Sebagian
Kelarutan dalam Pelarut Organik	Sangat Larut
Warna	Tak Berwarna hingga Kuning Pucat

Penelitian yang telah dilakukan Kiswandono *et al.*, (2022) menggunakan senyawa pembawa berbasis ikatan silang antara eugenol dan *divinyl benzene* (DVB).

Eugenol mengandung gugus eter, -OH, dan alil, dengan gugus -OH diharapkan kompatibel dengan senyawa target, yaitu fenol. Eugenol kemudian dipolimerisasi dengan DVB untuk meningkatkan berat molekul, sehingga menghasilkan membran PIM yang lebih selektif dalam mentransport fenol. Senyawa copoly-eugenol *divinyl benzene* (co-EDVB) 4% yang digunakan sebagai pembawa dalam penelitian ini disintesis dan diuji untuk mengangkut fenol dari fase sumber ke fase penerima dengan mengevaluasi kinerja membran PIM. Penelitian sebelumnya oleh Kiswandono *et al.*, (2012) menggunakan Co-EDVB dengan konsentrasi 2%, 6%, dan 12% untuk uji optimasi transportasi fenol. Kiswandono *et al.*, (2014) kemudian melanjutkan penelitian tentang kemampuan senyawa pembawa ini untuk mengangkut fenol dalam berbagai kondisi serta menguji masa pakai membran. Struktur kopoli (eugenol-DVB) diprediksikan seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Prediksi Struktur kopoli (eugenol-DVB) (Kiswandono *et al.*, 2014)

DVB memiliki dua gugus fungsi, salah satunya yaitu gugus fungsi vinil yang bisa digunakan sebagai agen taut silang yang sangat reaktif dengan reaksi kopolimerisasi gugus vinil. Divinil Benzena (DVB) merupakan senyawa diena yang dapat mengalami polimerisasi adisi. Ikatan rangkap dua pada senyawa diena ini mempunyai sifat reaktif sehingga proses sintesis dapat dilakukan pada suhu kamar. Kopolimerisasi ini merupakan reaksi kopolimerisasi adisi kationik, karena gugus vinil dari DVB mengalami adisi (Kiswandono *et al.*, 2012).

Sintesis Co-EDVB dapat dilakukan menggunakan eugenol sebagai bahan dasar, divinil benzena (DVB), dan katalis $\text{BF}_3\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$. Pembentukan polimer ditandai dengan munculnya gel berwarna ungu kemerahan saat katalis ditambahkan. Katalis ditambahkan secara bertahap sebanyak empat kali, dengan interval 1,5 jam (0,25 mL setiap kali penambahan). Secara fisik, polimer yang terbentuk berupa serbuk berwarna coklat muda. Kopolimerisasi ini dilakukan dengan menggunakan massa DVB sebesar 10% dari berat eugenol, melalui reaksi kopolimerisasi adisi kationik, di mana gugus vinil dari DVB mengalami adisi. Proses kopolimerisasi ini terdiri dari tiga tahap: inisiasi, propagasi, dan terminasi. Tahap inisiasi terjadi ketika ion karbokation terbentuk dari DVB, dan penambahan katalis $\text{BF}_3\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ bertahap memastikan pembentukan ion karbokation secara berkelanjutan. Tahap propagasi adalah saat ion karbokation bereaksi dengan eugenol, membentuk Co-

EDVB 2%. Pada tahap terminasi, pertumbuhan rantai polimer Co-EDVB 2% dihentikan dengan menambahkan metanol (*Handayani et al.*, 2004).

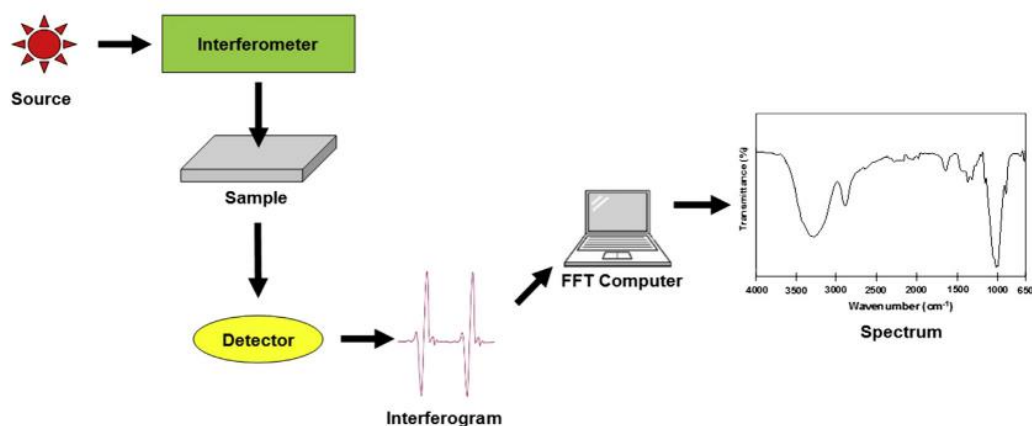
2.5 Analisis dan Karakterisasi

Penelitian ini melibatkan berbagai karakterisasi, termasuk analisis gugus fungsi dan komponen kimia dari hasil sintesis, serta kandungan logam pada membran menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR), analisis morfologi permukaan membran *Scanning Electron Microscopy* (SEM), serta analisis menggunakan spektrofotometer *Ultra Violet-Visible* (UV-Vis).

2.5.1 *Fourier Transform Infrared* (FT-IR)

Spektroskopi inframerah (IR) adalah teknik untuk mengukur penyerapan atau transmisi radiasi inframerah oleh suatu material berdasarkan panjang gelombang atau frekuensi. Hasil pengukuran ini menghasilkan spektrum IR, yang berupa plot penyerapan atau transmisi terhadap panjang gelombang atau frekuensi. Spektroskopi IR meneliti spektrum termal material yang dihasilkan oleh getaran molekul dan pita penyerapan rotasi yang menyertainya. Karena pita penyerapan berhubungan dengan getaran dari gugus fungsi tertentu dalam molekul, identifikasi pita ini memungkinkan pengenalan molekul yang membentuk material tersebut. Awalnya, spektroskopi IR dilakukan menggunakan instrumen dispersif dan berfokus pada identifikasi struktur material organik. Dengan kemajuan *Fourier Transform Infrared* (FTIR), kini spektrum IR resolusi tinggi dapat diperoleh dengan cepat dan akurat pada berbagai jenis sampel, seperti gas, cairan, padatan, film tipis, dan nanomaterial, yang menjadikannya teknik kuantitatif yang lebih populer, mirip dengan spektroskopi UV-Visible. Saat ini, FTIR digunakan untuk mengidentifikasi berbagai material organik dan anorganik, analisis kuantitatif dalam campuran kompleks, penentuan komposisi molekul, membedakan isomer struktural dan geometris, serta berbagai aplikasi lainnya (*Gaffney et al.*, 2012).

Instrumen yang digunakan untuk menentukan spektrum serapan suatu senyawa disebut spektrofotometer. Spektrofotometer *Fourier Transform* (FTIR) dapat memberikan spektrum inframerah lebih cepat dibandingkan dengan spektrofotometer konvensional. Gambar 4 mengilustrasikan secara skematis komponen utama dari spektrofotometer FTIR sederhana. Instrumen ini menghasilkan sinar IR yang dipancarkan dari sumber benda hitam bercahaya. Sinar tersebut kemudian melewati interferometer di mana pengkodean spektral terjadi. Rekombinasi sinar dengan jalur berbeda di interferometer menghasilkan interferensi konstruktif dan destruktif, yang disebut interferog. Selanjutnya, sinar memasuki kompartemen sampel, di mana sampel menyerap frekuensi energi tertentu yang merupakan ciri khas unik dari sampel tersebut. Detektor kemudian mengukur sinyal interferog khusus dalam bentuk energi terhadap waktu untuk semua frekuensi secara bersamaan. Sementara itu, sinar referensi digunakan sebagai latar belakang untuk pengoperasian instrumen. Akhirnya, spektrum yang diinginkan diperoleh setelah perangkat lunak *Fourier Transform* secara otomatis mengurangi spektrum latar belakang dari spektrum sampel.

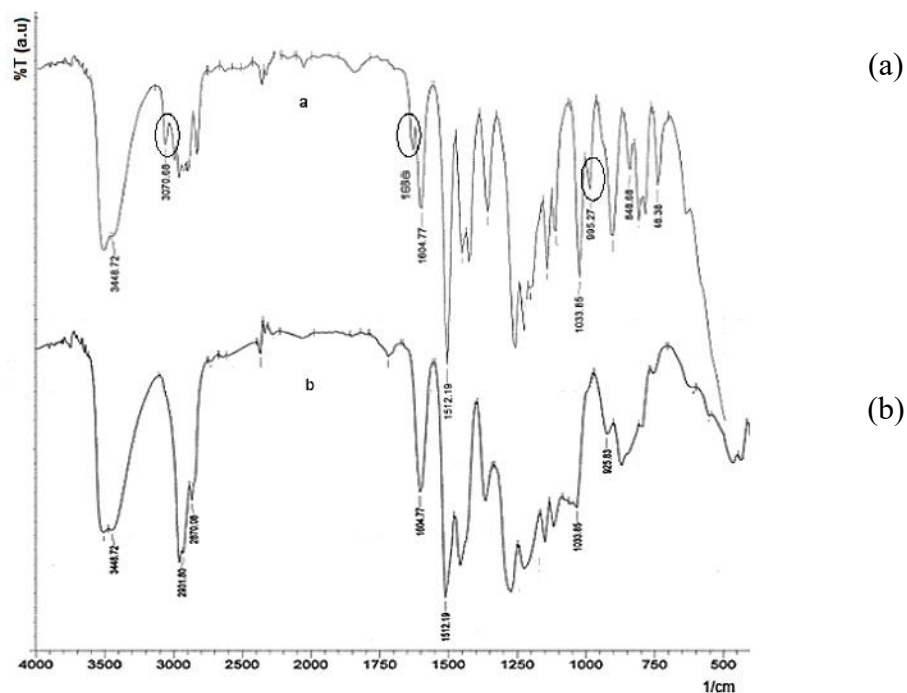


Gambar 4. Skema komponen utama dari FTIR (Mohamed *et al.*, 2017)

Spektroskopi inframerah mempelajari getaran molekuler. Gugus fungsional dapat dihubungkan dengan pita serapan inframerah yang khas, yang berkaitan dengan getaran dasar dari gugus fungsional tersebut. Untuk molekul nonlinier dengan N atom, terdapat $3N-6$ gerakan getaran atom molekul, atau dikenal sebagai $3N-6$ getaran dasar atau mode normal. Mode getaran normal ini akan aktif dalam inframerah (yakni, menyerap cahaya inframerah) jika terjadi perubahan momen

dipol molekul selama getaran. Oleh karena itu, getaran simetris biasanya tidak terdeteksi dalam inframerah. Khususnya, jika molekul memiliki pusat simetri, semua getaran yang simetris terhadap pusat tersebut tidak aktif dalam inframerah. Sebaliknya, getaran asimetris dari semua molekul dapat dideteksi. Karena kekurangan selektivitas ini, kita dapat mempelajari hampir semua gugus kimia dalam suatu sampel, terutama asam amino dan molekul air, yang sulit diamati menggunakan teknik spektroskopi lainnya (Berthomieu *and* Hienerwadel, 2009).

Dalam penelitian Kiswandono *et al.*, (2012) eugenol dipolimerisasi dengan divinil benzena (DVB) untuk membentuk kopolimer eugenol-divinil benzena (Co-EDVB) yang kemudian dianalisis menggunakan FTIR. Hasil spektra FTIR ditunjukkan pada Gambar 5. Pada Gambar 5a, spektra IR eugenol menampilkan pita karakteristik sebagai akibat dari regangan OH pada $3448,72\text{ cm}^{-1}$. Pita tekukan CH dari gugus aromatik tersubstitusi 1,2,4 terlihat pada $817,82\text{ cm}^{-1}$, sementara gugus vinil terdeteksi pada $995,27\text{ cm}^{-1}$ (tekukan $-\text{CH}=\text{CH}_2$), dan regangan C-C sp^2 dari gugus alil memberikan pita pada $1636,5\text{ cm}^{-1}$ serta sinyal dari cincin aromatik benzena muncul di sekitar $650\text{-}900\text{ cm}^{-1}$. Kopolimerisasi eugenol dengan DVB (Gambar 5b) ditandai dengan hilangnya pita gugus alil pada $1636,5\text{ cm}^{-1}$ dan gugus vinil pada $995,27\text{ cm}^{-1}$. Selain itu, muncul serapan pada $2931,8\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan adanya regangan CH- sp^3 .



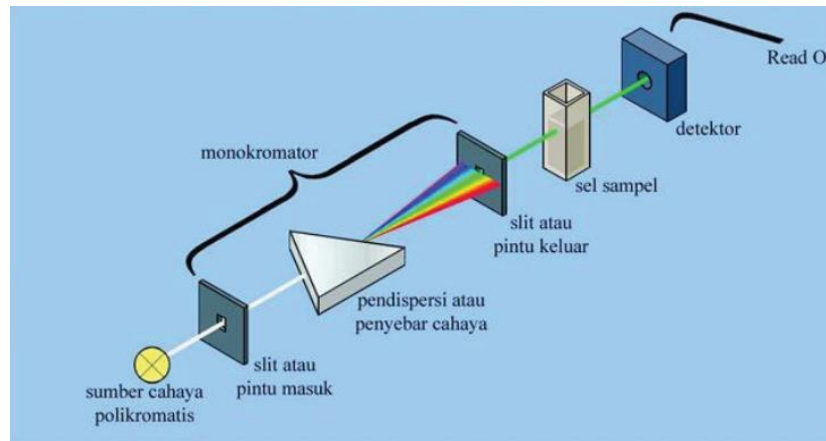
Gambar 5. Spektra IR (a) eugenol, (b) kopoli (eugenol-DVB) 2%

2.5.2 Spektrofotometer UV-Vis

Ultraviolet jauh memiliki rentang panjang gelombang sekitar 10 hingga 200 nm, sementara ultraviolet dekat berada di rentang 200 hingga 400 nm. Meskipun sinar UV tidak dapat dilihat oleh manusia, beberapa hewan, seperti burung, reptil, dan serangga seperti lebah, mampu melihat cahaya pada panjang gelombang UV..

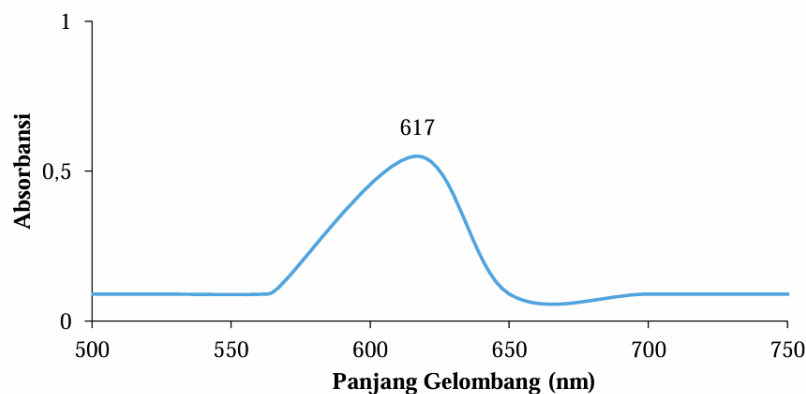
Kromofor adalah molekul atau bagian molekul yang secara kuat menyerap sinar di wilayah UV-Vis, seperti heksana, aseton, asetilen, benzena, karbonil, karbon dioksida, karbon monoksida, dan gas nitrogen. Auksokrom adalah gugus fungsi yang mengandung pasangan elektron bebas dan berikatan tunggal kovalen, yang terhubung dengan kromofor dan meningkatkan penyerapan sinar UV-Vis baik dari segi panjang gelombang maupun intensitasnya, seperti gugus hidroksi, amina, halida, dan alkoksi. Secara umum, ada dua jenis instrumen spektrofotometer, yaitu *single-beam* dan *double-beam*. Instrumen *single-beam* seperti yang terlihat pada Gambar 6 digunakan untuk pengukuran kuantitatif dengan mengukur absorbansi pada satu panjang gelombang. Instrumen ini memiliki beberapa keunggulan, seperti desain yang sederhana, biaya yang lebih murah, dan penghematan yang

signifikan. Beberapa instrumen spektrofotometer *single-beam* dirancang untuk mengukur sinar ultraviolet dan sinar tampak, dengan panjang gelombang terendah berkisar antara 190 hingga 210 nm dan panjang gelombang tertinggi antara 800 hingga 1000 nm (Suhartati, 2017).



Gambar 6. Spektrofotometer *single-beam* (Suhartati, 2017).

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Kiswandono *et al.* (2019) spektrum serapan senyawa *malachite green* menggunakan spektrofotometer UV-Vis menunjukkan bahwa panjang gelombang maksimum (λ_{maks}) terletak pada 617 nm. Panjang gelombang ini merepresentasikan titik serapan tertinggi, yang mengindikasikan interaksi maksimum antara senyawa tersebut dengan radiasi elektromagnetik pada wilayah spektrum tampak. Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Naila (2024) diperoleh panjang gelombang maksimum dari *malachite green* sebesar 617nm seperti yang tertera pada Gambar 7.

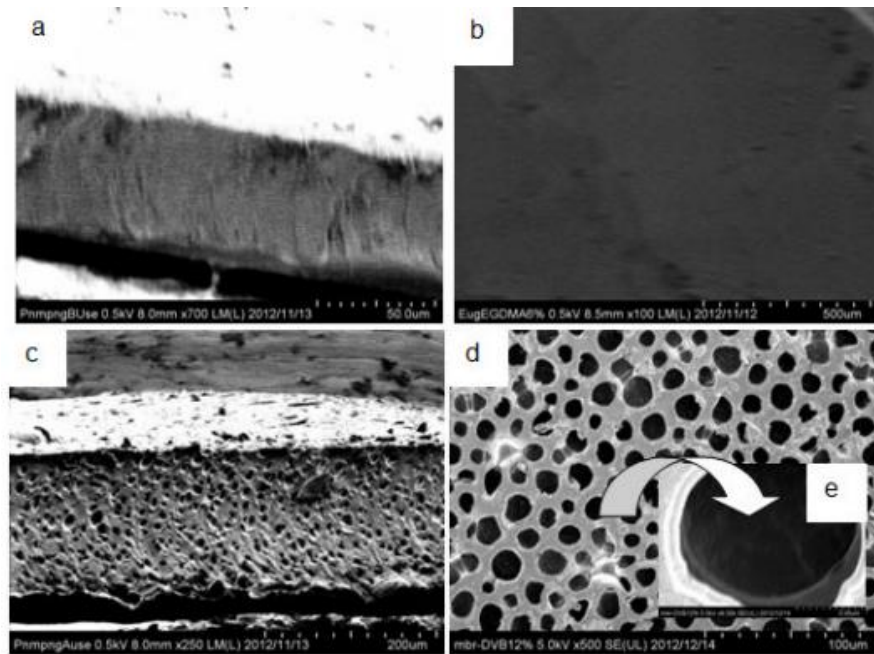


Gambar 7. Grafik panjang gelombang maksimum *malachite green* (Naila, 2024)

2.5.3 *Scanning Electron Microscope Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDX)*

Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDX) adalah salah satu alat paling serbaguna yang digunakan untuk memeriksa dan menganalisis morfologi struktur mikro serta karakterisasi komposisi kimia. Untuk memahami prinsip dasar mikroskop elektron, penting memahami konsep dasar optik cahaya. Mata manusia dapat membedakan objek dengan sudut pandang sekitar $1/60^\circ$, yang setara dengan resolusi sekitar 0,1 mm pada jarak pandang optimal 25 cm. Mikroskop optik memiliki batas resolusi sekitar 2.000 Å dengan cara memperbesar sudut visual menggunakan lensa optik. Mikroskop cahaya telah memainkan peran penting dalam penelitian ilmiah, dan terus digunakan hingga saat ini. Sejak ditemukan bahwa elektron bisa dibelokkan oleh medan magnet dalam berbagai eksperimen pada tahun 1890-an, mikroskop elektron dikembangkan dengan menggantikan cahaya sebagai sumber dengan berkas elektron berenergi tinggi. Bagian ini membahas prinsip dasar SEM, termasuk batas resolusi, interaksi berkas elektron dengan spesimen, serta pembangkitan sinyal (Zhou *et al.*, 2007).

Membran PIM yang akan digunakan untuk proses transportasi dan yang telah digunakan sebelumnya dianalisis menggunakan SEM untuk mengamati morfologi permukaannya. Proses transportasi dapat menyebabkan hilangnya beberapa komponen membran. *Leaching* dari komponen membran ini mengakibatkan pori-pori pada permukaan membran PIM menjadi lebih besar. Hasil analisis menggunakan mikroskop elektron (Gambar 8) mendukung hal ini, menunjukkan bahwa hampir seluruh permukaan dan penampang membran berpori. Namun, pori-pori pada membran sebelum proses transportasi lebih kecil dibandingkan setelahnya. Hal ini menunjukkan bahwa selama proses transportasi terjadi kehilangan komponen membran, yang menyebabkan permukaan dan penampang membran menjadi lebih keropos (Kiswandono *et al.*, 2013).



Gambar 8. SEM dari kopoli(eugenol-DVB) 12%. Sebelum transport (a) penampang melintang, 700x (b) penampang permukaan 100x. Setelah transport (c) penampang melintang 250x (d) penampang permukaan dan (e) penampang permukaan 80 (Kiswandono *et al.*, 2013).

Prinsip dasar SEM didasarkan pada eksperimen Knoll dan gagasan von Ardenne untuk mikroskop transmisi dengan pemindaian. Dalam proses yang mirip dengan pemindaian berkas elektron pada tabung sinar katoda, berkas elektron yang difokuskan memindai permukaan spesimen baris demi baris di dalam kolom mikroskop yang dievakuasi, membentuk sinyal berdasarkan interaksi antara berkas elektron dan sampel. Sinyal ini kemudian dideteksi secara elektronik dan diperkuat oleh alat yang sesuai. Awalnya, respons sinyal ditampilkan sebagai perubahan kecerahan pada tabung sinar katoda, yang bergerak bersama dengan berkas elektron dalam kolom mikroskop. Namun, kini teknik komputer digital telah menggantikan tabung sinar katoda tradisional. Besarnya perbesaran gambar ditentukan oleh ukuran area sampel yang dipindai. Resolusi gambar SEM umumnya ditentukan oleh diameter elektron yang difokuskan pada permukaan sampel dan interaksi antara elektron primer dengan sampel (Michler, 2008). Dalam lima tahun terakhir, teknologi *Scanning Electron Microscopy* yang dikombinasikan dengan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM-EDX) telah mengalami perkembangan pesat, menjadikannya alat penting dalam analisis

morfologi permukaan dan komposisi unsur berbagai jenis material. Fokus penelitian terkini banyak diarahkan pada penyempurnaan parameter operasional, contohnya studi mengenai penyesuaian tegangan akselerasi pada sampel biologis yang mengungkapkan adanya efek charging di atas 15 kV dan hilangnya deteksi beberapa elemen pada tegangan di bawah angka tersebut. Penggunaan metode *Contrast to Noise Ratio* (CNR) dalam analisis citra SEM pada material resin timbal menunjukkan bahwa pembesaran hingga 10.000 kali menghasilkan nilai CNR tertinggi serta kualitas visual yang lebih baik (Septiano *et al.*, 2022).

III. METODE PERCOBAAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini telah dilaksanakan pada bulan Desember 2024 sampai April 2025 di Laboratorium Kimia Analitik dan Instrumentasi, Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung. Karakterisasi senyawa pembawa Co-EDVB 4% dan membran PIM menggunakan alat *Scanning Electron Microscopy* (SEM) (JSM-6510LA JEOL) dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) (ASTM E1252-98R21) yang dilakukan di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Bandung. Analisis *malachite green* menggunakan Spektrofotometer UV-Vis (Shimadzu UV-1780 Double Beam) yang dilakukan di Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah neraca digital (Galaxy HR-150A 152 g x 0,1 mg), pipet tetes, *magnetic stirrer*, *magnetic bar*, spatula, satu set alat transpor *malachite green* (*chamber* berdiameter 3,5 cm), alat cetak membran, pinset, gelas ukur, gelas beaker, batang pengaduk, cawan petri, labu takar, oven, botol gelap, *thickness gauge* (Mitutoyo 7301 Dial Thickness Gauge 0-10 mm), pH meter, spektrofotometer UV-Vis (Shimadzu UV-1780 Double Beam), *Scanning Electron Microscopy* (SEM) (JSM-6510LA JEOL) dan *Fourier Transform Infrared* (FT-IR) (ASTM E1252-98R21).

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah Co-EDVB 4%, *malachite green*, polivinil klorida (PVC), dibenzil eter (DBE), tetrahidrofuran (THF), asam nitrat (HNO_3), PbCO_3 , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, akuabides, plastik *wrap*, tisu dan aluminium foil.

3.3 Pembuatan Larutan Induk *Malachite Green*, Pembuatan Limbah Buatan, dan Pengukuran Konsentrasi *Malachite Green* dalam Fasa Sumber

a. Pembuatan Larutan Induk *Malachite Green* 1000 ppm

Langkah awal dalam pembuatan larutan induk *malachite green* 1000 ppm dengan cara melarutkan 1 g *malachite green* dalam 1000 mL akuabides.

b. Pembuatan Limbah Buatan

Pembuatan limbah buatan 25 ppm dengan cara memasukkan 0,00125 g *malachite green*, 0,001613 g PbCO_3 , dan 0,0049 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dalam labu ukur 50 mL dan ditambahkan akuabides hingga tanda tera.

c. Pengukuran Konsentrasi *Malachite Green* dalam Fasa Sumber

Pengukuran konsentrasi *malachite green* pada fasa sumber ditentukan terlebih dahulu dengan penentuan panjang gelombang maksimum *malachite green*. Penentuan panjang gelombang maksimum *malachite green* dilakukan dengan mengukur larutan *malachite green* yang sudah diketahui konsentrasinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada rentang panjang gelombang 400 nm sampai 800 nm.

Selanjutnya, untuk penentuan konsentrasi *malachite green* pada fasa sumber dan fasa penerima, dengan mengambil masing-masing larutan pada kedua fasa tersebut sebanyak 5 mL, kemudian diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum yang telah didapat.

3.4 Pembuatan Membran PIM

Membran PIM dibuat dengan mencampurkan kopoli (eugenol-DVB) 4% sebagai senyawa pembawa, PVC sebagai polimer dasar, dan DBE sebagai *plasticizer* dengan perbandingan 10:32:58 (Nghiem *et al.*, 2006). Komposisi membran dapat dilihat pada Tabel 2. Tetrahidrofur (THF) yang berfungsi sebagai pelarut ditambahkan pada cetakan membran PIM, selanjutnya distirer selama 30-60 menit sampai campuran homogen. Membran hasil cetakan didiamkan selama 3 hari untuk menguapkan pelarut secara alami.

Tabel 2. Komposisi Membran PIM (Nghiem *et al.*, 2006).

Tipe Membran	Co-EDVB% (g)	PVC (g)	DBE (g)	Total (g)
T ₂₇ (Tipis)	0,0270	0,0864	0,1556	0,2700
T ₅₄ (Normal)	0,0540	0,1728	0,3132	0,5400
T ₁₀₈ (Tebal)	0,1080	0,3456	0,6264	0,1080

Setelah membran PIM selesai dibuat, membran tersebut ditimbang terlebih dahulu sebelum digunakan dalam proses transpor *malachite green*. Karakterisasi membran PIM dilakukan sebelum dan sesudah proses transpor, menggunakan FTIR dan SEM, serta pengukuran ketebalan membran dilakukan dengan alat pengukur ketebalan (*thickness gauge*).

3.5 Uji Membran PIM

3.5.1 Uji Porositas Membran PIM

Membran PIM direndam dalam 10 mL akuabides di dalam cawan petri selama 24 jam pada suhu ruang. Setelah itu, membran dikeringkan dengan tisu dan ditimbang untuk mendapatkan nilai W_1 (g) sebagai berat basah awal. Kemudian, membran dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C selama 6 jam hingga benar-

benar kering, didinginkan, dan ditimbang ulang untuk mendapatkan nilai W_2 (g) sebagai berat kering. Berat yang diperoleh digunakan untuk menghitung persentase porositas membran (Suryandari, 2020), yang terdapat pada Persamaan 1.

$$\text{Porositas} = \frac{W_1 - W_2}{\rho_w \cdot V_t} \times 100\%$$

$$V_t = \frac{W_1 - W_2}{\rho_w} + \frac{W_2}{\rho_p} \quad (1)$$

Keterangan:

W_1 : berat basah membran (g)

W_2 : berat kering membran (g)

ρ_w : densitas air (1 g/cm³)

ρ_p : densitas Co-EDVB 4% (1,46 g/cm³)

V_t : volume membran basah (cm³)

3.5.2 Uji Serapan Air Membran PIM

Membran PIM ditimbang menggunakan neraca analitik untuk memperoleh berat awal. Membran kemudian direndam dalam 10 mL akuabides selama 6 jam, dan setelah perendaman, membran ditimbang kembali. Berat yang diperoleh digunakan untuk menghitung persentase penyerapan air oleh membran (*Modhe et al.*, 2024) seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 2.

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

Keterangan:

W_w : berat basah membran (g)

W_d : berat kering membran (g)

ρ_w : densitas air (1 g/cm³)

ρ_p : densitas Co-EDVB 4% (1,46 g/cm³)

V_t : volume membran basah (cm³)

3.6 Optimasi Transpor *Malachite Green*

3.6.1 Variasi pH *Malachite Green* pada Fasa Sumber

Lima membran PIM dengan ketebalan normal (T_{54}) ditempatkan dalam lima pipa transpor (*chamber*) berdiameter 3,5 cm. Setiap *chamber* diisi dengan 50 mL HNO_3 1 M sebagai fasa penerima dan 50 mL *malachite green* 25 ppm sebagai fasa sumber. pH dari masing-masing fasa sumber divariasikan menjadi 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; dan 9,0. Pipa transpor kemudian ditutup dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 24 jam. Setelah pengadukan selesai, sampel sebanyak 5 mL diambil dari fasa sumber dan fasa penerima. Konsentrasi *malachite green* pada kedua fase dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum dan larutan standar yang digunakan yaitu *malachite green* dengan konsentrasi 2, 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 ppm yang diperoleh dari 100 ppm larutan induk *malachite green*.

3.6.2 Variasi Konsentrasi HNO_3 pada Fasa Penerima

Variasi konsentrasi HNO_3 pada fasa penerima dilakukan sebesar 0,50; 0,75; 1,00; 1,25; dan 1,50 M melalui pengenceran dari HNO_3 pekat 13 M. HNO_3 pekat dipipet dengan volume 9,6 mL untuk konsentrasi 0,50 M, 14,4 mL untuk 0,75 M, 19,2 mL untuk 1 M, 24 mL untuk 1,25 M, dan 28,8 mL untuk 1,5 M, kemudian dimasukkan ke dalam labu ukur 250 mL masing-masing, lalu ditambahkan akuades hingga mencapai tanda tera. Lima membran PIM dengan ketebalan normal (T_{54}) ditempatkan dalam lima pipa transpor (*chamber*) berdiameter 3,5 cm. Setiap *chamber* diisi dengan 50 mL HNO_3 sebagai fasa penerima dan 50 mL *malachite green* 25 ppm sebagai fasa sumber. Pipa transpor ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet selama 24 jam. Setelah selesai, sampel sebesar 5 mL diambil dari fasa sumber dan fasa penerima. Konsentrasi *malachite green* pada kedua fase dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum dan larutan standar yang digunakan yaitu *malachite green*.

dengan konsentrasi 2, 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 ppm yang diperoleh dari 100 ppm larutan induk *malachite green*.

3.6.3 Variasi Ketebalan Membran

Membran PIM dengan variasi ketebalan tipis (T_{27}), normal (T_{54}), dan tebal (T_{108}) yang telah dicetak ditempatkan di tengah pipa transpor. Selanjutnya, 50 mL larutan HNO_3 dengan konsentrasi optimum digunakan sebagai fasa penerima, dan 50 mL *malachite green* 25 ppm dengan pH optimum digunakan sebagai fasa sumber. Pipa transpor ditutup dan diaduk menggunakan pengaduk magnet selama 24 jam. Setelah pengadukan selesai, sampel sebesar 5 mL diambil dari fasa sumber dan fasa penerima untuk dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum dan larutan standar yang digunakan yaitu *malachite green* dengan konsentrasi 2, 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 ppm yang diperoleh dari 100 ppm larutan induk *malachite green*.

3.6.4 Variasi Konsentrasi Senyawa Pembawa

Membran PIM dengan komposisi optimum yang telah dicetak dan mengandung variasi konsentrasi senyawa pembawa yang tertera pada Tabel 3 ditempatkan di tengah pipa transpor. Kemudian, 50 mL larutan HNO_3 ditambahkan sebagai fasa penerima optimum dan 50 mL *malachite green* 25 ppm sebagai fasa sumber optimum. Pipa transpor ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet selama 24 jam. Setelah pengadukan selesai, sampel sebanyak 5 mL diambil dari fasa sumber dan fasa penerima. Konsentrasi *malachite green* dalam kedua fase dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

Tabel 3. Variasi Konsentrasi Senyawa Pembawa.

Membran	Co-EDVB (M)	Co-EDVB (g)	PVC (g)	DBE (g)
1	0,01	0,0357	0,1728	0,3132
2	0,02	0,0540	0,1728	0,3132
3	0,03	0,1072	0,1728	0,3132
4	0,04	0,1429	0,1728	0,3132
5	0,05	0,1783	0,1728	0,3132

3.6.5 Variasi Waktu Transpor

Membran PIM dengan ketebalan optimum yang telah dicetak dan mengandung senyawa pembawa ditempatkan di tengah pipa transpor. Selanjutnya, 50 mL larutan HNO_3 dengan konsentrasi optimum ditambahkan sebagai fasa penerima, dan 50 mL *malachite green* 25 ppm dengan pH optimum digunakan sebagai fasa sumber. Pipa transpor ditutup dan diaduk dengan variasi waktu selama 6, 12, 18, 24 dan 30 jam menggunakan pengaduk magnet. Setelah pengadukan selesai, sampel sebesar 5 mL diambil dari fasa sumber dan fasa penerima. Konsentrasi *malachite green* dalam kedua fase dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum dan larutan standar yang digunakan yaitu *malachite green* dengan konsentrasi 2, 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 ppm yang diperoleh dari 100 ppm larutan induk *malachite green*.

3.6.6 Studi Kompetisi Transpor *Malachite Green* pada Limbah Buatan

Studi mengenai kompetisi transpor *malachite green* dilakukan dengan menggunakan *chamber* yang telah dilengkapi membran PIM dengan kondisi optimum. Fasa sumber terdiri dari sampel limbah buatan yang merupakan campuran *malachite green*, PbCO_3 , dan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, masing-masing dengan konsentrasi 25 ppm. Sementara itu, fasa penerima mengandung 50 mL larutan HNO_3 . Setelah itu, pipa transpor ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet pada fasa sumber dan fasa penerima selama waktu optimum pada suhu ruang.

Setelah pengadukan selesai, sampel sebanyak 5 mL diambil dari fasa sumber dan fasa penerima. Konsentrasi *malachite green* dalam kedua fase dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis, analisis logam Cu(II) dan Pb(II) pada membran menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) serta morfologi membran dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

3.6.7 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), persen *recovery* (%R), dan persen removal (%RE) pada transpor *malachite green*. Perhitungan seperti terlihat pada Persamaan 3 (Agustina dan Sujana, 2020), dan Persamaan 4 (Kusumaningrum *et al.*, 2022), serta Persamaan 5, 6, dan 7 (Suryandari, 2020).

$$\%Recovery = \frac{C_{\text{penerima}}}{C_{0 \text{ sumber}}} \times 100 \quad (3)$$

Keterangan:

%*Recovery* = %*Malachite green* pada fasa penerima
 $C_{0 \text{ sumber}}$ = Konsentrasi awal *malachite green* pada fasa sumber (ppm)
 C_{penerima} = Konsentrasi *malachite green* pada fasa penerima (ppm)

$$\%Removal = \frac{C_{0 \text{ sumber}} - C_{\text{sumber}}}{C_{0 \text{ sumber}}} \times 100 \quad (4)$$

Keterangan:

%*Removal* = %*Malachite green* pada fasa penerima
 $C_{0 \text{ sumber}}$ = Konsentrasi awal *malachite green* pada fasa sumber (ppm)
 C_{sumber} = Konsentrasi akhir *malachite green* pada fasa sumber (ppm)

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

Keterangan:

V_f = Volume fluida (m^3)
 A = Luas permukaan membran (m^2)
 t = Waktu (jam)
 $[C]_t$ = Konsentrasi *malachite green* di fasa penerima pada waktu t (ppm)

$[C]_0$ = Konsentrasi awal fasa sumber(ppm)

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

Keterangan:

J = Fluks (L/m² Jam)

V = Volume sampel (L)

A = Luas permukaan membran (m²)

t = Waktu (jam)

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

Keterangan:

R = Koefisien rejeksi

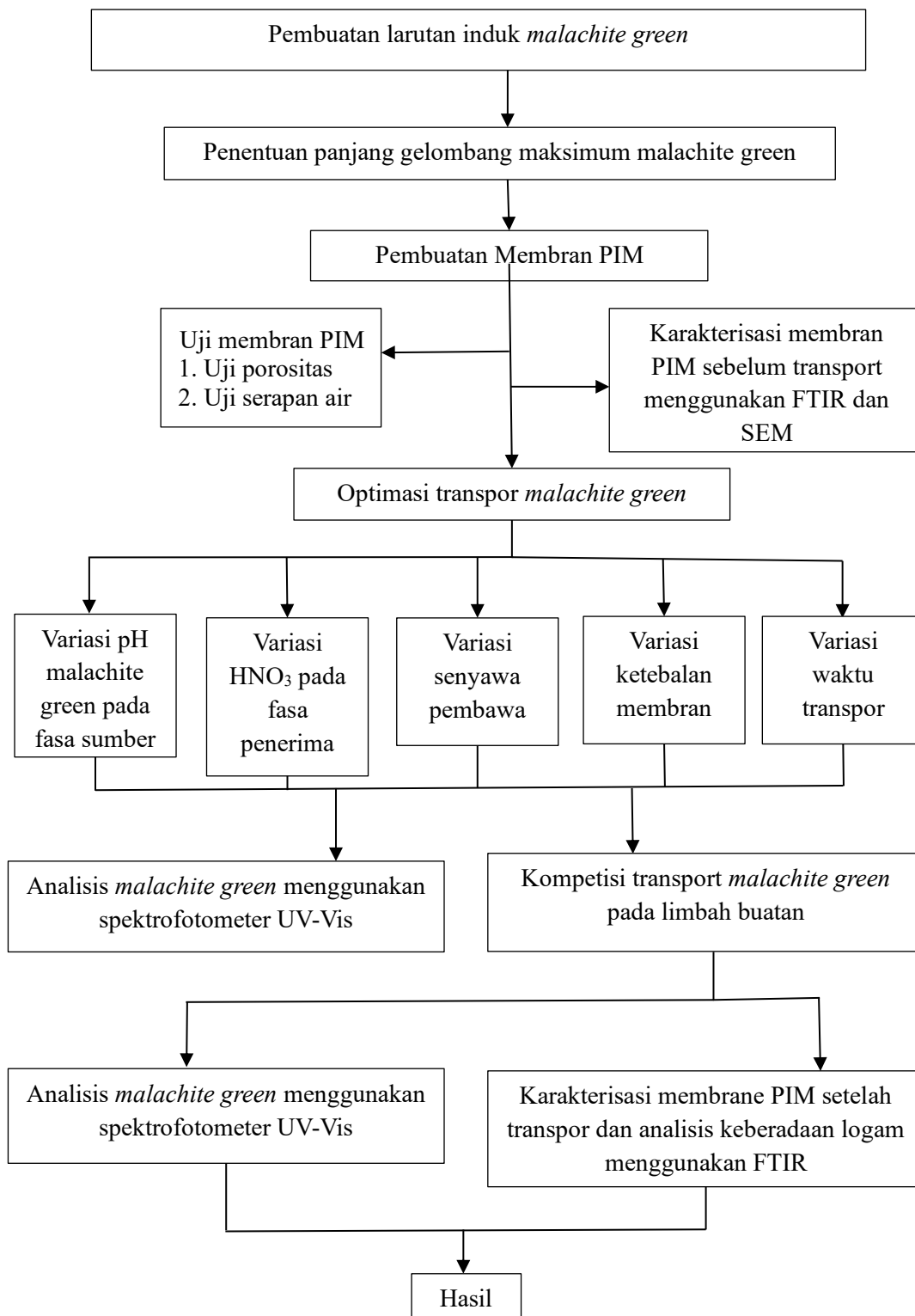
C_p = Konsentrasi *malachite green* yang ada pada fasa penerima (ppm)

C₀ = Konsentrasi awal fasa sumber saat t optimum (ppm)

Selanjutnya, analisis membran PIM sebelum dan setelah transpor menggunakan FTIR (*Fourier Transform Infra Red*) untuk gugus fungsi dan *Scanning Electron Microscope (SEM)* untuk melihat morfologi permukaan pada membran.

3.7 Skema Penelitian

Skema penelitian dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Skema penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Transpor *malachite green* diperoleh dalam kondisi optimum dengan pH fasa sumber *malachite green* adalah 7, konsentrasi fasa penerima HNO_3 optimum adalah 1 M dengan ketebalan membran T_{54} (ketebalan normal) selama 24 jam waktu transpor dengan jumlah *malachite green* tertranspor dengan % *removal* sebesar 93,07
2. Logam Cu(II) dan Pb(II) mempengaruhi mekanisme transpor, di mana keberadaannya berpotensi mempengaruhi perpindahan *malachite green* dari fasa membran menuju fasa penerima
3. Hasil karakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan bahwa permukaan membran PIM setelah proses transpor *malachite green* mengalami perubahan morfologi, ditandai dengan permukaan yang tidak rata. Kondisi ini diduga disebabkan oleh hilangnya sebagian komponen membran akibat proses *leaching*. Fenomena ini didukung oleh hasil karakterisasi FTIR yang menunjukkan adanya pergeseran pita serapan serta penurunan intensitas, yang mengindikasikan terjadinya interaksi antara senyawa *malachite green* dengan gugus fungsional pada membran, serta kemungkinan degradasi atau pelepasan komponen tertentu dari struktur membran.

5.2 Saran

Saran dari penelitian selanjutnya yaitu disarankan agar dilakukan kajian lebih mendalam mengenai proses transpor *malachite green* dengan menggunakan variasi senyawa pembawa lain guna meningkatkan efisiensi dan kestabilan sistem membran. Selain itu, perlu juga dilakukan variasi terhadap jenis ion logam yang digunakan sebagai kompetitor, dengan tujuan untuk mengevaluasi pengaruh spesifik kompetitor terhadap selektivitas dan kapasitas transpor *malachite green* ke fasa penerima, sehingga diperoleh kondisi optimum untuk aplikasi pemisahan menggunakan membran PIM.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, N. dan Sujana. 2020. Validation Method for Determination of Niclosamide Monohidrate in Veterinary Medicine Using Uv-Vis Spectrophotometry. *Jurnal Ilmiah Farmako Bahari*. 11(2): 153–160.
- Almeida, G. S., Cattrall, R. W., and Kolev, S. D. 2012. *Recent Trends in Extraction and Transport of Metal Ions Using Polymer Inclusion Membranes (PIMs)*. 416: 9–23.
- Amin, A. 2009. Pemisahan Unsur Samarium dan Yttrium dari Mineral Tanah Jarang dengan Teknik Membran Cair Berpendukung (Supported Liquid Membrane). *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*. 7(1): 15–23.
- Berthomieu, C., and Hienerwadel, R. 2009. Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. *Photosynthesis Research*. 101(2–3): 157–170.
- Bhernama, B. G. 2017. *Degradasi zat warna malachite green secara ozonolisis* (Skripsi, Universitas Andalas).
- Gaffney, J. S., Nancy, A. M. A., and Jones, D. E. 2012. Fourier Transform Infrared Spectra. *Fourier Transform Infrared Spectra*. 1: 1104-1135.
- Handayani, D. S., Kusumaningsih, T., and Yuli, M. 2004. Synthesis of Co-Poly(Eugenol Sulfonate)-DVB From Eugenol as a Major Component of Syzygium Aromaticum Oils. *Biofarmasi Journal of Natural Product Biochemistry*. 2(2): 53–57.
- Hikmah, S. A., Rahim, E. A., dan Musafira, M. 2019. Sintesis dan Karakteristik Polieugenol dari Eugenol Menggunakan Katalis $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{CH}_3\text{COOH}$. *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*. 4(3): 285–296.
- Hamad, M. T. M. H. 2023. Optimization Study of the Adsorption of *Malachite green* Removal by MgO Nano-Composite, Nano-Bentonite and Fungal Immobilization on Active Carbon Using Response Surface Methodology and Kinetic Study. *Environmental Sciences Europe*. 35(1): 1–37.

- Keskin, B., Zeytuncu, G., B., and Koyuncu, I. 2021. Polymer Inclusion Membrane Applications for Transport of Metal Ions: A Critical Review. *Chemosphere*. 279: 1-11.
- Khalil, A. A., Rahman, U. U., Khan, M. R., Sahar, A., Mehmood, T., and Khan, M. 2017. Essential Oil Eugenol: Sources, Extraction Techniques and Nutraceutical Perspectives. *RSC Advances*. 7(52): 32669–32681.
- Kiswandono, A. A., Nusantara, 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): 1009–1016.
- Kiswandono, A. A., Siswanta, D., Aprilita, N. H., and Santosa, S. J. 2012. Transport of Phenol Through Inclusion Polymer Membrane (PIM) Using Copoly(Eugenol-DVB) as Membrane *Carriers*. *Indonesian Journal of Chemistry*. 12(2): 105–112.
- Kiswandono, A. A., Siswanta, D., Aprilita, N. H., Santosa, S. J., and Hayashita, T. 2013. Extending the Life Time of Polymer Inclusion Membrane Containing Copoly(Eugenol-DVB) as *Carrier* for Phenol Transport. *Indonesian Journal of Chemistry*. 13(3): 254–261.
- Kiswandono, A. A., Siswanta, D., Aprilita, N. H., Santosa, S. J., and Hayashita, T. 2014. The Capability of Copoly(Eugenol-Divinylbenzene) as a *Carrier* For Phenol Transport with Polymer Inclusion Membrane (PIM). *Journal of Environmentally Friendly Processes*. 2(2): 57–68.
- Kiswandono, A. A., Widiarto, S., Sari, D. T. E. N., Supriyanto, R., Qudus, H. I., Rinawati, R., Rahmawati, A., dan Devariani, W. 2021. Kompetisi Fenol pada Limbah Buatan Menggunakan Kopolimer-Eugenol Divinil Benzena 10% sebagai Senyawa Pembawa. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*. 18(1): 1-9.
- Kiswandono, A. A., Sutopo, H., Mudasir, Fatry, S., Sari, M. Y., and Muhammad, I. 2019. *Copoly eugenol crosslinked diallylphthalate 8% as a carrier in phenol and Pb(II) metal transport*. *Physics Journal*. 13. 38.
- Kul, A. R., Yeşiltaş, S., Aybar, N., and Benek, V. 2023. Some Textile Dyeing Materials (Methylene Blue, *Malachite green* and Crystal Violet) and Their Effects on Health. *Current Researches in Health Sciences-IV*. 0–2.
- Kusumaningrum, D. I. P., Sudarni, D. H. A., dan 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.

- Ling, Y. Y., and Suah, F. B. M. 2017. Extraction of *Malachite green* from Wastewater by Using Polymer Inclusion Membrane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 5(1): 785–794.
- Michler, G. H. 2008. Scanning Electron Microscopy (SEM) Investigation of Selected Desensitising Agents in the Dentine Disc Model. *Australian Endodontic Journal*. 27(1): 24–24.
- Modhe, K., Ledoh, S. M. F., Lapailaka, T., Kadang, L., Naat, J. N., Pingak, R. K., Kapitan, O. B., dan Nitti, F. 2024. Stabilitas Polymer Inclusion Membrane dari Polimer Pendukung PVC dan Ekstraktan D2EHPA dalam Asam Klorida. *Jurnal Fisika: Fisika Sains Dan Aplikasinya*. 9(1): 36–46.
- Mohamed, M. A., Jaafar, J., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., and Rahman, M. A. 2017. Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. *Membrane Characterization*. 35(1): 1-37.
- Nghiem, L. D., Mornane, P., Potter, I. D., Perera, J. M., Cattrall, R. W., and Kolev, S. D. 2006. Extraction and Transport of Metal Ions and Small Organic Compounds Using Polymer Inclusion Membranes (PIMs). *Journal of Membrane Science*. 281(1–2): 7–41.
- Osy, Y. B. 2022. *Degradasi zat warna malachite green menggunakan metode sonolisis dengan bantuan katalis ZnO* (Disertasi doktoral, Universitas Negeri Padang).
- Pang, Y. L. and Abdullah, A. Z. 2013. Current Status of Textile Industry Wastewater Management and Research Progress In Malaysia: A Review. *Clean - Soil, Air, Water*. 41(8): 751–764.
- Saka, C., Kiswandono, A. A., and Hadi, S. 2022. Synthesis of Polymer Inclusion Membranes Based Based on PVC Containing Copoly-EDVB 4 % as a *Carrier* for the Removal of Phenol Solutions. *Membranes*. 12(3): 295.
- Salsabila, B. A. A., Yusuf, A. F. N., Gading, A. C. R., Prabuningrat, A., and Andanalusia, M. 2023. Eugenol Potential in Cloves as an Analgesic: Literature Review. *Jurnal Biologi Tropis*. 23(1): 169–173.
- Septiano, A. F., Susilo, and Setyaningsih, N. E. 2021. Analisis citra hasil scanning electron microscopy energy dispersive X-Ray (SEM EDX) komposit resin timbal dengan metode contrast to noise ratio (CNR). *Indonesian Journal of Mathematics and Natural Sciences*. 44(2): 81–85.
- Srivastava, S., Sinha, R., and Roy, D. 2004. Toxicological Effects of *Malachite green*. *Aquatic Toxicology*. 66(3): 319–329.
- Suhartati, T. 2017. *Dasar-Dasar Spektrofotometri UV-Vis dan Spektrometri Massa untuk Penentuan Struktur Senyawa Organik*. Aura. Bandar Lampung.

- Sukmawati, P. dan Utami, B. 2014. Adsorpsi Zat Pewarna Tekstil *Malachite green* Menggunakan Adsorben Kulit Buah Kakao (*Theobroma cacao*) Teraktivasi HNO_3 . *Prosiding Seminar Nasional Fisika Dan Pendidikan Fisika (SNFPF)*. 5: 19–25.
- Suryandari, E. T. 2020. Sintesis Membran Komposit PVDF-Zeolit untuk Penghilangan Metilen Biru. *Al-Kimiya*. 6(2): 58–66.
- Ulfia, K. N., Khabibi, K., dan Djunaidi, M. C. 2011. Recovery Logam Krom (VI) Menggunakan Polymer Inclusion Membran (PIM) dengan Senyawa Pembawa Aliquat 336-Topo dan Campuran Aliquat 336-Topo. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*. 14(3): 77–82.
- Yonel, S. H., Nasra, E., Oktavia, B., dan Etika, S. B. 2021. Optimasi Penyerapan Zat Warna *Malachite green*. *Jurnal Kimia Universitas Negeri Padang*. 10(2): 28–32.
- Zhou, W., Apkarian, R., Wang, Z. L., and Joy, D. 2007. Fundamentals of Scanning Electron Microscopy (SEM). *Scanning Microscopy for Nanotechnology: Techniques and Applications*. 1–40.