

**TRANSPOR *MALACHITE GREEN* MENGGUNAKAN METODE
POLYMER INCLUSION MEMBRANE (PIM) DENGAN SENYAWA
PEMBAWA *COPOLY-EUGENOL ETILEN GLIKOL DIMETAKRILAT*
(Co-EEGDMA) 5%**

(Tesis)

Oleh

**ANNUR VALITA SINDIANI
NPM 2427011003**



**PROGRAM STUDI MAGISTER KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

TRANSPOR *MALACHITE GREEN* MENGGUNAKAN METODE *POLYMER INCLUSION MEMBRANE (PIM)* DENGAN SENYAWA PEMBAWA *COPOLY-EUGENOL ETILEN GLIKOL DIMETAKRILAT* (Co-EEGDMA) 5%

Oleh

ANNUR VALITA SINDIANI

Limbah termasuk permasalahan lingkungan yang serius karena dapat menurunkan kualitas lingkungan apabila tidak diolah dengan baik, terutama limbah pewarna tekstil. Salah satu yang dapat merusak lingkungan yaitu *Malachite Green* (MG) sebagai pewarna basa kationik yang banyak digunakan dalam industri tekstil. Salah satu metode yang efektif untuk mengatasi pencemaran tersebut adalah teknologi pemisahan berbasis membran cair, yaitu *Polymer Inclusion Membrane* (PIM). PIM memiliki keunggulan karena selektif, mudah diaplikasikan, mendukung *green chemistry*, dan biaya murah. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimasi dan evaluasi kinerja membran PIM yang mengandung senyawa pembawa *Copoly-Eugenol Etilen Glikol Dimetakrilat* (Co-EEGDMA) 5% dalam proses transpor MG. Hasil pengukuran menggunakan spektrofotometer UV-Vis menunjukkan bahwa panjang gelombang maksimum MG berada pada 617 nm. Optimasi transpor MG dicapai pada pH 7 pada fasa sumber, konsentrasi HNO₃ 1,25 M pada fasa penerima, tipe membran T₅₄, penambahan senyawa pembawa sebesar 0,01 mmol, dan waktu transpor selama 24 jam. Evaluasi membran menunjukkan bahwa penambahan garam NaCl 0,001 M pada fasa sumber dan fasa penerima dapat meningkatkan %*removal* MG. Uji lifetime dengan penambahan garam NaCl menunjukkan bahwa umur membran terpanjang selama 41 hari. Evaluasi membran PIM pada parameter variasi pemakaian berulang baik dengan pencucian maupun tanpa pencucian, menunjukkan penurunan efisiensi transpor. Efisiensi transpor tertinggi dicapai %*removal* sebesar 91,12%.

Kata Kunci: Co-EDVB 10%, Evaluasi, *Malachite Green*, Optimasi, PIM.

ABSTRACT

MALACHITE GREEN TRANSPORT USING THE POLYMER INCLUSION MEMBRANE (PIM) METHOD WITH COPOLY-EUGENOL ETHYLENE GLYCOL DIMETHACRYLATE (Co-EEGDMA) 5% CARRIER

By

ANNUR VALITA SINDIANI

Waste is a serious environmental problem because it can degrade environmental quality if not properly processed, especially textile dye waste. One that can damage the environment is Malachite Green (MG) as a cationic base dye widely used in the textile industry. One effective method to overcome this pollution is a liquid membrane-based separation technology, namely Polymer Inclusion Membrane (PIM). PIM has advantages because it is selective, easy to apply, supports green chemistry, and is low cost. This study aims to optimize and evaluate the performance of PIM membranes containing 5% Copoly-Eugenol Ethylene Glycol Dimethacrylate (Co-EEGDMA) carrier in the MG transport process. The measurement results using a UV-Vis spectrophotometer showed that the maximum wavelength of MG was at 617 nm. Optimization of MG transport was achieved at pH 7 in the source phase, HNO₃ concentration of 1.25 M in the receiving phase, T₅₄ membrane type, the addition of 0.01 mmol of carrier, and a transport time of 24 hours. Membrane evaluation showed that the addition of 0.001 M NaCl salt to the source and receiver phases could increase the % removal of MG. The lifetime test with the addition of NaCl salt showed that the longest membrane life was 41 days. Evaluation of the PIM membrane on the variation parameters of repeated use both with and without washing, showed a decrease in transport efficiency. The highest transport efficiency achieved was % removal of 91.12%.

Keywords: Co-EDVB 10%, Evaluation, Malachite Green, Optimization, PIM.

**TRANSPOR *MALACHITE GREEN* MENGGUNAKAN METODE
POLYMER INCLUSION MEMBRANE (PIM) DENGAN
SENYAWA PEMBAWA *COPOLY-EUGENOL ETILEN*
GLIKOL DIMETAKRILAT (Co-EEGDMA) 5%**

Oleh

Annur Valita Sindiani

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER SAINS

Pada

**Program Studi Magister Kimia
Jurusan Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**PROGRAM STUDI MAGISTER KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

Judul Tesis : **TRANSPOR MALACHITE GREEN
MENGUNAKAN METODE POLYMER
INCLUSION MEMBRANE (PIM) DENGAN
SENYAWA PEMBAWA COPOLY-EUGENOL
ETILEN GLIKOL DIMETAKRILAT (Co-
EEGDMA) 5%**

Nama Mahasiswa : **Annur Walita Sindiani**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2427010003**

Program Studi : **Magister Kimia**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



1. **Komisi Pembimbing**

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

Rinawati, Ph.D.
NIP. 197104142000032001

2. **Ketua Prodi Magister Kimia FMIPA UNILA**

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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

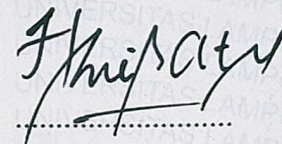
Ketua : Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc.



Sekretaris : Rinawati, Ph.D.



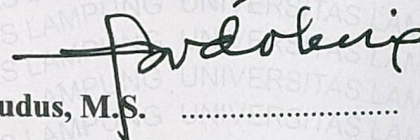
**Penguji
Bukan Pembimbing I : Dr. Eng. Heri Satria, M.Si.**



Bukan Pembimbing II : Prof. Andi Setiawan, Ph.D.



Bukan Pembimbing III : Prof. Dr. Hardoko Insan Qudus, M.S.



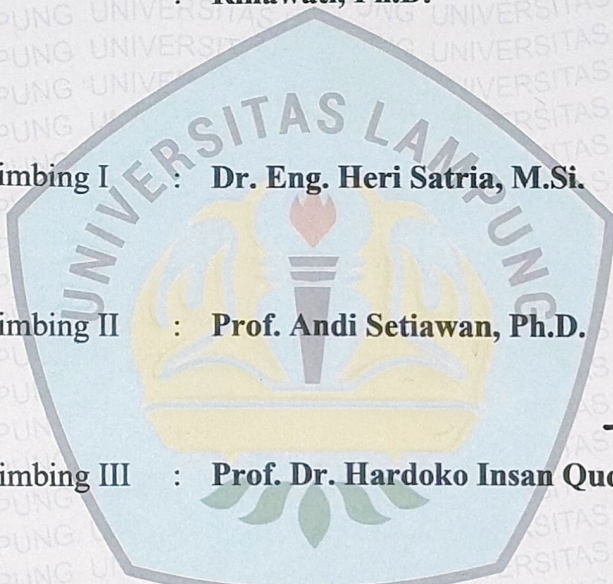
2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

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

3. Direktur Program Pascasarjana

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

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 04 Mei 2026



SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Annur Valita Sindiani
Nomor Pokok Mahasiswa : 2427011003
Program Studi : Magister Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa tesis saya berjudul :


**” TRANSPOR *MALACHITE GREEN* MENGGUNAKAN METODE
POLYMER INCLUSION MEMBRANE (PIM) DENGAN SENYAWA
PEMBAWA *COPOLY-EUGENOL ETILEN GLIKOL DIMETAKRILAT*
(Co-EEGDMA) 5%”**

Dengan ini menyatakan bahwa baik gagasan, tulisan, data, maupun pembahasannya adalah benar karya saya sendiri yang saya susun dengan mengikuti norma dan etika akademik yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila di kemudian hari terbukti pernyataan saya ini tidak benar, maka saya bersedia mempertanggungjawabkannya.

Bandar Lampung, 04 Mei 2026
Yang menyatakan,




Annur Valita Sindiani
NPM. 2427011003

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Annur Valita Sindiani dan lahir di Sri Gading, 10 April 2001 sebagai anak pertama dari satu bersaudari, putri dari Bapak Yardi Bahtiar dan Ibu Sri Wahyuni. Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Negeri 2 Panjang Utara pada tahun 2013–2016 dan SMK SMTI Bandar Lampung pada tahun 2016–2019. Pada tahun 2019, penulis melanjutkan pendidikan sebagai mahasiswa Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung dan menyelesaikan studinya pada tahun 2023. Tahun 2024 di bulan Mei, penulis bekerja di Sekretariat Komite Fatwa Badan Penyelenggara Jaminan Produk Halal (BPJPH) Republik Indonesia dan melanjutkan studinya juga pada Agustus 2024.

Penulis melakukan penelitian sebagai bahan penyusunan tesis di Laboratorium Kimia Analitik dan Instrumentasi Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung. Penulis berhasil menyelesaikan penelitian Magister terkait **Transpor *Malachite Green* menggunakan Metode *Polymer Inclusion Membrane (PIM)* dengan Senyawa Pembawa *Copoly-Eugenol Etilen Glikol Dimetakrilat (Co-EEGDMA) 5%***. Selama menjadi mahasiswa, penulis belajar mengenai pengelolaan jurnal dan mendapat kepercayaan sebagai *editorial board* di *Jurnal Analit: Analytical and Environmental Chemistry*. Penulis juga beberapa kali mengikuti Seminar Internasional untuk menjadi pemakalah oral yang terdiri dari *International Conference of Science and Technology (ICST) SEMIRATA 2025*, *The 3rd International Conference On Medical Science and Health (ICOMESH) 2025*, dan *The 2nd International Conference on Sustainable Chemistry 2025*. penulis juga aktif mengikuti ajang perlombaan salah satunya memenangkan Juara III Riset Festival 2025 yang diselenggarakan oleh Universitas Lampung. Penulis

juga aktif pada beberapa kegiatan pengembangan *soft skill* menjadi *Public Speaker* dan juga *Brand Ambassador* dari Wardah Paragon 2025 serta *Pink Flash Cosmetics* 2024.

Penulis telah mempublikasikan beberapa artikel ilmiah pada jurnal internasional. Publikasi terbaru penulis di tahun 2024 berjudul *Transport Of Malachite Green Using The Poly Eugenol-Based Polymer Inclusion Membrane (PIM) Method* dan *Phenol Solutions Recovery As Water Pollutants With Eugenol Cross-Linked Diallyl Phthalate Using Supported Liquid Membrane*. Pada tahun 2026, penulis juga mempublikasikan artikel ilmiah tahun 2026 berjudul *Optimization And Performance Evaluation Of Polymer Inclusion Membrane (PIM) Containing 10% Eugenol-Diallyl Phthalate Copolymer As Carrier For Malachite Green (MG) Transport*.



Dengan menyebut nama Allah yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang

Dengan mengucapkan
Alhamdulillahirabbil'amin,
Kebahagiaan ini dapat kuraih. Kupersembahkan karya kecilku, buah manis dari
perjuangan dan jerih payahku kepada:

Kedua orang tuaku tersayang, Bapak Yardi Bahtiar dan Ibu Sri Wahyuni,
yang telah memberikan kasih dan sayang yang sangat luar biasa dalam
membesarkanku, mendidik, mendoakan, serta merestui setiap langkahku hingga
kini dan mewujudkan harapan-harapan yang menjadi cita-cita bersama.

Adikku tercinta, Windi Anggriani
Terima kasih untuk cinta dan dukungan yang telah kalian berikan.

Para dosen yang sangat berjasa,
Tanpa bapak/ibu takkan mungkin aku sampai di titik ini.

Para sahabat dan teman seperjuanganku Magister Kimia 2024,
Terima kasih untuk canda, tawa, tangis, dan perjuangan yang kita lewati bersama,
serta kenangan manis yang telah kalian berikan kepadaku.

Teman-teman Tim Membrane Research,
Terima kasih atas kebersamaan, dukungan, semangat, dan kerja sama yang luar
biasa dalam perjalanan riset ini. Pengalaman bersama kalian menjadi bagian
penting dalam perjalananku.

Almamater tercinta "Universitas Lampung"

MOTTO

“...Allah will raise those who have believed among you and those who were given knowledge, by degrees. And Allah is Acquainted with what you do.”

— *Al Mujadillah: 11*

“The important thing is not to stop questioning. Curiosity has its own reason for existing.”

— *Albert Einstein*

“Do what you can, with what you have, where you are.”

— *Theodore Roosevelt*

“There is nothing more stupid than prioritizing a man between your education, knowledge will never betray, knowledge will always be with you.”

— *Alpha Gils Guide*

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan hidayah-Nya, tesis ini dapat diselesaikan dengan baik. Tesis yang berjudul “Transpor *Malachite Green* Menggunakan Metode *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) Dengan Senyawa Pembawa *Copoly*-Eugenol Etilen Glikol Dimetakrilat (Co-EEGDMA) 5%” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains di Universitas Lampung. Penyusunan tesis ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak yang telah memberikan bimbingan, informasi, saran, serta dukungan moril dan materil. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc., selaku pembimbing utama dan pembimbing akademik yang telah memberikan bimbingan, arahan, bantuan secara moril maupun materil, masukan, kritik, saran, serta motivasi dalam pelaksanaan penulisan dan penyelesaian tesis ini.
2. Ibu Rinawati, Ph.D., selaku pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, arahan, bantuan secara moril maupun materil, masukan, kritik, saran, serta motivasi dalam pelaksanaan penulisan dan penyelesaian tesis ini.
3. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, M.Si., selaku dosen pembahas I yang telah memberikan bimbingan, arahan, bantuan secara moril maupun materil, masukan, kritik, serta motivasi dalam pelaksanaan penulisan dan penyelesaian tesis ini.
4. Bapak Prof. Andi Setiawan, Ph.D., selaku dosen pembahas II yang telah memberikan bimbingan dan dukungan yang sangat luar biasa untuk

memacu semangat penulis, arahan, dan bantuan secara moril maupun materil untuk penyelesaian tesis ini.

5. Bapak Prof. Dr. Hardoko Insan Qudus, M.S., selaku dosen pembahas III yang telah memberikan bimbingan, arahan, bantuan secara moril maupun materil untuk penyelesaian tesis ini.
6. Ibu Prof. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
7. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si., selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung.
8. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, M.Si., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
9. Ibu Dr. Mita Rilyanti, M.Si., selaku Ketua Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
10. Ibu Prof. Dr. Ilim, M.S., selaku Ketua Program Studi Magister Kimia FMIPA Unila.
11. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kimia FMIPA Unila, penulis ucapkan terima kasih atas ilmu, bimbingan, dan perhatian yang telah diberikan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada staf administrasi atas bantuannya selama masa studi. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan Bapak dan Ibu.
12. Seluruh pihak yang terlibat dalam proses ini sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini, yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya.
13. Terakhir tapi tidak kalah penting, terima kasih untuk diriku yang sudah berhasil menyelesaikan penulisan tesis ini.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, namun dengan harapan semoga tesis yang sederhana ini dapat bermanfaat bagi yang memerlukannya. Aamiin.

Bandar Lampung, April 2026

Annur Valita Sindiani

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	ii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xxi
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	6
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. <i>Polymer Inclusion Membrane</i>	14
2.5. <i>Copoly-Eugenol Etilen Glikol Dimetakrilat</i>	16
2.6. Analisis dan Karakterisasi	21
2.6.1. <i>Fourier Transform Infra Red</i>	21
2.6.2. <i>Scanning Electron Microscope</i>	25
2.6.3. Spektrofotometer <i>Ultra Violet-Visible</i>	28
2.6.4. <i>Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry</i>	31
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	33
3.1. Waktu dan Tempat	33
3.2. Alat dan Bahan	33
3.3. Persiapan Transpor <i>Malachite Green</i> (MG).....	34
3.3.1. Pembuatan <i>Polymer Inclusion Membrane</i> (PIM).....	34
3.3.2. Pembuatan Larutan Induk <i>Malachite Green</i> , Pembuatan Limbah..	35
Buatan dan Pengukuran Konsentrasi <i>Malachite Green</i>	35

3.4. Optimasi Transpor <i>Malachite Green</i>	36
3.4.1. Variasi pH <i>Malachite Green</i> pada Fasa Sumber	36
3.4.2. Variasi Konsentrasi HNO ₃ pada Fasa Penerima.....	36
3.4.3. Variasi Ketebalan Membran	37
3.4.4. Variasi Konsentrasi Senyawa Pembawa.....	37
3.4.5. Variasi Waktu Transpor.....	38
3.5. Evaluasi Transpor <i>Malachite Green</i>	41
3.5.1. Efek Jenis Garam pada Fasa Sumber	41
3.5.2. Efek Konsentrasi Garam pada Fasa Sumber	41
3.5.3. Efek Konsentrasi Garam pada Fasa Penerima	42
3.5.4. Variasi Pemakaian Berulang	42
3.5.5. Uji <i>Lifetime</i>	43
3.6. Aplikasi Transpor <i>Malachite Green</i>	44
3.6.1. Studi Kompetisi Transpor <i>Malachite Green</i> pada Limbah Buatan.	44
3.7. Diagram Alir.....	45
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	46
4.1. Pembuatan Membran PIM Co-EEGDMA 5%	46
4.2. Penentuan Panjang Gelombang <i>Malachite Green</i>	51
4.3. Mekanisme Transpor <i>Malachite Green</i>	52
4.4. Optimasi Transpor <i>Malachite Green</i>	54
4.4.1. Variasi pH MG pada Fasa Sumber.....	54
4.4.2. Variasi Konsentrasi HNO ₃ pada Fasa Penerima.....	59
4.4.3. Variasi Ketebalan Membran.....	63
4.4.4. Variasi Konsentrasi Pembawa Co-EEGDMA.....	67
4.4.5. Variasi Waktu Transpor	71
4.5. Evaluasi Transpor <i>Malachite Green</i>	77
4.5.1. Variasi Jenis Garam	77
4.5.2. Variasi Konsentrasi Garam pada Fasa Sumber	79
4.5.3. Variasi Konsentrasi Garam pada Fasa Penerima	81
4.5.4. Variasi Pemakaian Berulang pada Membran PIM.....	83
4.5.5. Uji <i>Lifetime</i>	85
4.6. Aplikasi Transpor <i>Malachite Green</i>	89
4.6.1. Studi Kompetisi Transpor <i>Malachite Green</i> pada Limbah Buatan.	89
V. SIMPULAN DAN SARAN	98
5.1. Simpulan.....	98
5.2. Saran.....	99

DAFTAR PUSTAKA.....	100
LAMPIRAN.....	112

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Karakteristik zat warna MG	8
2. Sifat fisik dan kimia eugenol.....	17
3. Rendemen dan sifat fisika-kimia serbuk Co-EEGDMA	19
4. Identifikasi gugus fungsi	23
5. Perbandingan komponen pembentuk membran (10:32:58)	34
6. Variasi konsentrasi senyawa pembawa Co-EEGDMA 5%.	38
7. Massa total komponen, massa membran, dan ketebalan membran PIM sebelum transpor	48
8. Perbandingan bilangan gelombang hasil FTIR membran PIM sebelum dan setelah transpor MG variasi pH MG pada fasa sumber.....	58
9. Perbandingan bilangan gelombang hasil FTIR membran PIM sebelum dan setelah transpor MG variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	62
10. Perbandingan bilangan gelombang hasil FTIR membran PIM sebelum dan setelah transpor MG variasi ketebalan membran	66
11. Perbandingan bilangan gelombang hasil FTIR membran PIM sebelum dan setelah transpor MG variasi konsentrasi senyawa pembawa	70
12. Hasil permeabilitas dan laju alir variasi waktu transpor	73
13. Perbandingan bilangan gelombang hasil FTIR membran PIM sebelum dan setelah transpor MG variasi waktu transpor	76
14. Hasil uji lifetime membran PIM	86
15. Hasil analisis logam menggunakan ICP-OES.....	91
16. Perbandingan bilangan gelombang membran sebelum dan setelah transpor MG pada limbah buatan	92
17. Absorbansi larutan standar MG pada variasi pH MG fasa sumber.....	121
18. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pH MG	121
19. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pH.....	122
20. Absorbansi larutan standar MG pada variasi HNO ₃ pada fasa penerima	123
21. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada	

variasi HNO ₃ pada fasa penerima	123
22. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada HNO ₃ pada fasa penerima.....	124
23. Absorbansi larutan standar MG pada variasi ketebalan membran.....	124
24. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi ketebalan membran.....	125
25. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada ketebalan membran.....	125
26. Absorbansi larutan standar MG pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	126
27. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada konsentrasi senyawa pembawa	126
28. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi senyawa pembawa	127
29. Absorbansi larutan standar MG pada variasi waktu	128
30. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi waktu	129
31. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi waktu.....	129
32. Absorbansi larutan standar MG pada variasi jenis garam.....	130
33. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi jenis garam	130
34. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi jenis garam	131
35. Absorbansi larutan standar MG pada variasi konsentrasi garam NaCl pada fasa sumber.....	131
36. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi garam NaCl pada fasa sumber	132
37. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi garam NaCl pada fasa sumber	133
38. Absorbansi larutan standar MG pada variasi konsentrasi NaCl pada fasa penerima	133
39. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi garam NaCl pada fasa penerima	134
40. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi garam NaCl pada fasa penerima	135
41. Absorbansi larutan standar MG pada variasi pemakaian berulang.....	135
42. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pemakaian berulang (tanpa perendaman)	136
43. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pemakaian berulang (tanpa perendaman).....	137
44. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada	

variasi pemakaian berulang (perendaman dengan akuades)	137
45. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pemakaian berulang (perendaman dengan akuades).....	137
46. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pemakaian berulang (perendaman dengan HNO ₃)	138
47. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pemakaian berulang (perendaman dengan HNO ₃).....	138
48. Absorbansi larutan standar MG pada variasi pemakaian berulang.....	139
49. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan.....	139
50. Data \bar{x} , SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan	140
51. Data Transpor Waktu	141
52. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi pH fasa sumber	147
53. Massa membran setelah transpor MG variasi pH fasa sumber	147
54. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi fasa sumber	147
55. Massa membran sebelum transpor MG variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima	148
56. Massa membran setelah transpor MG variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima	148
57. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima ...	149
58. Membran sebelum transpor MG pada variasi ketebalan membran.....	149
59. Membran setelah transpor MG pada variasi ketebalan membran	150
60. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi ketebalan membran.....	150
61. Massa membran sebelum transpor MG variasi konsentrasi senyawa pembawa Co-EEGDMA 5%	151
62. Massa membran setelah transpor MG variasi konsentrasi senyawa pembawa Co-EEGDMA 5%	151
63. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi konsentrasi senyawa pembawa Co-EEGDMA 5%.....	151
64. Massa membran sebelum transpor MG variasi waktu transpor	152
65. Massa membran setelah transpor MG variasi waktu transpor	152
66. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi waktu transpor	153
67. Massa membran sebelum transpor MG variasi jenis garam	153
68. Massa membran setelah transpor MG variasi jenis garam.....	154
69. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi jenis garam.....	154
70. Massa membran sebelum transpor MG variasi konsentrasi garam pada fasa sumber NaCl.....	155
71. Massa membran setelah transpor MG variasi konsentrasi garam pada fasa sumber NaCl.....	155
72. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi konsentrasi garam pada fasa sumber NaCl.....	155

73. Massa membran sebelum transpor MG variasi konsentrasi garam pada fasa penerima NaCl.....	156
74. Massa membran setelah transpor MG variasi konsentrasi garam pada fasa penerima NaCl.....	157
75. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi konsentrasi garam pada fasa penerima NaCl.....	157
76. Membran sebelum transpor MG pada variasi pemakaian berulang (tanpa perendaman).....	158
77. Membran setelah transpor MG pada variasi pemakaian berulang (tanpa perendaman).....	159
78. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi pemakaian berulang (tanpa perendaman).....	159
79. Membran sebelum transpor MG pada variasi pemakaian berulang (perendaman dengan akuades).....	160
80. Membran setelah transpor MG pada variasi pemakaian berulang (perendaman dengan akuades).....	160
81. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi pemakaian berulang (perendaman dengan akuades).....	160
82. Membran sebelum transpor MG pada variasi pemakaian berulang (perendaman dengan HNO ₃).....	161
83. Membran setelah transpor MG pada variasi pemakaian berulang (perendaman dengan HNO ₃).....	161
84. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi pemakaian berulang (perendaman dengan akuades).....	162
85. Massa membran sebelum studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan.....	162
86. Massa membran setelah studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan.....	163
87. LM <i>loss</i> (%) transpor MG studi kompetisi limbah buatan.....	163
88. Data pengamatan pH lifetime (tanpa penambahan garam).....	164
89. Data pengamatan pH lifetime (penambahan garam NaCl).....	165
90. Data pengamatan pH lifetime (penambahan garam NaNO ₃).....	166
91. Data pengamatan pH lifetime (penambahan garam Na ₂ SO ₄).....	167
92. Data pengamatan pH lifetime (penambahan garam KNO ₃).....	168

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Struktur MG	7
2. Tiga jenis membran cair (BLM, SLM, dan ELM).....	13
3. Skema transpor dengan membran PIM.....	15
4. Struktur eugenol.....	17
5. Struktur EGDMA	18
6. Prediksi struktur Co-EEGDMA	19
7. Skema alat FTIR	22
8. Spektra IR dari PIM yang mengandung polieugenol (a) sebelum transpor (b) setelah transpor.....	24
9. Skema SEM.....	26
10. Hasil SEM membran PIM sebelum transpor (a) 3000x, (b) 500x dan setelah transpor (c) 3000x, (d) 500x.....	27
11. Hasil SEM membran PIM polieugenol (a) sebelum transpor dan (b) setelah transpor.....	27
12. Skema alat spektrofotometer UV-Vis	28
13. Pengaruh pH terhadap konsentrasi MG tertranspor	30
14. Proses transpor MG.....	35
15. Diagram alir penelitian.....	45
16. Membran PIM Co-EEGDMA 5% (a) T ₂₇ (b) T ₅₄ (c) T ₁₀₈	48
17. Morfologi permukaan (a) membran PIM mengandung Co-EEGDMA 5% sebelum transpor perbesaran 500x dan (b) sebelum transpor perbesaran 1000x (c) setelah transpor perbesaran 500x (d) setelah transpor perbesaran 1000x pada waktu transpor optimum (24 jam).....	49
18. Panjang gelombang maksimum MG.....	51
19. Proses MG mengalami disosiasi pada antarmuka membran.....	53
20. Proses transpor dan pembentukan ikatan hidrogen antara MG ⁺ dengan dengan Co-EEGDMA serta proses pelepasan MG ⁺ ke fasa penerima.....	54
21. Pengaruh pH MG pada fasa sumber terhadap konsentrasi MG yang tertranspor	55
22. Spektra FTIR membran sebelum dan setelah transpor variasi pH pada fasa	

sumber.....	57
23. Pengaruh konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima terhadap konsentrasi MG yang tertransportor	60
24. Spektra FTIR membran sebelum dan setelah transport variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	62
25. Pengaruh ketebalan membran terhadap konsentrasi MG yang tertransportor.....	64
26. Spektra FTIR membran sebelum transport dan setelah transport variasi ketebalan membran	66
27. Pengaruh konsentrasi senyawa pembawa terhadap konsentrasi MG yang tertransportor	68
28. Spektra FTIR membran sebelum transport setelah transport variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	69
29. Pengaruh waktu transport terhadap konsentrasi MG yang tertransportor	71
30. Spektra FTIR membran sebelum transport setelah transport variasi waktu transport	75
31. Pengaruh jenis garam terhadap konsentrasi MG yang tertransportor.....	77
32. Pengaruh konsentrasi NaCl pada fasa sumber terhadap konsentrasi MG yang tertransportor	80
33. Pengaruh konsentrasi NaCl pada fasa penerima terhadap konsentrasi MG yang tertransportor	81
34. Pengaruh pemakaian berulang terhadap konsentrasi MG yang tertransportor....	83
35. Grafik pengukuran pH <i>lifetime</i>	88
36. Perbandingan konsentrasi MG kontrol, MG+ logam Cu(II), MG + logam Pb(II), dan MG + Pb(II) + Cu(II) pada kompetisi transport MG.....	90
37. Perbandingan spektra FTIR membran sebelum transport, membran MG (Kontrol), membran MG + Cu(II), membran MG + Pb(II), membran MG + Cu(II) dan membran MG + Pb(II) + Cu(II).....	93
38. (a) Hasil SEM perubahan komposisi elemen membran setelah proses transport MG pada limbah buatan ; (b) Hasil analisis logam EDS pada membran setelah proses transport MG pada limbah buatan	96
39. Kurva kalibrasi MG pada variasi pH MG fasa sumber.....	121
40. Kurva kalibrasi MG pada variasi HNO ₃ pada fasa penerima	123
41. Kurva kalibrasi MG pada variasi ketebalan membran.....	125
42. Kurva kalibrasi MG pada variasi konsentrasi senyawa pembawa	126
43. Kurva kalibrasi MG pada variasi waktu.....	128
44. Kurva kalibrasi MG pada variasi jenis garam.....	130
45. Kurva kalibrasi MG pada variasi konsentrasi garam NaCl pada fasa sumber.....	132
46. Kurva kalibrasi MG pada variasi konsentrasi garam NaCl pada fasa penerima.....	134
47. Kurva kalibrasi MG pada variasi pemakaian berulang	136
48. % LM <i>loss</i> pada variasi pH fasa sumber.....	148

49. % LM <i>loss</i> pada variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	149
50. % LM <i>loss</i> pada variasi ketebalan membran.....	150
51. % LM <i>loss</i> pada variasi konsentrasi senyawa pembawa Co-EEGDMA 5%	152
52. % LM <i>loss</i> pada variasi waktu transpor	153
53. % LM <i>loss</i> pada variasi jenis garam	154
54. % LM <i>loss</i> pada variasi konsentrasi garam pada fasa sumber NaCl.....	156
55. % LM <i>loss</i> pada variasi konsentrasi garam pada fasa penerima NaCl	157
56. % LM <i>loss</i> pada variasi pemakaian berulang tanpa perendaman	159
57. % LM <i>loss</i> pada variasi pemakaian berulang perendaman dengan akuades.	161
58. % LM <i>loss</i> pada variasi pemakaian berulang perendaman dengan HNO ₃	162
59. % LM <i>loss</i> pada transpor MG studi kompetisi limbah buatan.....	163
60. (a) Cetakan membran (b) membran PIM sebelum transpor (c) membran PIM setelah transpor	169
61. Transpor MG (a) sebelum transpor; (b) setelah transpor	169
62. Rangkaian <i>chamber</i> untuk transpor MG	170

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Limbah termasuk permasalahan lingkungan yang serius karena akan menyebabkan penurunan kualitas lingkungan jika tidak diolah seperti limbah rumah tangga, limbah farmasi, logam, dan pewarna tekstil. Pewarna tekstil banyak digunakan di sektor industri seperti kertas, kosmetik, cat, penyamakan kulit, dan tekstil, berkontribusi signifikan terhadap keberadaan air limbah. Industri tekstil merupakan sektor yang paling menonjol karena menyumbang sebagian besar limbah cair karena tingginya penggunaan pewarna yaitu 10% untuk kertas dan 8% untuk industri cat (Pathania *et al.*, 2022). Pada rentang 50% pewarna tidak terserap dan tetap menjadi polutan yang menimbulkan risiko pencemaran lingkungan yang dapat menurunkan kualitas lingkungan secara signifikan (Yaseen *et al.*, 2019). Pewarna yang dapat merusak lingkungan yaitu *Malachite Green* (MG) sebagai pewarna basa kationik yang banyak digunakan dalam industri tekstil (El-Zahhar *et al.*, 2016).

Permasalahan utama dalam pengolahan limbah pewarna sintesis seperti MG karena belum adanya metode yang efisien, selektif, ramah lingkungan, dan sekaligus ekonomis bagi industri, terutama skala kecil-menengah. MG sebagai salah satu pewarna digunakan dalam produksi bahan tekstil dan produk kertas, namun demikian MG menjadi senyawa yang kontroversial karena dapat membahayakan sistem kekebalan tubuh, sistem reproduksi, sifat genotoksik dan karsinogenik. Kehadiran MG dalam air menyebabkan efek kesehatan yang serius seperti mutagenesis, teratogenisitas, kromosom, respirasi toksisitas, dan

karsinogenesis yang sangat bergantung pada waktu paparan, suhu dan konsentrasi pewarna (Ling *and* Suah, 2017). Berdasarkan data, *Minimum Required Performance Limits* (MRPLs) yang ditetapkan oleh *Commission Decision 2004/25/EC17*, MRPLs dari residu MG dalam produk daging dan makanan laut adalah 0,002 *part per million* (ppm) (*European Commission*, 2007). Selain itu, laporan yang dinyatakan oleh *Water Research Centre for the Department of The Environment, Transport, and the Regions of the United Kingdom* merekomendasikan standar kualitas lingkungan rata-rata tahunan sebesar 0,5 ppb untuk kadar MG dalam perlindungan kehidupan perairan tawar, meskipun belum ada standar yang direkomendasikan untuk air minum (Mohamad *et al.*, 2021). Berdasarkan penelitian Muhajir *et al.* (2015), ambang batas konsentrasi MG yang diperbolehkan di perairan adalah 0,01 ppm. Konsentrasi ini dianggap aman untuk mencegah efek merugikan pada ekosistem dan kesehatan manusia (Yonel *et al.*, 2021).

Limbah MG dapat diatasi dengan berbagai metode seperti remediasi (Oladoye *et al.*, 2023 ; El-Hadj *et al.*, 2024) ; adsorpsi (Amri *et al.*, 2023 ; Jayanayak *et al.*, 2024) ; Sartape *et al.*, 2017 ; Melhi *et al.*, 2024), pertukaran ion (Teixeira *et al.*, 2022 ; Nandoost *et al.*, 2022), serta membran cair (Kiswandono *et al.*, 2024 ; Raval *et al.*, 2022) ; Ashraf *et al.*, 2019). Metode konvensional seperti adsorpsi dan remediasi sering menghasilkan limbah sekunder, sementara fotokatalisis membutuhkan kondisi operasional tertentu dan biaya yang relatif tinggi. Di sisi lain, teknologi membran seperti PIM menawarkan keunggulan berupa selektivitas tinggi dan minim limbah, namun sejauh ini belum diuji secara luas baik dari aspek kestabilan, kemampuan transpor pada berbagai kondisi kimia, maupun aplikasinya pada limbah kompleks yang mengandung campuran pewarna dan kontaminan lain (Kiswandono *et al.*, 2024).

Penelitian ini berfokus pada pemisahan MG dengan menggunakan metode membran cair. Metode membran cair menggabungkan ekstraksi dengan pemisahan dalam satu fasa, jadi perpindahan massa yang tidak sama dalam pemisahan oleh kondisi seimbang. Pada metode membran cair, teknik pemisahan

melibatkan senyawa pembawa sebagai senyawa yang akan memfasilitasi senyawa target (Kiswandono *et al.*, 2017). Pemisahan polutan menggunakan metode membran cair dapat dilakukan dengan *Bulk Liquid Membrane* (BLM) Rosly *et al.* (2018), *Supported Liquid Membrane* (SLM) (Kazemi *et al.*, 2014 ; Sun *et al.*, 2017), *Emulsion Liquid Membrane* (ELM) (Ahmad *et al.* 2019), dan *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) (Benosmane *et al.*, 2018; Kiswandono *et al.*, 2012; Saka *et al.*, 2020).

Penelitian ini memilih metode PIM karena metode ini telah berkembang sebagai alternatif yang lebih stabil dibandingkan metode membran cair lainnya untuk memisahkan dan memurnikan senyawa fenol dari air limbah, dengan menggunakan berbagai jenis pembawa (Kiswandono *et al.*, 2024). Menurut Kiswandono *et al.* (2022), metode PIM memiliki kestabilan yang sangat baik dibandingkan dengan teknologi membran cair lainnya. Selain itu, PIM juga menawarkan berbagai keunggulan, seperti area membran dengan interfasial yang lebih luas, selektivitas tinggi, kekuatan membran yang baik dalam proses transpor, efisien dalam pemisahan senyawa, serta proses pemisahan yang sederhana. Membran PIM memiliki keunggulan dibandingkan dengan membran SLM, karena membran PIM memiliki masa pakai (*lifetime*) yang lebih lama. Hal ini disebabkan oleh mekanisme transpor dalam membran PIM yang bergantung pada komposisi serta homogenitas permukaan membran. Menurut Rodríguez *and* Miguel (2022), membran PIM menjadi salah satu jenis membran di mana senyawa pembawa terkandung dalam membran bersama dengan matriks polimer, dan *plasticizer*. Membran ini memiliki berbagai keunggulan, seperti proses sintesis yang sederhana, imobilisasi untuk senyawa pembawa yang efektif, fleksibilitas dalam aplikasi, serta sifat mekanis yang baik. Penelitian Sun *et al.* (2017), pada 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.

Kiswando *et al.* (2024) telah melakukan transpor MG dengan menggunakan polieugenol sebagai senyawa pembawa, *polyvinyl chloride* (PVC) sebagai polimer dasar, dan *dibenzyl ether* sebagai *plasticizer* didapatkan hasil %*removal* MG yang didapatkan adalah 89%. Ling and Suah (2017), telah menggunakan metode PIM untuk pemisahan MG yang terdiri dari PVC sebagai polimer dasar, *bis*-(2-*ethylhexyl*) *phosphate* (B₂EHP) sebagai pembawa, serta *dioctyl phthalate* (DOP) sebagai *plasticizer*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi ekstraksi *removal* yang diperoleh melebihi 98%, artinya penelitian ini berhasil diterapkan dalam proses ekstraksi MG dari sampel air limbah nyata. Ashraf *et al.* (2019) mengembangkan penggunaan membran cair berbasis membran SLM untuk pemulihan dan penghilangan selektif pewarna MG dari air limbah. Membran yang digunakan menunjukkan kestabilan yang baik pada kondisi optimum, dengan waktu maksimum transpor yang dicapai dalam 8 jam proses permeasi. Penelitian Soo *et al.* (2021), berfokus pada pengolahan limbah industri tekstil mengandung pewarna MG dalam kadar tinggi menggunakan metode PIM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PIM mencapai kinerja optimalnya dengan efisiensi transpor MG sebesar 86,68%. Dalam studi ini, B₂EHP dan DOP digunakan sebagai pembawa dan *plasticizer*, sementara *polyvinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene* (PVDF-co-HFP) berperan sebagai polimer dasar dalam sintesis membran PIM.

Pemilihan polimer yang tepat sangat penting untuk memastikan kinerja dan stabilitas membran PIM. Polimer yang digunakan harus memiliki stabilitas kimia dan termal yang baik agar dapat bertahan dalam lingkungan dan suhu tinggi tanpa mengalami degradasi. Beberapa polimer seperti *polyvinylidene fluoride* (PVDF), polisulfon (PSf), dan politetrafluoroetilena (PTFE) sering digunakan karena ketahanannya terhadap kondisi ekstrem. Selain itu, polimer harus kompatibel dengan berbagai *plasticizer* atau nanopartikel fungsional, yang digunakan untuk menyesuaikan karakteristik membran seperti selektivitas, permeabilitas, dan ketahanan terhadap *fouling* (Rodríguez and Miguel, 2022). Selain itu, polimer yang digunakan sebagai pembawa dalam fase membran harus memiliki struktur

yang memungkinkan terjadinya interaksi dengan senyawa yang akan ditranspor serta memiliki berat molekul yang tinggi (Saka *et al.*, 2020).

Senyawa pembawa didapatkan melalui proses polimerisasi dari agen tautsilang dengan eugenol. Dengan melakukan polimerisasi eugenol dan pemasukan gugus aktif yang diharapkan selektif terhadap proses transpor beberapa logam Fe(III), Cr(III), Cu(II), Ni(II), Co(II) dan Pb(II) (Harimu *et al.*, 2012). Polieugenol sebagai polimer sintesis masih belum efektif digunakan sebagai senyawa pembawa karena rendahnya kemampuan interaksi dengan senyawa target. Pada penelitian ini, kopolimerisasi eugenol menggunakan tautsilang etilen glikol dimetakrilat (EGDMA) digunakan untuk meningkatkan jumlah situs aktif dalam struktur polimer. Hasil sintesis memiliki kestabilan lebih baik, serta kemampuan transpor (perpindahan) senyawa target dari fasa sumber menuju fasa penerima dengan hasil transpor yang lebih tinggi. Reaksi polimerisasi senyawa vinil sebagian besar merupakan reaksi polimerisasi adisi. EGDMA adalah salah satu senyawa diena yang dapat mengalami polimerisasi adisi. EGDMA sebagai agen taut silang (*crosslinking agent*) dapat digunakan bersama dengan eugenol membentuk *Copoly* Eugenol-EGDMA (Co- EEGDMA). Oleh karena itu, Co-EEGDMA yang merupakan hasil sintesis dari eugenol dan EGDMA memiliki jumlah situs aktif yang lebih tinggi. Peningkatan jumlah situs aktif ini berdampak pada meningkatnya laju transpor semakin cepat (Kiswandono *et al.*, 2017).

Penelitian ini berfokus dalam mengurangi kadar MG di dalam perairan dengan dilakukan optimasi transpor dan evaluasi membran menggunakan metode PIM dengan senyawa pembawa Co-EEGDMA sebesar 5%. Hasil yang diharapkan yaitu semakin tinggi konsentrasi senyawa pembawa yang digunakan, maka hasil transpor yang dihasilkan akan memiliki stabilitas dan performa yang lebih baik. Uji optimasi PIM meliputi parameter variasi pH pada fasa sumber, variasi konsentrasi HNO₃ pada fasa penerima, variasi ketebalan membran, variasi konsentrasi senyawa pembawa, variasi waktu transpor, dan studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan. Sedangkan, uji evaluasi PIM meliputi variasi

konsentrasi *plasticizer*, variasi jenis garam serta konsentrasi garam pada fasa sumber dan fasa penerima, uji pemakaian berulang, dan uji *lifetime*.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Melakukan uji optimasi transpor MG dengan parameter variasi pH pada fasa sumber, variasi konsentrasi HNO₃ pada fasa penerima, variasi ketebalan membran, variasi konsentrasi senyawa pembawa, variasi waktu transpor untuk mengobservasi kondisi optimal hasil transpor MG.
2. Melakukan uji evaluasi membran PIM untuk transpor MG meliputi variasi jenis garam, variasi konsentrasi garam pada fasa sumber dan fasa penerima, variasi pemakaian berulang pada membran PIM , dan uji *lifetime* untuk mendapatkan kinerja optimal membran PIM dalam mentranspor MG.
3. Melakukan uji aplikasi transpor MG dengan limbah buatan Cu(II) dan Pb(II) untuk mengevaluasi kemampuan membran PIM dalam mentranspor MG pada kondisi yang mendekati limbah nyata.

1.3. Manfaat Penelitian

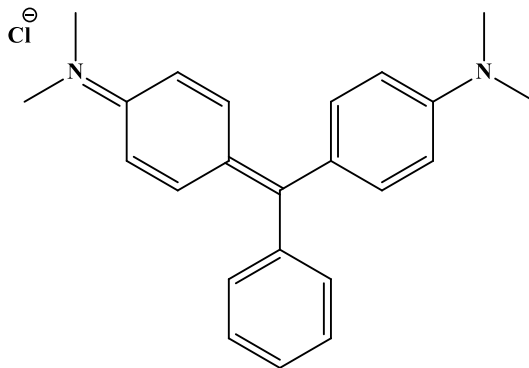
Adapun manfaat dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengoptimalkan pemanfaatan senyawa alam eugenol sebagai kontribusi dalam upaya pengurangan limbah MG menggunakan metode PIM dengan senyawa pembawa Co-EEGDMA 5%.
2. Memberi informasi baru tentang terhadap industri yang menghasilkan buangan limbah pewarna khususnya yang menggunakan zat warna MG.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Malachite Green

Malachite green (MG) dengan rumus kimia $C_{23}H_{26}N_2Cl$ merupakan senyawa yang bersifat toksik (Gambar 1). Senyawa ini juga dikenal dengan nama lain seperti 4-[(4-dimetilaminofenil)-fenil-metil]-N,N-dimetil-anilin, serta nama dagang seperti *Basic Green 4*, *Victoria Green B*, *Aniline Green*, dan *Diamond Green B* (Bhernama, 2017). MG adalah zat pewarna yang larut dalam air dan berbentuk serbuk kristal berwarna hijau, biasanya digunakan untuk mewarnai bahan seperti sutra, kertas, dan kulit (Raval *et al.*, 2022). MG termasuk salah satu agen antimikroba dengan sifat antijamur yang memiliki efek negatif dalam akuakultur. Pewarna MG perlu dihindari agar tidak dikonsumsi dan terakumulasi dalam tubuh demi menjaga keselamatan kesehatan makhluk hidup (Gharavinakhjavani *et al.*, 2020).



Gambar 1. Struktur MG (Ling and Suah, 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

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

(Ling *and* Suah, 2017).

MG mudah larut dan banyak digunakan, sehingga senyawa ini serta turunannya sering terlepas ke ekosistem perairan dari berbagai sumber. MG merupakan pewarna yang tidak dapat terurai secara hayati, bersifat persisten di lingkungan, dan berpotensi menimbulkan efek genotoksik, mutagenik, dan karsinogenik pada makhluk hidup (Sharma *et al.*, 2023). MG dapat menyebabkan keracunan pada organ vital seperti jantung, payudara, hati, dan ginjal. MG digunakan untuk mewarnai kulit, sutra, wol, dan serat akrilik, serta digunakan sebagai agen antijamur dan antibakteri (Yadav *et al.*, 2022). Batas aman kadar MG yang diperbolehkan di perairan limbah nyata adalah 0,01 ppm (Mohamad *et al.*, 2021).

Hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa tikus yang mengonsumsi MG dengan konsentrasi 100 ppm selama lebih dari dua tahun mengalami gejala pertumbuhan tumor (Sukmawati dan Utami, 2014). MG termasuk zat warna trifenilmetana mengalami biodegradasi karena adanya nitrogen di tulang belakangnya. Penelitian

yang dilakukan Ling *and* Suah (2017) mengenai degradasi MG menggunakan metode PIM menunjukkan bahwa rata-rata persen efisiensi transpor yang dicapai untuk MG adalah sebesar >96%. Selain itu, MG termasuk salah satu zat warna yang berbahaya dibuktikan dengan tinjauan dari mengenai efek toksik MG pada ikan air tawar yang akan mengubah mutasi kromosom, kanker, kerusakan jaringan organ, serta akumulasi residu di seluruh jaringan tubuh ikan (Bora *et al.*, 2024). Yang *et al.* (2021), meneliti efek MG pada mikrobioma kolam budidaya bandeng, menunjukkan bahwa pigmentasi industri berdampak negatif pada lingkungan hidup yang ada di perairan serta penelitian ini menunjukkan kesulitan untuk mengurai MG di perairan dengan bantuan mikroorganisme seperti *Pseudomonas spp.*, *Bacillus spp.*, *Streptomyces spp.* yang tercemar oleh MG.

2.2. Penanggulangan Limbah *Malachite Green*

Limbah MG dapat diatasi dengan berbagai metode seperti remediasi (Oladoye *et al.*, 2023 ; El-Hadj *et al.*, 2024), adsorpsi (Amri *et al.*, 2023 ; Jayanayak *et al.*, 2024 ; Sartape *et al.*, 2017 ; Melhi *et al.*, 2024), pertukaran ion (Teixeira *et al.*, 2022 ; Nandoost *et al.*, 2022, serta membran cair (Kiswandono *et al.*, 2024 ; Raval *et al.*, 2022 ; Ashraf *et al.*, 2019). Berbagai cara lain yang telah dikembangkan untuk mengolah limbah MG, seperti adsorpsi oleh *biochar* mikroalga (AB) (Pathy *et al.*, 2022), degradasi warna MG oleh aktivitas fotokatalitik dari FA-Ag₂O NAP (Mazumder *and* Ruma, 2022). Penguraian zat warna MG telah banyak dilakukan seperti koagulasi, flokulasi, dan karbon aktif (Soo *et al.*, 2021). Beberapa proses penanganan limbah zat warna ini memiliki kelemahan karena memerlukan bahan kimia yang mahal, proses pemisahan bahan kimia dengan air limbah zat warna menghasilkan limbah baru yang berasal dari sisa bahan yang telah digunakan, proses kimia tidak ramah lingkungan, dan proses biologi yang rumit (Hadri *et al.*, 2022).

Metode adsorpsi dalam proses penghilangan zat warna MG umumnya diawali dengan pembuatan adsorben yang tepat, lalu dilanjutkan dengan analisis karakteristik material tersebut menggunakan beragam metode fisik dan kimia

(Moradi *and* Panahandeh, 2022). Berbagai jenis adsorben ramah lingkungan telah dimanfaatkan untuk menghilangkan zat warna secara efektif. Beberapa contohnya adalah *biochar* dari cangkang kepiting (Wu *et al.*, 2022), daun tanaman *Zingiber officinale* (Buvaneswari *and* Singanan, 2022), *biochar* dari jarum pinus yang dikombinasikan dengan enzim *laccase* (Pandey *et al.*, 2022), serta *biochar* yang dimodifikasi dari sekam padi (Tsai *et al.*, 2022). Adsorben-adsorben tersebut menunjukkan efisiensi penghilangan yang tinggi, yaitu sebesar 99%, 88%, lebih dari 85%, dan 95%. Namun, beberapa sistem adsorpsi membutuhkan waktu kontak yang lama agar mencapai kesetimbangan (Ho, 2020).

Penelitian terkait pemisahan MG melalui metode pertukaran ion telah dilakukan oleh Teixeira *et al.* (2022) dan Nandoost *et al.* (2022). Teixeira *et al.* (2022), menerapkan teknik *ionic flocculation* yang melibatkan penggunaan polielektrolit kationik untuk membentuk flok dengan molekul MG dalam larutan. Di sisi lain, Nandoost *et al.* (2022) menggunakan resin *Amberlyst 15*, yaitu resin pertukaran ion kationik, untuk mengadsorpsi MG dari larutan. Penelitian ini menunjukkan bahwa resin tersebut mampu menghilangkan hingga 98,3% MG dalam waktu 4 jam. Pada penelitian Teixeira *et al.* (2022), metode *ionic flocculation* menghasilkan flokuasi yang perlu dipisahkan secara fisik dari air, sehingga menambah tahapan pemrosesan dan berpotensi menghasilkan lumpur yang harus ditangani lebih lanjut. Sementara itu, dalam penelitian Nandoost *et al.* (2022), penggunaan resin pertukaran ion seperti *Amberlyst 15* cenderung memiliki biaya operasional yang tinggi, terutama jika resin tidak dapat diregenerasi secara efisien.

Cara untuk menghilangkan zat warna secara efisien dari larutan air salah satunya adalah dengan memanfaatkan teknologi membran. Membran adalah suatu lapisan selektif yang memungkinkan hanya zat-zat tertentu yang dapat melaluinya, tergantung pada ukuran partikel (Marszałek *and* Żyła, 2021). Dalam penelitiannya, Raval *et al.* (2022) menerapkan teknologi membran cair emulsi, sementara Iqbal *et al.* (2022) memanfaatkan metode filtrasi membran dengan aliran silang (*cross-flow membrane filtration*). Kedua penelitian tersebut menunjukkan efisiensi tinggi dalam menghilangkan zat warna, yaitu masing-

masing sebesar 94,99% dan 97%. Kiswandonno *et al.* (2024) melakukan pemisahan MG dengan menggunakan metode PIM dengan %*removal* sebesar 89%. Khairati *et al.* (2025), melakukan pemisahan MG dengan metode PIM dengan senyawa pembawa Co-EDAF 2% menghasilkan %*removal* sebesar 91,30%. Metode PIM dianggap efektif untuk menangani limbah MG seperti yang dilakukan oleh Ling and Suah (2017), karena berhasil mentranspor MG dari limbah. PIM juga menawarkan berbagai keunggulan, seperti area interfisial yang lebih luas, selektivitas tinggi, kekuatan membran yang baik dalam proses transpor, efisien dalam pemisahan senyawa, serta proses pemisahan yang sederhana (Rodríguez and Miguel, 2022).

2.3. Teknologi Membran Cair

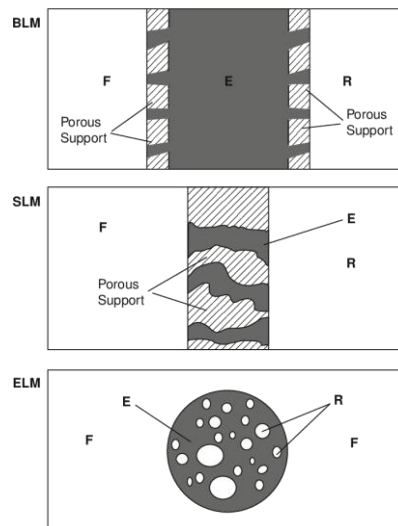
Teknologi membran merupakan metode pemisahan campuran, seperti air limbah, air laut, dan gas buangan yang mengandung zat pencemar. Dibandingkan dengan metode pemisahan lainnya, teknologi ini memiliki banyak keunggulan, antara lain efisiensi pemisahan yang tinggi, desain peralatan yang relatif sederhana, hemat energi, serta dapat beroperasi pada suhu ruangan tanpa menghasilkan polusi tambahan. Selain itu, teknologi membran mampu mengurangi kebutuhan bahan kimia untuk perawatan, menekan jumlah limbah yang dihasilkan, dan menurunkan konsumsi energi secara keseluruhan (Prihatiningtyas dan Tamrin, 2023).

Prinsip dalam teknologi membran cair adalah filtrasi. Polutan dari limbah akan dilewatkan pada fasa membran kemudian polutan yang mempunyai ukuran lebih besar daripada ukuran pori membran yang akan tertahan pada membran sehingga senyawa target yang melewati membran akan berkurang konsentrasinya. Istilah yang biasanya pada teknologi membran cair adalah *feed water*, *permeate*, dan *retentate*. *Feed water* adalah influent air limbah yang dimasukkan ke dalam sistem membran untuk kemudian diolah. *Permeate* adalah air limbah yang masuk dan melewati membran sedangkan *retentate* adalah air limbah yang tidak melewati membran atau sering dikenal dengan *concentrate*, *reject* dan *waste*

stream) (Yoon, 2015). Prinsip utama dalam sistem membran cair adalah adanya perbedaan konsentrasi atau gradien potensial kimia yang mendorong perpindahan zat terlarut dari satu sisi membran ke sisi lainnya. Proses ini terjadi pemisahan yang lebih spesifik dibandingkan dengan teknik konvensional seperti distilasi atau adsorpsi, karena dapat memanfaatkan interaksi molekuler tertentu untuk meningkatkan efisiensi pemisahan transpor (Kiswandono *et al.*, 2024).

Penggunaan membran sebagai suatu teknologi pemisahan mempunyai keunggulan dibandingkan dengan teknologi pemisahan lainnya yaitu energi yang digunakan cukup rendah sehingga ekonomis, karena pemisahan menggunakan membran tidak melibatkan perubahan fasa. Teknologi 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 (Al-Obaidi *et al.*, 2021). Pemisahan membran ini berdasarkan pada perbedaan konsentrasi antara fasa sumber dan fasa penerima. Metode teknologi membran cair ini memiliki selektivitas serta stabilitas yang lebih baik dalam aplikasinya (Khoiruddin *et al.*, 2010). Metode membran cair diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yaitu membran cair ruah (*Bulk Liquid Membrane*, BLM), membran cair emulsi (*Emulsion Liquid Membrane*, ELM), membran cair berpendukung (*Supported Liquid Membrane*, SLM), dan lain-lain yang merupakan bagian dari teknologi membran cair yang masih umum digunakan untuk proses pemisahan. Perbedaan dari membran BLM, SLM, dan ELM dapat dilihat pada Gambar 2.

Membran berperan sebagai penghalang selektif yang memisahkan dua fase fluida dan memungkinkan zat terlarut tertentu melintas dari satu sisi ke sisi lainnya. Umumnya berbentuk padatan, membran juga bisa berupa cairan. Faktanya, membran cair kerap dijumpai dalam kehidupan sehari-hari. Contohnya adalah lapisan minyak yang mengapung di atas permukaan air, yang merupakan membran cair organik pada dua cairan yang tidak saling larut (Bora *et al.*, 2024).



Gambar 2. Tiga jenis membran cair (BLM, SLM, dan ELM) (F: fasa sumber, E: fasa membran, R: fasa penerima) (Khoiruddin *et al.*, 2010)

Membran berasal dari bahasa latin *membrana* yang berarti kulit kertas. Istilah membran saat ini meluas untuk menggambarkan suatu lembaran tipis yang bertindak sebagai pemisah selektif antara dua fase yang bekerja berdasar *driving force*. Proses membran adalah proses pemisahan pada tingkat molekuler atau partikel yang sangat kecil. Proses pemisahan dengan membran dimungkinkan karena membran mempunyai kemampuan memindahkan salah satu komponen lebih cepat daripada komponen lain berdasarkan perbedaan sifat fisik dan kimia dari membran serta komponen yang dipisahkan. Dalam pengertian yang paling umum, membran adalah penghalang yang memisahkan dua fase dan membatasi pengangkutan berbagai spesies kimia dengan cara yang agak spesifik (Lusiana dan Prasetya, 2020).

Teknologi membran cair ini sudah diaplikasikan pada penelitian (Kiswandono *et al.*, 2024) ; Ling and Suah *et al.*, 2017 ; dan Khairati *et al.*, 2025) untuk penanganan limbah MG dengan metode PIM. Pemisahan polutan menggunakan metode membran cair dapat dilakukan dengan *Bulk Liquid Membrane* (BLM) (Rosly *et al.*, 2018), *Supported Liquid Membrane* (SLM) (Kazemi *et al.*, 2014 ; Sun *et al.*, 2017), *Emulsion Liquid Membrane* (ELM) (Ahmad *et al.*, 2019) dan metode

membran PIM (Benosmane *et al.*, 2018 ; Kiswandono *et al.*, 2012 ; Saka *et al.*, 2020).

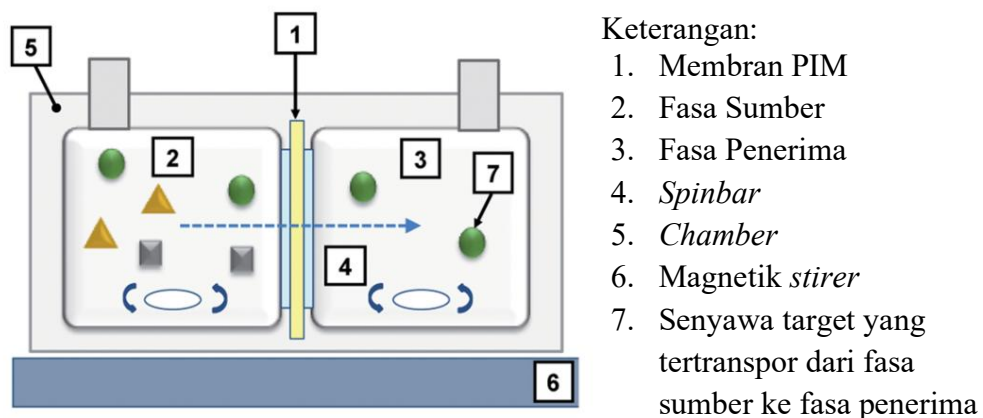
2.4. Polymer Inclusion Membrane

Membran PIM memanfaatkan polimer sebagai komponen pendukung, sehingga menghasilkan stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan membran cair biasa. Salah satu keunggulan utama dari PIM adalah daya tahannya yang lebih lama saat digunakan dalam sistem operasi yang kompleks (Turgut *et al.*, 2017). PIM melibatkan transpor selektif dan menargetkan zat terlarut (senyawa target) dari satu larutan melalui membran yang memisahkan antara fasa sumber dan fasa penerima. Membran PIM terdiri dari polimer pendukung, molekul pembawa, dan *plasticizer*. Pemakaian PVC pada membran akan menstabilkan membran dengan cara menahan molekul pembawa agar tetap berada pada membran. Modifikasi menggunakan PVC untuk pembentukan gel merupakan keuntungan dari metode PIM (Khalid *et al.*, 2022). Senyawa pembawa terletak pada fasa membran dan berfungsi sebagai fasilitator dalam teknik membran cair; peran ini sangat penting dan menentukan kinerja pemisahan (Soo *et al.*, 2021).

PIM merupakan jenis membran cair yang dikembangkan untuk mengatasi berbagai kelemahan seperti kestabilan mekanik yang rendah dan potensi bocornya senyawa pembawa (*carrier*). PIM dibuat dengan cara memasukkan fase cair ke dalam matriks padat, sehingga struktur membran menjadi lebih stabil dan umur pakainya lebih panjang. Hal ini membuat PIM lebih layak dan efisien untuk digunakan dalam aplikasi industri (Zhao *et al.*, 2024). PIM memiliki berbagai keunggulan dibandingkan metode ekstraksi cair-cair konvensional, seperti selektivitas yang sangat baik, kemudahan penggunaan metode yang mudah, stabilitas yang tinggi, serta membran dapat digunakan kembali (Senila, 2025). Skema PIM dapat dilihat pada Gambar 3.

Tiga langkah utama karakteristik transpor senyawa target dari fasa sumber ke fasa penerima dalam PIM, yaitu:

- Tahap pertama, yaitu senyawa target yang telah menyebar pada fasa antarmuka fasa sumber-membran, akan berikatan dengan senyawa pembawa membentuk kompleks. Setelah kompleks terbentuk, lalu ditranspor melintasi fasa antarmuka membran dan akan digantikan oleh molekul lain dari senyawa pembawa.
- Tahap kedua, yaitu kompleks berdifusi melalui membran menuju ke fasa penerima.
- Tahap akhir, yaitu pada fasa antarmuka membran dan fasa penerima akan terjadi kompleks terdisosiasi dan senyawa target dilepaskan ke fasa penerima, kemudian di fasa penerima senyawa target ditarik oleh anion untuk membentuk garam (Soo *et al.*, 2021).



Gambar 3. Skema transpor dengan membran PIM (Sharaf *et al.*, 2018)

PIM memiliki ciri khas berupa kemampuannya dalam mentranspor ion logam secara selektif melalui matriks polimer yang dapat disesuaikan dengan menambahkan berbagai jenis senyawa pembawa dan *plasticizer*. Komposisi membran PIM terdiri atas polimer dasar yang memberikan kekuatan mekanik dan bentuk pada membran, serta ekstrak atau senyawa pembawa, dan bila diperlukan, dapat ditambahkan *plasticizer*. Untuk menghasilkan PIM yang homogen dan fleksibel, kompatibilitas antara polimer dasar dan senyawa pembawa sangat penting, dan keduanya harus dapat larut dalam pelarut yang sama. Jenis dan jumlah pelarut juga berperan dalam memengaruhi kinerja serta

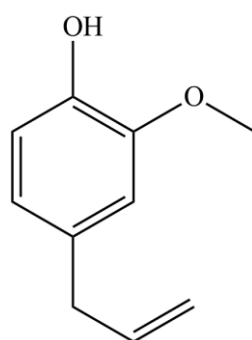
kualitas PIM, karena berpengaruh terhadap sebaran senyawa pembawa dan polimer di dalam membran (Senila, 2025).

Aplikasi PIM yang paling banyak diteliti adalah pemisahan logam mulia, seperti logam kelompok platina dan logam mulia lainnya. PIM yang dibuat dari polimer dasar *poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropene)* (PVDF-HFP) dan menggunakan *Cyphos IL 104*® (*trihexyl(tetradecyl) phosphonium bis(2,4,4-trimethylpentyl) phosphinate*) sebagai senyawa berhasil digunakan untuk mentranspor Au(III) secara selektif dari limbah elektronik (Bonggotgetsakul *et al.*, 2016). PIM yang dimodifikasi dengan *graphene oxide* telah digunakan untuk mentranspor emas (Au) dari larutan asam (Husna *et al.*, 2022). Selain itu, PIM terdiri dari PVC sebagai polimer dasar, 2NPOE sebagai *plasticizer*, dan D₂EHAG sebagai senyawa pembawa telah diuji untuk proses pemulihan Au(III) dari larutan hasil pelindian limbah ponsel. Hasil optimasi menunjukkan bahwa PIM tersebut mampu mentranspor Au(III) dengan efisiensi hingga 96% (Kubota *et al.*, 2019). Selain itu, aplikasi PIM juga dapat memisahkan limbah zat warna salah satunya MG. Penelitian Kiswando *et al.* (2024) memisahkan MG dengan polieugenol sebagai senyawa pembawa didapatkan *%removal* sebesar 89%, Ling and Suah *et al.* (2017) memisahkan limbah MG dengan menggunakan senyawa pembawa B₂EHP dengan *%removal* sebesar >96%, dan Khairati *et al.* (2025) menggunakan senyawa pembawa Co-EDAF dengan *%removal* sebesar 91,30%.

2.5. Copoly-Eugenol Etilen Glikol Dimetakrilat

Eugenol merupakan senyawa pembawa alami yang dapat digunakan untuk senyawa pembawa. Eugenol dapat digunakan sebagai bahan awal sintesis polimer karena memiliki tiga gugus fungsi yaitu gugus alil, eter dan hidroksi (Djunaidi, 2019). Eugenol merupakan salah satu senyawa kimia utama dalam minyak cengkeh yang memberikan aroma dan bau khas pada minyak cengkeh. Senyawa ini memiliki rumus molekul C₁₀H₁₂O₂ berwarna bening hingga kuning pucat, serta memiliki tekstur kental menyerupai minyak. Eugenol mudah larut dalam pelarut organik seperti alkohol, kloroform, dan eter. Kehadiran gugus hidroksi

menjadikan eugenol tergolong sebagai senyawa fenolik yang bersifat asam, sehingga dapat dipisahkan dengan mudah dari senyawa non-fenolik melalui metode ekstraksi cair–cair menggunakan pelarut aktif (Kiswando *et al.*, 2023). Struktur kimia dari eugenol dapat digambarkan sebagai senyawa fenolik yang memiliki gugus metoksi ($-\text{OCH}_3$) yang terikat pada posisi orto dari gugus hidroksil ($-\text{OH}$) pada cincin benzena. Selain itu, terdapat gugus alil ($-\text{CH}=\text{CH}_2$) yang memberi eugenol karakter reaktif dan memungkinkan terbentuknya ikatan silang dalam polimer. Struktur eugenol ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Struktur eugenol

Eugenol memiliki stabilitas kimia yang rendah dan sensitif terhadap oksidasi dan berbagai interaksi kimia (Ulanowska *and* Olas, 2021). Adapun sifat fisik dan kimia eugenol dapat dilihat pada Tabel 2.

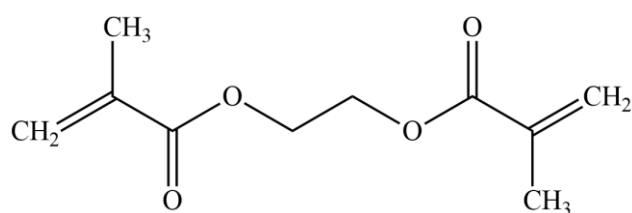
Tabel 2. Sifat fisik dan kimia eugenol

Parameter	Nilai
Kelas	Fenilpropanoid
Nama IUPAC	4-alil-2-metoksifenol
Rumus kimia	$\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{O}_2$
Berat molekul (g/mol)	164,2
Kelarutan dalam air	Larut Sebagian
Kelarutan dalam pelarut organik	Sangat larut
Warna	Tak berwarna hingga kuning pucat

(Khalil *et al.*, 2017).

Polimerisasi dengan bahan baku senyawa alam seperti eugenol merupakan suatu hal yang relatif baru dilakukan, maka pengembangan dan pemanfaatan monomer eugenol semakin diperluas. Dilihat dari sifat fisika dan kimia eugenol (Tabel 2), dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam sintesis polieugenol yang dapat digunakan sebagai senyawa pembawa dalam transpor membran cair. Syarat polimer yang dapat digunakan sebagai senyawa pembawa pada fasa membran yaitu mempunyai berat molekul yang tinggi serta memiliki struktur yang memungkinkan terjadinya interaksi dengan senyawa yang akan ditranspor (Kowalewska, 2022).

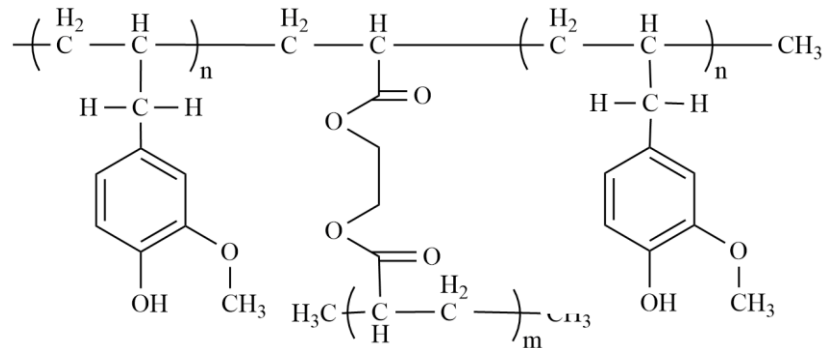
Eugenol dapat dipolimerisasi dengan agen taut silang seperti etilen glikol dimetakrilat (EGDMA). EGDMA adalah senyawa dengan rumus molekul $C_{10}H_{14}O_4$ (Asni dan Sianita, 2020). EGDMA merupakan senyawa dengan gugus alil, yaitu gugus yang berperan dalam reaksi kopolimerisasi. Kopolimer EGDMA merupakan hasil polimerisasi antara eugenol dengan agen tautsilang EGDMA. Kopolimerisasi ini merupakan reaksi kopolimerisasi adisi kationik karena EGDMA ditambahkan pada gugus vinil. Reaksi kopolimerisasi ini berlangsung melalui tahap inisiasi, propagasi, dan terminasi (Cholid, 2016). Struktur EGDMA dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Struktur EGDMA (Cholid, 2016).

Crosslinker berfungsi sebagai *backbone* yang berperan untuk mengontrol morfologi matriks polimer, menstabilkan rongga ikatan serta menjaga kestabilan (Chen *et al.*, 2016). Reaksi polimerisasi eugenol dengan suatu agen taut silang (*crosslinking agent*) akan menyebabkan berat molekul hasil polimer menjadi besar. Penggunaan EGDMA sebagai *crosslinker* didasarkan pada sifatnya sebagai

penentu selektivitas dari polimer yang disintesis (Asni dan Sianita, 2020). *Copolymer*-Eugenol EGDMA merupakan hasil polimerisasi antara eugenol dan *crosslinker* EGDMA (Kiswandono *et al.*, 2013). Prediksi struktur Co-EEGDMA dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Prediksi struktur Co-EEGDMA (Kiswandono, 2014).

Polimerisasi eugenol dengan agen taut silang merupakan salah satu cara untuk meningkatkan jumlah sisi aktif polimer. EGDMA adalah senyawa diena yang dapat mengalami polimerisasi adisi. Ikatan rangkap dua pada senyawa diena ini mempunyai sifat yang reaktif sehingga proses sintesis dapat dilakukan pada suhu kamar. Polimerisasi dengan melibatkan senyawa diena dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh struktur tertaut silang dalam hasil akhirnya (Tabel 3) (Kiswandono *et al.*, 2016).

Tabel 3. Rendemen dan sifat fisika-kimia serbuk Co-EEGDMA

Co-EEGDMA		Rendemen (%)	Warna	Titik Leleh	Kelarutan dalam Kloroform
%	Mol				
0	0,0000	88,93	Orange	80,3-82,7	Larut
2	0,0006	94,97	Cokelat	88,9-93,2	Larut
6	0,0018	95,03	Cokelat	87,5-89,3	Larut
12	0,0035	96,86	Cokelat	84,4-87,3	Larut

(Kiswandono *et al.*, 2016).

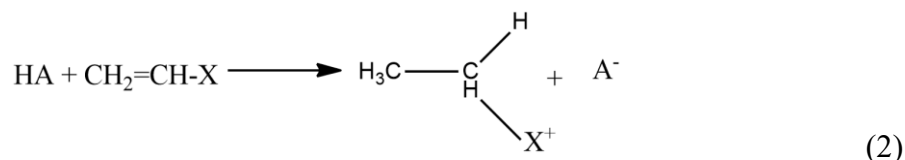
Langkah-langkah utama dalam sintesis eugenol dengan agen tautsilang:

1. Tahap Inisiasi

Eugenol mengalami proses oksidasi untuk membentuk radikal bebas.



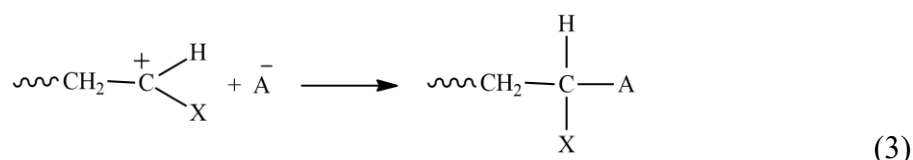
Tahap inisiasi dalam polimerisasi yang dikatalisis oleh asam mineral dapat dinyatakan sebagai berikut:



HA adalah molekul asam seperti asam klorida atau asam sulfat. Pada reaksi inisiasi, proton dialihkan dari asam ke monomer sehingga menghasilkan ion karbonium.

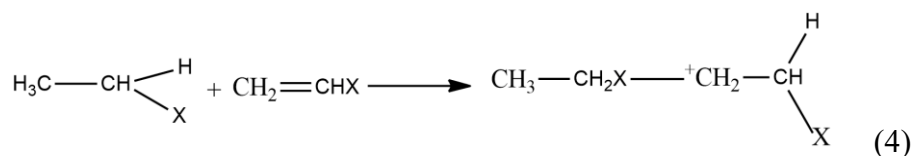
2. Tahap Propagasi

Tahap propagasi berupa adisi monomer pada ion karbonium yang dihasilkan dengan molekul alkena yang lain. Radikal bebas menyerang gugus fenolik pada molekul eugenol lainnya, membentuk ikatan C–C atau C–O, yang menghubungkan unit-unit monomer.



3. Tahap Terminasi

Tahap terminasi dapat terjadi berbagai proses dan sederhananya merupakan penggabungan ion karbonium dengan anion pasangannya atau ion lawan.



Proses ini berkelanjutan sampai diperoleh rantai monomer yang panjang, pada tahap ini terjadi penataan ulang intermolekuler dari karbokation. Tahap terminasi dilakukan penambahan metanol untuk menghentikan pertumbuhan rantai. Faktor penentu reaktivitas monomer dalam pembentukan polimer adalah stabilitas ion karbonium yang terbentuk oleh adisi ion inisiator dan stabilitas hasil resonansi.

Monomer yang membentuk ion karbonium stabil dengan mudah mengalami polimerisasi kationik (Kiswandono *et al.*, 2020).

2.6. Analisis dan Karakterisasi

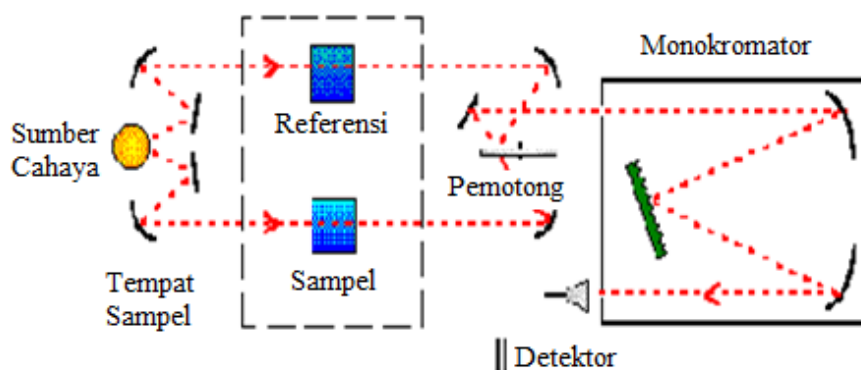
Penelitian ini dilakukan beberapa karakterisasi untuk menunjang hasil dari analisis yang dilakukan. Karakterisasi membran untuk mengetahui gugus fungsi menggunakan *Fourier Transform Infra Red* (FTIR), karakterisasi membran untuk mengetahui morfologi permukaan membran menggunakan *Scanning Elektron Microscope* (SEM), mengukur konsentrasi fasa sumber dan fasa penerima hasil transpor menggunakan Spektrofotometer *Ultra Violet-Visible* (UV-Vis), serta mengukur kadar logam menggunakan *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES).

2.6.1. *Fourier Transform Infra Red* (FTIR)

FTIR merupakan metode yang digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dalam suatu zat kimia. Gugus fungsi ini berperan penting dalam menentukan bagaimana sifat kimia dari senyawa. Contoh dari gugus fungsi tersebut adalah hidroksil ($-OH$) dan karbonil ($C=O$). Contoh keberadaan gugus fungsi hidroksil sering menunjukkan senyawa alkohol atau asam karboksilat. FTIR dapat membedakan keduanya secara akurat. Karakterisasi FTIR dapat diaplikasikan untuk analisis berbagai jenis sampel, baik gas, cairan, maupun padatan, dan juga dapat digunakan untuk analisis secara kuantitatif (Xiao *et al.*, 2019).

Metode FTIR mengamati interaksi molekul dengan radiasi elektromagnetik yang berada pada daerah panjang gelombang $0,75 - 1,000 \mu m$ atau pada bilangan gelombang $13,000 - 10 \text{ cm}^{-1}$. FTIR pada dasarnya adalah sama dengan spektrofotometer IR, perbedaannya terdapat pada sistem optik FTIR digunakan radiasi *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER) yang berfungsi sebagai radiasi yang diinterferensikan dengan radiasi infra merah agar sinyal radiasi infra merah yang diterima oleh detektor secara utuh dan lebih baik.

FTIR bekerja dengan cara infrared melewati celah di dalam sampel, yang mengontrol jumlah energi yang diberikan kepadanya. Beberapa infrared diserap oleh sampel dan yang lainnya ditransmisikan melalui permukaan sampel. Akibatnya, sinar infrared lolos ke detektor dan kemudian dikirim ke komputer (Borpatra *et al.*, 2022). Data yang diperoleh kemudian diubah menjadi spektrum menggunakan model matematis yang disebut fungsi Transformasi *Fourier*. Gambar 7 menunjukkan komponen-komponen dari spektrometer FTIR.



Gambar 7. Skema alat FTIR (Hilal *et al.*, 2017)

Karakterisasi FTIR dilakukan pada eugenol dengan *crosslink agent* yang akan menghasilkan senyawa pembawa baru yang mengalami polimerisasi. Tujuan dilakukannya karakterisasi senyawa pembawa untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat dalam senyawa, sehingga dapat menunjukkan keberhasilan sintesis senyawa pembawa tersebut. Pada membran PIM karakterisasi FTIR dilakukan sebelum dan sesudah transpor, kemudian hasil dari karakterisasi tersebut akan menunjukkan spektrum serapa yang spesifik mengidentifikasi gugus fungsi yang terserap pada membran sebelum dan sesudah transpor. Membran dapat digunakan untuk memisahkan dan mengekstrak senyawa organik dan untuk *removal ion logam* (Kiswando *et al.*, 2024).

Data dalam spektroskopi FTIR ditampilkan dalam bentuk grafik transmitansi terhadap panjang gelombang. Transmitansi nol menunjukkan bahwa seluruh radiasi diserap oleh sampel, sedangkan transmitansi 100% berarti sampel

menyerap radiasi dalam jumlah yang sama seperti referensi. Grafik yang dihasilkan bersifat unik untuk setiap molekul dan dapat digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi. Contohnya, gugus hidroksil ($-OH$) terdapat pada alkohol dan asam karboksilat, namun FTIR mampu membedakan keduanya berdasarkan panjang gelombangnya. Puncak untuk alkohol biasanya terdeteksi pada rentang panjang gelombang 3200 hingga 3600 cm^{-1} , sedangkan puncak untuk asam karboksilat berada di kisaran 2500 hingga 3300 cm^{-1} (Hansen *et al.*, 2011). Bilangan gelombang beberapa gugus fungsi lainnya pada FTIR dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Identifikasi gugus fungsi

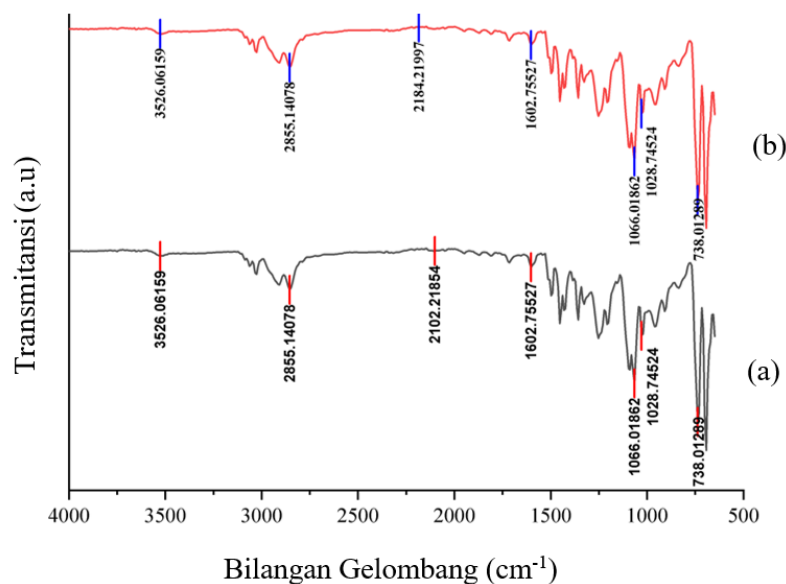
Bilangan Gelombang (cm^{-1})	Gugus Fungsi	Gugus Yang Teridentifikasi
3200-3500	$-OH$	Alkohol
2500-3300	$-COOH$	Asam karboksilat
2800-3000	$-NH$	Garam amina
3267-3333	$C\equiv C$	Alkuna
3000-3100	$C=C$	Alkena
2349	$C-C$	Alkana
1380-1415	$S=O$	Sulfat

(Hansen *et al.*, 2011).

Spektroskopi FTIR dapat sangat berguna untuk menentukan gugus fungsi yang terkandung dari membran. Persiapan membran melibatkan penggunaan pelarut. Pelarut tidak boleh bereaksi dengan polimer untuk menghindari perubahan sifat fisik dan polimer dalam pembuatan membran (Adewole *et al.*, 2015). Menurut Kiswando *et al.* (2022), hasil FTIR eugenol memiliki gugus yang khas yaitu senyawa aromatis tersubstitusi 1, 2, 4 yang ditunjukkan oleh pita serapan pada bilangan gelombang 817,82 cm^{-1} . Serapan pada bilangan gelombang 995,27 cm^{-1} menunjukkan ikatan $C-H$ gugus tak jenuh vinil ($CH=CH_2$), pita serapan 1033,85 cm^{-1} menunjukkan adanya regangan gugus eter ($-C-O-C-$) dan serapan pada 3448,72 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus $-OH$. Selain itu, terdapat serapan pada

1636,5 cm^{-1} yang menunjukkan regangan gugus alil untuk C=C dan regangan $\text{Csp}^3\text{-H}$ pada bilangan gelombang 2908,65 cm^{-1} .

Gambar 8 menunjukkan bahwa hasil perbandingan dari membran sebelum dan setelah transpor, bahwa bilangan gelombang 3518,6 cm^{-1} yaitu serapan gugus -OH pada membran sebelum transpor mengalami pergeseran bilangan gelombang kearah kanan yang mengindikasikan bahwa adanya interaksi antara gugus pada MG dengan gugus -OH pada senyawa pembawa dalam membran selama waktu transpor. Selain itu, terdapat pergeseran gugus regangan $\text{C}\equiv\text{C}$ di mana sebelum transpor menghasilkan bilangan gelombang 2102,2 cm^{-1} dan terdapat pergeseran regangan C-O di mana sebelum transpor menghasilkan bilangan gelombang 1028,7 cm^{-1} . Pergeseran bilangan gelombang pada gugus -OH dapat terjadi karena sisi aktif pada polieugenol di dalam membran sebagian ikut hilang selama terjadi proses transpor (Kiswandono *et al.*, 2024).



Gambar 8. Spektra IR dari PIM yang mengandung polieugenol (a) sebelum transpor (b) setelah transpor (Kiswandono *et al.*, 2024)

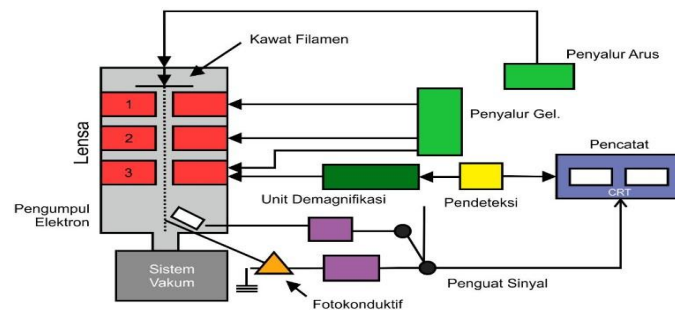
2.6.2. *Scanning Electron Microscope (SEM)*

SEM merupakan mikroskop elektron yang dapat digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dalam skala mikro dan nano dalam suatu sampel. Prinsip dari analisis SEM menggunakan elektron sebagai sumber pencitraan dan medan elektromagnetik sebagai lensanya. Elektron berinteraksi dengan atom-atom dalam sampel sehingga mengakibatkan sampel memberikan sinyal informasi mengenai permukaan topografi sampel, komposisi, dan sifat-sifat lainnya dengan tambahan adanya alat pendukung (Sajidah, 2017).

SEM termasuk salah satu jenis mikroskop elektron yang berfungsi untuk analisis morfologi atau menggambarkan permukaan suatu objek atau material dengan perbesaran 10-3.000.000 kali, kedalaman medan (*depth of field*) 4-0,4 mm, dan resolusi sebesar 110 nm. SEM memiliki prinsip memfokuskan sinar elektron (*electron beam*) dipermukaan obyek dan mengambil gambarnya dengan cara mendeteksi elektron yang muncul dari permukaan obyek. SEM dilengkapi dengan mikroskop optik yang digunakan untuk mempelajari tekstur, topografi, dan sifat permukaan bubuk atau padatan dan karena ketajaman fokus dari alat SEM sehingga gambar yang dihasilkan memiliki kualitas tiga dimensi (Goldstein *et al.*, 2018).

Analisis SEM menggunakan alat sinyal elektron sekunder. Berkas elektron diarahkan ke permukaan spesimen yang ditutupi oleh film konduktor. Tujuan pelapisan ini adalah agar polimer yang digunakan dapat menghasilkan arus listrik dan berinteraksi dengan berkas elektron. Berkas elektron yang berinteraksi dengan spesimen dikumpulkan, yang menghasilkan sinyal untuk mengatur intensitas elektron pada tabung televisi saat sinar mikroskop mengarah ke dalamnya. Pola difraksi elektron yang dihasilkan oleh interaksi berkas elektron dengan spesimen ini memberikan informasi tentang monografi. Semua berkas elektron yang dipantulkan terdapat satu berkas elektron yang dipantulkan dengan intensitas tertinggi. Detektor yang terdapat di dalam SEM akan mendeteksi berkas elektron berintensitas tertinggi yang dipantulkan oleh benda atau material yang dianalisis. Elektron memiliki resolusi yang lebih tinggi daripada cahaya. Cahaya hanya

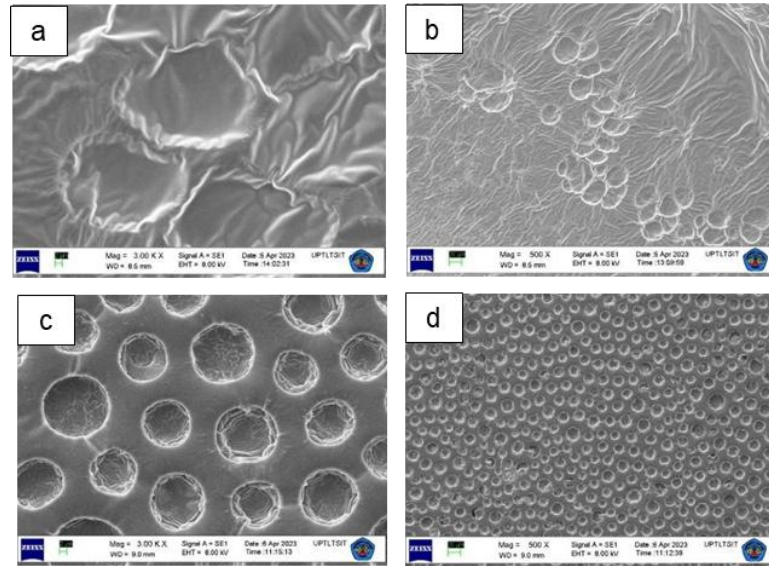
mampu mencapai 200 nm sedangkan elektron bisa mencapai resolusi sampai 0,1 – 0,2 nm (Goldstein *et al.*, 2018). Skema SEM dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Skema SEM (Ayyad, 2011)

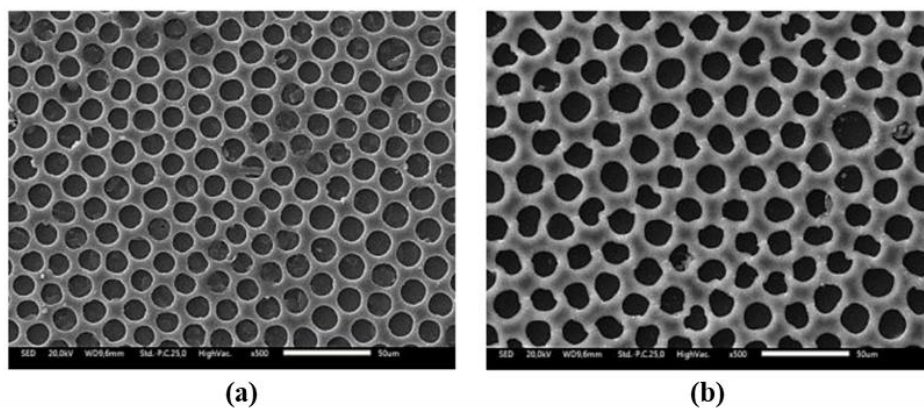
Data SEM memberikan informasi yang berguna terkait dengan sifat material, terutama morfologi permukaan material yang diselidiki. Beberapa peneliti juga telah menggunakan SEM untuk tujuan tersebut (Malboubi *et al.*, 2011 ; Mohammadkhani *et al.*, 2011). Kemampuan transpor MG juga dapat diamati menggunakan SEM, jika transpor MG sudah terjadi maka akan ada komponen membran cair yang hilang karena terjadinya *leaching*. Terjadinya kehilangan komponen membran pada transpor MG juga dapat diamati dengan memeriksa hasil analisis SEM pada Gambar 10.

Gambar 10 menunjukkan bahwa pada membran PIM sebelum transpor memiliki pori-pori halus dengan ukuran pori yang bervariasi dan hampir seragam. Morfologi pada membran PIM setelah transpor memiliki bentuk pori atau rongga yang banyak, rongga yang terbentuk menunjukkan bahwa pada membran tersebut sudah mengalami proses *leaching* atau pelepasan komponen. Hal ini juga didukung oleh hasil karakterisasi SEM pada membran yang ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 10. Hasil SEM membran PIM sebelum transpor (a) 3000x, (b) 500x dan setelah transpor (c) 3000x, (d) 500x (Khairati *et al.*, 2025).

Membran sebelum proses transpor (Gambar 11a) dengan pembesaran 500x, permukaan membran masih tertutup oleh *plasticizer*, sehingga ukuran pori-pori membran tampak sama. Setelah proses transpor MG (Gambar 11b) pada pembesaran yang sama, permukaan membran terlihat tidak rata yang menunjukkan bahwa selama proses transpor terjadi kehilangan komponen membran (*leaching*).

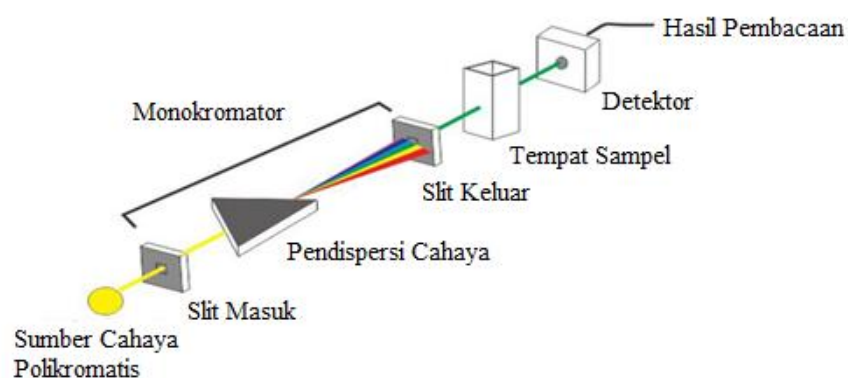


Gambar 11. Hasil SEM membran PIM polieugenol (a) sebelum transpor dan (b) setelah transpor (Kiswandono *et al.*, 2024).

Penggunaan membran dalam proses transpor memungkinkan terjadinya larutnya (*leaching*) komponen-komponen penyusun membran. *Leaching* menyebabkan permukaan membran PIM setelah transpor menjadi berpori besar dengan ukuran pori yang berbeda-beda. Komponen yang *leaching* dapat berasal dari hilangnya pembawa, polimer pendukung, atau *plasticizer*.

2.6.3. Spektrofotometer *Ultra Violet-Visible* (UV-Vis)

Spektrofotometri UV-Vis merupakan gabungan antara spektrofotometri UV dan *Visible*. Instrumen ini menggunakan dua sumber cahaya yang berbeda, sumber cahaya UV dan sumber cahaya tampak. Kemudahan metode ini adalah dapat digunakan untuk sampel berwarna dan tidak berwarna. Spektrofotometri ultraviolet-tampak atau UV-Vis melibatkan spektroskopi foton dalam wilayah UV visibel. Hal ini berarti menggunakan cahaya dalam jarak tampak dan dekat. Penyerapan dalam rentang tampak secara langsung mempengaruhi warna bahan kimia yang terlibat. Di wilayah spektrum elektromagnetik ini, molekul mengalami transisi elektronik (Zurweni *and* Sanova, 2023). Skema spektrofotometer UV-Vis dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Skema alat spektrofotometer UV-Vis (Khopkar, 2003)

Spektroskopi UV-Vis biasanya digunakan untuk molekul dan ion anorganik atau kompleks di dalam larutan. Spektrum UV-Vis mempunyai bentuk yang lebar dan hanya sedikit informasi tentang struktur yang bisa didapatkan dari spektrum ini

sangat berguna untuk pengukuran secara kuantitatif. Sinar ultraviolet berada pada panjang gelombang 200-400 nm, sedangkan sinar tampak berada pada panjang gelombang 460-760 nm. Kebanyakan penerapan spektrofotometri UV-Vis pada senyawa organik didasarkan $n-\pi^*$ ataupun $\pi-\pi^*$ karena spektrofotometri UV-Vis memerlukan hadirnya gugus kromofor dalam molekul itu. Transisi ini terjadi dalam daerah spektrum berkisar antara panjang gelombang 200-700 nm. Nilai yang keluar dari cahaya yang diteruskan dinyatakan dalam nilai absorbansi karena memiliki hubungan dengan konsentrasi sampel. Hukum *Lambeert-Beer* menyatakan nilai absorbansi cahaya berbanding lurus dengan konsentrasi dan ketebalan bahan atau medium (Suhartati, 2017).

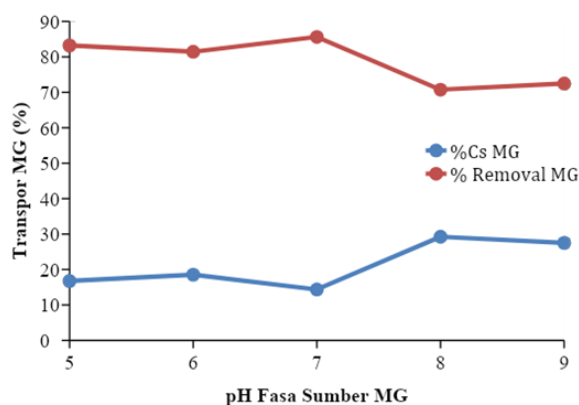
Menurut Suhartati (2017), instrumen spektrofotometri UV-Vis adalah :

- a. Sumber sinar polikromatis, berfungsi sebagai sumber sinar polikromatis dengan berbagai macam rentang panjang gelombang. Sumber yang biasa digunakan pada daerah UV adalah lampu deuterium atau disebut juga *heavy hydrogen*, sedangkan pada daerah Vis menggunakan lampu tungsten yang sering disebut lampu wolfram, spektrofotometer UV-Vis menggunakan *photodiode* yang telah dilengkapi monokromator.
- b. Monokromator, merupakan alat yang memecah cahaya polikromatis menjadi cahaya tunggal (monokromatis) dengan komponen panjang gelombang tertentu. Monokromator berfungsi untuk mendapatkan radiasi monokromator dari sumber radiasi yang memancarkan radiasi polikromatis. Monokromator terdiri dari susunan : celah (slit) masuk – filter – kisi (*grating*) – celah (slit) keluar.
- c. Wadah sampel (kuvet), merupakan wadah sampel. Kuvet yang terbuat dari leburan silika (kuarsa) dipakai untuk analisis kualitatif dan kuantitatif pada daerah pengukuran 190-1100 nm, dan kuvet dari bahan gelas dipakai pada daerah pengukuran 380-1100 nm karena bahan dari gelas mengabsorpsi radiasi UV.
- d. Detektor, menangkap cahaya yang diteruskan dari sampel. Cahaya kemudian diubah menjadi sinyal listrik oleh *amplifier* dan dalam *recorder* akan ditampilkan dalam bentuk angka-angka pada *reader* (komputer).

- e. *Visual display/read out*, merupakan suatu sistem baca yang menangkap besarnya isyarat listrik yang berasal dari detektor dan menyatakan dalam bentuk % transmitan maupun absorbansi.

Menurut penelitian Ling *and* Suah (2017), panjang gelombang maksimum yang digunakan untuk mengukur MG pada UV-Vis yaitu sebesar 617 nm. Sedangkan pada penelitian (Bhernama, 2017), pengukuran serapan MG dilakukan dengan mengukur absorbansi MG pada panjang gelombang 200-800 nm, dan didapatkan panjang gelombang maksimum sebesar 618 nm.

Penelitian oleh Kiswandono *et al.* (2024) menunjukkan bahwa terdapat pengaruh pH pada absorbansi MG yang diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis. pH termasuk parameter penting pada studi ini karena adanya difusi yaitu perbedaan konsentrasi proton antara fasa sumber dan fasa penerima. Variasi pH fasa sumber MG terdiri dari pH : 5, 6, 7, 8, dan 9. Artinya, variasi ini menunjukkan jumlah proton pada fasa sumber akan lebih meningkat. Kondisi optimum dengan jumlah MG yang tertransport ditunjukkan pada pH 7. pH MG optimum yang didapatkan sudah termasuk pH netral (pH 7). Kondisi optimum pH 7 dapat disebabkan karena MG berada dalam bentuk molekular yang memungkinkan terjadinya ikatan hidrogen dengan jumlah yang lebih banyak. Adapun hasil penelitian Kiswandono *et al.* (2024) mengenai pengaruh pH terhadap konsentrasi MG tertransport ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Pengaruh pH terhadap konsentrasi MG tertransport

2.6.4. *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)*

ICP-OES merupakan salah satu teknik analisis spektroskopi atom yang banyak digunakan untuk menentukan kandungan unsur dalam berbagai matriks sampel. Teknik ini bekerja berdasarkan prinsip emisi atom atau ion yang tereksitasi pada suhu tinggi dalam plasma, sehingga memancarkan radiasi elektromagnetik pada panjang gelombang tertentu yang khas bagi setiap unsur. Intensitas radiasi yang dipancarkan berbanding lurus dengan konsentrasi unsur dalam sampel sehingga dapat digunakan untuk analisis kuantitatif maupun kualitatif (Donati *et al.*, 2017).

ICP-OES menggunakan plasma yang dihasilkan dari gas argon yang diionisasi oleh medan elektromagnetik frekuensi radio. Plasma tersebut memiliki suhu yang sangat tinggi, berkisar antara 6000–10.000 K, sehingga mampu menyebabkan proses desolvasi, penguapan, atomisasi, dan eksitasi atom secara efisien. Pada kondisi ini, atom atau ion unsur dalam sampel akan tereksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi. Ketika elektron kembali ke tingkat energi dasar, energi dilepaskan dalam bentuk cahaya dengan panjang gelombang spesifik yang dapat dideteksi (Hou *et al.*, 2021). Proses analisis menggunakan ICP-OES dimulai dengan perubahan sampel cair menjadi aerosol menggunakan nebulizer. Aerosol tersebut kemudian dibawa oleh aliran gas argon menuju plasma, di mana partikel sampel mengalami pemanasan dan atomisasi. Emisi cahaya yang dihasilkan kemudian dipisahkan berdasarkan panjang gelombang menggunakan sistem optik seperti monokromator atau polikromator dan dideteksi menggunakan detektor, misalnya *photomultiplier tube* (Wu *et al.*, 2023).

PIM telah banyak digunakan dalam penelitian untuk pemisahan dan transpor berbagai ion logam dari larutan berair karena memiliki stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan membran cair konvensional. Beberapa penelitian melaporkan bahwa PIM efektif digunakan untuk transport logam berat seperti Cr(VI), Cu(II), Zn(II), Ni(II), Cd(II), dan Co(II) dari larutan limbah maupun larutan sintetik. Gherasim *et al.* (2011), melaporkan bahwa membran berbasis *polyvinyl chloride* (PVC) dengan carrier Aliquat 336 mampu mentranspor ion Cr(VI) secara efisien.

Kaya *et al.* (2013), menunjukkan bahwa penggunaan turunan calix[4]arene sebagai *carrier* dalam membran berbasis *cellulose triacetate* (CTA) mampu meningkatkan efisiensi transpor Cr(VI) hingga lebih dari 99% pada kondisi optimum. Studi lain juga melaporkan bahwa PIM berbasis senyawa pembawa organofosfor seperti di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid (D2EHPA) mampu mentranspor ion logam divalen seperti Cu(II), Zn(II), dan Ni(II) secara selektif dari larutan berair sehingga teknologi ini berpotensi besar untuk aplikasi pemisahan logam berat (Djunaidi *et al.*, 2018).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian ini telah dilaksanakan pada bulan Agustus 2025 sampai dengan Januari 2026 di Laboratorium Kimia Analitik dan Instrumentasi, Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung. Karakterisasi membran PIM menggunakan alat *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dilakukan di Laboratorium Mekanika Material dan Struktur, Mekanika Material Geomineral, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Analisis konsentrasi MG menggunakan Spektrofotometer UV-Vis dilakukan di Laboratorium Kimia Analitik dan Instrumentasi, Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung dan analisis logam menggunakan *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES) dilakukan di Unit Penunjang Akademik (UPA) Laboratorium Terpadu Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah *magnetic stirrer*, *magnetic bar*, neraca digital analitik (Mettler Toledo AB54-S), *chamber* berdiameter 3,5 cm dengan kapasitas 50 mL, cetakan membran, pH meter (pH 60 VioLab pH-Mv-Orp-T), *thickness gauge* (Mitutoyo 7301), *Scanning Electron Microscopy* (SEM) (*Thermo Scientific Quattro S*), *Fourier Transform Infrared* (FTIR) (Bruker Invenio-R), spektrofotometer UV-Vis (Shimadzu UV-1780 *Double*

Beam), *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES) (ICP varian 715/ES) pipet tetes, spatula, corong pisah, statif dan klem, mortal dan alugelas ukur, gelas beaker, aluminium foil, tisu, batang pengaduk, spatula, labu bundar, labu ukur, tisu.

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah *malachite green* (MG), *copoly-eugenol etilen glikol dimetakrilat* (Co-EEGDMA), akuades, akuabides, *polyvinyl chloride* (PVC), dibenzileter (DBE), tetrahidrofuran (THF), asam nitrat (HNO₃), timbal(II) karbonat (PbCO₃), tembaga(II) sulfat pentahidrat (CuSO₄.5H₂O), natrium sulfat (Na₂SO₄) anhidrat, eugenol, dan boron trifloro dietil eter (BF₃O(C₂H₅)₂).

3.3. Persiapan Transpor *Malachite Green* (MG)

3.3.1. Pembuatan *Polymer Inclusion Membrane* (PIM)

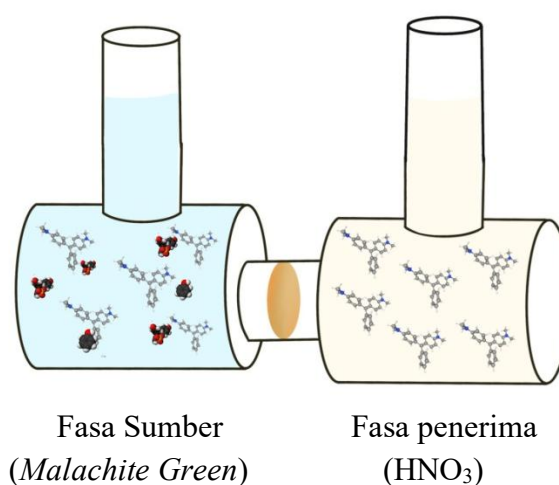
Membran PIM dicetak (dibuat) dengan berat total 0,27; 0,54 dan 1,08 g dalam suatu cetakan yang telah dilengkapi dengan *spin bar*. Jumlah bahan atau komponen penyusun membran yang diperlukan yaitu Co-EEGDMA 5% sebagai senyawa pembawa, PVC sebagai polimer dasar, dan DBE sebagai *plasticizer* terlihat pada Tabel 5. Tetrahidrofuran (THF) sebanyak 10 mL digunakan pada setiap membran PIM yang berfungsi sebagai pelarut untuk menghomogenkan campuran dalam cetakan, kemudian membran dapat digunakan setelah tiga hari dari pembuatan membran.

Tabel 5.Perbandingan komponen pembentuk membran (10:32:58)

Membran	Co-EEGDMA (g)	PVC (g)	DBE (g)	Berat Total (g)
T ₂₇	0,0270	0,0864	0,1556	0,27
T ₅₄	0,0540	0,1728	0,3132	0,54
T ₁₀₈	0,1080	0,3456	0,6264	1,08

(Kiswandono *et al*, 2024).

Setelah membran PIM dicetak, kemudian membran diukur ketebalannya menggunakan *thickness gauge*. Sebelum membran PIM digunakan, membran ditimbang untuk mengetahui berat awal membran tersebut. Selanjutnya, membran PIM digunakan untuk proses transpor MG yang dilakukan pada *chamber*. Fasa sumber berisi larutan MG 25 ppm dan fasa penerima berisi HNO_3 yang berperan sebagai senyawa pengikat. Membran sebelum dan sesudah transpor dikarakterisasi menggunakan FTIR dan SEM. Proses transpor dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Proses transpor MG (Kiswandono *et al.*, 2024).

3.3.2. Pembuatan Larutan Induk *Malachite Green*, Pembuatan Limbah Buatan dan Pengukuran Konsentrasi *Malachite Green*

- a. Pembuatan larutan induk *Malachite Green* (MG) 1000 ppm
Larutan induk MG 1000 ppm dibuat dengan cara dilarutkan 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) dibuat dengan cara dimasukkan 0,00125 g MG, 0,0016 g PbCO_3 dan 0,0049 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dalam labu ukur 50 mL, kemudian ditambahkan akuabides sampai tanda tera.

c. Pengukuran Konsentrasi *Malachite Green* (MG)

Sebelum pengukuran konsentrasi MG, terlebih dahulu ditentukan panjang gelombang maksimum MG 25 ppm menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada rentang panjang gelombang 450 nm sampai 800 nm. Selanjutnya, konsentrasi MG pada larutan standar, fasa sumber, dan fasa penerima diukur dengan cara diambil masing-masing 5 mL. Larutan sampel diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.4. Optimasi Transpor *Malachite Green*

3.4.1. Variasi pH *Malachite Green* pada Fasa Sumber

Membran PIM dengan ketebalan normal (T_{54}) yang sudah dicetak dan mengandung senyawa pembawa diletakkan di tengah-tengah pipa transpor, kemudian ditambahkan 50 mL HNO_3 1 M sebagai fasa penerima dan masing-masing 50 mL MG 25 ppm sebagai fasa sumber dengan pH yang telah divariasikan yaitu pH : 5,0 ; 6,0 ; 7,0 ; 8,0 dan 9,0. Pipa transpor ditutup dan diaduk selama 24 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 spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum. Membran PIM ditimbang beratnya setelah proses transpor selesai.

3.4.2. Variasi Konsentrasi HNO_3 pada Fasa Penerima

Membran PIM dengan ketebalan normal yang sudah dicetak dan mengandung senyawa pembawa diletakkan 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. Konsentrasi pekat HNO_3 adalah 13 M. 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 24 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 spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum. Membran PIM ditimbang beratnya setelah proses transpor selesai.

3.4.3. Variasi Ketebalan Membran

Membran PIM dengan variasi ketebalan T_{27} , T_{54} , dan T_{108} yang sudah dicetak dan mengandung senyawa pembawa diletakkan 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 24 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 spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum. Membran PIM ditimbang beratnya setelah proses transpor selesai.

3.4.4. Variasi Konsentrasi Senyawa Pembawa

Membran PIM ketebalan normal yang sudah dicetak dan mengandung variasi konsentrasi senyawa pembawa (Tabel 6) diletakkan di tengah-tengah pipa transpor, kemudian ditambahkan 50 mL HNO_3 sebagai fasa penerima optimum dan 50 mL MG 25 ppm sebagai fasa sumber optimum. Pipa transpor ditutup dan diaduk selama 24 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 spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum. Membran PIM ditimbang beratnya setelah proses transpor selesai.

Tabel 6. Variasi konsentrasi senyawa pembawa Co-EEGDMA 5%.

Membran	Konsentrasi senyawa pembawa (mmol)	Co-EEGDMA (g)	PVC (g)	DBE (g)	Berat Total (g)
1	0,01	0,054	0,1728	0,3132	0,5400
2	0,02	0,086	0,1728	0,3132	0,5720
3	0,03	0,1290	0,1728	0,3132	0,6150
4	0,04	0,1721	0,1728	0,3132	0,6581
5	0,05	0,2151	0,1728	0,3132	0,7011

3.4.5. Variasi Waktu Transpor

Membran PIM dengan kondisi optimum sebelum digunakan ditimbang terlebih dahulu. Membran PIM dengan ketebalan optimum yang sudah dicetak dan mengandung senyawa pembawa diletakkan di tengah-tengah pipa transpor, kemudian ditambahkan 50 mL HNO₃ konsentrasi optimum sebagai fasa penerima dan 50 mL MG 25 ppm dengan pH optimum sebagai fasa sumber. Pipa transpor ditutup dan diaduk dengan variasi waktu selama 6, 12, 18, 24 dan 30 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 spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

Setelah didapatkan hasil dan data transpor dari variasi waktu 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 formula 1, 2, 3, 4, dan 5 (Gherasim *et al.*, 2011).

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

Keterangan :

$\% Recovery$ = %MG yang terdapat di dalam fasa penerima

$C_{0 \text{ sumber}}$ = Konsentrasi awal MG di dalam fasa sumber (ppm)

C_{penerima} = Konsentrasi MG di dalam fase penerima (ppm)

$\%Recovery$ digunakan untuk mengevaluasi kemampuan pelepasan kembali ion logam ke fase penerima serta efektivitas regenerasi membran. Tingginya $\%recovery$ menandakan proses transpor bersifat reversible dan membran dapat digunakan kembali. PIM mampu mencapai $\%recovery$ hingga ~99% sehingga menunjukkan stabilitas dan potensi aplikasi jangka panjang (Gherasim *et al.*, 2011).

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

Keterangan :

$\%Removal$ = %MG yang terdapat di dalam fase penerima

$C_{0 \text{ sumber}}$ = Konsentrasi awal MG di dalam fase sumber (ppm)

C_{sumber} = Konsentrasi MG di dalam fase sumber (ppm)

$\%Removal$ digunakan untuk menilai kemampuan membran PIM dalam menghilangkan atau menurunkan konsentrasinya zat terlarut yang ada di fase sumber. Nilai $\%removal$ yang tinggi menunjukkan efisiensi ekstraksi yang baik dalam proses transpor (Gherasim *et al.*, 2011).

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

Keterangan:

V_f = Volume fluida (m^3)

A = Luas permukaan membran (m)

t = Waktu (jam)

$[C]_t$ = Konsentrasi fasa penerima pada waktu t

$[C]_0$ = Konsentrasi permeat (konsentrasi MG yang ada pada fase sumber)

Permeabilitas membran cair pada dasarnya menggambarkan kemampuan membran untuk molekul tertentu melewati fasa membran. Proses ini dipengaruhi oleh solubilitas, difusi, dan interaksi kimia antara permeat dan fasa cair membran. Permeabilitas sering dinyatakan berdasarkan koefisien permeabilitas yang mencerminkan laju alir massa per satuan area dan gradien konsentrasi. Nilai permeabilitas yang lebih besar menunjukkan bahwa proses transpor zat melalui membran berlangsung lebih cepat dan efisien, sedangkan nilai permeabilitas yang

lebih kecil mengindikasikan adanya peningkatan hambatan difusi di dalam fase membran (Wei *et al.*, 2021).

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

Keterangan :

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

Fluks adalah laju alir permeat (larutan yang berhasil melewati membran) per satuan luas membran biasanya dengan satuan L/m²·h atau m/s. Dalam penelitian membran, fungsi perhitungan flux adalah untuk mengetahui kinerja pemisahan. Jika nilai fluks yang didapatkan tinggi maka membran yang bekerja pada proses transpor efisien dan tidak ada penyumbatan selama proses transpor. Tetapi jika nilai fluks rendah karena adanya fouling (penumpukan material) yang terjadi pada proses transpor (Tsibranska *et al.*, 2020).

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

Keterangan :

R	= Koefisien rejeksi
C _p	= Konsentrasi permeat (konsentrasi MG yang ada pada fasa penerima saat t optimum)
C _t	= Konsentrasi MG pada fasa sumber saat t optimum

Koefisien rejeksi (R) adalah nilai yang menunjukkan kemampuan membran untuk mengevaluasi efektivitas membran dalam menahan zat terlarut agar tidak lolos kembali ke fasa sumber. Koefisien ini dinyatakan dalam bentuk fraksi 0–1 atau persentase (%). Jika hasil R tinggi artinya membran efektif menahan solut sedangkan jika R rendah membran kurang mampu mengambat solut (Tsibranska *et al.*, 2020).

$$\text{Koefisien Difusi (D)} = \frac{J-h}{C_1-C_2} \quad (6)$$

Keterangan :

D	= Koefisien difusi (m ² /s)
J	= Fluks (m/s)
H	= ketebalan membran (m)

C_1 = Konsentrasi MG di fasa sumber (ppm)

C_2 = Konsentrasi MG di fasa penerima (ppm)

Koefisien difusi (D) merupakan parameter penting dalam proses perpindahan massa yang menunjukkan kemampuan suatu molekul untuk berdifusi melalui suatu medium, seperti membran. Secara fisik, nilai koefisien difusi menggambarkan kecepatan pergerakan molekul dari daerah berkonsentrasi tinggi ke daerah berkonsentrasi rendah akibat adanya gradien konsentrasi. Nilai koefisien difusi yang tinggi menunjukkan bahwa molekul target dapat bergerak lebih cepat melalui membran, yang mengindikasikan peningkatan efisiensi proses pemisahan (Yuwono, 2015).

3.5. Evaluasi Transpor *Malachite Green*

3.5.1. Efek Jenis Garam pada Fasa Sumber

Membran PIM dibuat dengan komposisi optimum pada prosedur sebelumnya. Kemudian membran PIM ditempatkan pada pipa transpor MG. Pada pipa transpor masing-masing fasa sumber (*5 chamber*) diisi larutan 50 mL MG 25 ppm (kondisi pH optimum) dengan garam 0,01 M. Garam tersebut adalah KCl, NaCl, NaNO₃, Na₂SO₄, dan KNO₃. Sementara pada fasa penerima dimasukkan 50 mL HNO₃ (konsentrasi HNO₃ optimum). Pipa transpor ditutup dan diaduk menggunakan pengaduk magnet selama waktu optimum pada suhu kamar. Ditimbang berat membran setelah proses transpor selesai. Konsentrasi MG pada fasa penerima dan fasa sumber diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.5.2. Efek Konsentrasi Garam pada Fasa Sumber

Transpor MG dengan penambahan garam pada fasa penerima. Membran PIM dengan komposisi optimum jenis garam sebelum digunakan ditimbang terlebih dahulu, kemudian membran PIM ditempatkan pada pipa transpor MG. Pada fasa sumber diisi dengan 50 mL larutan MG 25 ppm dengan pH optimum sedangkan untuk fasa penerima diisi dengan larutan garam dengan variasi

konsentrasi 0; 0,001; 0,01; 0,1; dan 1 M dalam 50 mL HNO₃ konsentrasi optimum. Pipa transpor ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet pada fasa sumber dan fasa penerima selama waktu optimum pada suhu kamar. Kemudian, membran PIM dilepas, dikeringkan dan ditimbang. Konsentrasi MG pada fasa penerima dan fasa sumber diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.5.3. Efek Konsentrasi Garam pada Fasa Penerima

Transpor MG dengan penambahan garam pada fasa penerima. Membran PIM dengan komposisi optimum jenis garam sebelum digunakan ditimbang terlebih dahulu. Kemudian membran PIM ditempatkan pada pipa transpor MG. Pada fasa sumber diisi dengan 50 mL larutan MG 25 ppm dengan pH optimum sedangkan untuk fasa penerima diisi dengan larutan garam dengan variasi konsentrasi 0; 0,001; 0,01; 0,1; dan 1 M dalam 50 mL HNO₃ konsentrasi optimum. Pipa transpor ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet pada fasa sumber dan fasa penerima selama waktu optimum pada suhu kamar. Kemudian, membran PIM dilepas, dikeringkan dan ditimbang. Konsentrasi MG pada fasa penerima dan fasa sumber diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.5.4. Variasi Pemakaian Berulang

Membran PIM dengan kondisi optimum sebelum digunakan ditimbang terlebih dahulu. Kemudian membran PIM ditempatkan pada pipa transpor MG. Pada kolom fasa sumber diisikan 50 mL MG 25 ppm dengan pH optimum dan pada fasa penerima diisikan 50 mL HNO₃ dengan konsentrasi optimum. Pipa transpor ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet pada fasa sumber dan fasa penerima selama 24 jam pada suhu kamar. Setelah selesai diaduk, diambil sampel fasa sumber dan fasa penerima sebanyak 5 mL. Konsentrasi MG di dalam fasa sumber dan fasa penerima dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Membran PIM ditimbang beratnya setelah proses transpor selesai.

Pemakaian berulang dilakukan dengan:

- Disiapkan membran PIM untuk digunakan kembali untuk transpor MG dengan tiga kali pengulangan menggunakan larutan MG yang baru.
- Membran PIM dicuci dengan konsentrasi HNO_3 optimum selama 30 menit. setelah itu membran PIM digunakan kembali untuk transpor MG dengan lima kali pengulangan menggunakan larutan MG yang baru.
- Membran PIM dicuci dengan akuades selama 30 menit setelah itu membran PIM digunakan kembali untuk transpor MG dengan lima kali pengulangan menggunakan larutan MG yang baru.

3.5.5. Uji *Lifetime*

Uji umur membran (*lifetime*) bertujuan untuk mengetahui umur membran serta kestabilan membran PIM dengan atau tanpa penambahan garam. Membran PIM dengan komposisi optimum *plasticitizer* ditempatkan pada tengah pipa transpor MG, kemudian pada fasa sumber diisi 50 mL MG 25 ppm pH optimum dengan 5 variasi yaitu,

- a. Tanpa garam
- b. Menggunakan garam NaNO_3 0,1 M
- c. Menggunakan garam NaCl 0,1 M
- d. Menggunakan garam NaSO_4 0,1 M
- e. Menggunakan garam KNO_3 0,1 M

Fasa penerima diisi 50 mL HNO_3 konsentrasi optimum. Pipa transpor ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet pada fasa sumber dan fasa penerima. *Lifetime* ditentukan dengan cara mengukur nilai pH pada fasa sumber. Turunnya nilai pH pada fasa sumber mengindikasikan bahwa membran PIM sudah mengalami kebocoran. pH pada fasa sumber dicek secara berkala hingga pH pada fasa sumber $\pm 5,0$.

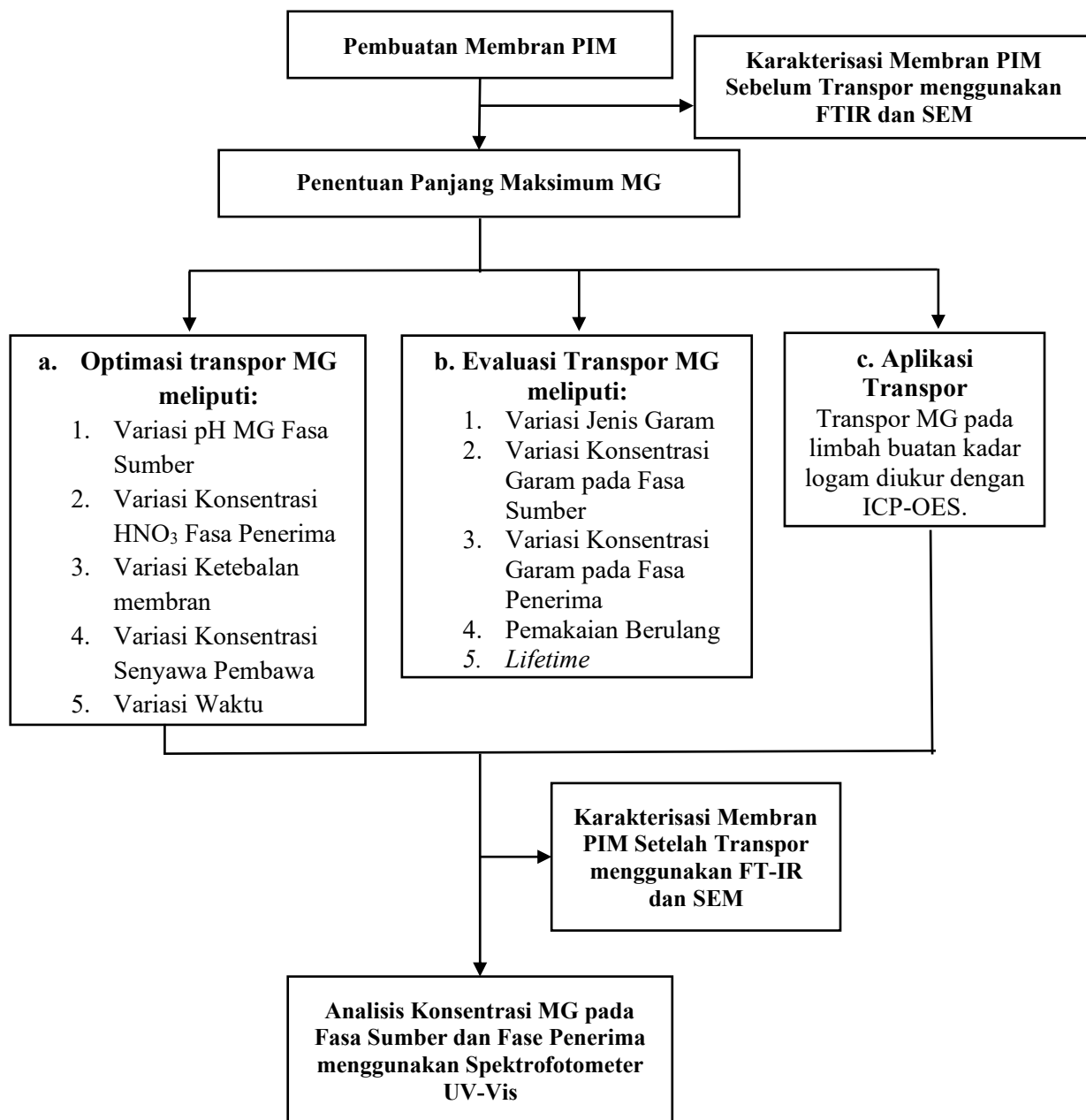
3.6. Aplikasi Transpor *Malachite Green*

3.6.1. Studi Kompetisi Transpor *Malachite Green* pada Limbah Buatan

Membran PIM dengan kondisi optimum sebelum digunakan ditimbang terlebih dahulu. Disiapkan sampel limbah buatan dibuat dengan mencampurkan MG, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dan PbCO_3 dengan konsentrasi masing-masing 25 ppm. Selanjutnya, dilakukan transpor menggunakan membran PIM dengan ketebalan optimum yang sudah dicetak. Membran diletakkan di tengah-tengah pipa transpor. Kemudian dimasukkan 50 mL limbah buatan sebagai fasa sumber dan 50 mL HNO_3 sebagai fasa penerima dengan kondisi optimum. Setelah itu, pipa transpor ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet pada fasa sumber dan fasa penerima selama waktu optimum pada suhu kamar. Setelah selesai diaduk, diambil sampel fasa sumber dan fasa penerima sebanyak 5 mL. Konsentrasi MG di dalam fasa sumber dan fasa penerima dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis, sementara membran setelah proses transpor variasi logam Cu(II) dan Pb(II) dilakukan karakterisasi menggunakan SEM-EDS. Membran PIM ditimbang beratnya setelah proses transpor selesai.

3.7. Diagram Alir

Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Diagram alir penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan pembahasan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Optimasi membran PIM mengandung Co-EEGDMA 5% untuk transpor MG dicapai pada kondisi pH 7 MG pada fasa sumber, konsentrasi HNO_3 sebesar 1,25 M, ketebalan membran normal T_{54} , serta konsentrasi senyawa pembawa 0,01 mmol selama 24 jam dengan *%removal* sebesar 88,14%.
2. Stabilitas dari evaluasi transpor didapatkan membran PIM yang mengandung Co-EEGDMA 5% bahwa penambahan jenis garam efektif yaitu NaCl 0,001 M baik di fasa sumber dan penerima yang mencapai umur membran selama 41 hari, dan pemakaian berulang membran efektif yaitu membran tanpa perendaman dengan akuades atau HNO_3 mencapai *%removal* sebesar 91,12%.
3. Aplikasi transpor dengan menggunakan logam berat mengandung Cu(II) dan Pb(II) menghasilkan *%removal* rendah sebesar 72,23%, artinya penambahan logam pada fasa sumber sulitnya terjadi pembentukan kompleks MG dan senyawa pembawa (Co-EEGDMA) karena Cu(II) dan Pb(II) berperan sebagai logam kompetitor dalam transpor.

5.2. Saran

Saran dari penelitian ini yaitu :

1. Dapat meningkatkan bobot molekul dan konsentrasi senyawa pembawa, misalnya dengan menggunakan Co-EEGDMA pada konsentrasi lebih dari 5% agar *%removal* dapat melebihi 91,12%.
2. Peneliti juga disarankan menggunakan limbah zat tekstil asli dari industri tekstil yang memakai MG.
3. Peneliti juga bisa menambahkan parameter lain seperti pengaruh konsentrasi komponen membran PVC atau DBE juga parameter kecepatan pengadukan dan pengaruh suhu.
4. Dapat melakukan variasi garam dan *lifetime* dapat menggunakan garam lain seperti KCl, KOH, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, dan lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Adewole, J., Ahmad, A., Ismail, S., Leo, C., and Sultan, A. 2015. Comparative Studies On The Effects Of Casting Solvent On Physico-Chemical And Gas Transport Properties Of Dense Polysulfone Membrane Used For CO₂/CH₄ Separation. *J. Appl. Polym. Sci.* 132: 42205.
- Ahmed, A. E., Majewska-Nowak, K., Grzegorzec, M. and Szymanek, I. 2022. The Effect of Mineral Salt on Reactive Dye Removal from Aqueous Solutions by Ultrafiltration. *Journal of Ecological Engineering.* 23(10): 239–247.
- Ahmad, A. L., Shafie, Z. M. H. M., Zaulkiflee, N. D., and Pang, W. Y. 2019. Preliminary Study Of Emulsion Liquid Membrane Formulation On Acetaminophen Removal From The Aqueous Phase. *Membranes.* 9(10).
- Akichouch, E. H., Sahli, S., Khoutoul, M., Miz, M. E., Bachiri, A. E., and Taha, N.I.A. 2020. Ionic Strength Effect on Malachite Green Adsorption onto Moroccan Montmorillonite Clay: Experimental Study and Theoretical Investigation. *Oriental Journal Of Chemistry.* 36(1): 63–75.
- Almeida, M. I. G. S., Cattrall, R. W., and Kolev, S. D. 2017. Polymer Inclusion Membranes (PIMs) In Chemical Analysis. *Analytica Chimica Acta.* 7: 1–14.
- Al-Obaidi, Q., Alabdulmuhsin, M., Tolstik, A., Trautman, J. G., and Al-Dahhan, M. 2021. Removal Of Hydrocarbons Of 4-Nitrophenol By Emulsion Liquid Membrane (ELM) Using Magnetic Fe₂O₃ Nanoparticles And Ionic Liquid. *Journal of Water Process Engineering.* 39: 101729.
- Amri, A., Lesbani, A., and Mohadi, R. 2023. Malachite Green Dye Adsorption from Aqueous Solution using a Ni/Al Layered Double Hydroxide-Graphene Oxide Composite Material. *Science and Technology Indonesia.* 8(2): 280–287.
- Aprilia, K. C., Safitri, N. U., Rakhman, K. A., and Kiswandono, A. A. 2025. Malachite Green Transport using Polymer Inclusion Membrane Method with Co-EDVB as Carrier. *Walisongo Journal of Chemistry.* 8(1): 87–97.
- Ashraf, W. M., Abulibdeh, N., and Salam, A. 2019. Selective Removal Of Malachite Green Dye From Aqueous Solutions By Supported Liquid

Membrane Technology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 16(18): 1-9.

- Asni, N.K., dan Sianita, M.M. 2020. Pengaruh Jumlah Crosslinker Terhadap Porsen Ekstraksi Pada Sintesis Molecularly Imprinted Polymer Sebagai Adsorben Untuk Kloramfenikol. *UNESA Journal of Chemistry*. 9(3): 170-229.
- Ayyad, O. D. H. 2011. *Novel Strategies for The Synthesis of Metal Nanoparticles and Nanostructures*. Thesis. Universitas de Barcelona. Barcelona.
- 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 Ozonolisis Dengan Penambahan Katalis TiO₂ Anatase Dan ZnO. *Elkawnie*. 3(1): 1-10.
- Borpatra Gohain, M., Karki, S., Yadav, D., Yadav, A., Thakare, N. R., Hazarika, S., and Ingole, P. G. 2022. Development Of Antifouling Thin-Film Composite/ Nanocomposite Membranes For Removal Of Phosphate And Malachite Green Dye. *Membranes*. 12(8): 768-778.
- Bora, R., Rasid, S. S., and Hussain, Md. A. 2024. Toxicological Impact of Malachite Green On Freshwater Fish: A Comprehensive Review. *Uttar Pradesh Journal Of Zoology*. 45(17): 659-668.
- Bonggotgetsakul, Y.Y.N., Cattrall, R.W., and Kolev, S.D. 2016. Recovery Of Gold From Aqua Regia Digested Electronic Scrap Using A Poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropene) (PVDF-HFP) Based Polymer Inclusion Membrane (PIM) Containing Cyphos® IL 104. *J. Membr. Sci*. 514: 274-281.
- Buveneswari, K., and Singanan, M., 2022. Removal Of Malachite Green Dye In Synthetic Wastewater Using Zingiber Officinale Plant Leaves Biocarbon. *Mater. Today Proc*. 55: 274-279.
- Cetina, M., Mihovilović, P., Pešić, A., and Vojnović, B. 2025. Influence of Ionic Strength and Temperature on the Adsorption of Reactive Black 5 Dye by Activated Carbon: Kinetics, Mechanisms and Thermodynamics. *Molecules*. 30(12): 2593.
- Cholid, M. 2016. *Adsorpsi Selektif Molekular Fenol oleh Polieugenol*. Disertasi. Universitas Gadjah Mada.
- Chen, L., Wang, X., Lu, W., Wu, X., and Li, J. 2016. Molecular Imprinting: Perspectives and Applications. *Chemical Society Review*. 45(8): 2137-2211.
- Correia, P.F.M.M. and De Carvalho, J.M.R. 2015. Salt Effects On The Recovery

Of Phenol By Liquid-Liquid Extraction With Cyanex 923. *Separation Science Technology*. 40: 3365–3380.

- Djunaidi M. C., and Wenten I. G. 2019. Synthesis Of Eugenol-Based Selective Membrane For Hemodialysis. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 509: 012069.
- Djunaidi, M. C., Adiwibawa, P. N., Setyowati, N. A., Khabibi, K., and Nita, U. K. 2018. Recovery of Cu (II) and Cr (VI) Metals From Electroplating Liquid Waste Using Polymer Inclusion Membrane (PIM). *Reaktor*. 18(2): 102-109.
- Donati, G. L., Amais, R. S., and Williams, C. B. 2017. Recent Advances In Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 32(7): 1283–1296.
- El-Hadj, A. Y. A., Hejji, L., Seddik, N., Azzouz, A., Pérez-Villarejo, L., Stitou, M., and Sonne, C. 2024. Remediation Of Malachite-Green Dye From Textile Wastewater Using Biosorbent Almond Shell-Based Cellulose. *Journal of Molecular Liquids*. 399.
- El-Zahhar, A. A., and Awwad, N. S. 2016. Removal Of Malachite Green Dye From Aqueous Solutions Using Organically Modified Hydroxyapatite. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 4(1): 633–638.
- European Commission. 2015. *The Food Classification And Description System Foodex 2 (Revision 2)*. EFSA supporting publication. Italia.
- Fan, J., Y. Fan, Y. Pei, K. Wu, J. Wang, and M. Fan. 2008. Solvent Extraction of Selected Endocrine-Disrupting Phenols Using Ionic Liquids. *Purification Technology*. 61: 324–331.
- Febriasari, A., Siswanta, D., Kiswandono, A. A., and Hidayat, N. A. 2016. Evaluation Of Phenol Transport Using Polymer Inclusion Membrane (PIM) With Polyeugenol As A Carrier. *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*. 11(2): 99–106.
- Fu, F., and Wang, Q. 2011. Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: A Review. *Journal of Environmental Management*. 92: 407–418.
- Gharavi-nakhjavani, M. S., Niazi, A., Hosseini, H., Aminzare, M., Dizaji, R., Tajdar-oranj, B., and Alizadeh, A. M. 2023. Malachite Green And Leucomalachite Green In Fish: A Global Systematic Review And Meta-Analysis. *Environmental Science and Pollution Research*. 30: 4891–48927.
- Gherasim, C. V., Bourceanu, G., and Timpu, D. 2011. Experimental And Modeling Studies Of Lead (II) Sorption Onto A Polyvinyl-Chloride Inclusion Membrane. *Chemical Engineering Journal*. 172: 817–827.

- Goldstein, J., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., and Joy, D. C. 2018. *Scanning Electron Microscopy And X-Ray Microanalysis*. Springer. Berlin.
- Hadri, M., Draoui, K., Bounab, L., Hamdaoui, M., Douhri, H., Kouda, I., and Zaitan, H. 2022. Thermodynamic And Kinetic Studies For The Adsorption Of Malachite Green On Diatomite. *Journal of Environmental Engineering and Science*. 18(2): 70–80.
- Hansen, S. Pedersen-Bjergaard, S., and Rasmussen, K. 2011. *Introduction to Pharmaceutical Chemical Analysis*. Wiley Hoboken. USA.
- Harimu, L., Matsjeh, S., Siswanta, D., dan Santosa, S. 2012. Sintesis Polieugenol Oksiasetat Sebagai Pengembangan 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.
- Hilal, N., Ismail, A., Matsuura, T., and Oatley-Radcliffe, D. 2017. *Membrane Characterization*. Elsevier Science. Amsterdam The Netherlands.
- Husna, S.M., Yusoff, A.H., Mohan, M., and Azmi, N.A. 2022. Shoparwe, N.F., Sulaiman, A.Z. Effect Of Graphene Oxide On The Properties Of Polymer Inclusion Membranes For Gold Extraction From Acidic Solution. *Membranes*. 12: 996.
- Ho, S. 2020. Removal Of Dyes From Wastewater By Adsorption Onto Activated Carbon: Mini Review. *J. Geosci. Environ. Protect*. 8(5): 100280.
- Hou, X., Amais, R. S., Jones, B. T., and Donati, G. L. 2021. Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Wiley.
- Iqbal, A., Cevik, E., Bozkurt, A., Asiri, S. M. M., Alagha, O., Qahtan, T.F., Jalees, M.I., and Farooq, M. U. 2022. Ultrahigh Adsorption By Regenerable Iron-Cobalt Core-Shell Nanospheres And Their Synergetic Effect On Nanohybrid Membranes For Removal Of Malachite Green Dye. *J. Environ. Chem. Eng*. 10(3): 107968.
- Jayanayak, G. M., Ganalu, R., Shashikanth, N., Ukkund, S. J., Ahmed, S., AlSubih, M., and Islam, S. 2024. Studies On The Removal Of Malachite Green From Its Aqueous Solution Using Water-Insoluble B-Cyclodextrin Polymers. *ACS Omega*. 9(9): 10132–10145.
- Kabir, S.M., Mahmud, H., and Schöenberger, H. 2022. Recovery Of Dyes and Salts from Highly Concentrated (Dye and Salt) Mixed Water using Nano-Filtration Ceramic Membranes. *Heliyon*. 8(11): 1–10.
- Kaczorowska, A., Bożejewicz, D., and Katarzyna, W. 2023. The Application Of Polymer Inclusion Membranes For The Removal Of Emerging Contaminants And Synthetic Dyes From Aqueous Solutions—A Mini

- Review. *Membranes*. 13(2): 132.
- Kagaya, S., Ryokan, Y., Cattrall, R.W., and Kolev, S. D. 2012. Stability Studies Of Poly(Vinyl Chloride)-Based Polymer Inclusion Membranes Containing Aliquat 336 As A Carrier. *Separation and Purification Technology*. 101 (13): 69–75.
- Kaya, A., Alpoguz, H. K., and Yilmaz, A. 2013. Application Of Cr(VI) Transport Through Polymer Inclusion Membrane With A Synthesized Calix[4]arene Derivative. *Industrial and Engineering Chemistry Research*.
- Kazemi, P., Peydayesh, M., Bandegi, A., Mohammadi, T., and Bakhtiari, O. 2014. Stability And Extraction Study Of Phenolic Wastewater Treatment By Supported Liquid Membrane Using Tributyl Phosphate And Sesame Oil As Liquid Membrane. *Chemical Engineering Research And Design*. 92(2): 375–383.
- Keskin, B., Zeytuncu-Gökoğlu, B., and Koyuncu, I. 2021. Polymer Inclusion Membrane Applications For Transport Of Metal Ions: A Critical Review. *Chemosphere*. 279: 130604.
- Khalid, N. A., Shoparwe, N. F., Yusoff, A. H., Sulaiman, A. Z., Ahmad, A. L., and Azmi, N. A. 2022. Fabrication And Characterisation Of MWCNT/ Polyvinyl (PVC) Polymer Inclusion Membrane For Zinc (II) Ion Removal From Aqueous Solution. *Membranes*. 12(10): 1020.
- Khairati, R. M., Kiswandono, A. A., Rinawati, R., and Ma'ruf, D. I. 2025. Application of Polymer Inclusion Membrane in the Transport of Malachite Green Dye Using Copolymer(Eugenol-Diallyl Phthalate) 2% as a Carrier. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*. 28(1): 8–15.
- Khalil, A. A., Rahman, U., Khan, M. R., Sahar, A., Mehmood, T., and Khan, M. 2017. Essential Oil Eugenol: Sources, Extraction Techniques and Nutraceutical Perspectives. *RSC Adv*. 7: 32669–32681.
- Khoiruddin, K., Jenderal, U., Yani, A., dan Hakim, A. N. 2010. *Diktat Pengantar Teknologi Membran*. Teknik Kimia Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Khopkar, S.M. 2003. *Konsep Dasar Kimia Analitik*. UI Press. Jakarta.
- Kislik, V. S. 2010. *Liquid Membranes Principles And Applications In Chemical Separations And Wastewater Treatment*. Elsevier. Inggris.
- Kiswandono, A. A. 2014. *Kajian Transpor Fenol Melalui Membran Berbasis Polieugenol Tertaut Silang Menggunakan Metode Polymer Inclusion Membrane (PIM) Disertasi*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Kiswandono, A. A., Rahmawati, A., Fadillah, N., Rinawati, R., Ferdias, P., and Putra, H. E. 2025. Effect Of Salt On The Stability Of PIM Membranes

Containing Poly-BADGE Carrier For Phenol Transport. *Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science*. 5(3): 1145–1159.

- Kiswandono, A. A., Antika, W., Rahmawati, A., and Rinawati, R. 2023. Investigating Phenol Transport Using Copoly (Eugenol-DVB) 8% As A Carrier With The Supported Liquid Membrane Method. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 26(10): 372–380.
- Kiswandono, A. A., Widiarto, S., Sari, D., Supriyanto, R., Qudus, H. I., Rinawati, R., Rahmawati, A., dan Devariani, W. 2022. 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., Supriyanto, Nuryaman, A., Siswanta, D., Aprilita, N. H., and Santosa, S.J. 2022. Synthesis And Performance Test Of Co-EEGDMA As A Carrier In Phenol Transport Using Polymer Inclusion Membrane. *Jurnal Penelitian Saintek*. 22(2): 114–125.
- Kiswandono, A. A., Mudasir, Siswanta, D., Aprilita, N. H., Santosa, S. J., and Hadi, S. 2020. Synthesis Of A New Crosslinked Poly-Bisphenol A Diglycidyl Ether (Poly-Badge) As A Carrier In Phenol Transport. *Kuwait Journal of Science*. 47(4), 39–48.
- Kiswandono, A. A., Nusantari, C. S., Rinawati, 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 Journal*. 12: 295.
- Kiswandono A., Ningsih, N., Sindiani A.V., Rinawati, R., and Qudus, H. I. 2024. Phenol Solutions Recovery As Water Pollutants With Eugenol Cross-Linked Diallyl Phthalate Using Supported Liquid Membrane. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 10: 53–70.
- Kiswandono, A.A., Santosa S. J., Siswanta, D., and Aprilita, N.H. 2013. Extending The Life Time Of Polymer Inclusion Membrane Containing Copoly(Eugenol-DVB) as Carrier for Phenol Transport. *Indo. J. Chem*, 13: 254–261.
- Kiswandono, A. A., Siswanta, D., Santosa, S. J., Nuryaman, A., Supriyanto, and Aprilita, N. H. 2017. Modification of Polyeugenol Derivate Contain Ethylene Glycol Dimethacrylate (EGDMA) As A Carrier for Phenol Transport. *The 6th International Conference of the Indonesian Chemical Society*.
- Kiswandono, A. A., Supriyanto., Nuryaman, A., Siswanta, D., Aprilita, 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., 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).
- 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.
- Kowalewska, A. 2022. Eugenol-Based Polymeric Materials Antibacterial Activity and Applications. *Antibiotics*. 12(11): 1–24.
- Kubota, F., Kono, R., Yoshida, W., Sharaf, M., Kolev, S.D., and Goto, M. 2019. Recovery Of Gold Ions from Discarded Mobile Phone Leachate by Solvent Extraction and Polymer Inclusion Membrane (PIM) Based Separation Using An Amic Acid Extractant. *Separ. Purif. Technol*, 214: 156–161.
- Lagiewka, J., Witt, K., Gierszewska, M., and Zawierucha, I. 2024. Selective Removal Of Organic Dyes Via Polymer Inclusion Membrane Containing A Perbenzylated B-Cyclodextrin Derivative. *Journal Of Water Process Engineering*. 68: 106306.
- Ling, Y. Y., and Suah, M. F. B. 2017. Extraction of Malachite Green from Wastewater By Using Polymer Inclusion Membrane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 5(1): 785–794.
- López-Cázares, M. I., Pérez-Rodríguez, F., René Rangel-Méndez, J., Centeno-Sánchez, M., Luis F., and Cházaro-Ruiz a. 2018. Improved Conductivity and Anti(Bio)Fouling of Cation Exchange Membranes by AgNPs-GO nanocomposites. *Journal of Membrane Science*. 565: 463–479
- Lusiana, R. A., dan Prasetya, N. B. 2020. *Membran dan Aplikasinya*. CV. Tigamedia Pratama. Semarang.
- Macías, M., Rodríguez, E., and Miguel, S. 2023. On The Use Of Polymer Inclusion Membranes For The Selective Separation Of Pb(II), Cd(II), And Zn(II) From Seawater. *Membranes*, 13(5): 512.
- Muhajir. 2015. The Study Of Malachite Green As Disinfectant Of Fungus *Saprolegnia Sp* To The Prevalence And Hatching Rate Of Carp (*Cyprinus Carpio Linn*). *Jurnal Perikanan*. 7(1): 9–18.
- Malboubi, M., Gu, Y. and Jiang, K. 2011. Characterization Of Surface Properties Of Glass Micropipettes Using SEM Stereoscopic Technique. *Microelectron Engineering*. 88(8): 2666–2670.
- Marcus, Y. 2009. Effect Of Ions On The Structure Of Water: Structure Making And Breaking. *Chemical Reviews*. 109(3): 1346–1370.

- Marszałek, J., and Zyła, R. 2021. Recovery Of Water From Textile Dyeing Using Membrane Filtration Processes. *Processes*. 9(10): 1833.
- 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.
- Melhi, S., Alqadami, A. A., Alosaimi, E. H., Ibrahim, G. M., El-Gammal, B., Bedair, M. A., and Elnaggar, E. M. 2024. Effective Removal of Malachite Green Dye from Water Using Low-Cost Porous Organic Polymers: Adsorption Kinetics, Isotherms, and Reusability Studies. *Water (Switzerland)*, 16(13).
- Mohamad, M., Wannahari, R., Mohammad, R., Shoparwe, N., Nawati, 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.
- Mohammadkhani. A., Malboubi. M., Anthony. C. and Jiang. K. 2011. Characterization of Surface Properties of Ordered Nanostructures Using SEM Stereoscopic Technique. *Microelectron Engineering*. 88(8): 2687–2690.
- Moradi, O., and Panahandeh, S. 2022. Fabrication Of Different Adsorbents Based On Zirconium Oxide, Graphene Oxide, And Dextrin For Removal Of Green Malachite Dye From Aqueous Solutions. *Environ. Res*. 214: 114042.
- Muthuraman, G., Palanivelub, K., and Teng, T. 2010. Transport Of Cationic Dye By Supported Liquid Membrane Using D2EHPA As The Carrier. *Color. Technol*. 126: 97–102.
- Nandoost, A., Bahramifar, N., Moghadamnia, A. A., and Kazemi, S. 2022. Adsorption Of Malachite Green (MG) As A Cationic Dye On Amberlyst 15 An Ion-Exchange Resin. *Journal of Environmental and Public Health*. 1–9.
- Nowik-Zajac, A., and Sabadash, V. 2025. Recent Developments in Polymer Inclusion Membranes: Advances in Selectivity, Structural Integrity, Environmental Applications and Sustainable Fabrication. *Membranes*. 15: 249.
- Oladoye, P. O., Ajiboye, T. O., Wanyonyi, W. C., Omotola, E. O., and Oladipo, M. E. 2023. Insights Into Remediation Technology For Malachite Green Wastewater Treatment. *Water Science And Engineering*. 16(3): 261–270.
- Pathania, D., Bhat, V. S., Shivanna, J. M., Sriram, G., Kurkuri, M., and Hegde, G. 2022. Garlic Peel Based Mesoporous Carbon Nanospheres For An Effective Removal Of Malachite Green Dye From Aqueous Solutions: Detailed

- Isotherms And Kinetics. *Spectrochimica Acta Part A. Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 276: 121197.
- Papapetros, K., Sygellou, L., Anastasopoulos, C., Andrikopoulos, K., Bokias, G., and Voyiatzis, G. 2023. Spectroscopic Study of the Interaction of Reactive Dyes with Polymeric Cationic Modifiers of Cotton Fabrics. *Applied Sciences*. 13: 5530.
- Pasieczna-Patkowska, R., Cichy, M., and Flieger, J. 2025. Application of Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy In Characterization Of Materials And Molecular Interactions. *Molecules*. 30(3): 684.
- 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.
- Pandey, D., Daverey, A., Dutta, K., and Arunachalam, K., 2022. Bioremoval Of Toxic Malachite Green From Water Through Simultaneous Decolorization And Degradation Using Laccase Immobilized Biochar. *Chemosphere*. 297: 134126
- Prasetya, N. B. A., and Sarjono, P. R. 2019. Synthesis of copolymer eugenol crosslinked with divinyl benzene and preliminary study on its antibacterial activity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 509(1).
- Prihatiningtyas, I., dan Tamrin. 2023. Aplikasi Membran Teknologi Untuk Pengolahan Limbah Air Dan Penghilangan Polutan Di Udara. *Seminar Nasional Kimia 2023 UIN Sunan Gunung Djati*. 97.
- Raval, A. R., Kohli, H. P., and Mahadwad, O. K. 2022. Application Of Emulsion Liquid Membrane For Removal Of Malachite Green Dye From Aqueous Solution: Extraction And Stability Studies. *Chemical Engineering Journal Advances*. 12.
- Radzimska-Lenarcik, E., Ulewicz, M., and Pyszka, I. 2020. Application Of Polymer Inclusion Membranes Doped With Alkylimidazole To Separation Of Silver And Zinc Ions From Model Solutions And After Battery Leaching. *Materials*. 13(14): 3103
- Rodríguez, E., and Miguel, S. 2022. Polymer Inclusion Membranes. *Membranes*. 12(2): 226.
- Rosly, M., Othman, N., and Rahman, H. 2018. Liquid Membrane Component Selection for Removal of Phenol from Simulated Aqueous Waste Solution. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*. 22(4): 702–714.
- Rosly, B.M., Jusoh, N., Othman, N., Rahman, H.A., Noah, N.F., and Sulaiman, R.N. 2020. Synergism Of Aliquat336-D₂EHPA As Carrier On The Selectivity Of Organic Compound Dyes Extraction Via Emulsion Liquid

- Membrane Process. *Separation and Purification Technology*. 239: 116527.
- Sajidah, H. B. N. 2017. *Review : Differential Thermal Analysis (DTA), Differential Scanning Calorimetry (DSC), Thermal Gravimetric Analysis (TGA) Scanning Elektron Microscopy (SEM) dan Transmission Elektron Microscopy (TEM) untuk Karakterisasi Serbuk Ba_{1-x}Sr_xTiO₃*. Departemen Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Salima, A., Ounissa, K. M., and Mohamed, M. L. 2012. Cationic Dye (MB) Removal Using Polymer Inclusion Membrane (Pims). *Procedia Engineering*. 33: 38–46.
- 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.
- Sartape, A. S., Mandhare, A. M., Jadhav, V. V., Raut, P. D., Anuse, M. A., and Kolekar, S. S. 2017. Removal Of Malachite Green Dye From Aqueous Solution With Adsorption Technique Using Limonia Acidissima (Wood Apple) Shell As Low Cost Adsorbent. *Arabian Journal of Chemistry*. 10: 229–238.
- Senila, M. 2025. Polymer Inclusion Membranes (PIMs) for Metal Separation—Toward Environmentally Friendly Production and Applications. *In Polymers Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. 17(6): 725.
- Sharaf, M., Yoshida, W., Kubota, F., Kolev, S. D., and Goto, M. 2018. A Polymer Inclusion Membrane Composed Of The Binary Carrier PC-88A And Versatic 10 For The Selective Separation And Recovery Of Sc. *RSC Advances*. 8(16): 8631–8637.
- Sharma, J., Sharma, S., and Soni, V. 2023. Toxicity Of Malachite Green On Plants And Its Phytoremediation: A Review. *Regional Studies in Marine Science*. 62: 102911.
- Suhartati, T. 2017. *Dasar-Dasar Spektrofotometri UV-Vis dan Spektrometri Massa untuk Penentuan Struktur Senyawa Organik*. CV Anugrah Utama Raharja. Bandar Lampung.
- 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: 19–25.
- Sun, H., Yao, J., Li, D., 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.

- Soo, J. A. L., Shoparwe, N. F., Otitoju, T. A., Mohamad, M., Tan, L. S., Li, S., and Makhtar, M. M. Z. 2021. Characterization and Kinetic Studies of Poly(Vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) Polymer Inclusion Membrane for the Malachite Green Extraction. *Membranes*. 11(9) : 1–24.
- Tsibranska, I., Dzhonova-Atanasova, D., and Panyovska, S. 2020. Effect Of Variable Flux And Rejection In Membrane Separation Of Polyphenols-Containing Natural Extracts. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 55 (4): 765–771.
- Teixeira, Y. N., Melo, R. P. F., Fernandes, M. R., Carmo, S. K. S., and Barros Neto, E. L. (2022). Malachite Green Removal Using Ionic Flocculation. *Water Practice And Technology*. 17(5): 1113–1128.
- Tsai, C. Y., Lin, P. Y., Hsieh, S.L., Kirankumar, R., Patel, A. K., Singhanian, R. R., Dong, C. D., Chen, C. W., and Hsieh, S., 2022. Engineered Mesoporous Biochar Derived From Rice Husk For Efficient Removal Of Malachite Green From Wastewaters. *Bioresour. Technol.* 347: 126749.
- Turgut, H. I., Eyupoglu, V., Kumbasar, R. A., and Sisman, I. 2017. Alkyl Chain Length Dependent Cr(VI) Transport By Polymer Inclusion Membrane Using Room Temperature Ionic Liquids As Carrier And PVDF–Co–HFP As Polymer Matrix. *Separation and Purification Technology*. 175: 406–417.
- Ulanowska, M., and Olas, B. 2021. Biological Properties And Prospects For The Application Of Eugenol–A Review. *International Journal of Molecular Sciences*. 22(7): 3671.
- Velikova, K., Dudev, T., Kukoc-Modun, L., D. Kolev, S., and Spassov, T. 2025. Assessing the Stability of Polymer Inclusion Membranes: The Case of Aliquat 336-Based Membranes. *Membranes*. 15: 309.
- Wei, J., She, Q., and Liu, X. 2021. Insights Into The Influence Of Membrane Permeability And Structure On Osmotically-Driven Membrane Processes. *Membranes*. 11(2): 153.
- Wu, Y., Gao, X., and Li, Y. 2023. Application Of Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer In Water Quality Monitoring. *Desalination and Water Treatment*. 314 : 314–321.
- Wu, J., Yang, J., Feng, P., Wen, L., Huang, G., Xu, C., and Lin, B., 2022. Highly Efficient And Ultra-Rapid Adsorption of Malachite Green by Recyclable Crab Shell Biochar. *J. Ind. Eng. Chem.* 113: 206–214.
- Xiao, T., Yuan, H., Ma, Q., Guo, X., and Wu, Y. 2019. An Approach for In Situ Qualitative And Quantitative Analysis of Moisture Adsorption In Nanogram-Scaled Lignin by Using Micro-FTIR Spectroscopy and Partial Least Squares Regression. *Int. J. Biol. Macromol.* 132: 1106–1111.

- Xu, W., Wang, W., Hao, L., Zhao, W., Liu, H., and Wang, X. 2020. Effect of Generation Number on Properties Of Fluoroalkyl-Terminated Hyperbranched Polyurethane Latexs And Its Films. *Journal of Applied Polymer Science*. 137(40) : 49215.
- Yang, C. W., Chang, Y., Hsieh, C., and Chang, B. 2021. Effects of Malachite Green on the Microbiomes of Milkfish Culture Ponds. *Water*. 13(4): 411.
- Yadav, V. K., Singh, B., Gacem, A., Yadav, K. K., Gnanamoorthy, G., Alsufyani, T., Hussein, H. S., Awwad, N. S., Verma, R., Inwati, G. K., *et al.* 2022. Development of Novel Microcomposite Materials from Coal Fly Ash and Incense Sticks Ash Waste and Their Application for Remediation of Malachite Green Dye from Aqueous Solutions. *Water*. 14: 3871.
- Yaseen, D. A., and Scholz, M. 2019. Textile Dye Wastewater Characteristics and Constituents of Synthetic Effluents: A Critical Review. *Springer*. 16.
- Yonel, S. H., Nasra, E., Oktavia, B., and Etika, S. B. 2021. Optimasi Penyerapan Zat Warna Malachite Green Menggunakan Karbon Aktif Dari Kulit Pisang Kepok (*Musa balbisiana Colla*). *Periodic*. 10(2): 28–32.
- Yoon, S. H. 2015. *Membrane Bioreactor Processes: Principles and Applications*. CRC press. New York.
- Yuwono, R. A. 2015. Dimetilsulfoksid Sebagai Enhancer Transpor Transdermal Teofilin Sediaan Gel. *Majalah Farmaseutik*. 11(1): 263–267.
- Zhao, S., Samadi, A., Wang, Z., Pringle, J. M., Zhang, Y., and Kolev, S. D. 2024. Ionic Liquid-Based Polymer Inclusion Membranes For Metal Ions Extraction And Recovery: Fundamentals, Considerations, And Prospects. *Chem. Eng. J.* 481: 148792.
- Zioui, D., Aoudjit, L., Tigrine, Z., Aburideh, H., and Arous, O. 2022. Competitive Transport Of Metal Ions Through A PVDF-CTA Based Polymer Inclusion Membrane Containing D2EHPA As Carrier. *Russ. J. Phys. Chem.* 96: 1334–1339.
- Zurweni., and Sanova, A. 2023. Development of UV-VIS Spectrophotometer Virtual Laboratory Media for Instrumental Analytical Chemistry Digital Practicum. *Formatif: Jurnal Ilmiah Pendidikan MIPA*, 13(1): 89–100.