

**OPTIMASI DAN EVALUASI *POLYMER INCLUSSION MEMBRANE*
(PIM) YANG MENGANDUNG SENYAWA PEMBAWA
COPOLY EUGENOL DIVINIL BENZENA 10%
UNTUK TRANSPOR *MALACHITE GREEN***

(Tesis)

**Oleh
KHARISMA CITRA APRILIA
NPM 2327011007**



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

ABSTRAK

OPTIMASI DAN EVALUASI *POLYMER INCLUSION MEMBRANE* (PIM) YANG MENGANDUNG SENYAWA PEMBAWA COPOLY EUGENOL DIVINIL BENZENA 10% UNTUK TRANSPOR *MALACHITE GREEN*

Oleh

KHARISMA CITRA ARILIA

Pesatnya perkembangan sektor industri menimbulkan permasalahan serius, salah satunya adalah pencemaran lingkungan akibat limbah zat warna seperti *malachite green* (MG). 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, dan penggunaan energi rendah. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimasi dan evaluasi kinerja membran PIM yang mengandung senyawa pembawa copoly eugenol divinil benzena (Co-EDVB) 10% dalam proses transpor MG. Hasil pengukuran menggunakan spektrofotometer UV-Vis menunjukkan bahwa panjang gelombang maksimum MG berada pada 614 nm. Optimasi transpor MG dicapai pada pH 7 pada fasa sumber, konsentrasi HNO_3 1 M pada fasa penerima, tipe membran T₅₄, penambahan senyawa pembawa sebesar 0,03 mmol, dan waktu transpor selama 12 jam. Evaluasi membran menunjukkan bahwa penambahan garam NaNO_3 0,001 M pada fasa sumber dan fasa penerima dapat meningkatkan % *removal* MG. Uji *lifetime* dengan penambahan garam NaCl, KCl, Na_2SO_4 , KNO_3 , dan NaNO_3 masing-masing 0,1 M menunjukkan bahwa umur membran terpanjang selama 62 hari dicapai pada penambahan NaNO_3 0,1 M. Evaluasi membran PIM pada parameter variasi pemakaian berulang baik dengan pencucian maupun tanpa pencucian, menunjukkan penurunan efisiensi transpor. Performa terbaik diperoleh pada pemakaian pertama tanpa pencucian. Pada kondisi optimum, efisiensi transpor MG mencapai % *removal* tertinggi sebesar 92,36%.

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

ABSTRACT

OPTIMIZATION AND EVALUATION OF POLYMER INCLUSION MEMBRANE (PIM) CONTAINING 10% COPOLY EUGENOL DIVINYLBENZENE AS CARRIER FOR MALACHITE GREEN TRANSPORT

By

KHARISMA CITRA APRILIA

The rapid development of the industrial sector has caused serious environmental problems, one of which is pollution from dye waste such as malachite green (MG). An effective method to address this pollution is separation technology based on liquid membrane, namely polymer inclusion membrane (PIM). PIM offers several advantages, including high selectivity, ease of application, and low energy consumption. This study aimed to optimize and evaluate the performance of PIM containing 10% copoly eugenol divinylbenzene (Co-EDVB) as a carrier compound for the transport of MG. UV-Vis spectrophotometer measurements showed that the maximum wavelength of MG was 614 nm. The optimal transport conditions were achieved at pH 7 in the source phase, 1 M HNO₃ in the receiving phase, membrane type T₅₄, carrier compound concentration of 0.03 mmol, and a transport time of 12 hours. Membrane evaluation indicated that the addition of NaNO₃ 0.001 M in both the source and receiving phases could improve the MG removal efficiency. Lifetime tests with the addition of NaCl, KCl, Na₂SO₄, KNO₃, and NaNO₃, each at a concentration of 0.1 M, showed the longest membrane lifespan of 62 days when using NaNO₃ 0.1 M. The evaluation of membrane reuse, both with and without washing, showed a decrease in transport efficiency. The best performance was obtained during the first use without washing. Under optimal conditions, the MG transport process achieved the highest removal efficiency of 92.36%.

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

**OPTIMASI DAN EVALUASI POLYMER INCLUSSION MEMBRANE
(PIM) YANG MENGANDUNG SENYAWA PEMBAWA
COPOLY EUGENOL DIVINIL BENZENA 10%
UNTUK TRANSPOR MALACHITE GREEN**

Oleh

KHARISMA CITRA APRILIA

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
2025**

Judul Tesis : **OPTIMASI DAN EVALUASI *POLYMER INCLUSION MEMBRANE* (PIM) YANG MENGANDUNG SENYAWA PEMBAWA COPOLY EUGENOL DIVINIL BENZENA 10% UNTUK TRANSPOR *MALACHITE GREEN***

Nama Mahasiswa : **Kharisma Citra Aprifia**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2327011007**

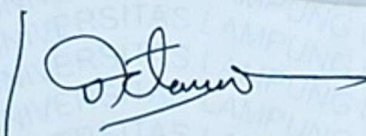
Program Studi : **Magister Kimia**

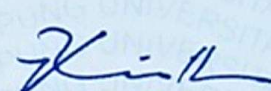
Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**

Bandar Lampung, 17 Juli 2025

MENYETUJUI

1. **Komisi Pembimbing**


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


Rinawati, Ph.D.
NIP. 197104142000032001

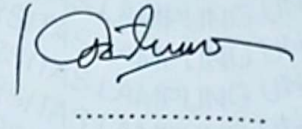
2. **Ketua Prodi Magister Kimia**


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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

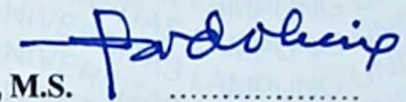
Ketua : **Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc.**



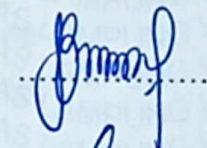
Sekretaris : **Rinawati, Ph.D.**



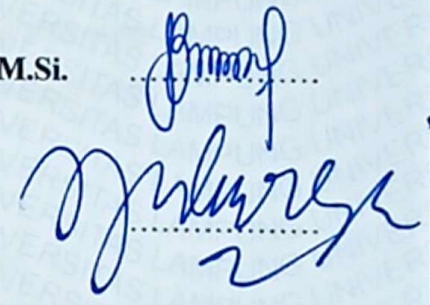
Penguji
Bukan Pembimbing I : **Prof. Dr. Hardoko Insan Qudus, M.S.**



Bukan Pembimbing II : **Prof. Dr. Kamisah D. Pandiangan, M.Si.**

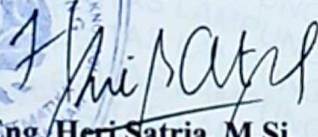


Bukan Pembimbing III : **Prof. Suharso, Ph.D.**



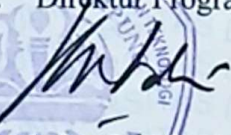
2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

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



3. Direktur Program Pascasarjana

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



Tanggal Lulus Ujian Tesis : **17 Juli 2025**

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Kharisma Citra Aprilia
Nomor Pokok Mahasiswa : 2327011007
Program Studi : Magister Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa tesis saya berjudul :

**” Optimasi dan Evaluasi *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) yang
Mengandung Senyawa Pembawa Copoly Eugenol Divinil Benzena 10%
untuk Transpor *Malachite Green* ”**

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, 17 Juli 2025
Yang menyatakan,



The image shows a handwritten signature in black ink over a yellow revenue stamp. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text 'METERA PEMPEL' and '6EAMX40T195693'.

Kharisma Citra Aprilia
NPM. 2327011007

RIWAYAT HIDUP

Penulis bernama lengkap Kharisma Citra Aprilia, lahir di Tanjung Bintang, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung pada tanggal 25 April 2001. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, pasangan Bapak Amin Nurdin dan Ibu Rismiyati. Penulis saat ini bertempat tinggal di Jalan Syamratulangi Gang Pisang RT. 16 LK. 1 Kelurahan Gedong Air, Kecamatan Tanjung Karang Barat, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung. Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Negeri 3 Gedong Air pada tahun 2012, kemudian melanjutkan pendidikan di MTs Negeri 2 Bandar Lampung dan lulus pada tahun 2015. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di SMK SMTI Bandar Lampung dan lulus pada tahun 2018. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan ke perguruan tinggi melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) di Universitas Lampung, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam pada Jurusan Kimia, dan berhasil meraih gelar Sarjana Sains (S.Si) pada tahun 2022. Pada tahun 2023, penulis melanjutkan studi ke jenjang magister.

Penulis melakukan penelitian sebagai bahan penyusunan tesis di Laboratorium Kimia Analitik dan Instrumentasi Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung. Penulis berhasil menyelesaikan pendidikan Magister pada bulan Juli tahun 2025 dengan tesis yang berjudul **Optimasi dan Evaluasi *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) yang Mengandung Senyawa Pembawa Copoly Eugenol Divinil Benzena 10% untuk Transpor *Malachite Green***. Selama menjadi mahasiswa, penulis belajar mengenai pengelolaan jurnal dan mendapat kepercayaan sebagai asisten editor di *Jurnal Analit: Analytical and Environmental Chemistry*. Penulis pernah menjadi pembicara (*oral presenter*) dan mendapatkan penghargaan sebagai *Best Presenter* pada seminar internasional, yaitu pada *The 1st*

International Conference on Medical Science and Health (ICOMESH) yang diselenggarakan oleh *Higher Education for Technology and Innovation (HETI) Project*, Universitas Lampung pada 2023 dengan judul "*Stability and Ability of 10% Copoly-Eugenol Divinyl Benzene for Phenol Transport Using Polymer Inclusion Membrane (PIM) Method*" dan pada *The 9th International Seminar in Sciences, Environment, and Education (ISSE)* yang diselenggarakan oleh Universitas Negeri Yogyakarta pada tahun 2024 dengan judul "*Transport Study of Malachite Green Using Polymer Inclusion Membrane (PIM) Method with Copoly-Eugenol Divinyl Benzene (Co-EDVB) as Carrier Compounds*".

Penulis telah mempublikasikan beberapa artikel ilmiah pada jurnal nasional dan internasional. Publikasi terbaru penulis di tahun 2025 berjudul "*Malachite Green Transport Using Polymer Inclusion Membrane Method with Co-EDVB as Carrier*" yang diterbitkan pada *Walisongo Journal of Chemistry*. Pada tahun yang sama, penulis juga mempublikasikan artikel berjudul "*Analysis of Nitrogen Dioxide as Air Pollutant in Office, Industrial, Residential, and Transportation Areas in Lampung Province*" pada *Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia (JKPK)*. Selain itu, pada tahun 2024 penulis telah mempublikasikan artikel internasional berjudul "*Evaluation of Polymer Inclusion Membrane Containing Copoly Eugenol Divinyl Benzene 10% as a Carrier for Phenol Transport*" pada *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*.



Dengan menyebut nama Allah yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang

Dengan mengucap
Alhamdulillah rabbil'alamin,
Kebahagiaan ini dapat kuraih. Kupersembahkan karya kecilku, buah manis
dari perjuangan dan jerih payahku kepada:

Kedua orang tuaku tersayang, Bapak Amin Nurdin dan Ibu Rismiyati,
yang telah memberikan kasih dan sayangnya 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, Sukma Adam Saka dan Mukhlis Al Ikhsan
Terima kasih untuk cinta dan dukungan yang telah kalian berikan.

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

Para sahabat dan teman seperjuanganku Magister Kimia 2023,
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-

“Abu Huraira reported Allah's Messenger (ﷺ) as saying: A strong believer is better and is more lovable to Allah than a weak believer....”

- Sahih Muslim, No. 2664-

“See beyond the eyes can see, believe beyond the inspiration”

-Felix Y. Siauw-

"People get so caught up in the fact that they have limits that they rarely exert the effort required to get close to them."

- James Clear

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

- A. A. Kiswandono

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan hidayah-Nya, tesis ini dapat diselesaikan dengan baik. Tesis yang berjudul “Optimasi dan Evaluasi *Polymer Inclusion Membran* (PIM) yang Mengandung Senyawa Pembawa Copoly Eugenol Divinil Benzena 10% untuk Transpor *Malachite Green*” 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 Prof. Dr. Hardoko Insan Qudus, M.S., 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. Ibu Prof. Dr. Kamisah Delilawati Pandiangan, M.Si., 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. Suharso, Ph.D., 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, terima kasih atas program Beasiswa S2 Bebas Uang Kuliah yang telah diberikan.
8. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, M.Si., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
9. Ibu Prof. Dr. Mita Rilyanti, M.Si., selaku Ketua Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
10. Ibu Prof. Dr. Dra. 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, 17 Juli 2025

Kharisma Citra Aprilia

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xxi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	8
1.3. Manfaat Penelitian.....	8
 II. TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1. <i>Malachite Green</i> (MG).....	9
2.2. Penanggulangan Limbah MG	11
2.3. Teknologi Membran Cair	13
2.4. <i>Polymer Inclusion Membrane</i> (PIM)	14
2.5. Copoly Eugenol Divinil Benzena (Co-EDVB).....	16
2.6. Analisis dan Karakterisasi	19
 III. METODE PENELITIAN	31
3.1. Waktu dan Tempat.....	31
3.2. Alat dan Bahan	31
3.3. Optimasi Transpor MG pada membran PIM	32
3.3.1. Pembuatan Membran PIM	32
3.3.2. Pembuatan Larutan Induk MG, Pembuatan Limbah Buatan, dan Pengukuran Konsentrasi MG dalam Fasa Sumber dan Fasa Penerima	33
3.3.3. Variasi pH MG pada fasa sumber.....	33

3.3.4.	Variasi Konsentrasi HNO_3 pada Fasa Penerima	34
3.3.5.	Variasi Ketebalan Membran	34
3.3.6.	Variasi Konsentrasi Senyawa Pembawa	35
3.3.7.	Variasi Waktu Transpor	35
3.3.8.	Studi Kompetisi Transpor MG pada Limbah Buatan	37
3.4.	Evaluasi Transpor MG pada Membran PIM	37
3.4.1.	Variasi Jenis Garam	37
3.4.2.	Variasi Konsentrasi Garam pada Fasa Sumber.....	38
3.4.3.	Variasi Konsentrasi Garam pada Fasa Penerima	38
3.4.4.	Pemakaian Berulang pada PIM.....	39
3.4.5.	Uji <i>Lifetime</i>	39
3.5.	Diagram Alir Penelitian.....	41
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	42
4.1.	Membran PIM Co-EDVB 10%	42
4.2.	Penentuan Panjang Gelombang MG.....	46
4.3.	Mekanisme Reaksi pada Proses Transpor MG	47
4.4.	Optimasi Transpor MG.....	48
4.4.1.	Variasi pH MG pada Fasa Sumber	48
4.4.2.	Variasi Konsentrasi HNO_3 pada Fasa Penerima.....	52
4.4.3.	Variasi Ketebalan Membran	55
4.4.4.	Variasi Konsentrasi Senyawa Pembawa.....	58
4.4.5.	Variasi Waktu Transpor.....	61
4.4.6.	Studi Kompetisi Transpor MG pada Limbah Buatan	65
4.5.	Evaluasi Transpor MG.....	69
4.5.1.	Variasi Jenis Garam	71
4.5.2.	Variasi Konsentrasi Garam pada Fasa Sumber.....	72
4.5.3.	Variasi Konsentrasi Garam pada Fasa Penerima	74
4.5.4.	Variasi Pemakaian Berulang pada Membran PIM.....	75
4.5.5.	Uji <i>Lifetime</i>	77
V.	SIMPULAN DAN SARAN	84
5.1.	Simpulan.....	84
5.2.	Saran.....	85
	DAFTAR PUSTAKA	86
	LAMPIRAN.....	94

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Karakteristik zat warna MG.....	11
2. Spesifik sifat fisik dan kimia eugenol.....	17
3. Penelitian sebelumnya.....	19
4. Bilangan gelombang dari berbagai jenis ikatan.....	25
5. Perbandingan massa komponen pembentuk membran (10:32:58).....	32
6. Variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	35
7. Massa total komponen, massa membran dan ketebalan membran PIM sebelum transpor.....	43
8. Perbandingan bilangan gelombang membran sebelum dan setelah transpor MG pada limbah buatan.....	68
9. Pengaruh pemakaian berulang terhadap konsentrasi MG yang tertranspor.....	76
10. <i>Lifetime</i> membran PIM.....	77
11. Perbandingan bilangan gelombang hasil FTIR membran PIM sebelum dan sesudah transpor.....	81
12. Absorbansi larutan standar MG pada variasi pH MG fasa sumber.....	104
13. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pH MG.....	104
14. Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pH MG.....	105
15. Absorbansi larutan standar MG pada variasi fasa penerima pada variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	106
16. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	106
17. Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	107
18. Absorbansi larutan standar MG pada variasi ketebalan membran.....	107
19. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi ketebalan membran.....	108

20.	Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi ketebalan membran.....	109
21.	Absorbansi larutan standar MG pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	109
22.	Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	110
23.	Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	110
24.	Absorbansi larutan standar MG pada variasi waktu.....	111
25.	Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi waktu.....	111
26.	Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi waktu.....	112
27.	Absorbansi larutan standar MG pada studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan.....	112
28.	Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan.....	113
29.	Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada studi transpor MG pada limbah buatan.....	114
30.	Absorbansi larutan standar MG pada variasi jenis garam.....	114
31.	Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi jenis garam.....	115
32.	Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi jenis garam.....	115
33.	Absorbansi larutan standar MG pada variasi konsentrasi garam pada fasa sumber.....	116
34.	Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi variasi konsentrasi garam pada fasa sumber.....	116
35.	Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi garam pada fasa sumber.....	117
36.	Absorbansi larutan standar MG pada variasi konsentrasi garam pada fasa penerima.....	117
37.	Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi garam pada fasa penerima.....	119
38.	Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi garam pada fasa penerima.....	119
39.	Absorbansi larutan standar MG pada variasi pemakaian berulang.....	119
40.	Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pemakaian berulang (tanpa pencucian).....	120
41.	Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pemakaian berulang (tanpa pencucian)....	120
42.	Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pemakaian berulang (pencucian dengan akuades).....	121
43.	Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pemakaian berulang (pencucian dengan akuades).....	121

44. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pemakaian berulang (pencucian dengan larutan HNO ₃ 1M).....	122
45. Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pemakaian berulang (pencucian dengan larutan HNO ₃ 1M).....	122
47. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi pH fasa sumber...	129
48. Massa membran setelah transpor MG variasi pH fasa sumber.....	129
49. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi fasa sumber.....	129
50. Massa membran sebelum transpor MG variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	130
51. Massa membran setelah transpor MG variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	130
52. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	131
53. Membran sebelum transpor MG pada variasi ketebalan membran.....	131
54. Massa membran setelah transpor MG variasi ketebalan membran.....	132
55. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi ketebalan membran.....	132
56. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	133
57. Massa membran setelah transpor MG pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	133
58. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	133
59. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi waktu transpor....	134
60. Massa membran setelah transpor MG pada variasi waktu transpor.....	135
61. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi waktu transpor.....	135
62. Massa membran sebelum studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan.....	135
63. Massa membran setelah transpor MG pada studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan.....	136
64. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan.....	136
65. Massa membran sebelum studi kompetisi transpor MG pada variasi jenis garam.....	137
66. Massa membran setelah transpor MG pada studi kompetisi transpor MG pada variasi jenis garam.....	137
67. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi studi kompetisi transpor MG pada variasi jenis garam.....	137
68. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi konsentrasi garam pada fasa sumber.....	138
69. Massa membran setelah transpor MG pada variasi garam pada fasa sumber.....	138

70. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi studi kompetisi transpor MG pada variasi konsentras garam pada fasa sumber.....	139
71. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi konsentrasi garam pada fasa penerima.....	139
72. Massa membran setelah transpor MG pada variasi konsentrasi garam pada fasa penerima.....	140
73. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi pada variasi konsentrasi garam pada fasa penerima.....	140
74. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi pemakaian berulang (tanpa pencucian).....	141
75. Massa membran setelah transpor MG pada variasi pemakaian berulang (tanpa pencucian).....	141
76. LM <i>loss</i> (%) transpor MG pada variasi pemakaian berulang (tanpa pencucian).....	141
77. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi pemakaian berulang (pencucian dengan akuades).....	142
78. Massa membran setelah transpor MG pada variasi pemakaian berulang (pencucian dengan akuades).....	142
79. LM <i>loss</i> (%) transpor MG pada variasi pemakaian berulang (pencucian dengan akuades).....	143
80. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi pemakaian berulang (pencucian dengan larutan HNO ₃ 1M).....	143
81. Massa membran setelah transpor MG pada variasi pemakaian berulang (pencucian dengan larutan HNO ₃ 1M).....	144
82. LM <i>loss</i> (%) transpor MG variasi pemakaian berulang (pencucian dengan larutan HNO ₃ 1M).....	144
83. Ketebalan membran PIM pada variasi pH fasa sumber.....	145
84. Ketebalan membran sebelum transpor pada variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	145
85. Ketebalan membran sebelum transpor pada variasi ketebalan membran.....	145
86. Ketebalan membran sebelum transpor pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	145
87. Ketebalan membran sebelum transpor pada variasi waktu transpor.....	146
88. Ketebalan membran sebelum transpor pada studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan.....	146
89. Ketebalan membran sebelum transpor pada studi kompetisi transpor MG pada variasi jenis garam.....	146
90. Ketebalan membran sebelum transpor pada variasi konsentrasi garam pada fasa sumber.....	146
91. Ketebalan membran sebelum transpor pada variasi konsentrasi garam pada fasa penerima.....	147
92. Ketebalan membran sebelum transpor pada variasi pemakaian berulang (tanpa pencucian).....	147
93. Ketebalan membran sebelum transpor pada variasi pemakaian berulang (pencucian dengan akuades).....	147

94. Ketebalan membran sebelum transpor pada variasi pemakaian berulang (pencucian dengan larutan HNO_3 1M).....	147
95. Data pengamatan pH <i>lifetime</i> (tanpa penambahan garam).....	148
96. Data pengamatan pH <i>lifetime</i> (HNO_3).....	148
97. Data pengamatan pH <i>lifetime</i> (NaCl).....	149
98. Data pengamatan pH <i>lifetime</i> (KNO_3).....	149
99. Data pengamatan pH <i>lifetime</i> (Na_2SO_4).....	150

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Struktur MG.....	9
2. Struktur senyawa eugenol.....	16
3. Prediksi struktur Co-EDVB.....	18
4. Skema SEM.....	20
5. Hamburan elektron yang jatuh pada lembaran tipis.....	21
6. Hasil SEM membran PIM sebelum transpor (a) 3000x, (b) 500x dan setelah transpor (c) 3000x, (d) 500x.....	22
7. Hasil SEM membran PIM polieugenol (a) sebelum transpor dan (b) setelah transpor.....	23
8. Skema peralatan FTIR.....	24
9. Spektra IR dari membran PIM yang mengandung polieugenol (a) sebelum transpor (b) setelah transpor.....	26
10. Skema alat spektrofotometer UV-Vis.....	29
11. Pengaruh pH terhadap konsentrasi MG tertranspor.....	30
12. Pengaruh waktu transpor terhadap konsentrasi MG tertranspor.....	30
13. Diagram alir penelitian.....	41
14. Membran PIM yang mengandung Co-EDVB 10% (a) T ₂₇ (b) T ₅₄ (c) T ₁₀₈	43
15. Morfologi permukaan membran PIM (a) sebelum transpor perbesaran 500x dan (b) sebelum transpor perbesaran 1000x (c) setelah transpor perbesaran 500x (d) setelah transpor perbesaran 1000x pada waktu transpor optimum (12 jam).....	44
16. Panjang gelombang maksimum MG.....	46
17. Proses disosiasi dan pertukaran ion pada antarmuka membran.....	47
18. Pembentukan ikatan hidrogen antara MG ⁺ dengan Co-EDVB dan proses pelepasan MG ⁺ oleh ion H ⁺ dari HNO ₃ melalui pertukaran ion di fasa penerima.....	48

19.	Pengaruh pH MG pada fasa sumber terhadap konsentrasi MG yang tertransport (%MG pada fasa sumber: konsentrasi MG pada fasa sumber; % Removal: konsentrasi MG pada fasa membran dan fasa penerima).....	49
20.	Spektra FTIR membran (a) sebelum transpor (b) setelah transpor variasi pH pada fasa sumber.....	51
21.	Pengaruh konsentrasi HNO_3 pada fasa penerima terhadap konsentrasi MG yang tertransport.....	53
22.	Spektra FTIR membran (a) sebelum transpor (b) setelah transpor variasi konsentrasi HNO_3 pada fasa penerima.....	54
23.	Pengaruh ketebalan membran terhadap konsentrasi MG yang tertransport..	56
24.	Spektra FTIR membran (a) sebelum transpor (b) setelah transpor variasi ketebalan membran.....	57
25.	Pengaruh konsentrasi senyawa pembawa terhadap konsentrasi MG yang tertransport.....	59
26.	Spektra FTIR membran (a) sebelum transpor (b) setelah transpor variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	60
27.	Pengaruh waktu transpor terhadap konsentrasi MG yang tertransport.....	61
28.	Spektra FTIR membran (a) sebelum transpor (b) setelah transpor variasi waktu transpor.....	64
29.	Perbandingan konsentrasi MG, logam Pb(II), dan logam Cu(II) pada kompetisi transpor MG.....	66
30.	Perbandingan spektra FTIR membran (a) membran sebelum transpor (b) MG (Kontrol) (c) MG + Pb(II) (d) MG + Cu(II) (e) MG + Pb(II) + Cu(II)	67
31.	Analisis EDX untuk meneliti perubahan komposisi elemen membran setelah proses transpor MG pada limbah buatan	70
32.	Pengaruh jenis garam terhadap konsentrasi MG yang tertransport.....	71
33.	Pengaruh konsentrasi HNO_3 pada fasa sumber terhadap konsentrasi MG yang tertransport.....	73
34.	Pengaruh konsentrasi HNO_3 pada fasa penerima terhadap konsentrasi MG yang tertransport.....	74
35.	Pengaruh pemakaian berulang terhadap konsentrasi MG yang tertransport.....	76
36.	Grafik pengukuran pH <i>lifetime</i>	79
37.	Perbandingan spektra IR (a) sebelum transpor (b) sesudah transpor tanpa penambahan garam (c) sesudah transpor dengan NaNO_3 (d) sesudah transpor dengan Na_2SO_4 (e) sesudah transpor penambahan NaCl (f) sesudah transpor penambahan KNO_3	81
38.	Kurva kalibrasi MG pada variasi pH MG fasa sumber.....	105
39.	Kurva kalibrasi konsentrasi HNO_3 pada variasi fasa penerima.....	107
40.	Kurva kalibrasi MG pada variasi ketebalan membran.....	109
41.	Kurva kalibrasi MG pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	110
42.	Kurva kalibrasi MG pada variasi waktu.....	112

43.	Kurva kalibrasi MG pada studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan.....	114
44.	Kurva kalibrasi MG pada variasi jenis garam.....	115
45.	Kurva kalibrasi MG pada variasi konsentrasi garam pada fasa sumber.....	117
46.	Kurva kalibrasi MG pada variasi konsentrasi garam pada fasa penerima....	119
47.	Kurva kalibrasi MG pada pemakaian berulang.....	120
48.	% LM <i>loss</i> pada variasi pH fasa sumber.....	131
49.	% LM <i>loss</i> pada variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	132
50.	% LM <i>loss</i> pada variasi ketebalan membran.....	133
51.	% LM <i>loss</i> pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	135
52.	% LM <i>loss</i> pada variasi waktu transpor.....	136
53.	% LM <i>loss</i> pada variasi studi kompetisi logam pada limbah buatan.....	137
54.	% LM <i>loss</i> pada variasi jenis garam.....	139
55.	% LM <i>loss</i> pada variasi konsentrasi garam pada fasa sumber.....	140
56.	% LM <i>loss</i> pada variasi konsentrasi garam pada fasa penerima.....	141
57.	% LM <i>loss</i> pada variasi pemakaian berulang (tanpa pencucian).....	143
58.	% LM <i>loss</i> pada pemakaian berulang (pencucian dengan akuades).....	144
59.	% LM <i>loss</i> pemakaian berulang (pencucian dengan larutan HNO ₃ 1M.....	145
60.	(a) Cetakan membran (b) membran PIM sebelum transpor (c) membran PIM setelah transpor.....	152
61.	Transpor MG (a) sebelum transpor (b) setelah transpor.....	152
62.	Rangkaian <i>chamber</i> untuk transpor MG.....	153

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pesatnya perkembangan sektor industri dapat menimbulkan masalah serius, seperti kerusakan sumber daya alam dan pencemaran lingkungan akibat meningkatnya jumlah limbah yang dihasilkan dari berbagai aktivitas industri. Selain mencemari lingkungan, zat pewarna juga berbahaya bagi keanekaragaman hayati dan dapat mengganggu kesehatan manusia karena dapat menyebabkan iritasi kulit, iritasi mata, kanker, serta berpotensi menimbulkan mutasi. Banyak industri memilih menggunakan pewarna sintetis karena kemudahan dalam proses produksi, biaya yang lebih efisien, kekuatan warna yang tinggi, stabilitas terhadap cahaya, serta ketahanannya terhadap biooksidasi aerobik dibandingkan dengan pewarna alami (Ling and Suah, 2017). Salah satu sumber limbah zat warna yang bersifat *non-biodegradable* adalah industri tekstil (Hani'ah dkk., 2020).

Limbah tekstil mengandung berbagai zat berbahaya seperti pewarna, nitrat, asam asetat, sabun, senyawa kromium, serta logam berat seperti arsenik, timbal, tembaga, kadmium, merkuri, nikel, dan kobalt yang membuat limbah ini sangat beracun dan bersifat karsinogenik bagi makhluk hidup (Soo *et al.*, 2021). Saat ini, sekitar 10.000 jenis pewarna tersedia secara komersial, dan sekitar 800.000 ton pewarna sintetis diproduksi setiap tahunnya untuk memenuhi kebutuhan industri tekstil di seluruh dunia. Namun, proses pewarnaan yang tidak efisien menyebabkan sekitar 10-15% pewarna terbuang ke lingkungan, yang pada akhirnya menjadi limbah berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan makhluk hidup (Chequer *et al.*, 2013). Senyawa berwarna yang terkandung dalam limbah

industri sangat mudah terlihat dan menjadi salah satu jenis pencemaran yang umum. Berbagai industri seperti percetakan, kertas, tekstil, dan *laundry* hingga saat ini masih menggunakan ribuan jenis pewarna komersial, termasuk *malachite green* (MG). Secara global, produksi pewarna tersebut diperkirakan mencapai sekitar 7×10^5 ton setiap tahunnya (Naushad *et al.*, 2016; Roy *et al.*, 2012).

MG merupakan salah satu pewarna sintetis yang memiliki tingkat kecerahan tertinggi dibandingkan dengan zat warna bahan celup lainnya. Kelompok amino dan imino dalam MG bekerja sama dengan asam, seperti asam klorida, untuk membunuh bakteri dan parasit gram negatif. Pewarna ini masih banyak digunakan di berbagai belahan dunia karena harganya terjangkau, kemudahan penggunaannya, dan efek warna yang menarik (Hani'ah dkk., 2020). Berdasarkan peraturan dari US *Food and Drug Administration* dan Keputusan Menteri Kelautan dan Perikanan No. 52/KEPMEN-KP/2014 tentang klasifikasi obat ikan, MG termasuk dalam kategori obat keras yang dilarang karena merupakan zat pewarna yang berbahaya. Pembuangan limbah MG ke sistem perairan dapat menyebabkan perubahan warna yang menghambat penembusan cahaya matahari menembus ke dalam air, sehingga mengancam kehidupan organisme perairan. Senyawa nitrogen dalam MG bersifat karsinogenik, genotoksik, mutagenik, dan teratogenik (Bouraie, 2015). Kehadiran MG dalam air juga menyebabkan efek seperti mutagenesis, teratogenesitas, kromosom, dan toksisitas (Ling and Suah, 2017). Toksisitas pewarna ini meningkat seiring dengan waktu paparan, suhu, dan konsentrasi MG. Kadar MG yang diperbolehkan di perairan adalah 0,01 ppm, tetapi karena potensi bahaya, kandungan MG harus dikurangi melalui pengolahan limbah (Mohammed *et al.*, 2023).

MG bersifat karsinogenik karena dapat berinteraksi langsung dengan DNA dalam tubuh manusia dan memicu mutasi genetik yang berpotensi menyebabkan kanker. Setelah masuk ke dalam tubuh, MG dimetabolisme menjadi *leuco malachite green* (LMG) yang stabil dan mudah terakumulasi dalam jaringan. MG dan LMG dapat masuk ke inti sel dan menyelip di antara pasangan basa DNA, sehingga mengganggu struktur DNA dan menghambat proses replikasi serta transkripsi.

MG juga dapat membentuk ikatan kovalen dengan basa nitrogen yang bersifat nukleofilik, terutama pada posisi N7 guanin dan N3 adenin, sehingga terbentuk DNA *adduct* yang dapat memicu mutasi jika tidak diperbaiki oleh sistem perbaikan DNA tubuh. Selain itu, MG meningkatkan produksi *reactive oxygen species* (ROS) yang merusak DNA, protein, dan membran sel. Kerusakan ini menimbulkan patahan rantai DNA, perubahan basa, dan ketidakstabilan genetik yang dapat mengaktifkan gen pemicu kanker atau menonaktifkan gen penekan tumor. Paparan MG dalam jangka panjang terbukti dapat menyebabkan fragmentasi DNA, pembentukan mikronuklei, serta proliferasi sel tidak terkontrol yang berujung pada kanker (Donya *et al.*, 2012; Stamatii *et al.*, 2005).

Berbagai cara telah dikembangkan untuk mengolah limbah MG, seperti adsorpsi oleh *biochar* mikroalga (Pathy *et al.*, 2022), degradasi warna oleh aktivitas fotokatalitik dari FA-Ag₂O NAP (Mazumder *and* Ruma, 2022), degradasi secara ozonolisis dengan penambahan katalis TiO₂ (Bhernama, 2017), pemisahan MG menggunakan metode *polymer inclusion membrane* (PIM) (Ling *and* Suah, 2017), dan telah banyak dilakukan penguraian zat warna MG seperti koagulasi, flokulasi, adsorpsi, dan karbon aktif. Namun, proses tersebut hanya memindahkan zat pencemar (kontaminan) dari satu fasa ke fasa yang lain, sehingga meninggalkan masalah yang belum diselesaikan. Selain itu, perlakuan konvensional seperti ini tidak efektif untuk mengolah air limbah tersebut karena beberapa cincin benzena memiliki ketahanan yang tinggi terhadap perlekatan mikroba, fiksasi dan tahan luntur (stabilitas dalam cahaya dan pencucian) (Bhernama, 2017).

Salah satu teknik efektif yang dapat dilakukan untuk pemisahan MG adalah menggunakan teknologi pemisahan berbasis membran cair. Ada beberapa jenis utama membran cair, yaitu *bulk liquid membrane* (BLM), *emulsion liquid membrane* (ELM), *supported liquid membrane* (SLM), dan *polymer inclusion membrane* (PIM) (Ling *and* Suah, 2017). Metode membran cair PIM banyak digunakan karena mempunyai spektra pemisahan yang luas, selektif, mudah dilakukan, kebutuhan energinya sangat minimum, sederhana, praktis, mengesktraksi spesies logam dan nonlogam secara selektif, dapat mengurangi

jumlah bahan kimia yang digunakan dan menghasilkan komposisi membran yang fleksibel (Bonggotgetsakul *et al.*, 2013; Rensini dkk., 2024).

PIM merupakan salah satu metode membran cair yang mampu atau dapat meningkatkan kestabilan membran karena dua hal, yaitu adanya polimer dasar dan *plasticizer*. Polimer dasar misalnya *polyvinyl chloride* (PVC) pada membran diharapkan dapat mengatasi kebocoran dari senyawa pembawa. *Plasticizer* misalnya dibenzil eter (DBE) pada membran berfungsi untuk membuat sistem membran menjadi lebih stabil (Kiswando *et al.*, 2024). Selektifitas dan kemampuan transpor untuk transpor merupakan topik yang berkembang pada penelitian berbasis membran cair ini. Penelitian berbasis membran cair ini akan berkembang di masa yang akan datang dan diminati oleh banyak peneliti. Teknologi membran cair merupakan gabungan dari metode ekstraksi cair-cair dengan tahap penerimaan dalam satu kali proses yang berkelanjutan. Senyawa yang diekstraksi merupakan larutan yang larut dalam air, dan dapat berada dalam keadaan diam atau mengalir di antara dua larutan, yaitu fasa sumber dan fasa penerima. Fasa sumber, fasa penerima dan fasa membran pada banyak eksperimen merupakan larutan cair, khususnya pada fasa membran yang merupakan senyawa organik. Cairan organik ini biasanya berada di dalam pori-pori kecil suatu polimer pendukung (Kiswando *et al.*, 2022).

Kelebihan PIM dibandingkan metode lainnya diantaranya adalah senyawa pembawa yang dibutuhkan sedikit dan memiliki kestabilan yang tinggi (Vazquez *et al.*, 2014). Selain itu, senyawa pembawa yang hilang selama proses dapat diabaikan, fluks yang lebih tinggi, pengoperasian yang sederhana serta lebih serbaguna (Kaczorowska *et al.*, 2022). Keunggulan tersebut diminati oleh banyak peneliti seperti Benosmane *et al.* (2018) yang mencapai % *recovery* fenol dengan metode PIM hingga 95% yang bergantung dengan kondisi pH optimum. Selain itu Almeida *et al.* (2017) memberikan tinjauan tentang aplikasi kimia dari metode PIM untuk pemisahan sampel. Cho *et al.* (2018) melakukan pembersihan tiosianat dalam air tambang emas dengan metode PIM memiliki efisiensi pemisahan hingga 99% selama 45 hari, dan Soo *et al.* (2021) membuat membran PIM dengan

komposisi PVDF-Co-HFP, B₂EHP, DOP, dan THF mampu mengekstraksi MG. Keunggulan lain yang menjadi alasan pemilihan metode PIM dalam penelitian ini adalah kemampuannya menghasilkan efisiensi transpor yang lebih baik, sehingga limbah cair hasil proses transpor dengan kadar MG yang sudah di bawah ambang batas dapat dibuang ke perairan tanpa membahayakan lingkungan. Selain itu, MG yang berhasil ditranspor ke fasa penerima dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan pewarna, misalnya untuk industri tekstil (*reusable*). Membran PIM yang digunakan juga dapat dicuci dan digunakan ulang, serta umur pemakaiannya (*lifetime*) dapat ditingkatkan, sehingga PIM menjadi metode yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan (Kiswandono *et al.*, 2024).

Senyawa pembawa memainkan peran penting dalam metode membran cair dan menentukan kinerja pemisahan (Mohammed *et al.*, 2023). Salah satu senyawa pembawa berbasis senyawa bahan alam adalah senyawa yang dihasilkan dari polimerisasi eugenol (Kiswandono *et al.*, 2022). Eugenol memiliki tiga gugus fungsional, yaitu gugus alil, hidroksi, dan metoksi, sehingga eugenol dapat digunakan sebagai bahan awal untuk sintesis senyawa baru. Gugus alil pada eugenol dapat dipolimerisasi menjadi polieugenol (Kowalewska dan Majewska, 2023). Berbagai polimer sebagai senyawa pembawa telah digunakan dengan beberapa metode membran cair ini diantaranya adalah *dioctyl phthalate* (DOP) (Soo *et al.*, 2021), *di(2-ethylhexyl) phosphoric acid* (D₂EHFA) (Raval *et al.*, 2022), polieugenol (Kiswandono *et al.*, 2024) dan *2-aminomethylpyridine* (Qiu *et al.*, 2021).

Polimerisasi dilakukan untuk peningkatan berat molekul suatu polimer yang terbentuk ini memenuhi syarat sebagai membran karena memiliki berat molekul yang tinggi, memiliki sisi aktif –OH dan cincin benzena, sehingga mampu berfungsi sebagai media transpor yang selektif. Polieugenol yang diperoleh tanpa taut silang akan memiliki berat molekul yang lebih rendah dibandingkan polieugenol yang dihasilkan melalui taut silang (Kiswandono *et al.*, 2024). Tujuan polimerisasi dengan menggunakan senyawa diena dan epoksida adalah untuk mendapatkan struktur tertaut silang pada akhirnya. Polimerisasi eugenol

atau polieugenol dengan suatu agen taut silang akan meningkatkan berat molekul polimer yang dihasilkan (Kowalewska *and* Majewska, 2023), sehingga akan mempengaruhi kemampuan membran dalam interaksi dengan senyawa target. Polimer hasil sintesis ini akan memiliki berat molekul yang besar, sehingga akan memiliki sisi aktif (gugus –OH dan cincin benzena) lebih banyak. Peningkatan sisi aktif pada polimer hasil sintesis ini diharapkan dapat meningkatkan kecepatan transpor sehingga proses transpor lebih cepat dan efisien. Reaksi polimerisasi vinil sebagian besar adalah polimerisasi adisi.

Polimerisasi adisi ini hanya terjadi pada ujung rantai yang memiliki ikatan rangkap dua sehingga dapat dihasilkan berat molekul yang tinggi. DVB adalah senyawa diena yang dapat mengalami polimerisasi adisi. Ikatan rangkap dua pada senyawa diena ini mempunyai sifat reaktif sehingga proses sintesis dapat dilakukan pada suhu kamar dan hasil sintesis berupa senyawa pembawa Copoly Eugenol Divinil Benzena (Co-EDVB). Co-EDVB berfungsi sebagai senyawa pembawa saat membran cair dibuat, sehingga dapat digunakan dalam proses pemisahan MG dengan menggunakan membran cair. Proses ini didasarkan pada perbedaan kelarutan MG dalam fasa larutan dan fasa organik. Hal ini sesuai dengan definisi membran cair, yaitu lapisan cair tipis yang semipermeabel yang memisahkan dua fasa cair atau dua fasa gas. Senyawa pembawa tetap berada di dalam membran dan dapat bergerak jika membran cair telah diubah menjadi lebih tipis (Carner *et al.*, 2020).

Penelitian oleh Soo *et al.*, (2021) menunjukkan bahwa transpor MG menggunakan metode PIM dengan senyawa pembawa B₂EHP mencapai hasil optimum dengan % *removal* sebesar 97%. Ashraf *et al.* (2019) juga melaporkan bahwa metode SLM mampu mencapai % *removal* MG sebesar 90%. Sedangkan, Raval *et al.* (2022) menggunakan metode ELM dengan senyawa pembawa D₂EHPA, yang mencapai % *removal* sebesar 94,99%. Oleh karena itu, penelitian ini berinovasi dengan menggunakan jenis senyawa pembawa yang berbeda, yaitu Co-EDVB 10% yang belum banyak dikaji sebelumnya. Co-EDVB 10% dipilih sebagai senyawa pembawa karena mengandung agen *crosslinker* DVB, yang

dikenal sebagai senyawa diena dengan potensi untuk meningkatkan jumlah sisi aktif pada polimer. Hal ini didasarkan pada asumsi bahwa peningkatan jumlah sisi aktif suatu polimer dapat diperoleh dengan meningkatkan berat molekulnya (Anisa dkk., 2016). Penggunaan Co-EDVB 10% diharapkan mampu meningkatkan efektivitas proses transpor MG, terutama dalam hal efisiensi transpor. Selain itu, metode PIM dipilih dalam penelitian ini karena berdasarkan bukti dari penelitian sebelumnya, metode ini terbukti lebih efisien untuk transpor MG, ditunjukkan dengan % *removal* yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode lainnya. Penelitian ini juga mencakup optimasi proses transpor untuk menentukan kondisi optimum, serta evaluasi stabilitas membran PIM dalam proses transpor MG, sehingga dapat memberikan wawasan baru mengenai keandalan dan daya guna metode ini dalam aplikasi praktis.

Berdasarkan teori yang dijelaskan sebelumnya bahwa peningkatan berat molekul suatu polimer dapat meningkat sisi aktif pada senyawa pembawa sehingga dapat meningkatkan stabilitas dan kemampuan membran PIM, maka pada penelitian ini telah dilakukan uji optimasi dan evaluasi membran menggunakan metode PIM dengan senyawa pembawa Co-EDVB 10% untuk transpor MG, dengan harapan semakin besar konsentrasi senyawa pembawa maka stabilitas dan kemampuan membran yang dihasilkan lebih optimal. Uji optimasi membran PIM meliputi variasi pH pada fasa sumber, variasi konsentrasi HNO_3 pada fasa penerima, variasi ketebalan membran, variasi konsentrasi senyawa pembawa, dan variasi waktu transpor, serta aplikasi transpor MG melalui studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan. Sedangkan uji evaluasi membran PIM meliputi variasi jenis garam, variasi 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 optimasi membran PIM yang mengandung Co-EDVB 10% untuk transpor MG dengan parameter variasi pH pada fasa sumber, variasi konsentrasi HNO_3 pada fasa penerima, variasi ketebalan, variasi waktu transpor, serta aplikasi transpor MG melalui studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan.
2. Melakukan uji evaluasi membran PIM yang mengandung Co-EDVB 10% untuk transpor MG meliputi variasi jenis garam, variasi konsentrasi garam pada fasa sumber dan fasa penerima, uji pemakaian berulang, dan uji *lifetime*.
3. Melakukan karakterisasi membran PIM yang mengandung Co-EDVB 10% sebelum dan sesudah transpor menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dan *Scanning Elektron Microscope-Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX).

1.3. Manfaat Penelitian

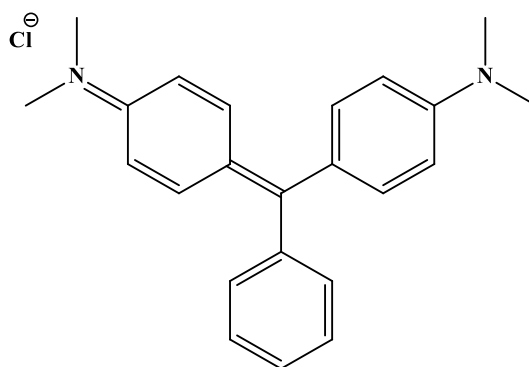
Adapun manfaat dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengoptimalkan pemanfaatan senyawa alam eugenol sebagai kontribusi dalam upaya pengurangan limbah MG menggunakan metode PIM dengan senyawa pembawa Co-EDVB 10%.
2. Memberi manfaat terhadap instansi pendiri industri yang menghasilkan buangan limbah, dalam melakukan pengolahan air yang tercemar oleh polutan MG sehingga pengelola dapat mengolah limbah secara mandiri dalam mengurangi pencemaran terhadap lingkungan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Malachite Green* (MG)

MG memiliki nama lain 4-[(4-dimetilaminofenil)-fenil-metil]-N,N- dimetil-anilin, merupakan senyawa kimia yang memiliki rumus molekul $C_{23}H_{25}ClN_2$ dengan berat molekul sebesar 364,911 g/mol. MG adalah senyawa organik yang digunakan sebagai zat warna kontroversial sebagai antimikroba dalam akuakultur. MG diklasifikasikan dalam industri zat warna sebagai pewarna *triamethane* dan juga digunakan dalam industri pigmen secara tradisional digunakan sebagai pewarna bahan seperti sutra, kulit, dan kertas. MG yang digunakan sebagai anti protozoa pada ikan akan tetapi bersifat racun akut dan kronis, karsinogenesis, dan mutagenesis. Resiko yang terjadi berupa kerusakan sistem kekebalan tubuh dan sistem reproduksi. Selain itu, MG juga menyebabkan bahaya kesehatan umum dan masalah potensial lingkungan (Bhernama, 2017). MG memiliki struktur seperti Gambar 1.



Gambar 1. Struktur MG

Zat warna MG dapat menimbulkan efek berbahaya apabila tercampur dalam lingkungan perairan. Limbah cair berwarna MG sangat membahayakan ekosistem perairan karena dapat merusak hati, insang, ginjal, dan usus hewan laut (Abu-Hussien *et al.*, 2022). Zat warna MG juga diketahui sangat beracun terhadap sel mamalia dan berpotensi menyebabkan tumor. Namun, meskipun sejumlah penelitian menunjukkan bahwa zat warna ini sangat toksik dan berbahaya, MG masih digunakan dalam akuakultur dan industri tekstil (Handri *et al.*, 2022).

Selama proses industri tekstil, hingga 50% pewarna hilang setelah proses pencelupan karena interaksi yang buruk antara molekul pewarna dan serat kain dan sekitar 10- 15% dari zat warna tersebut dibuang ke limbah air industri. Oleh karena itu, sejumlah besar pewarna datang ke aliran limbah dan mencemari perairan. Namun, air limbah yang mengandung pewarna sangat sulit untuk diolah, karena pewarna adalah molekul organik yang memiliki ketahanan terhadap pencernaan aerobik dan stabil terhadap cahaya, panas dan oksidator. Salah satu contohnya adalah pewarna MG, pewarna ini banyak digunakan dalam industri tekstil untuk pencelupan, desinfektan medis dan obat cacing, juga digunakan dalam akuakultur dan peternakan sebagai agen terapi antijamur, antibakteri, antiparasit (Kaczorowska *et al.*, 2022).

Akumulasi zat warna MG dalam tubuh makhluk hidup dapat mempengaruhi sistem kekebalan tubuh, sistem reproduksi dan bersifat karsinogenik serta genotoksik. Meskipun penggunaan pewarna ini telah dilarang di beberapa negara dan dilarang oleh US *Food and Drug Administration*, namun masih digunakan di banyak belahan dunia. Hal ini karena harganya murah, mudah ditemukan, dan efek yang dihasilkan menarik. Batas konsentrasi MG yang diperbolehkan di perairan adalah 0,01 ppm (Hani'ah dkk., 2020). Hasil tes laboratorium menunjukkan bahwa tikus yang memakan MG pada konsentrasi 100 ppm selama lebih dari 2 tahun menunjukkan adanya tanda-tanda tumor. Saat ini MG telah menjadi senyawa yang sangat kontroversial karena risiko yang ditimbulkannya bagi konsumen ikan yang diolah termasuk efeknya pada sistem kekebalan tubuh, sistem reproduksi, sifat genotoksik, dan sifat karsinogenik. Hal ini dapat

menyebabkan efek parah pada sistem saraf, sistem reproduksi, hati, otak, dan ginjal. Penelitian yang dilakukan Ling *and* Suah (2017) mengenai degradasi MG menggunakan metode PIM menunjukkan bahwa rata-rata persen efisiensi ekstraksi yang dicapai untuk MG adalah sebesar >98% dan >96%. Adapun sifat fisiokimia zat warna MG dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik zat warna MG

Karakteristik		Keterangan
Rumus molekul		$C_{23}H_{25}ClN_2$
Berat molekul		364,9 g/mol
pH		5
Nama IUPAC	4- {[4-(Dimetilamino)fenil](fenil)metilidena}- N , N -dimetilsiklohexa-2,5-dien-1-iminium klorida	
λ_{max}		617 nm
Warna		Hijau

2.2. Penanggulangan Limbah MG

Salah satu metode penanganan limbah MG adalah degradasi yang dilakukan dengan metode ozonolisis (Bhernama, 2017). Proses ini dilakukan dengan menggunakan katalis TiO_2 -anatase dan ZnO. Residu MG disentrifugasi dan diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada 200-800 nm setelah degradasi. Selanjutnya, diozonolisis MG 6 mg/L selama 5 menit diperoleh pH optimum pada pH 7,6 lalu ditambahkan katalis TiO_2 -anatase 0,025 mg, dan ZnO 0,025 mg pada pH 7 dengan variasi waktu didapatkan waktu optimum 5 menit. Degradasi dengan penambahan TiO_2 -anatase lebih besar daripada penambahan ZnO, karena stabilitas TiO_2 -anatase yang besar. Selanjutnya, dengan metode absorpsi zat pewarna tekstil MG menggunakan adsorben kulit buah kakao (*Theobroma cacao*) teraktivasi HNO_3 dilakukan dengan tujuan untuk bahwa limbah kulit kakao dapat digunakan sebagai adsorben zat warna tekstil MG, sifat adsorpsi zat warna tekstil MG oleh adsorben dari kulit kakao, waktu kontak

optimum adsorben kulit kakao terhadap zat warna MG, dan massa optimum adsorben kulit kakao terhadap zat warna MG. Adsorben yang digunakan adalah kulit kakao berukuran 100 *mesh* yang telah diaktivasi dengan larutan HNO_3 0,6 M. Penentuan kondisi optimal dilakukan dengan variasi massa adsorben sebesar 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; dan 0,30 gram. Variasi waktu kontak yang digunakan adalah 10, 20, 30, 40, 50, dan 60 menit. Variasi konsentrasi larutan zat warna yang digunakan adalah 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 ppm. Volume larutan zat warna yang digunakan untuk setiap variasi adalah 25 mL. Pengumpulan data dilakukan menggunakan metode spektrofotometri UV-Vis. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sukmawati dan Utami (2014), diketahui bahwa:

- a. Kulit kakao (*Theobroma cacao*) dapat digunakan sebagai adsorben zat warna tekstil MG
- b. Massa optimum yang dibutuhkan adsorben kulit kakao untuk menyerap zat warna tekstil MG adalah 0,25 g
- c. Waktu kontak optimum yang dibutuhkan adsorben kulit kakao untuk menyerap zat tekstil MG adalah 40 menit. Zat adsorpsi warna tekstil MG oleh adsorben kulit kakao adalah adsorpsi kimia (Sukmawati dan Utami, 2014).

Namun, metode ini kurang efektif karena zat warna yang diadsorpsi tersebut masih terakumulasi di dalam adsorben yang pada suatu saat nanti akan menimbulkan permasalahan baru. Berbagai cara lain yang telah dikembangkan untuk mengolah limbah MG, seperti adsorpsi oleh *biochar* mikroalga (Pathy *et al.*, 2022), serta degradasi warna MG oleh aktivitas fotokatalitik dari FA- Ag_2O NAP (Mazumder *and* Ruma, 2022). Penguraian zat warna MG telah banyak dilakukan seperti koagulasi, flokulasi, dan karbon aktif (Soo *et al.*, 2021). Selain itu, perlakuan konvensional seperti adsorpsi, pertukaran ion, aerobik dan anaerobik, oksidasi, koagulasi dan flokulasi memiliki efektivitas yang lebih rendah untuk mengolah air limbah ini. Rendahnya efektivitas tersebut disebabkan oleh ketahanan tinggi pada beberapa cincin benzena terhadap perlekatan mikroba, fiksasi, dan tahan luntur (stabilitas terhadap cahaya dan pencucian). 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 PIM dianggap efektif untuk menangani limbah MG seperti yang dilakukan oleh Ling *and* Suah, (2017), karena berhasil mengekstrak MG dari limbah.

2.3. Teknologi Membran Cair

Membran adalah lapisan semipermeabel yang tipis dan berfungsi sebagai penghalang di antara dua fasa. Jika senyawa dari suatu campuran berpindah melewati membran lebih cepat dari campuran senyawa lainnya, maka penggunaan membran ini akan menyempurnakan proses pemisahan tersebut. 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).

Carner *et al.* (2020) juga menuliskan bahwa membran cair merupakan salah satu dari teknologi membran, yakni lapisan semipermeabel tipis yang dapat digunakan untuk memisahkan dua komponen dengan cara menahan dan melewatkan komponen tertentu. Prinsip pemisahan membran cair ditentukan oleh sifat molekul pembawa spesifik. Senyawa pembawa berada tetap di dalam membran dan dapat bergerak jika dilarutkan dalam cairan. Senyawa pembawa juga harus menunjukkan aktivitas yang spesifik terhadap satu komponen pada fasa sumber sehingga diperoleh selektivitas yang tinggi. Selain itu,

permiselektivitas komponen sangat tergantung pada spesifikasi senyawa pembawa. Membran cair terdiri dari cairan yang berperan sebagai penghalang semipermeabel dan tidak bercampur dengan fasa sumber maupun fasa penerima (Obotey *and* Rathilal, 2020).

2.4. *Polymer Inclusion Membrane (PIM)*

Metode 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, senyawa 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 senyawa ini sangat penting dan menentukan kinerja pemisahan (Soo *et al.*, 2021). Proses transpor senyawa target diawali dengan difusi senyawa target pada fasa sumber melewati pembatas lapisan, kemudian terjadi penyerapan senyawa target pada fasa antarmuka sumber-membran. Senyawa target tertranspor ke fasa membran dan melewati fasa membran kemudian terjadi desorpsi pada fasa antarmuka membran- penerima, akhirnya senyawa target terdifusi kembali di fasa penerima (Sadiq *et al.*, 2023).

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

- a. 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 diangkut melintasi fasa antarmuka ini dan akan digantikan oleh molekul lain dari senyawa pembawa.

- b. Tahap kedua, yaitu kompleks berdifusi melalui membran menuju ke fasa penerima.
- c. Tahap akhir, yaitu pada fasa antarmuka membran- fasa penerima, kompleks terdisosiasi dan senyawa target dilepaskan ke fasa penerima, kemudian di fasa penerima senyawa target ditarik oleh anion untuk membentuk garam.

Faktor-faktor yang berkaitan dengan pengaruh dan kemampuan dari membran PIM dalam transpor suatu analit. Faktor-faktor tersebut antara lain komposisi penyusun membran, sifat polimer dasar dan polimer pendukung, senyawa pembawa dan *plasticizer*, morfologi membran, dan sifat kimia dari larutan berair dalam membuat fasa sumber dan fasa penerima (Kiswandono *et al.*, 2019).

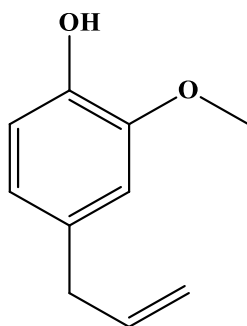
Pembuatan membran pada metode PIM menggunakan larutan yang mengandung senyawa pembawa atau ekstrak, *plasticizer*, dan polimer dasar seperti selulosa triasetat (CTA) atau PVC membentuk lapisan yang tipis, stabil, dan fleksibel.

Hasilnya adalah membran *self-supporting* yang dapat digunakan untuk memisahkan larutan yang diinginkan dengan cara yang mirip dengan SLM (Arabi *et al.*, 2021).

Metode PIM dianggap mampu meningkatkan kestabilan dari metode SLM karena dua hal, yaitu polimer pendukung (PVC) yang diharapkan dapat mengatasi kebocoran senyawa pembawa, dan *plasticizer* yang berfungsi untuk membuat sistem membran lebih stabil. Oleh karena itu, metode PIM diharapkan mempunyai potensi lebih baik untuk pemisahan skala industri dibandingkan tipe membran cair lainnya. Penelitian menggunakan metode PIM telah dilakukan untuk transpor ion logam Pb(II), Cd(II), dan Zn(II), hasilnya metode PIM efektif untuk mentranspor ion logam dan terbukti efektif untuk transpor Cd baik dalam media garam maupun asam (Soo *et al.*, 2021). Membran PIM membentuk lapisan yang tipis, stabil, dan fleksibel. Hasilnya adalah membran *self-supporting* yang dapat digunakan untuk memisahkan larutan yang diinginkan dengan cara yang mirip dengan SLM (Arabi *et al.*, 2021).

2.5. Copoly Eugenol Divinil Benzena (Co-EDVB)

Senyawa eugenol merupakan salah satu komponen kimia dalam minyak cengkeh yang memberikan bau dan aroma yang khas pada minyak cengkeh. Eugenol memiliki rumus molekul $C_{10}H_{12}O_2$ memiliki warna bening hingga kuning pucat, kental seperti minyak dan mudah larut dalam pelarut organik. Eugenol bersifat larut dalam alkohol, kloroform, dan eter. Eugenol memiliki gugus hidroksi, metoksi, dan alil. Adanya gugus hidroksi menyebabkan eugenol sebagai senyawa fenolik yang bersifat asam dan mudah dipisahkan dari senyawa non fenolik lainnya dengan cara ekstraksi cair-cair menggunakan pelarut aktif (Kiswandono *et al.*, 2020). Gugus fungsional tersebut memungkinkan eugenol dimanfaatkan sebagai bahan dasar untuk pembuatan senyawa lain dengan berbagai tujuan (Sastrohamidjojo, 2014). Struktur dari eugenol dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur senyawa eugenol

Polimerisasi dengan bahan baku senyawa alam seperti eugenol merupakan suatu hal yang relatif baru dilakukan, maka pengembangan dan pemanfaatan monomer eugenol semakin diperluas. Eugenol 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 *and* Majewska, 2023). Adapun spesifik sifat fisik dan kimia eugenol dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifik sifat fisik dan kimia eugenol

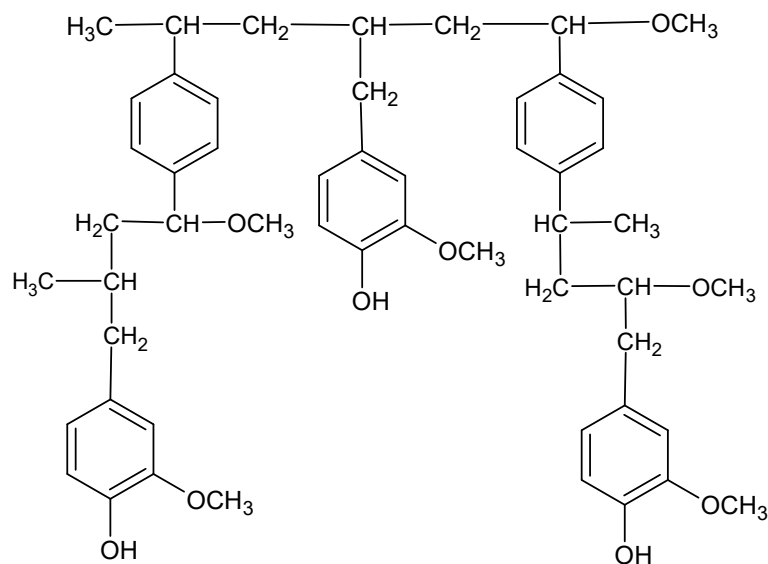
Karakteristik	Keterangan
Massa jenis (g/cm ³)	1,06
Wujud polimer	Padat
Titik didih (°C)	256
Titik leleh (°C)	-9
Warna	Bening ke kuning pucat
Aroma	Aroma cengkeh
Kelarutan	Larut dalam kloroform, etanl dan Metanol

(Sudarlin dan Winarto, 2017)

Kopolimerisasi merupakan salah satu cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan jumlah sisi aktif, yaitu melalui ikatan rangkap dua pada senyawa-senyawa diena. Divinil benzena (DVB) memiliki titik didih sebesar 195 °C, tidak larut dalam air, tetapi larut dalam etanol dan eter. DVB memiliki titik nyala sebesar 76 °C. Penggunaannya dalam industri plastik bertujuan untuk membentuk taut silang, memodifikasi material, dan membantu proses kopolimerisasi. DVB merupakan salah satu contoh senyawa diena yang dapat digunakan dengan asumsi bahwa peningkatan jumlah sisi aktif suatu polimer dengan meningkatkan berat molekul DVB. Semakin banyak agen pertautan silang (*crosslinking agent*) menyebabkan berat molekul semakin tinggi serta meningkatkan fraksi gel dan viskositas polimer.

DVB dapat sebagai penetrasi sebelum terjadi ikatan silang pada proses pembuatan membran sehingga memberikan kompatibilitas yang lebih baik pada membran yang dibuat. Ikatan silang membuat sifat mekanik dari membran lebih padat dan tidak rapuh (Anisa dkk., 2016). Ikatan rangkap dua pada DVB mempunyai sifat yang reaktif sehingga proses sintesis dapat dengan mudah dilakukan pada suhu kamar menggunakan katalis asam lunak. Eugenol yang memiliki ikatan rangkap dua, yang jika ditambahkan monomer diena sebagai agen taut silang akan menghasilkan suatu kopolimer. Polimerisasi antara eugenol dengan DVB

menghasilkan Co- EDVB (Kiswando *et al.*, 2022). Co-EDVB diharapkan dapat meningkatkan jumlah sisi aktif pada polimer yang digunakan sebagai senyawa pembawa pada proses transpor senyawa target, contohnya zat warna MG. Adapun prediksi struktur Co-EDVB ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Prediksi struktur Co-EDVB

Polimerisasi senyawa diena terjadi pada bagian gugus vinil. Polimerisasi antara eugenol dengan DVB menghasilkan Co-EDVB yang diharapkan dapat meningkatkan jumlah sisi aktif pada polimer yang digunakan sebagai senyawa pembawa pada proses transpor MG. Muatan positif yang ada pada ion nitrogen tersier yang ada di MG siap bergerak menuju Co-EDVB bermuatan negatif yang ada di membran PIM untuk membentuk kompleks pasangan ion netral (Ling *and* Suah, 2017). Oleh karena itu, bentuk kationik pewarna diekstraksi melintasi membran hidrofobik dengan nilai efisiensi ekstraksi yang tinggi. Pewarna kationik membentuk kompleks pasangan ion netral dengan senyawa pembawa anionik. Senyawa pembawa yang sangat efisien dan menunjukkan selektivitas yang tinggi dalam mengekstraksi ion-ion logam transisi dari fasa air ke fasa organik dapat memberikan transpor yang rendah atau sebaliknya ligan yang mempunyai kemampuan ekstraksi rendah tetapi kemampuan transpor tinggi (Mamat *and* See, 2017). Selain itu, Co-EDVB juga diasumsikan dapat melakukan

transpor MG dilihat dari ikatan hidrogen yang terbentuk antara unsur N pada MG dengan –OH pada Co-EDVB. Sintesis Co-EDVB dapat dilakukan dengan bahan dasar berupa eugenol, DVB, dan $\text{BF}_3\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ sebagai katalis. Reaksi pembentukan polimer ditandai dengan pembentukan gel berwarna ungu kemerahan pada saat katalis ditambahkan. Penambahan katalis dilakukan sebanyak empat kali secara bertahap setiap 1,5 jam (0,25 mL setiap penambahan). Secara fisik polimer yang dihasilkan berupa serbuk berwarna coklat muda. Beberapa polimerisasi eugenol-DVB telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Penelitian sebelumnya

% Co-EDVB	Warna	Titik Leleh	Referensi
10	Coklat	69,33	Handayani dkk., 2004
12	Coklat	95,50	Handayani dkk., 2004
2	Coklat	85,70	Kiswandono <i>et al.</i> , 2014
4	Coklat	98,00	Kiswandono <i>et al.</i> , 2014
6	Coklat	102,00	Kiswandono <i>et al.</i> , 2014
12	Coklat	109,00	Kiswandono <i>et al.</i> , 2014

2.6. Analisis dan Karakterisasi

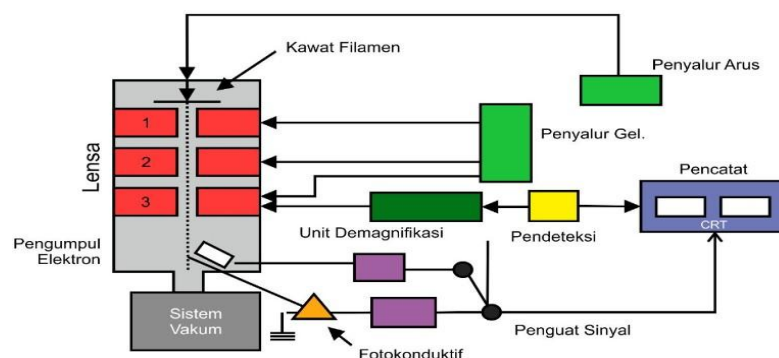
Pada penelitian ini, membran PIM dikarakterisasi dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR), serta hasil transpor MG dianalisis dengan spektrofotometer *Ultra Violet-Visible* (UV-Vis).

2.6.1. *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Metode analisis yang sangat penting dalam karakterisasi morfologi polimer adalah metode analisis menggunakan SEM. SEM adalah salah satu jenis mikroskop elektron yang berfungsi untuk analisis morfologi atau menggambarkan permukaan

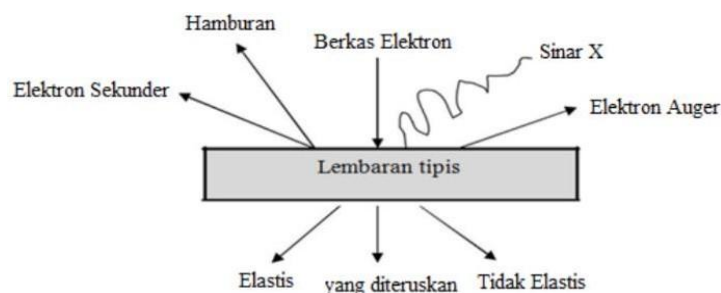
suatu objek atau material dengan perbesaran 10-3.000.000 kali, kedalaman medan (*depth of field*) 4-0,4 mm, dan resolusi sebesar 110 nm. SEM memiliki prinsip memfokuskan sinar elektron (*electron beam*) dipermukaan obyek dan mengambil gambarnya dengan cara mendeteksi elektron yang muncul dari permukaan obyek. SEM dilengkapi dengan mikroskop optik yang berfungsi untuk mempelajari tekstur, topografi, dan sifat permukaan bubuk atau padatan. Ketajaman fokus pada alat SEM memungkinkan 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. Tetapi dari 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 4.



Gambar 4. Skema SEM (Ayyad, 2011)

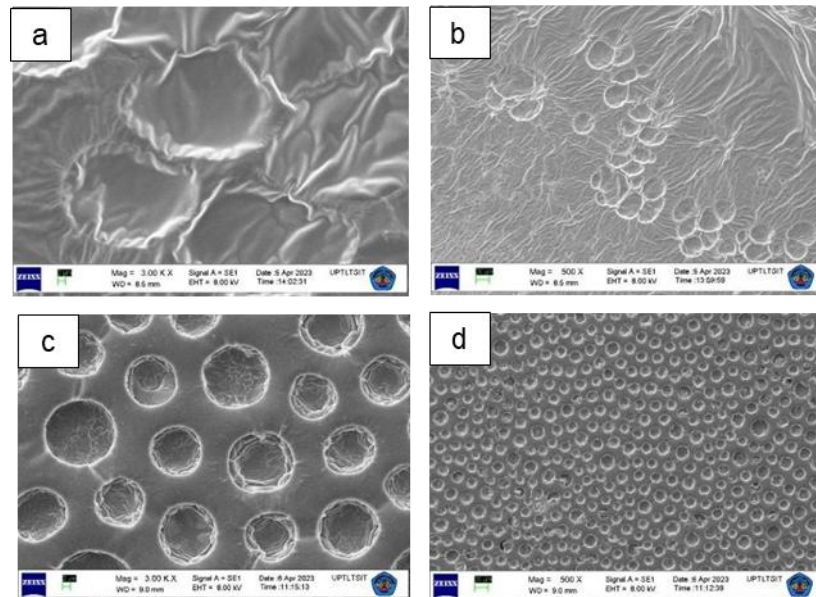
Struktur suatu material dapat diketahui dengan cara melihat interaksi yang terjadi jika suatu spesimen padat dikenai berkas elektron. Berkas elektron yang jatuh tersebut sebagian akan dihamburkan sedang sebagian lagi akan diserap dan menembus spesimen. Bila spesimen cukup tipis, sebagian besar ditransmisikan dan beberapa elektron dihamburkan secara tidak elastis. Interaksi dengan atom dalam spesimen menghasilkan pelepasan elektron energi rendah, foton sinar-X dan elektron auger, yang semuanya dapat digunakan untuk mengkarakterisasi material. Berikut ini adalah gambaran mengenai mekanisme hamburan elektron-elektron apabila mengenai spesimen disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hamburan elektron yang jatuh pada lembaran tipis (Ayyad, 2011).

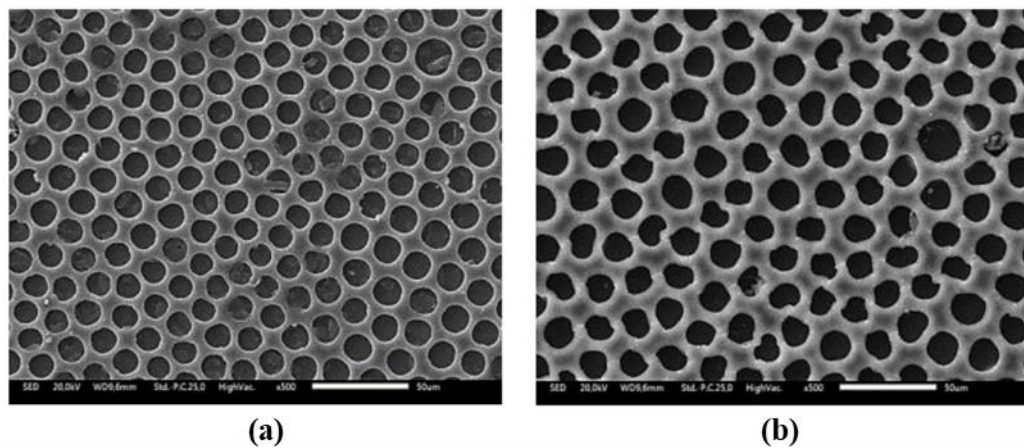
Interaksi antara elektron dengan atom pada sampel akan menghasilkan pelepasan elektron dengan energi rendah, foton sinar-X, dan elektron auger yang seluruhnya dapat digunakan untuk mengkarakterisasi material. Elektron sekunder adalah elektron yang dipancarkan dari permukaan kulit atom terluar yang dihasilkan dari interaksi berkas elektron jauh dengan padatan sehingga mengakibatkan terjadinya loncatan elektron yang terikat lemah dari pita konduksi. Elektron auger adalah elektron dari kulit orbit terluar yang dikeluarkan dari atom ketika elektron tersebut menyerap energi yang dilepaskan oleh elektron lain yang jatuh ke tingkat energi yang lebih rendah (Ayyad, 2011). Data SEM memberikan informasi yang berguna terkait dengan sifat material, terutama morfologi permukaan material yang diselediki. 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, di mana 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 6.



Gambar 6. Hasil SEM membran PIM sebelum transpor (a) 3000x, (b) 500x dan setelah transpor (c) 3000x, (d) 500x (Khairati dkk., 2025)

Gambar 6 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 7. Pada membran sebelum proses transpor (Gambar 7a) dengan pembesaran 500x, permukaan membran masih tertutup oleh *plasticizer*, sehingga ukuran pori-pori membran tampak sama. Setelah proses transpor MG (Gambar 7b) pada pembesaran yang sama, permukaan membran terlihat tidak rata yang menunjukkan bahwa selama proses transpor terjadi kehilangan komponen membran (*leaching*).



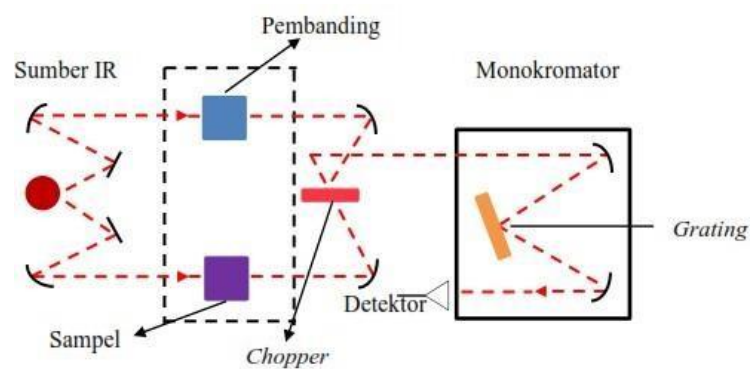
Gambar 7. Hasil SEM membran PIM polieugenol (a) sebelum transpor dan (b) setelah transpor (Kiswandono *et al.*, 2024)

Penggunaan membran dalam proses transpor memungkinkan terjadinya peluruhan (*leaching*) komponen-komponen penyusun membran. *Leaching* tersebut 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*.

2.6.2. *Fourier Transform Infra Red (FTIR)*

Spektroskopi FTIR mengamati interaksi molekul dengan radiasi elektromagnetik pada panjang gelombang 2,5-25 μm atau bilangan gelombang 4.000-400 cm^{-1} . Sistem optik FTIR menggunakan radiasi *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER) yang berfungsi sebagai radiasi yang dikombinasikan dengan radiasi *infrared* agar sinyal radiasi *infrared* 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).

Analisis dapat dilakukan dengan beberapa kelebihan saat menggunakan spektrometer FTIR. Salah satunya adalah FTIR dapat digunakan pada semua frekuensi sumber cahaya secara bersamaan, yang memungkinkan analisis dilakukan lebih cepat dari pada menggunakan metode *scanning*. Selain itu, metode spektrofotometri FTIR memiliki sensitivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan instrumentasi dispersi karena radiasi yang masuk ke sistem deteksi lebih tinggi daripada metode dispersi (Borpatra *et al.*, 2022). Skema FTIR dapat dilihat pada Gambar 8.



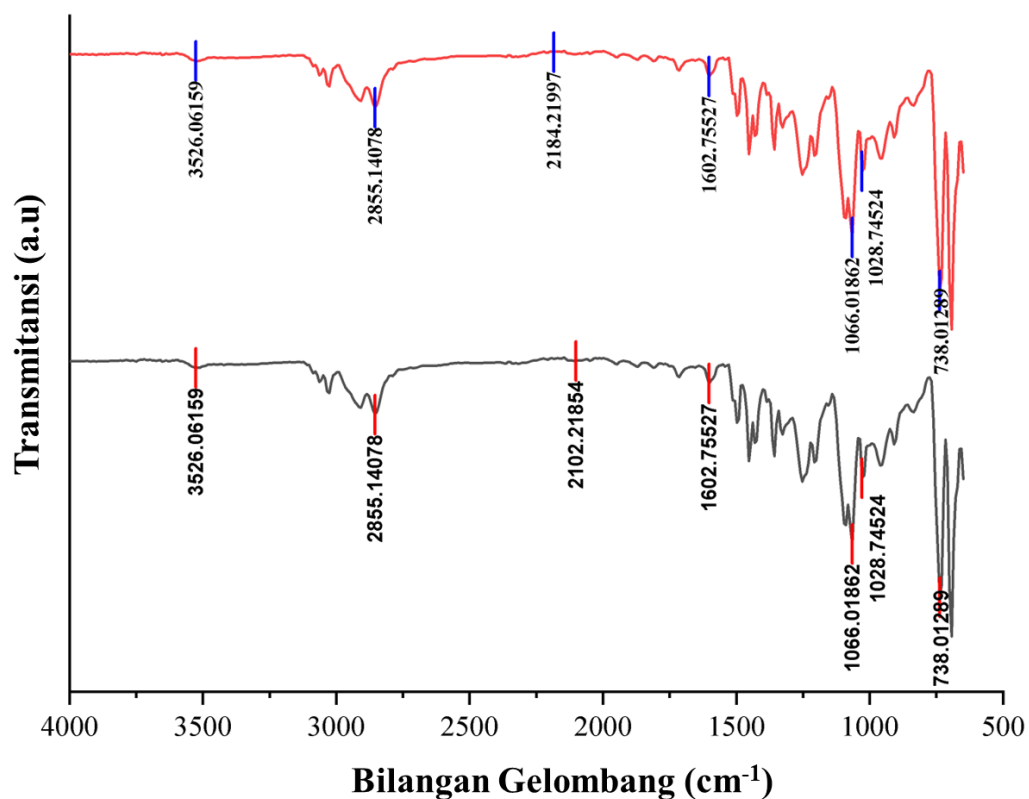
Gambar 8. Skema peralatan FTIR (Thermo, 2001).

Karakterisasi FTIR bertujuan untuk mengetahui jenis-jenis vibrasi antar atom. FTIR juga digunakan untuk menganalisis senyawa organik dan anorganik, serta untuk melakukan analisis kuantitatif dan kualitatif dengan mengamati kekuatan absorbansi senyawa pada panjang gelombang tertentu (Borpatra *et al.*, 2022). Analisis kualitatif dilakukan dengan mengamati bentuk puncak-puncak spektra yang spesifik sesuai dengan gugus-gugus fungsional yang dimiliki oleh senyawa yang dianalisis. Analisis kuantitatif dilakukan menggunakan senyawa standar dengan variasi konsentrasi yang kemudian dibuat spektranya. Bilangan gelombang dari beberapa gugus fungsi lainnya pada FTIR dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Bilangan gelombang dari berbagai jenis ikatan

Bilangan Gelombang (cm^{-1})	Jenis Ikatan
3750-3000	Regangan O–H dan N–H
3000-2700	Regangan $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$, C–H dan C–H aldehid
1900-1650	Regangan C=O (asam, aldehid, keton, amida, ester dan anhidrida)
1675-1500	Regangan C=C (aromatik dan alifatik) dan C=N
1475-1300	C–H <i>bending</i>
1000-6500	C=C–H dan Ar–H <i>bending</i>

Membran dapat digunakan untuk memisahkan dan mengekstrak senyawa organik dan untuk mengembalikan ion logam (Kiswandono *et al*, 2024). Eugenol memiliki beberapa gugus fungsional, yaitu alil ($-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}_2$), gugus hidroksi ($-\text{OH}$) dan metoksi ($-\text{OCH}_3$). Sedangkan pada divinil benzena hanya mengandung gugus fungsi vinil ($-\text{CH}=\text{CH}_2$). Sisi aktif yang dimiliki oleh senyawa pembawa hasil sintesis ini salah satunya adalah gugus $-\text{OH}$. Oleh karena itu, karakterisasi spektroskopi IR menjadi penting karena hasilnya akan memberikan informasi mengenai gugus-gugus fungsi dari masing-masing polimer). Semua polimer tersebut memiliki pola serapan spektra yang hampir sama. Oleh karena itu, perbedaannya dapat dibedakan berdasarkan luas area spektra dan rasio intensitas masing-masing serapan. Spektra dari PIM yang mengandung polieugenol sebelum dan setelah transpor MG dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Spektra IR dari membran PIM yang mengandung polieugenol (a) sebelum transpor (b) setelah transpor (Kiswandono *et al.*, 2024)

Gambar 9 menunjukkan bahwa hasil perbandingan dari membran sebelum dan setelah transpor, bahwa bilangan gelombang $3518,6 \text{ cm}^{-1}$ yaitu serapan gugus -OH pada membran sebelum transpor mengalami pergeseran bilangan gelombang ke arah 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 $2102,2 \text{ cm}^{-1}$ dan terdapat pergeseran regangan C-O di mana sebelum transpor menghasilkan bilangan gelombang $1028,7 \text{ cm}^{-1}$. 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).

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

Spektrofotometri UV-Vis adalah pengukuran panjang gelombang, intensitas sinar ultraviolet, dan cahaya tampak yang diabsorpsi oleh sampel. Sinar ultraviolet dan cahaya tampak memiliki energi yang cukup untuk mempromosikan elektron pada kulit terluar ke tingkat energi yang lebih tinggi. Spektrofotometri UV-Vis biasanya digunakan untuk molekul dan ion anorganik atau kompleks di dalam larutan. Spektra UV-Vis mempunyai bentuk yang lebar dan hanya sedikit informasi tentang struktur yang bisa didapatkan dari spektra 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 spektra (200-700 nm) yang nyaman untuk digunakan dalam eksperimen. Nilai yang keluar dari cahaya yang diteruskan dinyatakan dalam nilai absorbansi karena memiliki hubungan dengan konsentrasi sampel. Hukum *Beer* menyatakan nilai absorbansi cahaya berbanding lurus dengan konsentrasi dan ketebalan bahan atau medium (Suhartati, 2017).

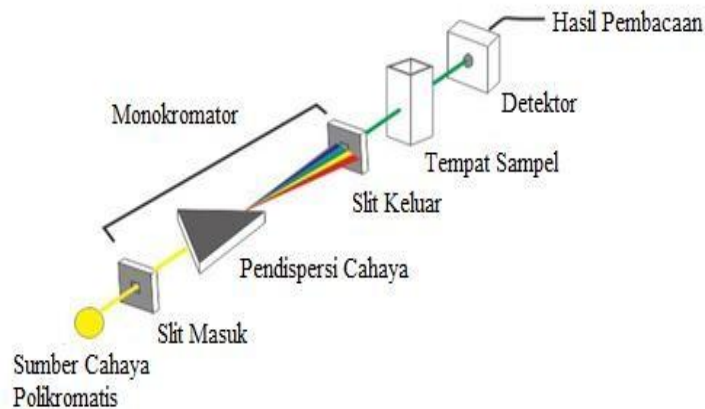
Spektrofotometer UV-Vis yang komersial biasanya beroperasi dari sekitar 175 nm atau 200-1000 nm. Identifikasi kualitatif senyawa organik dalam daerah ini jauh lebih terbatas daripada dalam daerah inframerah. Ini karena pita serapan terlalu lebar dan kurang terinci. Tetapi, gugus-gugus fungsional tertentu seperti karbonil, nitro, sistem tergabung, benar-benar menunjukkan puncak yang karakteristik, dan sering dapat diperoleh informasi yang berguna mengenai ada tidaknya gugus semacam itu dalam molekul tersebut (Suhartati, 2017). Prinsip kerja spektrofotometer berdasarkan hukum *Lambert Beer*, yaitu bila cahaya monokromatik (I_0) melalui suatu media (larutan), maka sebagian cahaya tersebut diserap (I_a), sebagian dipantulkan (I_r), dan sebagian lagi dipancarkan (I_t).

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* hidrogen, sedangkan pada daerah sinar tampak (*visible*) 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 monokromat 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 yang akan dianalisis. Kuvet 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 berfungsi untuk 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 % transmittan maupun absorbansi.

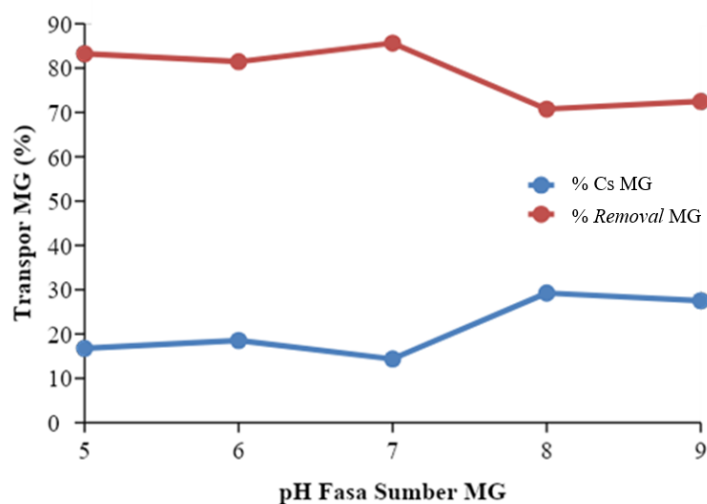
Cara kerja alat spektrofotometer UV-Vis yaitu sinar dari sumber radiasi diteruskan menuju monokromator. Cahaya dari monokromator diarahkan terpisah melalui sampel dengan sebuah cermin berotasi. Detektor menerima cahaya dari sampel secara bergantian secara berulang-ulang. Sinyal listrik dari detektor diproses, diubah ke digital dan dilihat hasilnya, selanjutnya perhitungan dilakukan

dengan komputer yang sudah terprogram (Suhartati, 2017). Skema alat spektroskopi UV-Vis dapat dilihat pada Gambar 10.



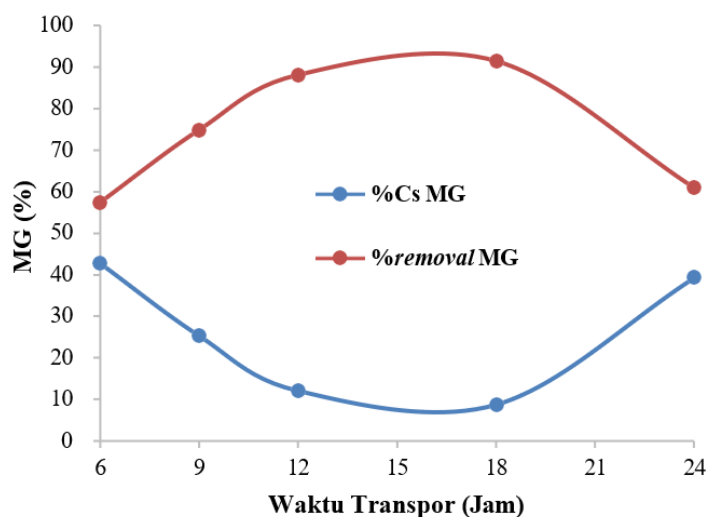
Gambar 10. Skema alat spektrofotometer UV-Vis

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 absorban MG pada panjang gelombang 200-800 nm, dan didapatkan panjang gelombang maksimum sebesar 618,07 nm. Penelitian yang dilakukan 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 faktor yang dapat mendorong adanya difusi pada membran 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 11.



Gambar 11. Pengaruh pH terhadap konsentrasi MG tertranspor

Penelitian serupa juga dilakukan oleh Khairati dkk. (2025) yang mengamati pengaruh waktu transpor terhadap absorbansi MG yang diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Hasil optimum pada variasi waktu terdapat pada 18 jam waktu transpor dengan % *removal* sebesar 91,30%. Transpor MG akan bertambah seiring dengan bertambahnya waktu transpor. Hal ini dikarenakan semakin lama waktu untuk transpor, maka semakin lama pula interaksi antara MG dengan senyawa pembawa pada membran. Lamanya interaksi antara MG dengan membran menyebabkan pelepasan ion MG ke fasa penerima semakin cepat. Adapun hasil penelitian Khairati dkk. (2025) mengenai pengaruh waktu transpor terhadap konsentrasi MG tertranspor ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Pengaruh waktu transpor terhadap konsentrasi MG tertranspor

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

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

3.2. Alat dan Bahan

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

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah MG, Co- EDVB 10%, akuabides, *polyvinyl chloride* (PVC), dibenzil eter (DBE), tetrahidrofuran (THF), HNO_3 , akuades, PbCO_3 , dan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

3.3. Optimasi Transpor MG pada membran PIM

3.3.1. Pembuatan Membran PIM

Membran PIM dengan massa total 0,2700; 0,5400; dan 1,0800 g dicetak dalam suatu cetakan (Tabel 5). Komponen penyusun membran yaitu Co-EDVB 10% sebagai senyawa pembawa, PVC sebagai polimer dasar, dan DBE sebagai *plasticizer*. THF sebanyak 10 mL digunakan pada setiap membran PIM yang berfungsi sebagai pelarut untuk menghomogenkan campuran dalam cetakan, kemudian hasil cetakan didiamkan selama tiga hari untuk menguapkan pelarut secara alami.

Tabel 5. Perbandingan massa komponen pembentuk membran (10:32:58)
(Kiswando *et al.*, 2024)

Tipe Membran	Co-EDVB (g)	PVC (g)	DBE (g)	Massa Total (g)
T ₂₇	0,0270	0,0864	0,1556	0,2700
T ₅₄	0,0540	0,1728	0,3132	0,5400
T ₁₀₈	0,1080	0,3456	0,6264	1,0800

Setelah membran PIM dibuat, kemudian ditimbang terlebih dahulu sebelum 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. Karakterisasi membran sebelum dan sesudah transpor dilakukan menggunakan FTIR dan SEM.

3.3.2. Pembuatan Larutan Induk MG, Pembuatan Limbah Buatan, dan Pengukuran Konsentrasi MG dalam Fasa Sumber dan Fasa Penerima

Pembuatan larutan induk MG 1000 ppm dibuat dengan cara melarutkan 1 g MG dalam 1000 mL akuades. Pembuatan limbah buatan, yaitu dengan memasukkan 0,0250 g MG, 0,0400 g PbCO_3 , dan 0,0738 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dalam labu ukur 250 mL, kemudian ditambahkan akuades sampai tanda tera. Larutan yang dihasilkan untuk konsentrasi 100 ppm, kemudian larutan diencerkan dalam 25 ppm dengan volume 250 mL yang akan digunakan pada penelitian ini. Pengukuran konsentrasi MG pada fasa sumber, terlebih dahulu ditentukan panjang gelombang maksimum. Penentuan panjang gelombang maksimum MG dilakukan dengan cara mengambil larutan MG yang telah disiapkan ke dalam kuvet, lalu untuk mengetahui panjang gelombang maksimum, larutan MG 25 ppm diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 400-800 nm (Ghasemi *and* Kaykhaili., 2016). Pada fasa sumber, fasa penerima, dan larutan standar MG (10, 15, 20, 25, 30, 35, dan 40 ppm) masing-masing diambil sebanyak 5 mL. Sampel tersebut dimasukkan ke dalam kuvet, lalu diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.3.3. Variasi pH MG pada fasa sumber

Membran PIM dengan ketebalan normal (T_{54}) yang sudah dicetak dan mengandung senyawa pembawa ditempatkan 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 5, 6, 7, 8, dan 9. Pipa transpor ditutup dan diaduk selama 9 jam dengan *magnetic stirrer*. Setelah selesai diaduk, fasa sumber dan fasa penerima diambil sampelnya sebanyak 5 mL. Konsentrasi MG yang terdapat di dalam fasa sumber dan fasa penerima diukur dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.3.4. Variasi Konsentrasi HNO_3 pada Fasa Penerima

Variasi konsentrasi HNO_3 pada fasa penerima adalah 0,50; 0,75; 1,00; 1,25; dan 1,50 M. Masing-masing larutan disiapkan dengan memipet larutan HNO_3 pekat 13 M sebanyak 9,6 mL untuk larutan HNO_3 0,50 M; 14,4 mL untuk larutan HNO_3 0,75 M; 19,2 mL untuk larutan HNO_3 1,00 M; 24,0 mL untuk larutan HNO_3 1,25 M; dan 28,8 mL untuk larutan HNO_3 1,50 M. Larutan yang telah dipipet dimasukkan ke dalam labu ukur 250 mL, kemudian setiap larutan diencerkan dengan akuades hingga mencapai tanda tera. Membran PIM yang telah dicetak dan mengandung senyawa pembawa ditempatkan di tengah pipa transpor. Selanjutnya, 50 mL HNO_3 sebagai fasa penerima dan 50 mL larutan MG 25 ppm dengan pH optimum sebagai fasa sumber dimasukkan ke dalam pipa transpor. Pipa ditutup dan diaduk selama 9 jam menggunakan *magnetic stirrer*. Setelah pengadukan selesai, diambil sampel 5 mL dari fasa sumber dan fasa penerima. Konsentrasi MG pada kedua fasa diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.3.5. Variasi Ketebalan Membran

Variasi ketebalan membran PIM adalah variasi ketebalan tipis (T_{27}), normal (T_{54}), dan tebal (T_{108}) (Kiswandono *et al.*, 2020). Membran PIM yang sudah dicetak dan mengandung senyawa pembawa ditempatkan di tengah- tengah pipa transpor, kemudian ditambahkan 50 mL HNO_3 konsentrasi optimum sebagai fasa penerima dan 50 mL MG 25 ppm dengan pH optimum sebagai fasa sumber. Pipa transpor ditutup dan diaduk selama 9 jam dengan *magnetic stirrer*. Setelah selesai diaduk, fasa sumber dan fasa penerima diambil sampelnya sebanyak 5 mL. Konsentrasi MG yang terdapat di dalam fasa sumber dan fasa penerima diukur dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.3.6. Variasi Konsentrasi Senyawa Pembawa

Membran PIM dengan ketebalan optimum yang sudah dicetak dan mengandung variasi konsentrasi senyawa pembawa (Tabel 6) ditempatkan 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 9 jam dengan *magnetic stirrer*. Setelah selesai diaduk, fasa sumber dan fasa penerima diambil sampelnya sebanyak 5 mL. Konsentrasi MG yang terdapat di dalam fasa sumber dan fasa penerima diukur dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

Tabel 6. Variasi konsentrasi senyawa pembawa

Membran	Co-EDVB 10 % (mmol)	Massa Co-EDVB 10% (g)	PVC (g)	DBE (g)
1	0,01	0,0144	0,1728	0,3132
2	0,02	0,0288	0,1728	0,3132
3	0,03	0,0540	0,1728	0,3132
4	0,04	0,0576	0,1728	0,3132
5	0,05	0,0721	0,1728	0,3132

3.3.7. Variasi Waktu Transpor

Membran PIM dengan komposisi optimum dipasang pada pipa transpor, lalu ditambahkan 50 mL larutan HNO_3 1M dan 50 mL larutan MG 25 ppm pH 7. Campuran diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 4, 8, 12, 18, dan 24 jam. Setelah itu, diambil sampel 5 mL dari masing-masing fasa, lalu konsentrasi MG diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Data transpor digunakan untuk menghitung permeabilitas, fluks, koefisien rejeksi, % *recovery*, dan % *removal* (Gherasim *et al.*, 2011; Kiswandono *et al.*, 2022).

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

Keterangan :

%Recovery = % MG yang terdapat di dalam fase penerima
 $C_{0 \text{ sumber}}$ = Konsentrasi awal MG di dalam fase sumber (ppm)
 C_{penerima} = Konsentrasi MG dalam fase penerima (ppm)

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

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)

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

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)

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

Keterangan :

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

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

Keterangan :

R = Koefisien rejeksi
 C_p = Konsentrasi permeat (konsentrasi MG yang ada pada fasa penerima saat t optimum)
 C_t = Konsentrasi MG pada fasa sumber saat t optimum

3.3.8. Studi Kompetisi Transpor MG pada Limbah Buatan

Sampel limbah buatan disiapkan dengan mencampurkan MG, PbCO_3 , dan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, masing-masing dengan konsentrasi 25 ppm. Proses transpor dilakukan menggunakan membran PIM dengan ketebalan optimum yang telah dicetak. Membran ditempatkan di tengah pipa transpor. Selanjutnya, 50 mL limbah buatan sebagai fasa sumber dan 50 mL HNO_3 sebagai fasa penerima dengan kondisi optimum dimasukkan ke dalam pipa transpor. Pipa transpor kemudian ditutup dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada fasa sumber dan fasa penerima selama waktu optimum pada suhu kamar. Setelah pengadukan selesai, diambil sampel 5 mL dari fasa sumber dan fasa penerima. Konsentrasi MG pada kedua fasa diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis.

3.4. Evaluasi Transpor MG pada Membran PIM

3.4.1. Variasi Jenis Garam

Membran PIM dengan komposisi optimum *plasticizer* pada prosedur sebelumnya ditimbang terlebih dahulu. Membran PIM ditempatkan di dalam pipa transpor MG. Pada kolom fasa sumber (*5 chamber*) dimasukkan campuran 50 mL MG (25 ppm, pH optimum) dan garam 0,01 M, yaitu KCl, NaCl, NaNO_3 , Na_2SO_4 , dan KNO_3 . Fasa penerima diisi dengan 50 mL HNO_3 0,1 M. Pipa transpor ditutup, lalu diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama waktu optimum pada suhu kamar. Setelah pengadukan selesai, membran PIM dilepas dan dikeringkan di udara terbuka. Setelah membran kering, membran ditimbang untuk mengetahui massa setelah transpor. Konsentrasi MG pada fasa penerima dan fasa sumber diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.4.2. Variasi Konsentrasi Garam pada Fasa Sumber

Transpor MG dengan penambahan garam pada fasa sumber. Membran PIM dengan komposisi optimum jenis garam sebelum digunakan ditimbang terlebih dahulu. Membran PIM ditempatkan pada pipa transpor MG. Pada kolom fasa sumber diisi 50 mL MG 25 ppm pH optimum yang telah ditambahkan jenis garam optimum dengan variasi konsentrasi 0; 0,001; 0,01; 0,1; dan 0,5 M dan pada kolom fasa penerima diisi 50 mL HNO_3 0,1 M. Pipa transpor ditutup dan diaduk dengan *magnetic stirrer* pada fasa sumber dan fasa penerima selama waktu optimum pada suhu kamar. Kemudian, membran PIM dilepas, dikeringkan dengan cara dibiarkan di udara terbuka, dan ditimbang. Konsentrasi MG pada fasa penerima dan fasa sumber diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.4.3. Variasi 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. Membran PIM ditempatkan pada pipa transpor MG. Pada fasa sumber diisi dengan 50 mL larutan MG 25 ppm dengan pH optimum sedangkan untuk fasa penerimanya diisi dengan larutan garam dengan variasi konsentrasi 0; 0,001; 0,01; 0,1; dan 0,5 M dalam 50 mL HNO_3 0,1 M. Pipa transpor ditutup dan diaduk dengan *magnetic stirrer* pada fasa sumber dan fasa penerima selama waktu optimum pada suhu kamar. Kemudian, membran PIM dilepas, dikeringkan dengan cara dibiarkan di udara terbuka, dan ditimbang. Konsentrasi MG pada fasa penerima dan fasa sumber diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.4.4. Pemakaian Berulang pada PIM

Membran PIM dengan komposisi optimum *plasticizer* ditimbang terlebih dahulu sebelum digunakan. Membran PIM ditempatkan di dalam pipa transpor MG. Pada kolom fasa sumber diisi 50 mL larutan MG 25 ppm dengan pH optimum, sedangkan pada kolom fasa penerima diisi 50 mL HNO_3 0,1 M. Pipa transpor ditutup, lalu diaduk menggunakan pengaduk magnet pada fasa sumber dan fasa penerima selama waktu optimum pada suhu kamar. Setelah pengadukan selesai, membran PIM dilepas, dikeringkan di udara terbuka selama waktu optimum, dan ditimbang. Konsentrasi MG pada fasa penerima dan fasa sumber dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum. Terdapat 3 variasi perlakuan pemakaian berulang, diantaranya adalah sebagai berikut :

- a. Membran PIM digunakan kembali untuk transpor MG dengan lima kali pemakaian menggunakan larutan MG yang baru.
- b. Membran PIM dicuci dengan akuades selama 30 menit (direndam), setelah itu membran PIM digunakan kembali untuk transpor MG dengan lima kali pemakaian menggunakan larutan MG yang baru.
- c. Selanjutnya membran PIM dicuci dengan larutan HNO_3 1M selama 30 menit (direndam), setelah itu membran PIM digunakan kembali untuk transpor MG dengan lima kali pemakaian menggunakan larutan MG yang baru.

3.4.5. 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 *plasticizer* ditempatkan pada tengah pipa transpor MG, kemudian pada kolom fasa sumber diisi 50 mL MG 25 ppm pH optimum dengan 5 variasi yaitu,

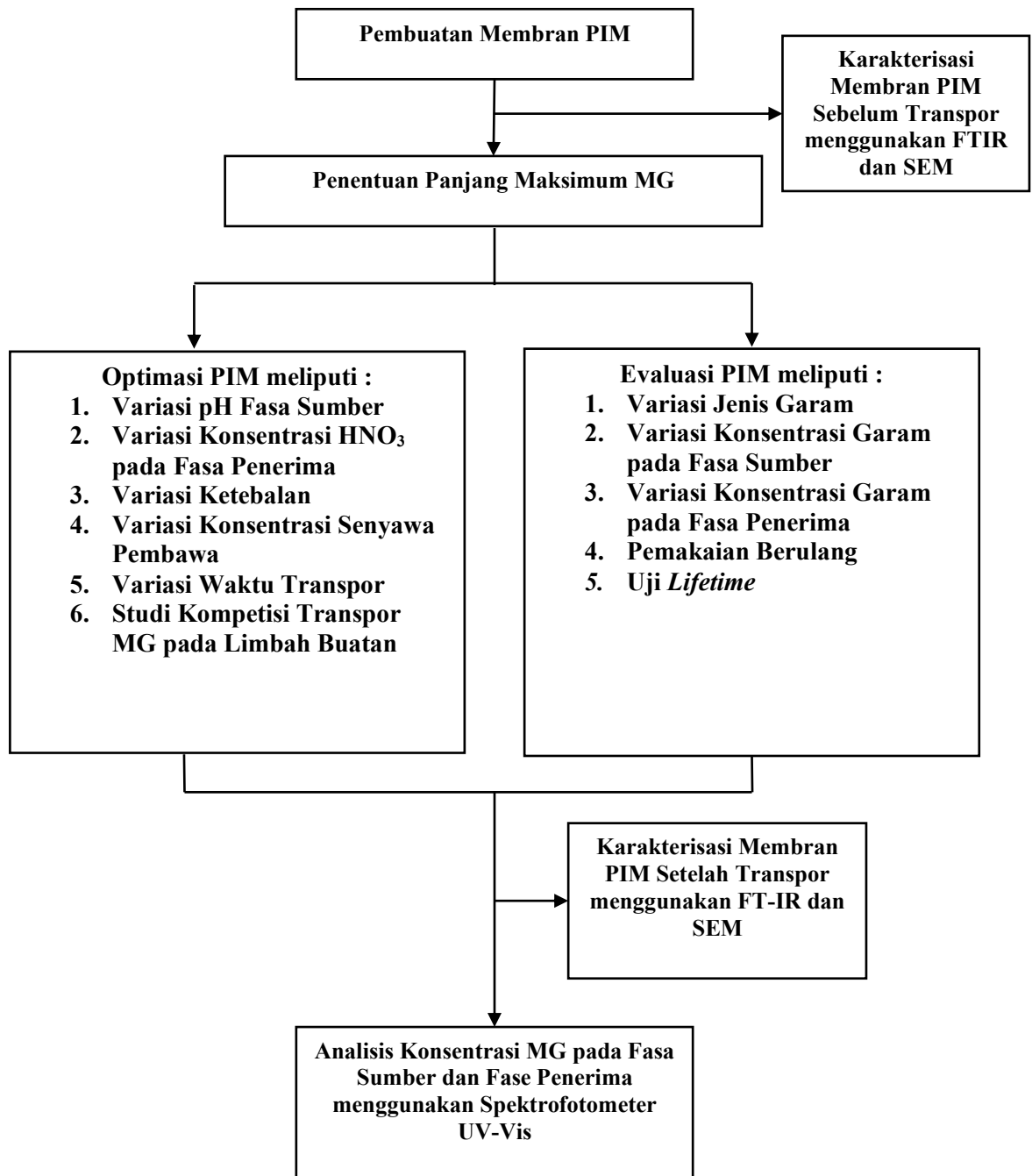
- a. Tanpa garam
- b. Menggunakan garam NaNO_3 0,1 M
- c. Menggunakan garam NaCl 0,1 M

- d. Menggunakan garam NaSO_4 0,1 M
- e. Menggunakan garam KNO_3 0,1 M

Pada kolom fasa penerima diisi 50 mL HNO_3 0,1 M. 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 $\pm 5,0$.

3.5. Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. 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 yang mengandung Co-EDVB 10% untuk transpor MG dicapai pada kondisi pH 7 pada fasa sumber, konsentrasi HNO_3 1M pada fasa penerima, tipe membran T₅₄, dan penambahan senyawa pembawa Co-EDVB 10% sebesar 0,03 mmol selama 12 jam, serta adanya logam Cu(II) dan Pb(II) pada fasa sumber dalam proses transpor berpengaruh pada turunnya % *removal* MG dari fasa sumber menuju fasa penerima.
2. Stabilitas membran PIM yang mengandung Co-EDVB 10% dicapai pada penambahan garam NaNO_3 0,001M baik pada fasa sumber maupun fasa penerima yang mencapai umur membran selama 62 hari, serta pemakaian membran PIM untuk transpor terbaik yaitu pada pemakaian pertama (tanpa pencucian).
3. Hasil karakterisasi membran PIM yang mengandung Co-EDVB 10% setelah transpor menggunakan SEM menunjukkan permukaan membran yang tidak rata dan berlubang akibat adanya komponen membran yang hilang selama proses transpor (*leaching*). Hal ini didukung dengan karakterisasi menggunakan FTIR yang menunjukkan adanya pergeseran pita serapan dan penurunan intensitas.

5.2. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk meningkatkan bobot molekul dan konsentrasi senyawa pembawa, misalnya dengan menggunakan Co-EDVB pada konsentrasi lebih dari 10% agar % *removal* dapat melebihi 92,36%. Peneliti juga perlu mengoptimalkan parameter lain, seperti kecepatan pengadukan yang diharapkan dapat meningkatkan koefisien difusi untuk meningkatkan % *removal*. Selain itu, penelitian berikutnya juga disarankan untuk melakukan uji *lifetime* dengan variasi konsentrasi garam NaNO_3 pada fasa sumber, baik dengan konsentrasi yang lebih rendah maupun lebih tinggi dari 0,1 M untuk mendapatkan konsentrasi optimum yang dapat memperpanjang umur membran PIM hingga lebih dari 62 hari.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Hussien, S. H., Hemdan, B. A., Alzahrani, O. M., Alswat, A. S., Alatawi, F. A., Alenezi, M. A., and El-Sayed, S. M. 2022. Microbial degradation, spectral analysis and toxicological assessment of malachite green dye by *Streptomyces exfoliatus*. *Molecules*, 27(19): 56-64.
- Akichouch, E. H., Sahli, S., Khoutoul, M., Miz, M. E., Bachiri, A. E., and TahaNI, 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., Catrall, 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: 101-129.
- Anisa, S., Erwin, dan Sunit, H. 2016. *Pembuatan dan Pengukuran Sifat Kelistrikan Membran Fuel Cell dengan Struktur Supramolekular dan Ikatan Silang*. Universitas Riau. Riau.
- 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.
- Arabi, H. R., Milani, S. A., Abolghasemi, H., and Zahakifar, F. 2021. Recovery and transport of thorium (IV) through polymer inclusion membrane with D₂EDHPA from nitric acid solutions. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 327: 653-665.
- Ashraf, M. W., Abulibdeh, N., and Salam, A. 2019. Selective Removal of Malachite Green Dye From Aqueous Solution by Supported Liquid Membrane Technology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16: 1-9.

- Asrami, M.R. and Saien, J. 2019. Salt Effects On Liquid–Liquid Equilibria Of Water + Phenol + (Propan-2-Yl) Benzene + Salts Systems. *J. Chem. Eng. Data*, 64: 2414–2422.
- Ayyad, O. D. H. 2011. Novel Strategies for The Synthesis of Metal Nanoparticles and Nanostructures. *Tesis*. 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. *Elkawanie*, 3(1): 1–10.
- Bonggotgetsakul, Y. Y. N., Robert, Cattrall, R.W., and Kolev, S. 2013. A Method for the Coating of a Polymer Inclusion Membrane with a Monolayer of Silver Nanoparticles. *Journal of Membrane Science*, 428: 142-149.
- 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.
- Bouraie, M. E. 2015. Removal Of The Malachite Green (MG) Dye From Textile Industrial Wastewater Using The Polyurethane Foam Functionalized With Salicylate. *Dispersion Science Technology Journal*, 36: 1228–1236.
- Carner, C. A., Croft, C. F., Kolev, S. D., and Almeida, M. I. G. 2020. Green solvents for the fabrication of polymer inclusion membranes (PIMs). *Separation and Purification Technology*, 239: 116-126.
- Chequer, F. M. D., de Oliveira, G. A. R., Ferraz, E. R. A., Cardoso, J. C., Zanoni, M. V. B., and de Oliveira, D. P. 2013. Textile dyes: Dyeing process and environmental impact. In Gunay, M. (ed). *Eco-Friendly Textile Dyeing and Finishing*. InTech.
- Cho, Y., Cattrall, R. W., and Kolev, S. D. 2018. A Novel Polymer Inclusion Membrane Based Method for Continuous Clean-up of Thiocyanate from Gold Mine Tailings Water. *Hazardous Materials Journal*, 341: 297-303.
- 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. *Sep. Sci. Technol*, 40: 3365–3380.
- Dahdah, H., Sellami, F., and Dekkouche, S. 2023. Stability Study Of Polymer Inclusion Membranes (Pims) Based On Acidic (D2EHPA), Basic (Aliquat 336) And Neutral (TOPO) Carriers: Effect Of Membrane Composition And Aqueous Solution. *Polym. Bull*, 80: 6495–6525.

- Donya, S. M., Farghaly, A. A., Abo-Zeid, M. A., Aly, H. F., Ali, S. A., Hamed, M. A., and El-Rigal, N. S. 2012. Malachite green induces genotoxic effect and biochemical disturbances in mice. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, 16(4): 469-477.
- Fan, J., Fan, Y., Pei, Y., Wu, K., Wang, J., and Fan, M. 2008. Solvent Extraction of Selected Endocrine-Distrupting Phenols Using Ionic Liquid. *Separation and 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.
- Ghasemi, E. and Kaykhaii, M. 2016. Application of Micro-cloud point extraction for spectrophotometric determination of Malachite green, Crystal violet and Rhodamine B in aqueous samples. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 164: 93-97.
- 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.
- Handayani, D. S., Kusumaningsih, T., and Yuli, M. 2004. Synthesis Of Co-Poly (Eugenol Sulfonate)-DVB From Eugenol As A Major Component Of Syzygium Aromaticum Oils. *Asian Journal Of Natural Product Biochemistry*, 2(2): 53-57.
- Hani'ah, U., Hernayanti, H., dan Simanjuntak, S. B. I. 2020. Efek Subletal Limbah Batik terhadap Aktivitas Enzim Serum Glutamat Pyruvat Transaminase pada Serum Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*). *BioEksakta: Jurnal Ilmiah Biologi Unsoed*, 2(1): 23-38.
- Harimu, L., Matsjeh, S., Siswanta, D., dan Santosa, S. J. (2012). Sintesis polieugenol oksiasetat sebagai pengemban untuk pemisahan ion logam berat Fe(III), Cr(III), Cu(II), Ni(II), Co(II), dan Pb(II) menggunakan metode ekstraksi pelarut. *Indonesian Journal of Chemistry*, 9(2): 261–266.
- Indriani, D. W., Muchlisyyah, J., Aulia, L. P., Sisca, H., dan Amaliyah, F. A. 2021. *Senyawa Organik dalam Bioproses*. Universitas Brawijaya Press. Malang.

- Kaczorowska, M. A. 2022. The use of polymer inclusion membranes for the removal of metal ions from aqueous solutions—The latest achievements and potential industrial applications: A Review. *Membranes*, 12(11): 11-35.
- Kaya, A., Onac, C., and Alpoguz, H. K. 2016. A Novel Electro-Driven Membrane For Removal Of Chromium Ions Using Polymer Inclusion Membrane Under Constant DC Electric Current. *Journal Of Hazardous Materials*, 317: 1-7.
- Keskin, B., Zeytuncu-Gökoğlu, B., and Koyuncu, I. 2021. Polymer inclusion membrane applications for transport of metal ions: A critical review. *Chemosphere*, 279: 130604.
- Khairati, R. M., Kiswandono, A. A., Rinawati, R., dan 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.
- 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): 10-20.
- Kislik, V. S. 2009. *Liquid Membranes: Principles and Application in Chemical Separations and Wastewater Treatment, Chapter 3: Supported Liquid Membranes and Their Modifications: Definition, Classification, Theory, Stability, Application and Perspective, First Edition*. Hebrew University of Yerussalem. Yerussalem. 34.
- 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., Antika, W., Rahmawati, A., dan 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., Aprilia, K. C. ., Rahmawati, A. ., Widiarto, S. ., and Rinawati, R. 2024. Evaluation Of Polymer Inclusion Membrane Containing Copoly Eugenol Divinyl Benzene 10% As A Carrier For Phenol Transport. *Journal Of Advanced Research In Fluid Mechanics And Thermal Sciences*, 122(2): 38–51.
- Kiswandono, A. A., Hadi, S., Sinjia, F., Sari, M. Y., and Irfan, M. 2019. Copoly Eugenol Crosslinked Diallylphthalate 8 % as Carrier in Phenol and Pb (II) Metal Transport. *Journal of Physics*, 13: 38-50.

- Kiswandono, A. A., Mudasir, Siswanta, D., Aprilita, N. H., Santosa, S. J., Hadi, S., and Mahmud, T. 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., Nusantara, 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. A., Rahmawati, A., Oktalina, N. R., Sindiani, A. V., Utama, W. T., and Lusiana, R. A. 2023. Utilization Of The Polymer Inclusion Membrane Method For Phenol Transport Using Co-EDVB 8% As A Carrier. *Rasayan Journal Of Chemistry*, 16(3): 1637-1645.
- Kiswandono, A. A., Rinawati, R., and Sukarta, I. N. 2023. Polymer Inclusion Membrane's 10% Copoly-EEGDMA-Containing Membrane's Lifetime And Optimization For Phenol Transport. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 24(5): 254-264.
- Kiswandono, A. A., Sindiani, A. V., Khotimah, R. K., Rabbani, M. B., Kurniawan, B., Rinawati, R., and Putra, H. E. 2024. Transport of Malachite Green Using the Polyeugenol-Based Polymer Inclusion Membrane (PIM) Method. *Journal of Membrane Science and Research*, 10(1): 1-5.
- Kiswandono, A. A., Siswanta, D., Aprilita, N. H., and Santosa, S. J. 2012. Transport of Phenol Through Inclusion Polymer Membrane (PIM) using Copoly(Eugenol-DVB) as Membrane Carriers. *Indonesian Journal of Chemistry*, 12(2): 105–112.
- Kiswandono, A. A., Siswanta, D., Aprilita, N. H., Santosa, S. J., and Hayashita, T. 2014. The capability of copoly (eugenol-divinylbenzene) as a carrier for phenol transport with polymer inclusion membrane (PIM). *Journal of Environmentally Friendly Processes*, 2(2) : 57-68.
- Kiswandono, A. A., Siswanta, D., Aprilita, N. H., Santosa, S. J., dan Hayashita, T. 2013. Extending the life time of polymer inclusion membrane containing copoly (Eugenol-DVB) as carrier for phenol transport. *Indonesian Journal of Chemistry*, 13(3): 254-261.
- Kiswandono, A.A., Sonny, W., Dessy, T. E. N. S., Supriyanto, R., Qudus, H. I., Rinawati, Rahmawati, A., dan Devariani, W. 2022. Kompetisi Fenol pada Limbah Buatan Menggunakan Kopoli Eugenol Divinil Benzena 10% sebagai Senyawa Pembawa. *Alchemy Jurnal Penelitian Kimia*, 18(1): 1-9.
- Kowalewska, A. and Majewska-Smolarek, K. 2023. 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. *Separation And Purification Technology*, 214: 156-161.
- Ling, Y. Y. and Suah, F. B. 2017. Extraction Of Malachite Green From Wastewater by Using Polymer Inclusion Membrane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1): 785–794.
- 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.
- Mamat, N. A., and See, H. H. 2017. Simultaneous Electromembrane Extraction of Cationic and Anionic Herbicides Across Hollow Polymer Inclusion Membranes with a Bubbleless Electrode. *Journal of Chromatography A*, 15: 9–16.
- 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.
- 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.
- Mohammed, M. A., Al-Bayati, I. S., Alobaidy, A. A., Waisi, B. I., and Majeed, N. 2023. Investigation the efficiency of emulsion liquid membrane process for malachite green dye separation from water. *life*, 4(5): 190-195.
- Naushad, M., Khan, M. A., Alothman, Z. A., Khan, M. R., and Kumar, M. 2016. Adsorption of methylene blue on chemically modified pine nut shells in single and binary systems: isotherms, kinetics, and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*, 57: 15848–15861.
- Nghiem, L. D, Mornane, P., Potter, I. D., Perera, J. M., Cattrall, R. W., and Kolev, S. D. 2006. Extraction and Transpor of Metal Ions and Small Organic Compounds using Polymer Inclusion Membranes (Pims). *Journal of Membrane Science*, 281: 8-37.
- Obotey, E., E. and Rathilal, S. 2020. Membrane technologies in wastewater treatment: a review. *Membranes*, 10(5): 89-107.
- 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.

- 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): 012102.
- Qiu, X. jing, Tang, J., Tan, J., Hu, H. P., Ji, X. B., and Hu, J. G. 2021. Selective Recovery of Cu(II) Through Polymer Inclusion Membranes Mediated with 2-Aminomethylpyridine Derivatives. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 31(11): 3591–3601.
- Radzyminska-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.
- 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: 1-11.
- Rensini, W. A., Kadang, L., Lapailaka, T., Naat, J. N., Pingak, R. K., Kapitan, O. B., dan Nitti, F. 2024. Uji stabilitas *polymer inclusion membrane* dari polimer pendukung PVC, ekstrak D₂EHPA, dan *plasticizer* asam oleat pada kondisi asam. *Jurnal Beta Kimia*, 4(1): 1-18.
- Roy, A., Chakraborty, S., Kundu, S. P., Adhikari, B., and Majumder, S. B. 2012. Adsorption of anionic-azo dye from aqueous solution by lignocelluloses-biomass jute fiber: equilibrium, kinetics, and thermodynamics study. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51: 12095–12106.
- Sadiq, A. C., Olasupo, A., Rahim, N. Y., Ngah, W. S. W., Hanafiah, M. A. K. M., and Suah, F. B. M. 2023. Fabrication and characterisation of novel chitosan-based polymer inclusion membranes and their application in environmental remediation. *International journal of biological macromolecules*, 244: 125-140.
- Sastrohamidjojo, H. 2014. *Kimia Minyak Atsiri*. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- 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.
- Stammati, A., Nebbia, C., De Angelis, I., Albo, A. G., Carletti, M., Rebecchi, C., and Dacasto, M. 2005. Effects of malachite green (MG) and its major metabolite, leucomalachite green (LMG), in two human cell lines. *Toxicology in Vitro*, 19(7): 853-858.

- Sudarlin dan Winarto, H. 2017. Polimerisasi Eugenol Minyak Daun Cengkeh Hasil Redistilasi, Ekstraksi, dan Fraksinasi Menggunakan Katalis Asam Sulfat Pekat. *Jurnal Kimia Valensi*, 3(1): 50-58.
- 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.
- Thermo, N. 2001. *Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry*. USA: Thermo Nicolet Corporation.
- Vazquez M.I., Romero V., Fontàs C., Anticó E., and Benavente J. 2014. Polymer Inclusion Membranes (Pims) with the Ionic Liquid (IL) Aliquat 336 as Extractant: Effect of Base Polymer and IL Concentration on Their Physical–Chemical and Elastic Characteristics. *Journal of Membrane Science*, 455: 312-319.
- Witt, K., Radzimska-Lenarcik, E., Kosciuszko, A., Gierszewska, M., & Ziuziakowski, K. (2018). The influence of the morphology and mechanical properties of polymer inclusion membranes (PIMs) on zinc ion separation from aqueous solutions. *Polymers*, 10(2): 1-14
- Zhao, W., He, G., Nie, F., Zhang, L., Feng, H., and Liu, H. 2012. Membrane Liquid Loss Mechanism of Supported Ionic Liquid Membrane for Gas Separation. *Journal of Membrane Science*, 411: 73–80.
- Zheng, H.D., Wang, B. Y., Wu, Y. X., and Ren, Q. L. 2009. Instability Mechanisms of Supported Liquid Membranes for Copper (II) Ion Extraction. *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects*, 351: 38-45.