

**TRANSPOR *MALACHITE GREEN* MELALUI *POLYMER INCLUSION*
MEMBRANE (PIM) MENGGUNAKAN *CARRIER COPOLY-EUGENOL*
DIALILFTALAT (Co-EDAF) 4%**

(Skripsi)

Oleh

**FILDZA AMALIA
NPM 2117011068**



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

ABSTRAK

TRANSPOR *MALACHITE GREEN* MELALUI *POLYMER INCLUSION MEMBRANE (PIM)* MENGGUNAKAN *CARRIER COPOLY-EUGENOL DIALILFTALAT (Co-EDAF) 4%*

Oleh

FILDZA AMALIA

Malachite green termasuk salah satu bahan pewarna yang digunakan dalam industri tekstil, namun limbahnya dapat mencemari lingkungan dan berpotensi berbahaya bagi kesehatan manusia dan ekosistem sehingga perlu adanya pemisahan *malachite green* dari limbah industri. Penelitian ini membahas mengenai transpor *malachite green* menggunakan metode PIM dengan *copoly-eugenol dialilftalat (Co-EDAF) 4%* sebagai *carrier*. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan hasil yang optimum dalam proses pemisahan *malachite green*, mengetahui morfologi dan struktur kimia dari membran PIM, serta mengetahui pengaruh logam berat Pb(II) dan Cu(II) terhadap efisiensi pemisahan *malachite green* pada limbah buatan. Membran dipreparasi dengan melarutkan *carrier Co-EDAF 4%*, polivinil klorida (PVC), dan dibenzileter (DBE) ke dalam pelarut tetrahidrofuran (THF). Konsentrasi *malachite green* setelah transpor diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum 617 nm. Membran PIM sebelum dan setelah transpor dikarakterisasi menggunakan FT-IR dan SEM. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa membran PIM dengan *carrier Co-EDAF 4%* mampu memisahkan *malachite green* secara efektif sebesar 91,12% pada kondisi optimum: pH fasa sumber 7, konsentrasi HNO₃ fasa penerima 1,00 M, ketebalan membran T₅₄, konsentrasi *carrier* 0,08 M, dan waktu transpor 24 jam. Keberadaan logam kompetitor mempengaruhi proses pemisahan *malachite green* dari fasa sumber ke fasa penerima. Hasil pemisahan *malachite green* tanpa kehadiran logam Pb(II) dan Cu(II) menghasilkan konsentrasi *malachite green* lebih besar, yaitu sebesar 91,52% dibandingkan pemisahan *malachite green* dengan adanya logam Pb(II) dan Cu(II), yaitu sebesar 89,92%.

Kata kunci: Co-EDAF 4%, *malachite green*, PIM

ABSTRACT

MALACHITE GREEN TRANSPORT THROUGH POLYMER INCLUSION MEMBRANE (PIM) USING CARRIER COPOLY-EUGENOL DIALILPHTHALATE (Co-EDAF) 4%

By

FILDZA AMALIA

Malachite green is one of the dyes used in the textile industry, but its waste can pollute the environment and potentially be harmful to human health and ecosystems, so it is necessary to separate malachite green from industrial waste. This study discusses the transport of malachite green using the PIM method with 4% copoly-eugenol dialilphthalate (Co-EDAF) as a carrier compound. This study aims to obtain optimal results in the process of separation of malachite green, determine the morphology and chemical structure of the PIM membrane, and the influence of heavy metals Pb(II) and Cu(II) on the efficiency of separation of malachite green in artificial waste. The membrane is prepared by dissolving the Co-EDAF carrier compounds 4%, polyvinyl chloride (PVC), and dibenzileter (DBE) into a tetrahydrofuran (THF) solvent. The concentration of malachite green after transport was measured using a UV-Vis spectrophotometer at a maximum wavelength of 617 nm. The PIM membrane before and after transport was characterized using FT-IR and SEM. The results of this study showed that the PIM membrane with 4% Co-EDAF carrier compounds was able to effectively separate malachite green by 91.12% under optimal conditions: source phase pH 7, HNO₃ receptor phase concentration 1.00 M, T₅₄ membrane thickness, carrier compound concentration 0.08 M, and 24-hour transport time. The presence of competitor metals interferes with the process of separation of green malachite from the source phase to the receiving phase. The result of the separation of malachite green without the presence of Pb(II) and Cu(II) metals resulted in a greater concentration of malachite green, which was 91.52% compared to the separation of malachite green with the presence of Pb(II) and Cu(II) metals, which was 89.92%.

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

**TRANSPOR *MALACHITE GREEN* MELALUI *POLYMER INCLUSION*
MEMBRANE (PIM) MENGGUNAKAN *CARRIER COPOLY-EUGENOL*
DIALILFTALAT (Co-EDAF) 4%**

Oleh

Fildza Amalia

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS

Pada

Jurusan Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

Judul : **TRANSPOR MALACHITE GREEN
MELALUI POLYMER INCLUSION
MEMBRANE (PIM) MENGGUNAKAN
CARRIER COPOLY-EUGENOL
DIALILFTALAT (Co-EDAF) 4%**

Nama Mahasiswa : **Fildza Amalia**

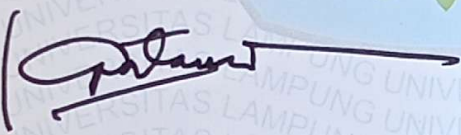
Nomor Pokok Mahasiswa : **2117011068**

Program Studi : **Kimia**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**

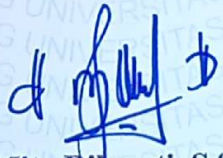
MENYETUJUI,

1. Komisi Pembimbing


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


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

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung

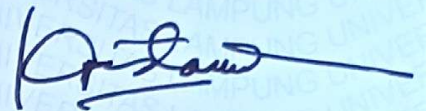

Dr. Mita Rilyanti, S.Si., M.Si.
NIP.197205302000032001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

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



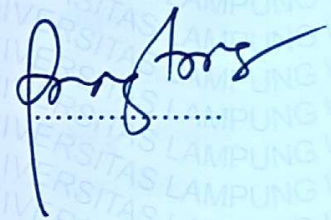
Sekretaris

: **Dr. Rinawati, M.Si.**



Anggota

: **Prof. Dr. Rudy TM Situmeang, M.Sc.**



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **3 Juli 2025**

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Fildza Amalia
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117011068
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul **Transpor Malachite Green melalui Polymer Inclusion Membrane (PIM) Menggunakan Carrier Copoly-Eugenol Dialilftalat (Co-EDAF) 4%** adalah benar karya sendiri, baik gagasan, hasil, dan analisisnya. Saya tidak keberatan jika data dalam skripsi ini digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi sesuai dengan kesepakatan sebelum dilakukan publikasi.

Bandar Lampung, 15 Juli 2025
Yang Menyatakan



Fildza Amalia
NPM. 2117011068

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Fildza Amalia dan lahir di Jakarta, 24 Mei 2003 sebagai anak tunggal dari Bapak Parnoto dan Ibu Yeni Noviana. Penulis menyelesaikan pendidikan di SMP Negeri 248 Jakarta pada tahun 2015-2018 dan SMA Negeri 56 Jakarta pada tahun 2018-2021. Pada tahun 2021, penulis melanjutkan pendidikan sebagai mahasiswa Jurusan Kimia,

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Lampung (Unila) dan menyelesaikan studinya pada tahun 2025.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Kader Muda Himaki pada tahun 2021, kemudian menjadi pengurus muda Himpunan Mahasiswa Kimia (Himaki) sebagai anggota bidang kaderisasi dan pengembangan organisasi pada tahun 2022. Pada tahun 2023 penulis menjabat sebagai Sekretaris Bidang Kaderisasi dan Pengembangan Organisasi Himaki FMIPA Unila. Selain itu, penulis juga mengikuti kegiatan Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) program Membangun Desa di Desa Rejomulyo, Kabupaten Lampung Selatan pada tahun 2023.

Pada tahun 2024 penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Tempat Pembuangan Sampah Terpadu (TPST) Bantargebang Bekasi. Penulis pernah menjadi asisten Praktikum Kimia Dasar pada tahun 2024. Pada tahun 2025 penulis telah menyelesaikan tugas akhir untuk mendapatkan gelar sarjana dengan membuat skripsi yang berjudul “*Transpor Malachite Green melalui Polymer Inclusion Membrane (PIM) Menggunakan Carrier Copoly-Eugenol Dialilftalat (Co-EDAF) 4%*”.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan menyebut nama Allah yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang

Dengan mengucap

Alhamdulillahil'alamin dan dengan segala kerendahan hati,

Ku persembahkan karya ini teruntuk;

*Kedua orang tuaku tercinta, Bapak Parnoto dan Ibu Yeni Noviana yang telah membesarkan,
mendidik, mendo'akan, mendukung, dan memberikan cinta dan kasih yang sangat besar
sehingga putrimu dapat menyelesaikan studi ini.*

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

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

Almamater Tercinta Universitas Lampung

MOTTO

“Wahai orang-orang yang beriman, rukuklah, sujudlah, sembahlah Tuhanmu, dan lakukanlah kebaikan agar kamu beruntung.”

(Q. S. *Al-Hajj*: 77)

“I know sour, which allows me to appreciate the sweet.”

(Jason Lee)

“Kita tidak bisa beli titik tertinggi untuk memulai sesuatu.
Semua harus dari nol.”

(Tsana)

“Jangan sepelekan hal kecil, kita gak pernah tau efeknya seperti apa. Kerikil dilempar ke laut, pasti ada gelombangnya.”

(Marcella FP)

Perjalanan pendidik yang sangat menyenangkan adalah saat melihat yang dididik menjadi bertambah keimanan kepada Allah dan berhasil dalam kehidupannya.

(Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc.)

Sesibuk apapun, hendaknya kerjakanlah sholat dhuha setiap pagi, walau hanya 2 rakaat, pasti Allah akan berikan keberkahan hidup sepanjang harinya.

(Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc.)

SANWACANA

Puji syukur atas kehadiran Allah *Subhanahu wa Ta'Ala, Rabb* semesta alam yang senantiasa memberikan rahmat, taufiq, hidayah, dan inayah-Nya, sehingga penulis masih diberikan kesehatan dan kemampuan untuk menyelesaikan skripsi dengan judul “Transpor *Malachite Green* melalui *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) Menggunakan *Carrier Copoly-Eugenol Dialilftalat* (Co-EDAF) 4%” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Jurusan Kimia Universitas Lampung. Selawat beriring salam tidak lupa penulis haturkan kepada *Nabiyallahu Muhammad Shalallahu 'alaihi wa Salam* yang telah membawa umat-Nya hijrah dari zaman jahiliah ke zaman yang bermartabat dan berilmu. Selama proses penyusunan skripsi ini tak lepas dari kesulitan dan rintangan, namun semua itu dapat penulis lalui berkat do'a, dukungan, bimbingan, dan bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih pada:

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Parnoto dan Ibu Yeni Noviana. Terima kasih atas segala pengorbanan, kasih sayang, cinta, nasihat, dukungan, dan materi yang telah diberikan selama ini sehingga penulis mampu menghadapi segala hambatan yang ada dan skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
2. Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc. selaku dosen pembimbing akademik sekaligus dosen pembimbing I. Terima kasih atas segala ilmu, kebaikan, bimbingan, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan studi, penelitian, dan skripsi.
3. Ibu. Dr. Rinawati, M.Si. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan, dan segala ilmu selama proses penyelesaian skripsi.

4. Bapak Prof. Dr. Rudy TM Situmeang, M.Sc. selaku dosen pembahas atas segala ilmu, masukan, dan saran dalam penelitian sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
5. Ibu Dr. Mita Rilyanti, M.Si. selaku ketua Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
7. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, pengalaman, dan motivasi selama penulis menjalankan studi di Universitas Lampung.
8. Seluruh staf administrasi dan pegawai di lingkungan Jurusan Kimia, Dekanat Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, serta Universitas Lampung yang senantiasa membantu dalam sistem akademik, perkuliahan, penelitian, serta penyusunan skripsi sehingga dapat diselesaikan dengan baik.
9. Emak, Mbah, Mamah Uun, Mami Kokom, Kanjang Fajar, Yay Ina, Yay Pipi, Dede, Kak Indah, Al, dan Anya serta keluarga besar tercinta yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan perhatian selama masa perkuliahan ini.
10. Teman sekamar penulis, Puti yang selalu siap sedia mendengar keluh kesah, memberikan dukungan, pikiran, waktu, dan bantuan selama masa perkuliahan ini dan berkembang bersama dalam segala hal. Terima kasih atas segala warna dan cerita selama ini, semoga selalu diberikan warna-warna cantik di kehidupan ini.
11. Teman seperjuangan penulis selama penelitian, Trie, Marsa, Abe atas bantuan, dukungan, dan kerja sama selama penelitian yang telah dilakukan bersama.
12. Keluarga besar *Membrane Research*, Mba Icha, Mba Kharisma, Kak Annur, Kak Fadhil, dan adik-adik *membrane*'22 yang telah kebersamai dan memberikan bantuan, dukungan, serta pengalamannya.
13. Trio bujang, Hafiz, Abe, Andra yang telah kebersamai dan membantu penulis selama masa perkuliahan.

14. Anggota grup “*Logical girls*”, Khai dan Trie yang selalu memberikan berbagai cerita, sudut pandang, dukungan, dan bantuan selama masa perkuliahan ini.
15. Para peri *greenflag*, Dedes, Gita, dan Khai yang sudah memberikan serbuk-serbuk kebahagiaan, warna, dukungan, dan perhatian selama proses menuju S.Si.
16. Anggota grup “njytm”, Khai, Alya, Linda, Ais yang sudah menjadi tempat penulis bercerita, belajar, dan bermain selama perkuliahan ini.
17. Keluarga besar Himaki Periode 2023, teman-teman pimpinan Abe, Amel, Alya, Hafiz, Govin, Ulma, Andra, Vira, Rima, Naurah, Trie, Talfa, Radit, dan Fera. Terima kasih atas cerita dan pengalamannya.
18. *My beloved* TM, Nopit, Lintang, Jole, dan Dita yang siap sedia menjadi tempat penulis bercerita, bermain, dan berkeluh kesah. Terima kasih atas do’a, dukungan, dan bantuan sejak masa putih biru.
19. Para “cantik”, Laras, Nana, dan Nini yang menjadi teman bermain dan bertukar cerita penulis, serta memberikan dukungan dan bantuan sejak masa putih abu-abu.
20. Anggota grup “rjm”, Mba Ing, Trie, Marsa, Ami, Rere, Nadira, dan Lilis yang telah memberikan pengalaman dan cerita sejak satu atap hingga selesai masa perkuliahan.
21. Teman-teman Kimia Angkatan 2021, khususnya kelas A atas segala cerita dan pengalaman barunya.
22. Seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung dalam menyelesaikan skripsi penulis dan tidak dapat disebutkan satu per satu, serta almamater Universitas Lampung.
23. Teruntuk diriku, Fildza Amalia. Terima kasih sudah berjuang dan bertanggung jawab atas apa yang dipilih. Terima kasih sudah bertumbuh dan berkembang menjadi sosok yang tangguh dan tidak menyerah dengan segala lika-liku yang ada selama ini.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini belum sempurna. Oleh karena itu, penulis memohon maaf dan memohon kritik serta saran yang membangun dari

pembaca untuk perbaikan penelitian selanjutnya. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan di masa depan.

Bandar Lampung, 15 Juli 2025
Penulis

Fildza Amalia

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	vi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	4
1.3 Manfaat	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Limbah Cair Industri Tekstil.....	5
2.2 <i>Malachite Green</i> (MG)	6
2.3 Senyawa Eugenol dan Dialilftalat (DAF)	8
2.4 Membran	10
2.5 Logam Berat.....	11
2.6 <i>Polymer Inclusion Membrane</i> (PIM)	13
2.7 <i>Fourier Transform-Infra Red</i> (FT-IR)	14
2.8 Spektrofotometer Ultra Violet- <i>Visible</i> (UV-Vis).....	17
2.9 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	19
III. METODE PERCOBAAN	24
3.1 Waktu dan Tempat	24
3.2 Alat dan Bahan.....	24
3.3 Pembuatan Larutan Induk MG, Pembuatan Limbah Buatan dan Pengukuran Konsentrasi MG.....	25
3.4 Pembuatan Membran <i>Polymer Inclusion Membrane</i> (PIM).....	26
3.5 Uji Membran PIM	26
3.5.1 Uji Porositas Membran	26
3.5.2 Uji Serapan Air Membran	27
3.6 Optimasi Transpor MG	28
3.6.1 Variasi pH MG pada Fasa Sumber.....	28
3.6.2 Variasi Konsentrasi HNO ₃ pada Fasa Penerima	28
3.6.3 Variasi Ketebalan Membran	28
3.6.4 Variasi Konsentrasi <i>Carrier</i>	29

3.6.5 Variasi Waktu Transpor	29
3.6.6 Studi Kompetisi Transpor MG pada Limbah Buatan.....	30
3.6.7 Analisis Parameter Transpor.....	30
3.7 Skema Penelitian.....	32
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Pembuatan Membran PIM	33
4.2 Uji membran PIM	38
4.2.1 Uji Porositas Membran	38
4.2.2 Uji Serapan Air Membran.....	39
4.3 Pengukuran Konsentrasi <i>Malachite Green</i> (MG) pada Fasa Sumber.....	40
4.4 Optimasi Transpor MG	41
4.4.1 Variasi pH MG pada Fasa Sumber	41
4.4.2 Variasi Konsentrasi HNO ₃ pada Fasa Penerima	43
4.4.3 Variasi Ketebalan Membran	44
4.4.4 Variasi Konsentrasi <i>Carrier</i>	46
4.4.5 Variasi Waktu Transpor	47
4.4.6 Studi Kompetisi Transpor MG pada Limbah Buatan	49
V. SIMPULAN DAN SARAN	53
5.1 Simpulan	53
5.2 Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN.....	60

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Karakteristik zat warna MG	7
2. Komposisi penyusun membran PIM.....	26
3. Variasi konsentrasi <i>carrier</i>	29
4. Berat total komponen membran, berat membran, dan ketebalan membran.....	34
5. Bilangan gelombang membran PIM setelah transpor	36
6. Hasil %Cs dan % <i>removal</i> transpor MG variasi pH pada fasa sumber.....	42
7. Hasil %Cs dan % <i>removal</i> transpor MG variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	44
8. Hasil %Cs dan % <i>removal</i> transpor MG variasi ketebalan membran.....	45
9. Hasil %Cs dan % <i>removal</i> transpor MG variasi konsentrasi <i>carrier</i>	46
10. Hasil %Cs dan % <i>removal</i> transpor MG variasi waktu transpor	48
11. Hasil kompetisi transpor MG pada limbah buatan 24 jam.....	50
12. Perbandingan bilangan gelombang membran setelah transpor MG pada limbah buatan.....	51
13. Absorbansi larutan standar MG pada variasi pH fasa sumber	68
14. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pH.....	68
15. Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pH	69
16. Absorbansi larutan standar MG pada variasi konsentrasi HNO ₃ fasa penerima	70
17. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi HNO ₃	70
18. Data $\bar{x}$, SD dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi HNO ₃	71
19. Absorbansi larutan standar MG pada variasi ketebalan membran.....	72

20. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi ketebalan membran.....	72
21. Data $\bar{x}$, SD dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi ketebalan membran.....	73
22. Absorbansi larutan standar MG pada variasi konsentrasi <i>carrier</i>	74
23. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi <i>carrier</i>	74
24. Data $\bar{x}$, SD dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi <i>carrier</i>	75
25. Absorbansi larutan standar MG pada variasi waktu transpor	76
26. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi waktu transpor	76
27. Data $\bar{x}$, SD dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi waktu transpor	77
28. Absorbansi larutan standar MG pada studi kompetisi limbah buatan.....	78
29. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada studi kompetisi limbah buatan	78
30. Data $\bar{x}$, SD dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada studi kompetisi limbah buatan	79
31. Data transpor variasi waktu.....	80
32. Uji normalitas MG kontrol.....	86
33. Uji-t sampel independen hasil studi kompetisi transpor MG terhadap logam Pb(II) dan Cu(II)	87
34. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi pH fasa sumber	88
35. Massa membran setelah transpor MG pada variasi pH fasa sumber	88
36. %LM <i>loss</i> transpor MG pada variasi pH fasa sumber	89
37. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi konsentrasi HNO ₃ fasa penerima.....	89
38. Massa membran setelah transpor MG pada variasi konsentrasi HNO ₃ fasa penerima.....	89
39. %LM <i>loss</i> transpor MG pada variasi konsentrasi HNO ₃ fasa penerima.....	89
40. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi ketebalan membran	90
41. Massa membran setelah transpor MG pada variasi ketebalan membran	90
42. %LM <i>loss</i> transpor MG pada variasi ketebalan membran	90
43. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi konsentrasi <i>carrier</i>	91
44. Massa membran setelah transpor MG pada variasi konsentrasi <i>carrier</i>	91
45. %LM <i>loss</i> transpor MG pada variasi konsentrasi <i>carrier</i>	91

46. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi waktu transpor	92
47. Massa membran setelah transpor MG pada variasi waktu transpor.....	92
48. %LM <i>loss</i> transpor MG pada variasi waktu transpor.....	92
49. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi kompetisi limbah buatan	93
50. Massa membran setelah transpor MG pada variasi kompetisi limbah buatan	93
51. %LM <i>loss</i> transpor MG pada variasi kompetisi limbah buatan.....	93
52. Ketebalan membran PIM pada variasi pH fasa sumber	94
53. Ketebalan membran PIM pada variasi konsentrasi HNO ₃ fasa penerima.....	94
54. Ketebalan membran PIM pada variasi ketebalan membran.....	94
55. Ketebalan membran PIM pada variasi konsentrasi <i>carrier</i>	94
56. Ketebalan membran PIM pada variasi waktu transpor	95
57. Ketebalan membran PIM pada variasi kompetisi limbah buatan.....	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Struktur senyawa kimia MG	7
2. Struktur eugenol.	9
3. Prediksi struktur polieugenol tertaut silang dengan DAF	10
4. Komponen spektroskopi FTIR.....	15
5. Spektrum FT-IR 8% Co-EDAF	16
6. Spektra FT-IR dari (a) eugenol, (b) polieugenol, (c) Co-EDAF 2%, (d) co-EDAF 6% dan (e) Co-EDAF 12%.....	17
7. Skema spektrofotometer UV-Vis (<i>Double-beam</i>)	18
8. Panjang gelombang maksimum MG.....	19
9. Komponen perangkat SEM.....	20
10. Morfologi bubuk Co-EDAF 8% berdasarkan hasil SEM (a) 100x (b) 500x ..	21
11. Hasil SEM pada membran a) sebelum dan b) setelah transpor.....	22
12. Morfologi permukaan membran setelah transpor MG pada limbah buatan ...	23
13. EDS spektrum dari membran setelah transpor MG pada limbah buatan	23
14. Skema penelitian	32
15. Membran PIM dengan Co-EDAF 4% sebelum transpor dengan ketebalan (a) T ₂₇ , (b) T ₅₄ , dan (c) T ₁₀₈	34
16. Spektra IR membran PIM sebelum transpor dan setelah transpor 24 jam	35
17. Morfologi membran PIM sebelum transpor dengan perbesaran (a) 500x, (b) 2500x dan setelah transpor 24 jam (c) 500x, (d) 2500x.....	37
18. Hasil uji porositas membran awal	38
19. Hasil uji serapan air membran awal	39
20. Panjang gelombang maksimum MG.....	40
21. Pengaruh pH MG pada fasa sumber terhadap konsentrasi MG yang tertranspor	42
22. Pengaruh konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima terhadap konsentrasi MG yang tertranspor	43

23. Pengaruh ketebalan membran PIM terhadap konsentrasi MG yang tertransportor	45
24. Pengaruh massa konsentrasi carrier membran PIM terhadap konsentrasi MG yang tertransportor	46
25. Pengaruh waktu transport membran PIM terhadap konsentrasi MG yang tertransportor	48
26. Perbandingan konsentrasi MG, logam Pb(II), dan logam Cu(II) pada kompetisi transport MG 24 jam	50
27. Spektra IR membran PIM setelah kompetisi transport MG	50
28. Morfologi permukaan membran (a) sebelum transport dan (b) setelah transport MG pada limbah buatan.....	51
29. Spektrum EDX membran setelah transport MG pada limbah buatan	52
30. Kurva kalibrasi MG pada variasi pH fasa sumber	68
31. Kurva kalibrasi MG pada variasi konsentrasi HNO ₃	70
32. Kurva kalibrasi MG pada variasi ketebalan membran.....	72
33. Kurva kalibrasi MG pada variasi konsentrasi carrier.....	74
34. Kurva kalibrasi MG pada variasi waktu transport	76
35. Kurva kalibrasi MG pada studi kompetisi limbah buatan.....	78
36. Plot Q-Q normal respon MG.....	86
37. (a) Alat cetak membran; (b) Membran PIM sebelum transport	96
38. Uji porositas membran (a) T ₂₇ (b) T ₅₄ (c) T ₁₀₈	96
39. Uji serapan air membran (a) T ₂₇ (b) T ₅₄ (c) T ₁₀₈	96
40. Transport MG variasi pH pada fasa sumber (a) sebelum transport dan (b) setelah transport	97
41. Transport MG variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima (a) sebelum transport dan (b) setelah transport.....	97
42. Transport MG variasi ketebalan membran (a) sebelum transport dan (b) setelah transport	98
43. Transport MG variasi variasi konsentrasi carrier (a) sebelum transport dan (b) setelah transport	98
44. Transport MG variasi variasi waktu (a) sebelum transport dan (b) setelah transport	99
45. Studi kompetisi transport MG pada limbah buatan (a) sebelum transport dan (b) setelah transport	99
46. Membran PIM setelah transport variasi waktu transport	100
47. Membran PIM setelah kompetisi transport MG pada limbah buatan	100
48. Skema fasa sumber, fasa membran, dan fasa penerima dalam transport MG	101

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencemaran air akibat bahan pewarna dari industri tekstil semakin menjadi perhatian. Pertumbuhan industri ini dipicu oleh permintaan pasar untuk produk *fashion*, sering kali mengabaikan dampak lingkungan dari limbah yang dihasilkan. Salah satu bahan pewarna yang sering digunakan adalah *malachite green* (MG), yang merupakan pewarna sintetis dari kelompok triphenylmethane. MG banyak digunakan dalam industri tekstil, tetapi limbahnya dapat mencemari lingkungan dan berpotensi berbahaya bagi kesehatan manusia dan ekosistem (Roy *et al.*, 2020). Limbah cair yang dihasilkan oleh kegiatan industri yang dibuang ke aliran sungai tanpa melalui proses pengolahan air limbah tentunya akan memberikan dampak terhadap pencemaran air karena kandungan kimia dari limbah cair yang dapat merusak ekosistem air (Pratistita dkk., 2024).

MG memiliki dampak buruk yang signifikan terhadap lingkungan dan kesehatan. MG bersifat persisten, tahan terhadap degradasi biologis alami, bio-akumulatif, dan memiliki sifat mutagenik, karsinogenik, serta teratogenik (Abewaa *et al.*, 2023). Stabilitas tinggi dan recalcitrance yang kuat dari MG menunjukkan kemampuannya untuk merusak sel hidup manusia secara langsung (Ruslinda dan Yustisia, 2013). Kadar MG yang diizinkan di perairan adalah sekitar 0,01 ppm (Fangidae *et al.*, 2020), jika melebihi batas ini dapat menyebabkan penurunan kualitas air dan kematian organisme akuatik. Namun, jika kadar ini melebihi batas, dapat menyebabkan penurunan kualitas air dan kematian organisme akuatik, yang pada gilirannya mengganggu ekosistem perairan dan mengancam keberlangsungan hidup berbagai spesies.

Mengingat bahaya yang dapat ditimbulkannya, maka diperlukan suatu pengolahan limbah untuk menurunkan kandungan senyawa MG. Metode konvensional penghilangan zat warna, seperti adsorpsi, degradasi, fotokatalitik, dan oksidasi kimia telah diterima secara luas dalam pengolahan limbah industri tekstil karena kemampuannya untuk aplikasi skala besar. Namun, metode tersebut memiliki kelemahan dalam hal biaya produksi, operasi, dan pemeliharaan yang tinggi. Pemisahan MG dengan teknik adsorpsi menggunakan berbagai macam absorben, seperti zeolite, silika gel, karbon aktif, grafit, kitosan dan bentonit umumnya tidak ekonomis dan membutuhkan bahan serta energi yang besar (Fangidae *et al.*, 2020). Berdasarkan uraian di atas, dicari alternatif lain yang dapat menangani limbah MG yaitu menggunakan teknik pemisahan membran. Berdasarkan pada struktur dan prinsip pemisahannya, membran terdiri dari tiga jenis, yaitu membran berpori, membran tidak berpori, dan membran cair. Teknik membran cair banyak digunakan untuk pemisahan MG dari lingkungan perairan. Membran cair digunakan karena nilai difusivitasnya yang tinggi terhadap medium cair. Pemisahan dengan membran cair dapat dilakukan secara berkelanjutan, penggunaan energi umumnya relatif lebih rendah, proses pemisahan dengan membran dapat digabungkan dengan proses pemisahan lainnya, pemisahan dapat dilakukan dalam kondisi yang mudah diciptakan, dan komponen membran bervariasi sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan (Bensaadi *et al.*, 2022).

Teknik pemisahan membran cair mengandung pembawa yang efektif, mudah disiapkan, serbaguna, stabil, memiliki sifat kimia dan mekanik yang baik. Teknik ini memiliki banyak potensi untuk aplikasi dalam berbagai industri, dan penelitian terus dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan selektivitasnya. Teknik transpor membran cair melibatkan tiga fasa, yaitu fasa sumber (*source phase*) yang mengandung senyawa target, fasa membran yang berisi *carrier* dalam pelarut organik, dan fasa penerima (*receiving phase*) yang berfungsi sebagai agen pelepas dari kompleks *carrier*. Teknik pemisahan membran cair, khususnya menggunakan *Polymer Inclusion Membrane* (PIM), melibatkan pembuatan membran yang terdiri dari tiga komponen utama: *carrier*, *plasticizer*, dan polimer dasar dalam suatu larutan, kemudian mencetaknya dalam satu cetakan hingga terbentuk film

yang tipis, stabil, dan fleksibel (Ruslinda dan Yustisia, 2013). Dalam pembuatan membran PIM, *carrier* berfungsi untuk memfasilitasi transportasi senyawa target melalui pori-pori membran menuju fasa penerima. Polimer dasar berperan sebagai pendukung untuk menjaga integritas membran, sedangkan *plasticizer* digunakan untuk meningkatkan fleksibilitas dan stabilitas sistem di dalam membran.

Membran PIM dianggap mampu meningkatkan kestabilan karena dua hal, yaitu polimer dasar misalnya polivinil klorida yang diharapkan dapat mengatasi kebocoran *carrier*, dan plasticizer yang berfungsi untuk membuat sistem membran lebih stabil. Keunggulan dari PIM, antara lain mudah dalam sistem operasinya, dapat meminimalkan penggunaan bahan kimia, serta komposisi membran yang fleksibel dan selektif sebanding dengan pemisahan yang efisien.

Carrier termasuk salah satu komponen penting dalam membran PIM, karena berperan dalam proses pemisahan yang efektif. Salah satu *carrier* yang dapat digunakan, contohnya *Copoly-Eugenol Dialil Ftalat* (Co-EDAF). Co-EDAF termasuk senyawa hasil modifikasi kopolimerisasi dari senyawa eugenol yang diharapkan dapat meningkatkan jumlah sisi aktif pada polimer yang digunakan sebagai *carrier* pada proses transpor MG. Co-EDAF berfungsi sebagai *carrier* yang memiliki afinitas tinggi terhadap MG, sehingga mempengaruhi efektivitas pemisahan. Berdasarkan penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa variasi konsentrasi *carrier* dapat mempengaruhi hasil transportasi, sehingga penting untuk mengeksplorasi berbagai konsentrasi untuk mendapatkan performa terbaik dalam aplikasi pemisahan senyawa seperti MG.

Penelitian mengenai transpor MG menggunakan metode PIM dengan Co-EDAF telah dilakukan oleh Ma'ruf (2023). Dalam penelitian tersebut, penggunaan Co-EDAF 2% berhasil mentranspor MG sebesar 91,30% pada kondisi optimum, yaitu pH fasa sumber 9 dan waktu transpor selama 18 jam. Selain itu, penelitian mengenai penggunaan Co-EDAF dengan metode PIM dalam transpor MG juga dilakukan oleh Aini (2024). Pada penelitian tersebut digunakan Co-EDAF 6% yang berhasil mentranspor MG sebesar 91,86%. Meskipun penelitian dengan MG telah dilakukan pada konsentrasi 2% dan 6%, penggunaan Co-EDAF 4% dalam

transpor MG belum pernah dilakukan. Penggunaan Co-EDAF 4% dalam penelitian ini dapat memberikan keseimbangan antara efisiensi dan selektivitas dalam proses pemisahan. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan rangkaian optimasi transpor MG, meliputi pembuatan membran PIM, uji porositas membran PIM, uji serapan air membran, variasi pH MG pada fasa sumber, variasi konsentrasi HNO_3 pada fasa penerima, variasi ketebalan membran, variasi konsentrasi *carrier*, variasi waktu transpor, dan studi kompetisi transpor MG pada limbah buatan menggunakan membran PIM dengan *carrier* Co-EDAF 4%.

1.2 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui hasil yang optimum dalam proses pemisahan MG menggunakan *carrier* Co-EDAF 4% dengan metode PIM.
2. Mengetahui morfologi dan struktur kimia dari membran PIM yang dihasilkan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Fourier Transform Infrared* (FT-IR).
3. Mengetahui pengaruh keberadaan logam berat Cu(II) dan Pb(II) terhadap efisiensi pemisahan melalui uji kompetisi transpor MG pada limbah buatan.

1.3 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memberikan informasi tentang pemanfaatan polimer Co-EDAF 4% sebagai *carrier* dalam pemisahan MG.
2. Memberikan wawasan dalam pemanfaatan polimer dalam bidang analisis kimia.
3. Memberikan kontribusi untuk mengurangi limbah zat warna khususnya MG di lingkungan perairan dan menambah nilai ekonomis dari eugenol.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah Cair Industri Tekstil

Limbah pada dasarnya berarti suatu bahan yang terbuang atau dibuang dari suatu sumber hasil aktivitas manusia, maupun proses-proses alam dan tidak atau belum mempunyai nilai ekonomi, bahkan dapat mempunyai nilai ekonomi yang negatif. Limbah umumnya dibagi menjadi tiga, yaitu limbah yang berbentuk cair (limbah cair), limbah yang berbentuk padat (limbah padat), dan limbah yang berbentuk gas (limbah gas). Limbah ini biasanya terbuang ke lingkungan. Limbah dikatakan telah mencemari lingkungan jika limbah itu memasuki lingkungan dan mengakibatkan terjadinya perubahan keseimbangan lingkungan yang merugikan atau tidak diharapkan. Penanganan dan pengendalian limbah telah menjadi masalah yang semakin lama semakin kompleks dan rumit. Dalam era globalisasi ini, pengelolaan lingkungan menjadi topik yang menarik perhatian banyak pihak di seluruh dunia karena berhubungan dengan produktivitas dan pembangunan yang berkelanjutan (Willian dan Pardi, 2022).

Industri tekstil tidak banyak menghasilkan banyak limbah padat. Limbah yang lebih banyak dihasilkan secara volume yaitu limbah cair berupa pewarna dalam volume besar ke dalam perairan di Indonesia baik sungai ataupun selokan. Limbah cair terutama dihasilkan dari proses penyempurnaan tekstil, mengandung bahan-bahan yang dilepas dari serat, sisa bahan kimia yang ditambahkan pada proses penyempurnaan tersebut, dan yang terlepas dengan cara kimia atau mekanik selama proses produksi tekstil berjalan. Selain itu, limbah cair dari

industri tekstil juga didapat dari cairan kimia dalam mencetak motif pada kain yang dilakukan dengan teknologi mesin *print* (Enrico, 2019).

Sektor industri pewarna telah menjadi sumber polusi lingkungan karena berbagai kegiatan industri yang memiliki dampak pada peningkatan limbah industri yang dihasilkan. Selain polusi lingkungan, pewarna dapat merusak lingkungan, dan keanekaragaman hayati, dan merusak kesehatan manusia. Banyak industri menggunakan pewarna sintetis karena kemudahan dan efisiensi biaya sintesis, keberanian warna, dan stabilitas cahaya. Namun, industri tekstil adalah sumber limbah dalam jumlah besar. Perawatan khusus dari pewarna ini sangat penting untuk mengatasi masalah lingkungan yang disebabkan karena kandungan MG sangat berbahaya (Kiswandono *et al.*, 2024).

2.2 Malachite Green (MG)

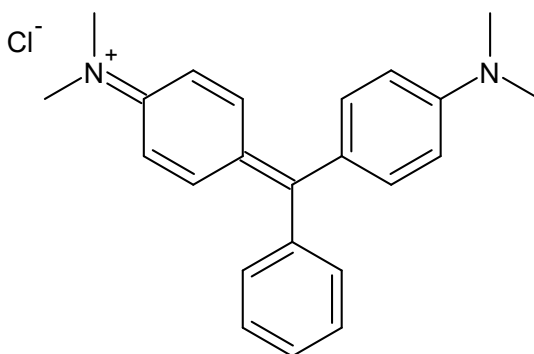
Zat warna merupakan salah satu produk industri yang biasa digunakan sebagai pewarna. Zat warna digunakan dalam beberapa industri seperti industri makanan, obat-batan, tekstil dan kosmetik (Silvia dkk., 2020). Zat warna yang biasa digunakan dalam beberapa industri tersebut selain memiliki manfaat juga memberikan dampak bagi lingkungan berupa limbah zat warna. Limbah zat warna merupakan limbah cair yang bersifat toksik, mutagenik dan karsinogenik yang biasanya mencemari perairan (Hayu dkk., 2022). Limbah zat warna yang sering mencemari perairan adalah MG (Silvia dkk., 2020).

MG adalah warna dasar organik yang terbuat dari garam yang mengandung amino. MG banyak dimanfaatkan dalam berbagai industri karena memiliki warna terang dan harga yang relatif murah (Silvia dkk., 2020). Zat warna ini juga dapat menimbulkan dampak negatif karena dapat merusak kekebalan tubuh makhluk hidup, bersifat karsinogenik dan gemotoksik (Yonel dkk., 2021). Kadar MG yang hanya diperbolehkan tersebar diperairan adalah sebesar 0,01 ppm (Anggraini dan Nasra, 2024).

Salah satu zat warna yang digunakan di industri tekstil yaitu MG yang berbahaya bagi lingkungan. Zat warna MG dapat menyebabkan iritasi pada sistem pencernaan manusia jika mengkonsumsi ikan yang terkontaminasi zat tersebut. MG diketahui dapat meracuni sel mamalia dan dapat menyebabkan tumor. Air yang mengandung MG harus dinetralkan terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan (Kusumaningrum dkk., 2022). MG merupakan suatu senyawa organik yang dapat larut dalam air. MG merupakan zat warna yang toksik dan dapat menimbulkan bahaya jika tercampur dalam badan air. Zat warna MG biasanya digunakan sebagai bahan pencelupan kertas, wol, kulit, tekstil, kapas, dan serat akrilik. Sifat fisika dan kimia zat warna MG dapat dilihat pada Tabel 1. Struktur zat warna MG dapat dilihat pada Gambar 1.

Tabel 1. Karakteristik zat warna MG

Parameter	Nilai
Rumus Molekul	$C_{23}H_{25}ClN_2$
Berat Molekul	364,9 g/mol
Indeks Warna	42000
CAS Number	2437-29-8
Nature	Zat warna kationik



Gambar 1. Struktur senyawa kimia MG

(Kusumaningrum dkk., 2022).

MG merupakan salah satu limbah zat warna yang banyak digunakan. MG ini zat warna yang bahan dasarnya adalah garam dari warna dasar organik yang mengandung amino, dan termasuk zat warna dasar celup. MG tergolong zat warna trifenilmetan yang umum di industri tekstil, karena warnanya yang cemerlang,

efek yang ditimbulkan menarik, harganya murah dan mudah ditemukan, namun bersifat karsinogenik. Dampak bagi manusia jika zat warna ini terakumulasi di dalam tubuh dapat menimbulkan ancaman kesehatan yang serius seperti mampu merusak system reproduksi, sistem kekebalan tubuh serta genotoksik (Silvia dkk., 2020).

Pesatnya perkembangan industri tekstil pada saat sekarang ini mengakibatkan limbah zat warna terus meningkat. Umumnya industri tekstil memproduksi limbah zat warna yang termasuk golongan senyawa organik *non-biodegradable* atau sulit teruraikan yang menyebabkan tercemarnya ekosistem perairan. Limbah zat warna yang banyak ditemukan salah satunya adalah MG. Di dalam tubuh makhluk hidup, akumulasi zat warna MG bersifat karsinogenik, gemotoksik, dan mempengaruhi sistem kekebalan tubuh. Nilai ambang batas MG di perairan maksimal sebesar 0,01 ppm. Pencemaran lingkungan perairan yang disebabkan oleh zat warna sintetik dapat diatasi dengan beberapa cara seperti metode koagulasi, ozonisasi, proses oksidasi, presipitasi kimia, pertukaran ion, ultrafiltrasi, dan reverse osmosis (Yonel dkk., 2021).

Peningkatan konsentrasi pewarna tekstil dalam berbagai limbah *electroplating*, cat, pewarna, chrome tanning, industri kertas, dll, telah menjadi kekhawatiran besar karena sifat beracun dan efek merugikan lainnya pada penerimaan air. MG (MG) adalah salah satu pewarna dasar yang biasa digunakan dalam pewarna kapas, sutra, kertas, bambu, rumput, tanah liat dan kulit serta dalam pembuatan cat dan tinta pencetakan, yang mencemari lingkungan air karena penghapusan yang tidak tepat dari limbah industri tersebut di negara-negara berkembang. MG dicurigai sebagai karsinogen serta teratogen dan racun pernapasan (Nurlela, 2019).

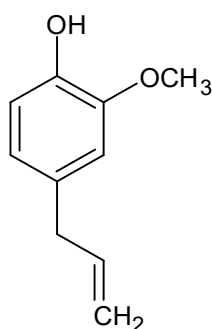
2.3 Senyawa Eugenol dan Dialilftalat (DAF)

Eugenol merupakan turunan guaiakol yang mendapat tambahan rantai alil, dikenal dengan nama IUPAC 2-metoksi-4-(2-propenil) fenol. Eugenol dapat

dikelompokkan dalam keluarga alilbenzena dari senyawa-senyawa fenol (Salsabila dkk., 2023). Eugenol dan turunannya telah diteliti secara komputasi untuk mengetahui sifat serta reaksi yang melibatkan eugenol dan turunannya (Maahury dkk., 2022).

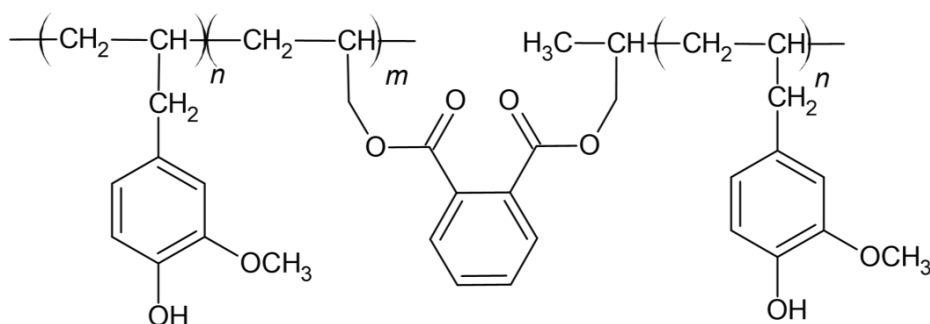
Salah satu sumber daya terbarukan yang mudah tersedia untuk sintesis polimer adalah eugenol. Eugenol adalah senyawa fenolik yang merupakan komponen utama minyak cengkeh (*Eugenia caryophyllata*) (70-90%) yang dapat dengan mudah diekstraksi dengan menambahkan basa untuk membentuk garam eugenol. Selain memiliki gugus fenolik ($-\text{OH}$), eugenol juga memiliki metoksi dan alik. Kehadiran gugus alil ($-\text{CH}_2\text{CH}=\text{CH}_2$) dalam eugenol memungkinkan polimerisasi terjadi melalui reaksi polimerisasi penambahan kationik. Penelitian tentang sintesis polimer dari eugenol telah banyak dilakukan dan diterapkan, seperti untuk polimer antibakteri dan antioksidan, dan bahan terbarukan termoset (Ngadiwiyana *et al.*, 2022).

Eugenol memiliki tiga gugus fungsional, yaitu gugus alil, hidroksi, dan metoksi. Gugus alil pada eugenol memungkinkan terjadinya polimerisasi untuk membentuk polieugenol. Proses polimerisasi ini bertujuan untuk meningkatkan pemanfaatan eugenol, menjadikannya sebagai bahan yang lebih efektif untuk *carrier* dalam metode pemisahan membran cair (Kiswandono dkk., 2024). Tampilan struktur eugenol dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur eugenol.

Eugenol dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam sintesis polieugenol dan polieugenol dapat digunakan sebagai *carrier* dalam transpor membran cair. Pada umumnya polieugenol dapat dihasilkan melalui sintesis langsung menggunakan katalis asam, tetapi polimer hasil sintesis ini belum efektif, karena kemampuan interaksi dengan senyawa target masih kurang. Alternatif untuk meningkatkan sisi aktif dapat dilakukan dengan cara kopolimerisasi melalui ikatan rangkap dua (senyawa-senyawa diena). DAF merupakan senyawa monomer yang memiliki gugus diena sehingga dapat digunakan kopolimerisasi untuk memperoleh struktur tertaut silang dalam hasil akhirnya (Kiswandono dkk., 2017). Prediksi struktur polieugenol hasil tertaut silang dengan DAF dapat dilihat pada Gambar 3. Modifikasi dengan cara kopolimerisasi diharapkan dapat meningkatkan jumlah sisi aktif pada polimer, semakin banyak agen taut silang (*crosslinking agent*) menyebabkan berat molekul semakin tinggi dan meningkatkan fraksi gel serta viskositas polimer. Senyawa turunan polieugenol yang telah ditaut silang dengan senyawa-senyawa diena, maka senyawa turunan polieugenol ini akan memiliki berat molekul yang lebih besar dibandingkan polieugenol yang dihasilkan tidak melalui taut silang, sehingga jumlah sisi aktif semakin banyak, dan polieugenol menjadi lebih stabil (Kiswandono, 2014).



Gambar 3. Prediksi struktur polieugenol tertaut silang dengan DAF (Kiswandono, 2014)

2.4 Membran

Membran adalah lapisan tipis antara dua fase cair. Fungsinya sebagai penghalang terhadap spesies tertentu dan membatasi pergerakan spesies yang berbeda

tergantung pada sifat fisik dan kimianya. Membran berperan dalam mengendalikan perpindahan zat antara dua media, menjaga selektivitas berdasarkan sifat spesifiknya. Pemilihan jenis membran untuk mengolah limbah fenol cair melibatkan pertimbangan berbagai faktor, seperti sifat kimia fenol, kondisi operasional, dan tujuan pengolahan limbah. Membran cair dipilih karena mempunyai karakteristik tertentu yang efektif mengatasi permasalahan pencemaran limbah cair fenol (Kiswandono *et al.*, 2023).

Membran itu sendiri bisa berupa padat, cair, atau gel. Membran permukaan sebagai saringan molekuler yang dibuat dalam bentuk film dari satu bahan yang berlapis dengan jaring halus atau pori-pori kecil untuk memungkinkan pemisahan partikel dan molekul kecil. Membran berfungsi sebagai penghalang selektif, memungkinkan zat tertentu melewatinya sambil menahan zat lain. Kemampuan membran untuk membedakan antarspesies disebut selektivitas. Membran digunakan untuk menyimpan zat terlarut, zat terlarut-zat terlarut, partikel-zat terlarut, dan partikel-pelarut (Lestari, 2020).

Membran cair didefinisikan sebagai lapisan tipis yang bersifat *semipermeable*, yang artinya hanya molekul dengan ukuran tertentu yang dapat melintasi dari satu fasa ke fasa lainnya melalui membran, sementara molekul lain ditahan di permukaan membran. Membran cair banyak digunakan karena memiliki banyak kelebihan yang menguntungkan penggunaannya, diantaranya pemisahan berlangsung pada suhu kamar, penggunaan energi cenderung lebih rendah, perawatan relatif mudah, dan tidak merubah struktur molekul zat yang dipisahkan sehingga prosesnya menjadi lebih sederhana (Kiswandono dkk., 2024).

2.5 Logam Berat

Logam berat dalam perairan akibat limbah industri bersifat toksik bagi biota akuatik dan indikator pencemaran lingkungan jika melebihi batas aman. Timbal (Pb) tidak memiliki manfaat bagi organisme air, tetapi kelebihan konsentrasinya

mengganggu kelangsungan hidup biota perairan dan berisiko terakumulasi dalam ikan, membahayakan keamanan pangan manusia. Sementara itu, tembaga (Cu) diperlukan organisme dalam jumlah kecil, tetapi menjadi racun jika berlebihan biasanya berasal dari limbah industri percetakan, garment, atau besi *stainless*. Nilai baku mutu sesuai Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021 bahwa nilai ambang batas untuk logam berat Cu di perairan secara nasional adalah sebesar 0.02 mg/L (baku mutu III) dan 0.02 mg/L (baku mutu IV) dan logam berat Pb adalah sebesar 0.03 µg/L (baku mutu III) dan 0.05 µg/L (baku mutu IV) (Paundanan dkk., 2023).

Logam berat dalam suatu perairan dibutuhkan oleh makhluk hidup untuk berbagai proses metabolisme tetapi jika logam berat tersebut berlebihan akan menyebabkan keracunan. Logam berat dikatakan sebagai bahan pencemar apabila keberadaannya melewati batas baku mutu. Berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No 51 Tahun 2004 bahwa batas maksimal Cu di perairan yakni sebesar 0,008 mg/L. Menurut Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No 51 Tahun 2004, bahwa ambang batas logam berat Pb yang diperbolehkan yakni sebesar 0,008 mg/L (Permata dkk., 2018).

Salah satu jenis pencemaran lingkungan yang dihadapi saat ini adalah disebabkan oleh logam-logam berat di antaranya adalah logam berat tembaga yang terdapat pada limbah cair. Sumber-sumber penyumbang pencemaran logam berat tembaga dapat berasal dari industri elektronika, penggunaan fungisida dan insektisida yang berlebihan. Jumlah logam tembaga yang diperbolehkan terakumulasi dalam air adalah 1,3 ppm dan bila lebih akan bersifat toksik dan dapat menyebabkan gangguan tertentu pada makhluk hidup, sehingga diperlukan langkah-langkah pencegahan berupa pengambilan atau pemisahan logam berat tembaga tersebut (Haris dkk., 2005).

Sungai adalah ekosistem lotik yang sering mengalami pencemaran baik itu dari sumber alami maupun aktivitas manusia seperti domestik, pertanian, dan industri. Kehadiran pencemar seperti logam-logam berat akan berpengaruh buruk terhadap

proses-proses biologis organisme akuatik yang dapat mengancam keberlanjutan kehidupannya termasuk manusia melalui jalur jaringan makanan. Sumber logam-logam berat dapat berasal dari sumber alami seperti pelapukan batuan dan deposisi atmosfer. Sumber antropogenik antara lain pertanian, peternakan, domestik, dan industri. Seluruh data yang diperoleh pada penelitian ini dianalisis kemudian dibandingkan dengan Nilai Ambang Batas (NAB) menurut standar baku mutu air sungai berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 82 tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Baku Mutu untuk logam Pb dan Cu secara berturut-turut yaitu 0,03 dan 0,02 mg/L. (Patty dkk., 2018).

2.6 Polymer Inclusion Membrane (PIM)

Teknik membran cair yang dikenal sebagai metode PIM telah muncul sebagai pilihan yang lebih stabil dibandingkan dengan pendekatan membran cair lainnya untuk memisahkan dan memurnikan senyawa fenol dari air limbah dengan pembawa yang berbeda. Metode PIM dalam menggunakan membran cair banyak dipilih karena memiliki kemampuan pemisahan yang luas dan selektif, mudah dalam aplikasi, membutuhkan sedikit energi, dapat mengekstraksi logam dan non-logam secara selektif, mengurangi penggunaan bahan kimia, dan memiliki komposisi membran yang fleksibel (Kiswandono *et al.*, 2024).

Teknologi pemisahan menggunakan membran cair telah diterima secara luas di banyak negara industri dibandingkan dengan metode konvensional lainnya, seperti ekstraksi cairan, filtrasi membran, dan elektrodialisis. PIM adalah metode terbaru yang menerapkan teknik ini menggunakan komposisi komponen membran yang terdiri dari PVC sebagai polimer dasar dan ekstraktor yang biasa disebut sebagai pembawa. Metode ini adalah salah satu metode alternatif yang telah digunakan di tahun-tahun sebelumnya karena ramah lingkungan, yang mendukung *green chemistry*. Hal ini karena PIM tidak membutuhkan pelarut dalam jumlah besar tetapi hanya jumlah transportasi yang relatif kecil. Selain itu,

telah banyak digunakan untuk pemisahan logam berat, dan senyawa organik. Keuntungan lain adalah bahwa itu memiliki permukaan antarmuka yang lebih besar dan sangat selektif tergantung pada jenis komponen untuk mendapatkan memori yang selektif, kuat, dan mampu memisahkan senyawa dengan mudah dan efisien (Kiswandono *et al.*, 2022).

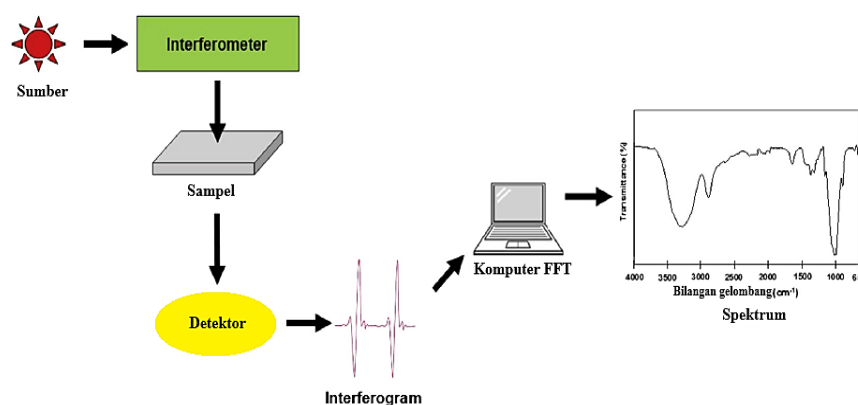
Carrier yang terkandung dalam metode PIM mempengaruhi umur membran dalam mengangkut senyawa sasaran ke fase penerima. Selain itu, *carrier* dalam PIM juga memiliki durasi hidup yang lebih lama dibandingkan dengan SLM. Hal ini dikarenakan mekanisme transportasi PIM tergantung pada komposisi membran dan homogenitas permukaan. Proses transportasi dalam PIM membutuhkan *carrier* sebagai salah satu komponen yang digunakan dalam membentuk membran. Selain itu, ada berbagai cara untuk meningkatkan stabilitas dan permeabilitas membran seperti menambahkan polimer persimpangan ke komposisi. Interaksi antara pengangkut dan senyawa sasaran juga diperlukan untuk mengangkut fenol dari fase sumber ke membran. Konsentrasi *carrier* yang digunakan dalam PIM umumnya jauh lebih kecil (Kiswandono *et al.*, 2022).

Membran PIM dirancang untuk memiliki stabilitas yang baik terhadap berbagai kondisi lingkungan, termasuk perubahan pH, suhu, dan paparan polutan berbahaya. Stabilitas ini diperoleh dari komponen polimer yang menjadi dasar struktural membran, seperti PVC yang memiliki ketahanan mekanis dan kimia yang baik. Sementara itu, selektivitas PIM sangat tinggi karena keberadaan *carrier* dalam membran. *Carrier* mampu berinteraksi secara spesifik dengan polutan tertentu melalui kompleksasi atau pengikatan selektif, sehingga hanya senyawa target yang dapat ditranspor secara efektif (Kiswandono dkk., 2025).

2.7 Fourier Transform-Infra Red (FT-IR)

FT-IR adalah salah satu teknik analisis penting bagi para peneliti. Jenis analisis ini dapat digunakan untuk mengkarakterisasi sampel dalam bentuk cairan, larutan, pasta, bubuk, film, serat, dan gas. Analisis ini juga dimungkinkan untuk

menganalisis material pada permukaan substrat, dibandingkan dengan jenis analisis karakterisasi lainnya, FT-IR cukup populer. Analisis karakterisasi ini cukup cepat, akurasi yang baik, dan relatif sensitif. Dalam prosedur analisis FT-IR, sampel mengalami kontak dengan radiasi inframerah (IR). Radiasi IR kemudian berdampak pada getaran atom molekul dalam sampel, menghasilkan penyerapan spesifik dan/atau transmisi energi. Hal ini membuat FT-IR berguna untuk menentukan getaran molekul spesifik yang terkandung dalam sampel. Spektrum IR dibagi menjadi tiga wilayah nomor gelombang: spektrum IR jauh ($<400\text{ cm}^{-1}$), spektrum IR tengah ($400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$), dan spektrum IR dekat ($4000\text{--}13000\text{ cm}^{-1}$). Spektrum IR menengah adalah yang paling banyak digunakan dalam analisis sampel, tetapi spektrum IR jauh dan dekat juga berkontribusi dalam memberikan informasi tentang sampel yang dianalisis (Nandiyanto *et al.*, 2019). Komponen spektroskopi FT-IR dapat dilihat pada Gambar 4.

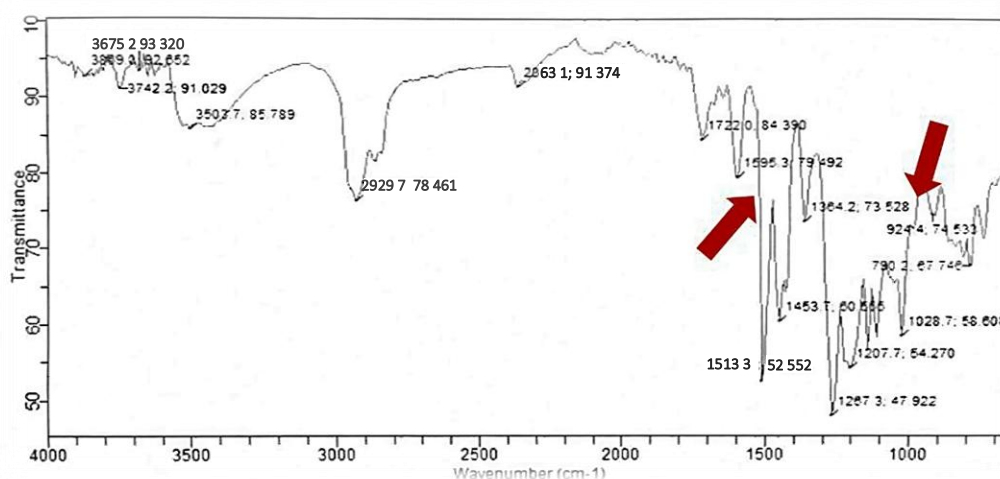


Gambar 4. Komponen spektroskopi FTIR (Alqaheem and Alomair, 2020)

Spektrum FT-IR merupakan hasil interaksi antara senyawa-senyawa kimia dalam matriks sampel yang kompleks. Spektrum FT-IR sangat kaya dengan informasi struktur molekular dengan serangkaian pita serapan yang spesifik untuk masing-masing molekul sehingga dapat digunakan untuk membedakan suatu bahan baku yang memiliki kemiripan. Keuntungan teknik spektroskopi FT-IR ialah berpotensi sebagai metode analisis yang cepat karena dapat dilakukan secara langsung pada sampel tanpa adanya tahapan pemisahan terlebih dahulu. Kekurangan yang dapat ditimbulkan dengan menggunakan spektroskopi FT-IR ialah dalam hal interpretasi secara visual dan langsung menjadi sulit akibat adanya tumpang tindih spektrum

serapan dari molekul-molekul dalam sampel. Spektrum FT-IR akan menampilkan keseluruhan informasi ikatan dalam suatu molekul yang terdiri atas gerak vibrasi dan rotasi. Hal tersebut membuat spektroskopi FT-IR sangat berguna untuk analisis kualitatif seperti membedakan antar sampel akan tetapi interpretasinya dapat menjadi sulit dilakukan akibat adanya kemiripan dari setiap respon ikatan pada molekul yang ada dalam suatu sampel (Rafi dkk., 2016).

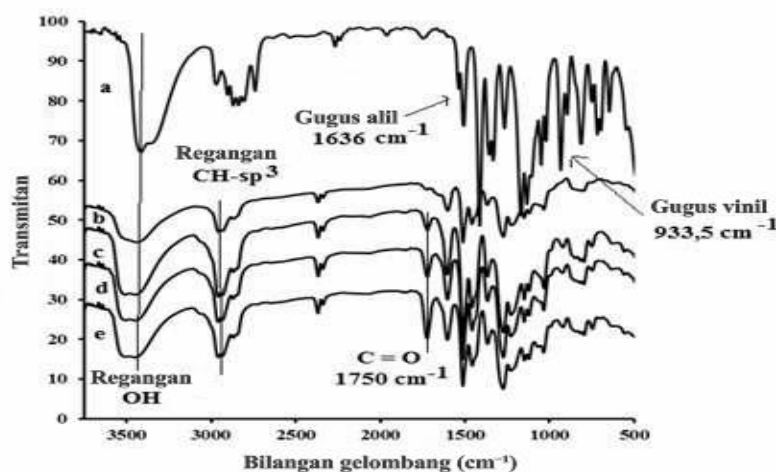
Sintesis 8% *Copoly Eugenol-Diallyl Phthalate* (Co-EDAF) merupakan *carrier* yang memiliki gugus aktif –OH, sehingga perlu dilakukan karakterisasi menggunakan FT-IR untuk menentukan keberhasilan sintesis. Pada Gambar 5 menunjukkan spektrum FT-IR dari senyawa Co-EDAF (Kiswandono *et al.*, 2019). Berdasarkan spektrum FT-IR pada Gambar 5 menunjukkan bahwa tidak ada munculnya gugus vinil ($-\text{CH}=\text{CH}_2$) pada nomor gelombang $995,27\text{ cm}^{-1}$ dan gugus alil pada nomor gelombang 1636 cm^{-1} , ini adalah parameter keberhasilan dalam sintesis ini. Selain itu hilangnya penyerapan di area $1000-650\text{ cm}^{-1}$, juga menunjukkan bahwa telah terjadi reaksi tambahan terhadap ikatan rangkap dalam eugenol. Penyerapan yang kuat pada beberapa bilangan gelombang di atas menunjukkan bahwa kopolimerisasi telah berhasil (Kiswandono *et al.*, 2019).



Gambar 5. Spektrum FT-IR 8% Co-EDAF (Kiswandono *et al.*, 2019)

Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Kiswandono *et al.*, (2019) diperoleh perbandingan spektrum IR eugenol, polieugenol dan Co-EDAF 2, 6 dan 12% seperti yang disajikan pada Gambar 6. Spektra tersebut menunjukkan bahwa

polieugenol dan Co-EDAF memiliki pola yang hampir serupa karena tidak ada gugus baru yang muncul atau hilang pada kedua senyawa tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa jenis gugus fungsional pada polieugenol dan *co-polymer* adalah sama, kecuali pada penyerapan di 1750 cm^{-1} yang khas untuk gugus $\text{C}=\text{O}$ pada Co-EDAF, sementara polieugenol tidak memiliki gugus karbonil ini.



Gambar 6. Spektrogram FT-IR dari (a) eugenol, (b) polieugenol, (c) Co-EDAF 2%, (d) co-EDAF 6% dan (e) Co-EDAF 12% (Kiswandono *et al.*, 2019)

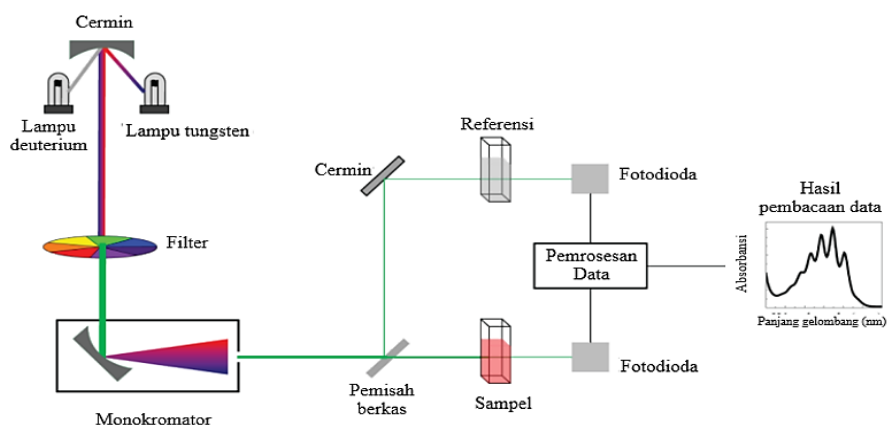
Berdasarkan Gambar 6, Co-EDAF menunjukkan intensitas dan rasio puncak yang lebih besar dibandingkan polieugenol karena polimer *crosslinker* memiliki jumlah gugus identik yang jauh lebih banyak. Kekuatan penyerapan spektrum IR yang lebih tinggi menunjukkan bahwa dua polimer ikatan silang memiliki lebih banyak gugus fungsional dibandingkan polieugenol. Penyerapan yang lebih kuat terlihat tidak hanya pada pita gugus $-\text{OH}$, tetapi juga di hampir semua bagian spektrum, sehingga dapat disimpulkan bahwa kopolimerisasi telah berhasil dilakukan (Kiswandono *et al.*, 2019).

2.8 Spektrofotometer Ultra Violet-Visible (UV-Vis)

Spektrofotometri dapat dianggap sebagai perluasan suatu pemeriksaan visual dengan studi yang lebih mendalam dari absorpsi energi. Absorpsi radiasi oleh

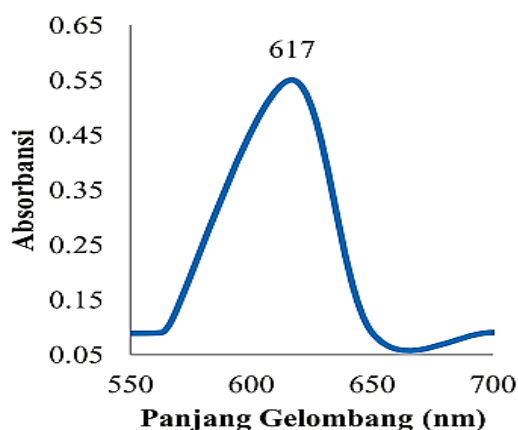
suatu sampel diukur pada berbagai panjang gelombang dan dialirkan oleh suatu perekam untuk menghasilkan spektrum tertentu yang khas untuk komponen yang berbeda. Penyerapan sinar UV menyebabkan elektron dalam materi untuk melompat ke tingkat energi yang lebih tinggi. Ketika molekul atau ion menyerap ultraviolet atau radiasi yang terlihat itu mengalami perubahan dengan konfigurasi elektron valensi. Empat jenis transisi antara tingkat energi terkuantisasi untuk menjelaskan spektrum molekul UV-Vis. Rentang panjang gelombang perkiraan untuk serapan ini, seperti dalam daftar ikatan, kelompok fungsional, atau molekul yang menimbulkan transisi (Yudono, 2017).

Pada umumnya terdapat dua tipe instrumen spektrofotometer, yaitu *single-beam* dan *double-beam*. *Single-beam* dapat digunakan untuk kuantitatif dengan mengukur absorbansi pada panjang gelombang tunggal, sedangkan *double-beam* (Gambar 7) mempunyai dua sinar yang dibentuk oleh potongan cermin yang berbentuk V yang disebut pemecah sinar. Sinar pertama melewati larutan blanko dan sinar kedua secara serentak melewati sampel. Sumber sinar polikromatis, untuk sinar UV adalah lampu deuterium, sedangkan sinar Visibel atau sinar tampak adalah lampu wolfram. Monokromator pada spektrometer UV-Vis digunakan lensa prisma dan filter optik. Sel sampel berupa kuvet yang terbuat dari kuarsa atau gelas dengan lebar yang bervariasi. Detektor berupa detektor foto atau detektor panas atau detektor dioda foto, berfungsi menangkap cahaya yang diteruskan dari sampel dan mengubahnya menjadi arus listrik. Skema spektrofotometer UV-Vis (*Double-beam*) dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Skema spektrofotometer UV-Vis (*Double-beam*) (Suharti, 2017)

Sebelum mengukur konsentrasi MG, panjang gelombang MG maksimum sebesar 25 ppm dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada rentang panjang gelombang antara 400 nm hingga 800 nm (Kiswandono *et al.*, 2024). Serapan MG diukur dengan spektrofotometer UV-Vis pada λ 200-800 nm pada variasi konsentrasi sebagai larutan standar. Kemudian, diambil data absorbansi pada panjang gelombang yang memberikan serapan optimum. Data absorbansi maksimum digunakan untuk penguraian zat warna MG pada variabel penentuan pH maksimum, waktu optimum dan berat optimum katalis (Bhernama, 2017). Spektrofotometer UV-Vis terkomputerisasi (UV-1650A, Shimadzu, Jepang) digunakan untuk mengukur absorbansi larutan MG pada panjang gelombang yang telah ditentukan, yaitu λ_{max} sebesar 617 nm (Hossain *and* Hossain, 2013). Panjang gelombang maksimum MG yang diperoleh pada penelitian Khotimah (2024) yaitu sebesar 617 nm, seperti yang disajikan pada Gambar 8. Penelitian lain juga melaporkan panjang gelombang maksimum MG berada dalam rentang 618 nm (Khairil dan Etika, 2022) dan 618,07 nm (Bhernama, 2017). Di sisi lain, Khairati *et al.*, (2025) memperoleh panjang gelombang maksimum MG sebesar 613 nm.



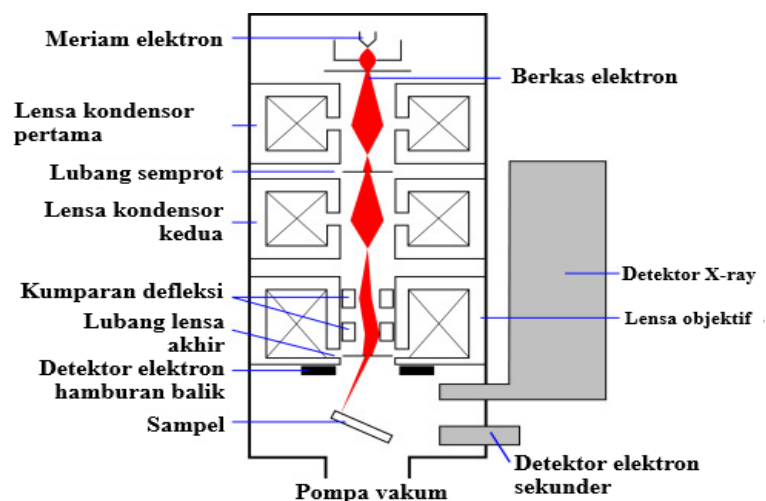
Gambar 8. Panjang gelombang maksimum MG (Khotimah, 2024)

2.9 Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM merupakan salah satu jenis mikroskop elektron yang mampu menghasilkan resolusi tinggi dari gambaran permukaan suatu sampel. Prinsip kerja alat SEM adalah dengan memanfaatkan hamburan balik elektron (*electron beam*) pada

permukaan objek dan mengambil gambar dengan mendeteksi elektron yang muncul pada permukaan objek (Septiano dkk., 2021). Kemajuan dalam penggunaan SEM memungkinkan pemindaian area yang luas dan mengumpulkan sejumlah besar data untuk mendapatkan karakteristik sampel, diantaranya adalah menghitung objek dan mengumpulkan statistik objek tersebut, salah satunya mendapatkan citra morfologi ukuran untuk menentukan distribusi ukuran. Pengujian SEM memungkinkan mendapatkan hasil citra morfologi dan konsentrasi dari campuran bahan (Masykuroh dan Nurulita, 2022).

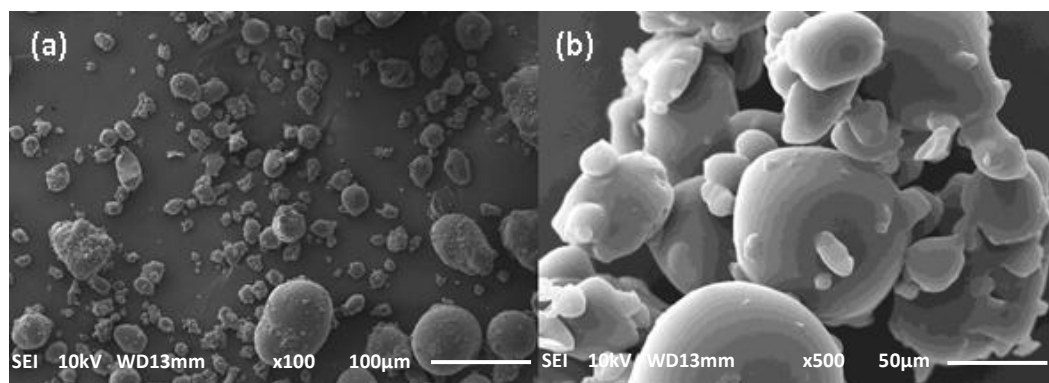
SEM telah banyak digunakan dalam menganalisis mikro dan struktur nano dalam banyak aplikasi. SEM memiliki resolusi yang lebih unggul daripada mikroskop cahaya karena elektron yang digunakan memiliki panjang gelombang yang jauh lebih kecil daripada cahaya. Alat ini memberikan informasi tentang topografi dan komposisi permukaan dengan mengumpulkan dan memproses sinyal yang dihasilkan oleh probe elektron tajam dalam volume interaksi tertentu (Rianto, 2022). SEM bekerja mirip dengan mikroskop optik tetapi dalam SEM, elektron digunakan sebagai pengganti cahaya. Sebuah berkas elektron terkonsentrasi akan dikirim ke sampel dan ini akan menyebabkan pelepasan elektron sekunder. Setelah itu, elektron dikumpulkan oleh detektor dan kemudian dianalisis untuk membentuk gambar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9 (Alqaheem and Alomair, 2020).



Gambar 9. Komponen perangkat SEM (Alqaheem and Alomair, 2020)

Karakterisasi perubahan struktur morfologi membran dapat diamati dengan menggunakan SEM. Umumnya setelah dilakukan proses ultrafiltrasi terdapat gumpalan pada pori-pori membran. Gumpalan tersebut merupakan larutan umpan yang tidak dapat melewati membran dan menyumbat pori-pori sehingga laju alir filtrat menjadi terhambat dan efektifitas dari membran jadi menurun pada pemisahan protein selanjutnya. Peristiwa penyumbatan pada membran ini dikenal dengan istilah *fouling* (Arahman dan Umami, 2023).

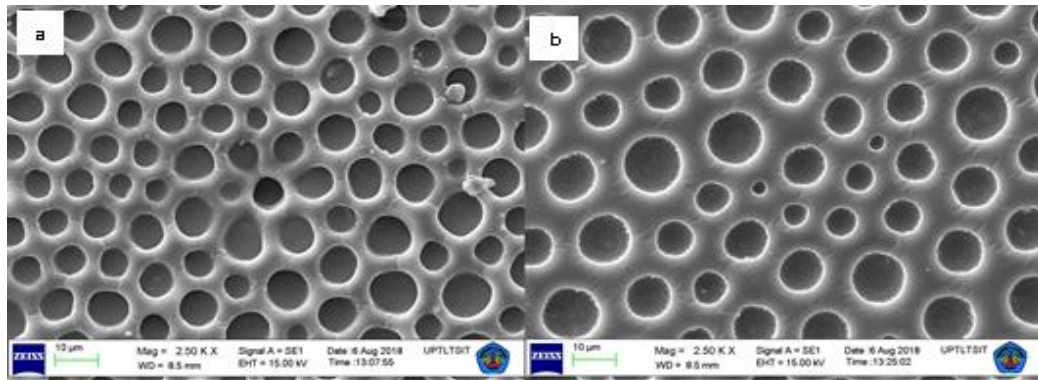
Serbuk Co-EDAF 8% kemudian dicirikan dengan SEM untuk mengetahui informasi terkait morfologi permukaan bahan yang diuji. Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Kiswandono *et al.*, (2019) menunjukkan morfologi permukaan Co-EDAF yang dominan berupa gumpalan bulat padat, selain itu terlihat bahwa bubuk polimer memiliki morfologi yang hampir sama dan seragam (Kiswandono *et al.*, 2019) disajikan pada Gambar 10.



Gambar 10. Morfologi bubuk Co-EDAF 8% berdasarkan hasil SEM (a) 100x (b) 500x (Kiswandono *et al.*, 2019)

Membran PIM yang mengandung 8% Co-EDAF dapat mengangkut fenol hingga 15,8% dan tetap efektif meskipun digunakan berulang kali. Membran ini juga mampu mentransportasi logam Pb(II), tetapi dengan kemampuan yang lebih rendah dibandingkan fenol. Sisi aktif hidroksil pada Co-EDAF berperan penting dalam interaksi ikatan hidrogen untuk transportasi fenol. Namun, penggunaan berulang menyebabkan penurunan kapasitas transportasi, terutama pada golongan –OH, yang berkurang seiring dengan penggunaan. Penurunan persentase komponen membran yang hilang terjadi pada penggunaan kedua dan ketiga

karena kehilangan komponen yang signifikan pada penggunaan pertama (Kiswandono *et al.*, 2019). Hasil SEM membran PIM pada penelitian yang dilakukan oleh Kiswandono *et al.*, (2019) menunjukkan bahwa permukaan membran setelah pengangkutan memiliki pori-pori terbuka dan tertutup, menandakan adanya komponen membran yang hilang seperti pada Gambar 11.

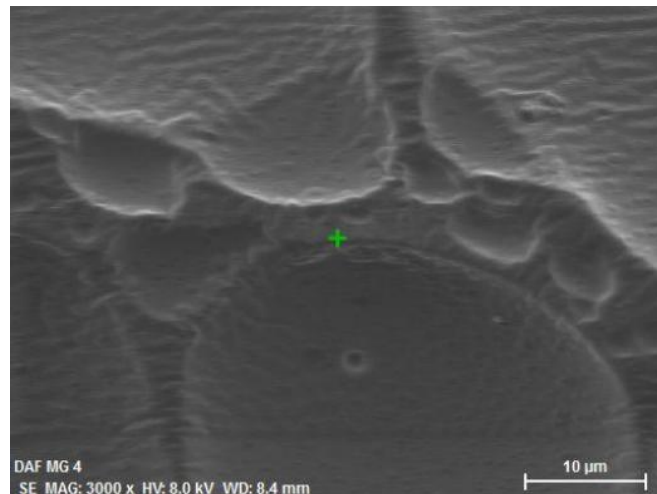


Gambar 11. Hasil SEM pada membran a) sebelum dan b) setelah transpor (Kiswandono *et al.*, 2019)

Scanning Electron Microscope (SEM) – Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX) merupakan metode yang secara luas digunakan untuk pengamatan morfologi permukaan, struktur, dan pemetaan kandungan berbagai jenis sampel, seperti bahan alam, organik, anorganik, polimer, logam. Metode pengamatan ini menggunakan berkas elektron pancaran energi tinggi untuk memindai objek sehingga menghasilkan citra dan komposisi sampel. Berkas elektron yang digunakan sebagai sumber memiliki panjang gelombang puluhan ribu kali lebih pendek dari panjang gelombang cahaya tampak sehingga citra yang dihasilkan metode ini memiliki resolusi dan detail gambar yang lebih baik daripada mikroskop optik. Prinsip tersebut membuat metode ini memiliki keunggulan lebih dan sangat digemari jika dibandingkan mikroskop optik. Metode ini dapat menghasilkan citra gambar tiga dimensi dengan perbesaran dan resolusi yang jauh lebih tinggi (Sahdiah dan Kurniawan, 2023).

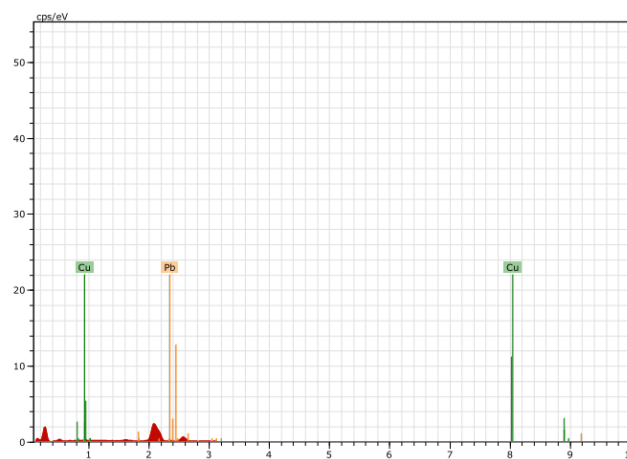
Keberadaan kompetitor logam yang membentuk kompleks dengan senyawa pembawa yang menghalangi interaksi gugus aktif-OH pada membran PIM. Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Ma'ruf (2023), membran PIM dengan *carrier*

Co-EDAF merupakan metode yang cukup selektif untuk pemisahan limbah cair berupa MG. Hal ini didukung dengan hasil karakterisasi SEM EDX yang menunjukkan hasil dari komponen logam yang terdapat pada membran setelah transpor limbah cair buatan yang ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Morfologi permukaan membran setelah transpor MG pada limbah buatan (Ma'ruf, 2023)

Berdasarkan hasil SEM EDX diketahui bahwa, terdapat kadar logam yang dianalisis pada fasa penerima membran yang mengandung logam Cu(II) dan Pb(II) dengan kandungan masing-masing logam berat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13. Analisis EDS ini diharapkan dapat memverifikasi hasil dari SEM EDX. Berdasarkan Gambar 13, hasil yang diperoleh pada logam Cu (II) sebesar 36.61% dan logam Pb(II) sebesar 63.39%. Kehadiran logam mempengaruhi transpor MG (Ma'ruf, 2023).



Gambar 13. EDS spektrum dari membran setelah transpor MG pada limbah buatan (Ma'ruf, 2023)

III. METODE PERCOBAAN

3.1 Waktu dan Tempat

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

3.2 Alat dan Bahan

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

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah *malachite green* (MG), *Copoly-Eugenol Dialil Ftalat* (Co-EDAF) 4%, polivinil klorida (PVC), dibenzileter (DBE), tetrahidrofuran (THF), asam nitrat (HNO_3), timbal (II) karbonat (PbCO_3), tembaga (II) sulfat pentahidrat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), akuabides, plastik *wrap*, tisu, dan *aluminium foil*.

3.3 Pembuatan Larutan Induk MG, Pembuatan Limbah Buatan dan Pengukuran Konsentrasi MG

a. Pembuatan larutan induk MG 1000 ppm (Lampiran 1)

1 gram MG ditimbang, selanjutnya MG dilarutkan dalam 1000 mL akuabides dan larutan dihomogenkan.

b. Pembuatan limbah buatan 25 ppm (Lampiran 1)

Larutan limbah buatan yang mengandung MG, logam Pb(II), dan logam Cu(II) dibuat dengan cara menimbang 0,00125 g MG, 0,001613 g PbCO_3 , dan 0,0049 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Masing-masing logam dilarutkan dalam labu ukur 50 mL, selanjutnya tambahkan akuabides sampai tanda tera. Larutan dari masing-masing logam dicampurkan sesuai dengan jenis limbah buatan yang diinginkan.

c. Pengukuran Konsentrasi MG

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

Selanjutnya, untuk penentuan konsentrasi MG pada fasa sumber dan fasa penerima, dengan mengambil masing-masing larutan pada kedua fasa tersebut sebanyak 1 mL, kemudian diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum yang telah

didapat.

3.4 Pembuatan Membran *Polymer Inclusion Membrane* (PIM)

Membran PIM dibuat dengan mencampurkan Co-EDAF 4% sebagai *carrier*, PVC sebagai polimer dasar, dan DBE sebagai *plasticizer* dengan rasio 10:32:58 (Nghiem *et al.*, 2006). Komposisi membran dapat dilihat pada Tabel 2. THF sebanyak 10 mL yang berfungsi sebagai pelarut ditambahkan ke dalam cetakan membran PIM (Lampiran 9). Campuran tersebut kemudian diaduk selama 30-60 menit hingga homogen. Membran hasil cetakan didiamkan selama 3 hari untuk menghilangkan pelarut secara alami.

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

Tipe Membran	Co-EDAF 4% (g)	PVC (g)	DBE (g)	Total (g)
T ₂₇ (Tipis)	0,0270	0,0864	0,1566	0,2700
T ₅₄ (Normal)	0,0540	0,1728	0,3132	0,5400
T ₁₀₈ (Tebal)	0,1080	0,3456	0,6264	1,0800

Membran PIM yang telah selesai dibuat, terlebih dahulu ditimbang sebelum digunakan untuk proses transpor MG. Karakterisasi membran PIM sebelum dan setelah transpor dianalisis menggunakan FT-IR dan SEM. Ketebalan membran diukur menggunakan *thickness gauge*.

3.5 Uji Membran PIM

3.5.1 Uji Porositas Membran

Merendam membran PIM dengan 10 mL akuabides di dalam cawan petri selama 24 jam pada suhu ruang. Membran dikeringkan menggunakan tisu dan

ditimbang didapatkan nilai W_1 (g) sebagai nilai berat basah awal membran. Membran dikeringkan menggunakan oven dengan suhu 100 °C selama 6 jam hingga benar-benar kering, lalu didinginkan dan ditimbang kembali sehingga didapatkan nilai W_2 (g) sebagai berat kering membran. Hasil berat yang diperoleh digunakan untuk menentukan persen porositas membran seperti pada Persamaan 1 (Suryandari, 2020).

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

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

Keterangan:

W_1 : berat basah membran (g)

W_2 : berat kering membran (g)

ρ_w : densitas air (1 g/cm³)

ρ_p : densitas polimer (1,78 g/cm³)

V_t : volume membran basah (cm³)

3.5.2 Uji Serapan Air Membran

Membran PIM ditimbang untuk didapatkan berat awal membran. Kemudian, membran direndam dalam 10 mL akuabides selama 6 jam dan ditimbang kembalisetelah perendaman. Hasil berat yang diperoleh digunakan untuk menentukan persen serapan air membran seperti pada Persamaan 2 (Rensini dkk., 2024).

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

Keterangan:

W_w : berat basah membran (g)

W_d : berat kering membran (g)

3.6 Optimasi Transpor MG

3.6.1 Variasi pH MG pada Fasa Sumber

Lima membran PIM dengan ketebalan normal (T_{54}) dipasang pada lima pipa transpor (*chamber*) yang memiliki diameter 3,5 cm. Masing-masing *chamber* ditambahkan 50 mL larutan HNO_3 1,00 M sebagai fasa penerima dan 50 mL MG 25 ppm sebagai fasa sumber. pH fasa sumber divariasikan menjadi pH 5, 6, 7, 8, dan 9. Pipa transpor ditutup dan diaduk selama 24 jam menggunakan pengaduk magnet. Setelah diaduk, 1 mL sampel diambil dari fasa sumber dan fasa penerima. Konsentrasi MG dalam fasa sumber dan fasa penerima dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.6.2 Variasi Konsentrasi HNO_3 pada Fasa Penerima

Membran PIM dengan ketebalan normal diletakkan di tengah pipa transpor. 50 mL larutan MG 25 ppm ditambahkan pada fasa sumber dengan pH optimum. Fasa penerima diisi dengan 50 mL larutan HNO_3 dengan konsentrasi 0,50 M; 0,75 M; 1,00 M; 1,25 M; dan 1,50 M. Tutup pipa transpor dan diaduk selama 24 jam dengan pengaduk magnet. Setelah diaduk, fasa sumber dan fasa penerima diambil sebanyak 1 mL. Sampel dari fasa sumber dan fasa penerima diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.6.3 Variasi Ketebalan Membran

Membran PIM yang sudah dicetak dengan ketebalan tipis (T_{27}), normal (T_{54}), dan tebal (T_{108}) diletakkan di tengah pipa transpor. Kemudian, 50 mL larutan HNO_3 kondisi optimum ditambahkan sebagai fasa penerima dan 50 mL larutan

25 ppm dengan pH optimum sebagai fasa sumber. Pipa transpor ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet selama 24 jam. setelah diaduk, sampel 1 mL diambil dari fasa penerima dan fasa sumber. Analisis dilakukan dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.6.4 Variasi Konsentrasi *Carrier*

Membran PIM dengan komposisi optimum dicetak dan mengandung variasi konsentrasi *carrier* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Perhitungan massa Co-EDAF 4% yang dibutuhkan untuk membuat membran pada variasi ini terlampir pada Lampiran 1. Membran PIM ditempatkan di tengah pipa transpor. 50 mL larutan HNO₃ dengan kondisi optimum ditambahkan ke pipa transpor sebagai fasa penerima. 50 mL larutan MG 25 ppm dengan pH optimum ditambahkan ke dalam pipa transpor sebagai fasa sumber. Pipa transpor ditutup dan pengaduk magnet digunakan untuk mengaduk larutan selama 24 jam. 1 mL sampel dari fasa sumber dan penerima diambil, dianalisis dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

Tabel 3. Variasi konsentrasi *carrier*

Konsentrasi <i>Carrier</i> (M)	Co-EDAF 4% (g)	PVC (g)	DBE (g)	Total (g)
0,06	0,0399	0,1728	0,3132	0,5259
0,07	0,0465	0,1728	0,3132	0,5325
0,08	0,0540	0,1728	0,3132	0,5400
0,09	0,0598	0,1728	0,3132	0,5458
0,10	0,0664	0,1728	0,3132	0,5524

3.6.5 Variasi Waktu Transpor

Membran PIM dengan ketebalan optimum yang sudah dicetak dan mengandung *carrier* ditempatkan di tengah-tengah pipa transpor. Kemudian, 50 mL larutan

HNO₃ kondisi optimum ditambahkan sebagai fasa penerima dan 50 mL MG 25 ppm dengan pH optimum sebagai fasa sumber. Setelah pipa transpor ditutup dan diaduk dengan pengaduk magnet selama 6, 12, 18, 24, dan 30 jam. Kemudian, ambil 1 mL dari fasa sumber dan fasa penerima untuk diukur konsentrasi MG. Analisis dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis dengan panjang gelombang maksimum.

3.6.6 Studi Kompetisi Transpor MG pada Limbah Buatan

Untuk membuat sampel limbah buatan MG, CuSO₄.5H₂O dan PbCO₃ dibuat dengan mencampurkan masing-masing larutan dengan konsentrasi 25 ppm. Transpor MG kemudian dilakukan dengan menggunakan membran PIM dengan ketebalan optimum yang telah dicetak. Membran berada di tengah pipa transpor, ditambahkan 50 mL limbah buatan sebagai fasa sumber dan 50 mL HNO₃ kondisi optimum dimasukkan sebagai fasa penerima. Setelah itu, pipa transpor ditutup dan pengaduk magnet digunakan untuk mengaduk fasa sumber dan fasa penerima pada suhu kamar dengan waktu optimum. Konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima diukur dengan spektrofotometer UV-Vis, sedangkan keberadaan logam Cu(II) dan Pb(II) dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX).

3.6.7 Analisis Parameter Transpor

Data hasil transpor yang telah diperoleh selanjutnya digunakan untuk menentukan parameter-parameter kinetika transpor yang terdiri dari %*recovery*, permeabilitas (P), fluks (J), dan koefisien rejeksi (R) pada transpor MG. Perhitungan dapat dilihat pada Persamaan 3 (Nurul dan Sujana, 2020), Persamaan 4 (Kusumaningrum dkk., 2022), serta Persamaan 5, 6, dan 7 (Suryandari, 2020).

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

Keterangan:

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

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

Keterangan:

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

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

Keterangan:

V_f = Volume fluida (m^3)
 A = Luas permukaan membran (m^2)
 t = Waktu transpor (s)
 $[C]_t$ = Konsentrasi MG di fasa penerima pada waktu t (ppm)
 $[C]_0$ = Konsentrasi awal fasa sumber (ppm)

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

Keterangan:

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

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

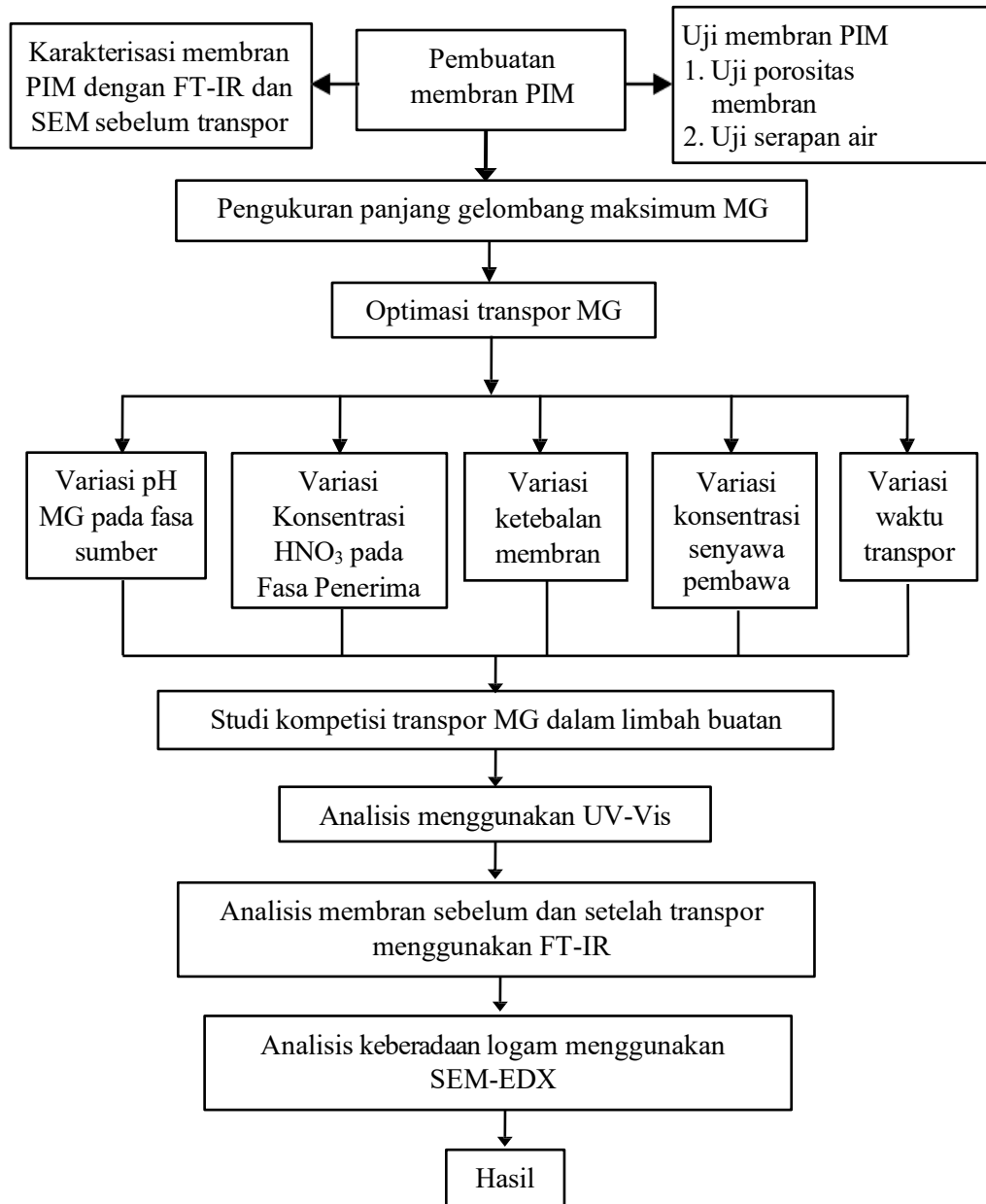
Keterangan:

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

Selanjutnya, analisis membran PIM sebelum dan setelah transpor menggunakan FT-IR untuk gugus fungsi dan SEM melihat morfologi permukaan pada membran.

3.7 Skema Penelitian

Skema penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Skema penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Transpor MG mencapai kondisi optimum pada pH fasa sumber 7, konsentrasi HNO_3 fasa penerima 1,00 M, ketebalan membran normal (T_{54}) dan konsentrasi *carrier* 0,08 M selama waktu transpor 24 jam dengan %*removal* sebesar 91,12%.
2. Karakterisasi SEM membran PIM menunjukkan bahwa membran setelah transpor selama 24 jam mengalami kerusakan morfologi ditandai dengan permukaan yang lebih kasar, berpori, dan terdapat retakan yang tidak beraturan, sedangkan karakterisasi FT-IR membran PIM setelah melewati transpor selama 24 jam menunjukkan adanya pergeseran pita serapan.
3. Keberadaan logam Pb(II) dan Cu(II) dalam limbah buatan mempengaruhi proses pemisahan MG dari fasa sumber ke fasa penerima sehingga menurunkan efisiensi pemisahan MG.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu dilakukan pengembangan komponen penyusun membran PIM menggunakan bahan yang lebih ramah lingkungan dan *biodegradable*. Selain itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai transpor MG beberapa logam kompetitor selain Pb(II) dan Cu(II) menggunakan metode *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) dan *carrier* Co-EDAF dengan variasi konsentrasi yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Abewaa, M., Mengistu, A., Takele, T., Fito, J., and Nkambule, T. 2023. Adsorptive Removal of Malachite Green Dye from Aqueous Solution Using Rumex Abyssinicus Derived Activated Carbon. *Scientific Reports*. 13(1): 1–16.
- Alqaheem, Y., and Alomair, A. A. 2020. Microscopy and Spectroscopy Techniques for Characterization of Polymeric Membranes. *Membranes*. 10(33): 1–36.
- Anggraini, D., dan Nasra, E. 2024. Penyerapan Malachite Green Menggunakan Selulosa Hasil Ekstrak Kulit Pisang Kepok (*Musa Balbisiana Colla*). *Jurnal Pendidikan Tambusai*. 8(1): 11956–11964.
- Arahman, N., dan Umami, K. 2023. Pengaruh Perlakuan Hipoklorit Terhadap Profil Filtrasi Membran Polietersulfon. *Jurnal Inovasi Ramah Lingkungan*. 4(1): 21–25.
- Bensaadi, S., Draï, N., Arous, O., Berbar, Y., Hammache, Z. E., Amara, M., and Bruggen, V. D. 2022. A Study of Chromium (VI) Ions Fixation and Transport using Polymer Inclusion Membrane Containing D2EHPA as Complexing Agent. *Journal of Membrane Science and Research*. 8(1): 1–7.
- Bhernama, B. G. 2017. Degradasi Zat Warna Malachite Green Secara Ozonolisis dengan Penambahan Katalis TiO₂-anatase dan ZnO. *Elkawnie: Journal of Islamic Science and Technology*. 3(1): 1–10.
- Enrico. 2019. Dampak Limbah Cair Industri Tekstil Terhadap Lingkungan dan Aplikasi Tehnik Eco Printing sebagai Usaha Mengurangi Limbah. *Moda*. 1(1): 1–9.
- Fangidae, T. S., Bage, T. M. P., Anggorowati, A. A., and Sudaryanto, Y. 2020. Study of Malachite Green Adsorption using Tannin-Based Adsorbent (TBA) from Mangrove Bark (*Rhizophora mucronata*). *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan” Pengembangan Teknologi Kimia Untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*: 1–7. Yogyakarta, 14–15 Juli 2020.

- Haris, A., Riyanti, A. D., dan Gunawan, G. 2005. Pengendapan Logam Tembaga dengan Metoda Elektrolisis Internal. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 8(2): 33–38.
- Hartini, A. S., Syahbanu, I., dan Nurlina. 2018. Uji Water Uptake dan Porositas Terhadap Blend Membran Berbasis Polisulfon dan Selulosa Asetat dari Nata de Coco. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*. 7(4): 25–30.
- Hayu, L. D. R., Nasra, E., Azhar, M., dan Etika, S. B. 2022. Adsorpsi Zat Warna Methylene Blue Menggunakan Karbon Aktif dari Kulit Durian (*Durio zibethinus Murr.*). *Chemistry Journal of Universitas Negeri Padang*. 11(1): 8–13.
- Hossain, M. A., and Hossain, M. L. 2013. Dynamic Modeling of the Transport Mechanism of Malachite Green to Adsorb on Used Black Tea Leaves. *International Journal of Recent Scientific Research*. 4(10): 1575–1579.
- Khairati, R. M., Kiswandono, A. A., and Ma'ruf, D. I. 2025. Application of Polymer Inclusion Membrane in the Transport of Malachite Green Dye Using Copolymer (Eugenol-Diallyl Phthalate). *Journal of Scientific and Applied Chemistry*. 28(1): 8–15.
- Khairil, D. F., dan Etika, S. B. 2022. Optimasi pH dan Konsentrasi Penyerapan Malachite Green Menggunakan C-Sinamalkaliks[4]Resorsinarena sebagai Adsorben. *Chemistry Journal of Universitas Negeri Padang*. 11(2): 56–60.
- Khotimah, R. K. 2024. *Transpor Malachite Green menggunakan Metode Polymer Inclusion Membrane (PIM) dengan Copoly Eugenol Ethylene Glycol Dimethacrylate (Co-EEGDMA) 6% sebagai Senyawa Pembawa*. Skripsi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Kiswandono, A. A. 2014. *Study on the Transport of Phenol Through Crosslinked Polyeugenol Based Polymer Inclusion Membrane (PIM)*. Disertasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.
- Kiswandono, A. A., Antika, W., Rahmawati, A., and Rinawati, R. 2023. Investigating Phenol Transport Using Copoly(Eugenol-DVB) 8% as a Carrier with the Supported Liquid Membrane Method. *Journal of Scientific and Applied Chemistry*. 26(10): 372–380.
- Kiswandono, A. A., Ferdias, P., Rahmawati, A., dan Rinawati, R. 2025. *Senyawa Pembawa Poly-BADGE untuk Transpor Fenol Berbasis Polymer Inclusion Membrane (PIM)*. Hexagon Publishing. Bandar Lampung.

- Kiswandono, A. A., Hadi, S., Mudasir, Sinjia, F., Sari, M. Y., and Irfan, M. 2019. Copoly Eugenol Crosslinked Dialylphthalate 8% as a Carrier in Phenol and Pb(II) Metal Transport. *Journal of Physics: Conference Series*. 1338(1): 1–8.
- Kiswandono, A. A., Mudasir, Siswanta, D., Aprilita, N. H., Santosa, S. J., and Hadi, S. 2019. Synthesis and Characterization of Co-EDAF and Its Application Test as a Carrier Membrane for Phenol Transport Using Polymer Inclusion Membrane (PIM). *Research Journal of Chemistry and Environment*. 23(5): 1–9.
- Kiswandono, A. A., Nusantara, C. S., Rinawati, R., and Hadi, S. 2022. Optimization and Evaluation of Polymer Inclusion Membranes Based on PVC Containing Copoly-EDVB 4% as a Carrier for the Removal of Phenol Solutions. *Membranes*. 12(3): 1–13.
- Kiswandono, A. A., Rinawati, R., Agustina, W., Hadi, N., Nurhasanah, N., Rahmawati, A., Nitti, F., and Lusiana, R. A. 2024. Transport of Phenol Using a Supported Liquid Membrane Containing Eugenol Cross-Linked by Diallyl Phthalate or Divinyl Benzene as a Carrier. *Journal of Membrane Science and Research*. 10(3): 1–8.
- Kiswandono, A. A., Rinawati, R., Nurhasanah, N., dan Rahmawati, A. 2024. *Membran Cair dan Senyawa Pembawa Kopoli (Eugenol-Divinil Benzena) untuk Transpor Fenol*. Graha Ilmu. Yogyakarta.
- 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., Supriyanto, Nuryaman, A., Siswanta, D., Aprilita, N. H., dan Santosa, S. J. 2017. Sintesis dan Uji Kemampuan Senyawa Co-EEDGMA sebagai Senyawa Pembawa pada Transport Fenol Menggunakan Metode Polymer Inclusion Membrane. *Jurnal Penelitian Saintek*. 22(2): 114–125.
- Kiswandono, A. A., Widiarto, S., Sari, D. T. E. N., Supriyanto, R., Qudus, H. I., Rinawati, R., Rahmawati, A., dan Devariani, W. 2021. Kompetisi Fenol pada Limbah Buatan Menggunakan Kopoli-Eugenol Divinil Benzena 10% sebagai Senyawa Pembawa. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*. 18(1): 1–9.
- Kusumaningrum, D. I. P., Sudarni, D. H. A., dan Wahyuningsih, S. 2022. Optimasi Pengaruh Waktu Kontak dan Dosis Adsorben Limbah Daun Kayu Putih (*Melaleuca cajuputi*) dengan Metode Isoterm Adsorpsi Langmuir. *Jurnal Teknik Kimia USU*. 11(2): 72–79.
- Lestari, K. R. 2020. *Teori Dasar Membran*. LP UNAS. Jakarta Selatan.

- Ma'ruf, D. I. 2023. *Studi Transpor Malachite Green Menggunakan Metode Polymer Inclusion Membrane (PIM) dengan Copoly-eugenol Dialilftalat 2% sebagai Senyawa Pembawa*. Skripsi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Maahury, M. F., Martoprawiro, M. A., dan Allo, V. L. 2022. Struktur Molekul dan Sifat Elektronik Eugenol dan Turunannya Menggunakan DFT Molecular. *Jurnal Kimia Mulawarman*. 19(2): 58–62.
- Masykuroh, A., dan Nurulita, N. N. 2022. Potensi Ekstrak Kulit Jeruk Kunci (*Citrus microcarpa Bunge*) Sebagai Bio reduktor dalam Sintesis Nanopartikel Perak. *BIOMA: Jurnal Biologi Makassar*. 7(1): 12–20.
- Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., and Ragadhita, R. 2019. How to Read and Interpret FTIR Spectroscopy of Organic Material. *Indonesian Journal of Science and Technology*. 4(1): 97–118.
- Ngadiwiyana, Gunawan, Prasetya, N. B. A., Kusworo, T. D., and Susanto, H. 2022. Synthesis and Characterization of Sulfonated Poly(Eugenol-Co-Allyleugenol) Membranes for Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Heliyon*. 8(6): 1–12.
- Nurlela. 2019. Pengolahan Air Limbah Pewarna Sintetis dengan Metode Adsorpsi dan Ultraviolet. *Jurnal Redoks*. 3(2): 44–50.
- Nurul, N., dan Sujana, D. 2020. Validasi Metode Analisis Penetapan Kadar Niklosamid Monohidrat dalam Sediaan Obat Hewan dengan Menggunakan Spektrofotometri Uv-Vis. *Jurnal Ilmiah Farmako Bahari*. 11(2): 153–160.
- Patty, J. O., Siahaan, R., and Maabuat, P. V. 2018. Kehadiran Logam-Logam Berat (Pb, Cd, Cu, Zn) Pada Air dan Sedimen Sungai Lowatag, Minahasa Tenggara - Sulawesi Utara. *Jurnal Bioslogos*. 8(1): 15–20.
- Paundanan, M., Fachruddin, F., dan Khaery, A. 2023. Studi Pencemaran Logam Berat Timbal (Pb) dan Tembaga (Cu) Berdasarkan Nilai Ambang Batas (NAB) di Sungai Motui Kabupaten Konawe Utara. *Jurnal Ilmu Alam dan Lingkungan*. 14(1): 1–7.
- Permata, M. A. D., Purwiyanto, A. I. S., dan Diansyah, G. 2018. Kandungan Logam Berat Cu (Tembaga) dan Pb (Timbal) pada Air dan Sedimen di Kawasan Industri Teluk Lampung, Provinsi Lampung. *Journal of Tropical Marine Science*. 1(1): 7–14.
- Pratistita, M. W., Ratri, A. K., Selian, F. H., dan Triadi, I. 2024. Penegakan Hukum Terhadap Pencemaran Limbah Pewarna Cair Industri Tekstil. *TERANG: Jurnal Kajian Ilmu Sosial, Politik dan Hukum*. 1(1): 276–289.

- Rafi, M., Anggundari, W. C., dan Irawadi, T. T. 2016. Potensi Spektroskopi FT-IR-ATR dan Kemometrik untuk Membedakan Rambut Babi, Kambing, dan Sapi. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 5(3): 229–234.
- Rensini, W. A., Kadang, L., Lapailaka, T., Naat, J. N., Pingak, R. K., Kapitan, O. B., dan Nitti, F. 2024.. Stabilitas Polymer Inclusion Membrane dari Polimer Pendukung PVC dan Ekstraktan D2EHPA dalam Asam Klorida. *Jurnal Beta Kimia*. 4(1): 1–18.
- Rianto, D. 2022. Scanning Electron Microscopy for Nanostructure Analysis of Hybrid Multilayer Coating. *Pillar of Phisycs*. 15(2): 119–128.
- Roy, D. C., Biswas, S. K., Sheam, M. M., Hasan, M. R., Saha, A. K., Roy, A. K., Haque, M. E., Rahman, M. M., and Tang, S. S. 2020. Bioremediation of Malachite Green Dye by Two Bacterial Strains Isolated from Textile Effluents. *Current Research in Microbial Sciences*. 1(5): 37–43.
- Ruslinda, Y., dan Yustisia, D. 2013. Analisis Timbulan dan Komposisi Sampah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) Rumah Tangga di Kota Padang Berdasarkan Tingkat Pendapatan. *Lingkungan Tropis*. 7(1): 21–30.
- Sahdiah, H., dan Kurniawan, R. 2023. Optimasi Tegangan Akselerasi pada Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX) untuk Pengamatan Morfologi Sampel Biologi. *Jurnal Sains dan Edukasi Sains*. 6(2): 117–123.
- Salsabila, B. A. A., Yusuf, A. F. N., Gading, A. C. R., Prabuningrat, A., and Andanalusia, M. 2023. Eugenol Potential in Cloves as an Analgesic: Literature Review. *Jurnal Biologi Tropis*. 23(1): 169–173.
- Septiano, A. F., Susilo, S., and Setyaningsih, N. E. 2021. Analisis Citra Hasil Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray (SEM EDX) Komposit Resin Timbal dengan Metode Contrast to Noise Ratio (CNR). *Indonesian Journal of Mathematics and Natural Sciences*. 44(2): 81–85.
- Silvia, R., Nasra, E., Oktavia, B., dan Etika, S. B. 2020. Penyerapan Zat Warna Malachite Green Menggunakan Kulit Pisang Kepok (*Musa Balbisiana Colla*) sebagai Biosorben dengan Metode Batch. *Chemistry Journal of Universitas Negeri Padang*. 9(2): 71–75.
- Suharti, T. 2017. *Dasar-dasar Spektrofotometri UV-Vis dan Spektrometri Massa untuk Penentuan Struktur Senyawa Organik*. AURA. Bandar Lampung.
- SSuryandari, E. T. 2020. Sintesis Membran Komposit PVDF-Zeolit untuk Penghilangan Metilen Biru. *Al-Kimiya*. 6(2): 58–66.
- Willian, N., dan Pardi, H. 2022. *Buku Ajar Pemisahan Kimia Sebuah Pengantar pada Aspek Kemaritiman*. UMRAH Press. Tanjungpinang.

Yonel, S. H., Nasra, E., Oktavia, B., dan Etika, S. B. 2021. Optimasi Penyerapan Zat Warna Malachite Green Menggunakan Karbon Aktif dari Kulit Pisang Kepok (*Musa balbisiana Colla*). *Chemistry Journal of Universitas Negeri Padang*. 10(2): 28–32.

Yudono, B. 2017. Spektrometri. *Simetri*. Palembang.