

**TRANSPOR *MALACHITE GREEN* MENGGUNAKAN POLI-BISFENOL A
DIGLISIDIL ETER (POLI-BADGE) 2:1 SEBAGAI SENYAWA PEMBAWA
MENGGUNAKAN *POLYMER INCLUSION MEMBRANE* (PIM)**

(Skripsi)

Oleh

MARSANDA NUR WAHYUNINGTYAS

2117011006



**JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

TRANSPOR *MALACHITE GREEN* MENGGUNAKAN *POLI-BISFENOL A DIGLISIDIL ETER* (POLI-BADGE) 2:1 SEBAGAI SENYAWA PEMBAWA MENGGUNAKAN *POLIMER INCLUSION MEMBRANE* (PIM)

Oleh

MARSANDA NUR WAHYUNINGTYAS

Malachite Green (MG) merupakan pewarna trifenilmetana tidak dapat terurai. MG menjadi permasalahan karena banyak digunakan dalam industri tekstil dan berpotensi mencemari lingkungan perairan. Penelitian ini membahas mengenai transpor MG menggunakan metode *polymer inclusion membrane* (PIM) dengan poli-bisfenol a diglisidil eter (Poli-BADGE) 2:1 sebagai senyawa pembawa. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh hasil yang optimum pada transpor MG menggunakan membran PIM dan mengetahui pengaruh adanya logam Pb(II) dan Cu(II) terhadap proses pemisahan MG pada limbah buatan. Membran PIM pada penelitian ini tersusun dari senyawa pembawa Poli-BADGE 2:1, PVC sebagai polimer pendukung, dan DBE sebagai *plasticizer*. Konsentrasi MG diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum 617 nm. Membran PIM sebelum dan sesudah transpor dikarakterisasi menggunakan SEM dan FTIR. Hasil penelitian menunjukkan bahwa membran PIM dengan senyawa pembawa Poli-BADGE 2:1 mampu mentranspor MG secara efektif sebesar 90,90% pada kondisi optimum: pH fasa sumber 7, konsentrasi HNO₃ fasa penerima 1,25 M, ketebalan membran PIM T₅₄, konsentrasi senyawa pembawa 0,09 M, dan waktu transpor 24 jam. Transpor MG dengan logam Pb(II) dan Cu(II) menghasilkan konsentrasi MG yang ditranspor lebih kecil, yaitu sebesar 85,67% dibandingkan transpor MG tanpa logam, yaitu sebesar 91,32%. Keberadaan logam kompetitor mengakibatkan adanya gangguan terhadap proses transpor MG dari fasa sumber ke fasa penerima.

Kata kunci : *Malachite green*, PIM, Poli-BADGE 2:1

ABSTRACT

TRANSPORT OF MALACHITE GREEN USING POLY-BISPHENOL A DIGLYCIDYL ETHER (POLY-BADGE) 2:1 AS CARRIER COMPOUND WITH POLYMER INCLUSION MEMBRANE (PIM)

By

MARSANDA NUR WAHYUNINGTYAS

Malachite Green (MG) is a non-degradable triphenylmethane dye. MG poses a problem because it is widely used in the textile industry and has the potential to contaminate aquatic environments. This study discusses the transport of MG using the polymer inclusion membrane (PIM) method with poly-bisphenol A diglycidyl ether (Poly-BADGE) 2:1 as the carrier compound. The aim of this research was to achieve optimal results in the transport of MG using the PIM membrane and to investigate the effect of the presence of Pb(II) and Cu(II) metals on the separation process of MG in synthetic wastewater. The PIM membrane in this study was composed of the carrier compound Poly-BADGE 2:1, PVC as the support polymer, and DBE as a plasticizer. The concentration of MG was measured using a UV-Vis spectrophotometer at a maximum wavelength of 617 nm. The PIM membrane before and after transport was characterized using SEM and FTIR. The results showed that the PIM membrane with Poly-BADGE 2:1 carrier can effectively transport MG at a rate of 90.90% under optimal conditions: source phase pH of 7, receiving phase HNO₃ concentration of 1.25 M, PIM membrane thickness T₅₄, carrier concentration of 0.09 M, and transport time of 24 hours. The transport of MG with Pb(II) and Cu(II) metals results in a lower transported concentration of MG, which was 85.67%, compared to the transport of MG without metals, which was 91.32%. The presence of competing metals caused interference in the transport process of MG from the source phase to the receiving phase.

Keywords : *Malachite green*, PIM, Poli-BADGE 2:1

**TRANSPOR *MALACHITE GREEN* MENGGUNAKAN POLI-BISFENOL A
DIGLISIDIL ETER (POLI-BADGE) 2:1 SEBAGAI SENYAWA PEMBAWA
MENGGUNAKAN *POLIMER INCLUSION MEMBRANE* (PIM)**

Oleh

Marsanda Nur Wahyuningtyas

Skripsi

**Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar
SARJANA SAINS**

pada

**Jurusan Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



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

Judul

: **TRANSPOR MALACHITE GREEN
MENGUNAKAN POLI-BISFENOL A
DIGLISIDIL ETER (POLI- BADGE) 2:1 SEBAGAI
SENYAWA PEMBAWA MENGGUNAKAN
POLIMER INCLUSION MEMBRANE (PIM)**

Nama

: **Marsanda Nur Wahyuningtyas**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2117011006**

Program Studi

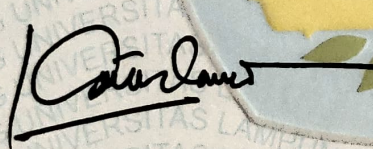
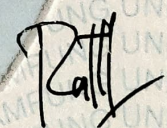
: **Kimia**

Fakultas

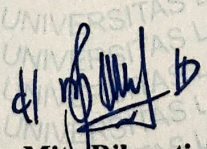
: **Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam**

MENYETUJUI

1. **Komisi Pembimbing**

 
Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc. Dr. Eng. Ni Luh Gede Ratna Juliasih, M.Si.
NIP. 197007052005011003 NIP. 197707132009122002

2. **Ketua Jurusan FMIPA Universitas Lampung**

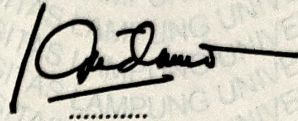

Dr. Mita Rilyanti, M.Si.
NIP.197205302000032001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc.



Sekretaris

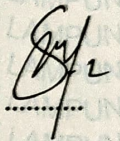
: Dr. Eng. Ni Luh Gede Ratna Juliasih, M.Si.



Penguji

Bukan Pembimbing

: Prof. Dr. Buhani, M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

NIP. 197110012005011002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 1 Juli 2025

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan dibawah ini,

Nama : Marsanda Nur Wahyuningtyas
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117011006
Jurusan : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya berjudul “ **Transpor Malachite Green Menggunakan Poli-Bisfenol A Diglisidil Eter (Poli-BADGE) 2:1 Sebagai Senyawa Pembawa Menggunakan Polimer Inclusion Membrane (PIM)**” adalah benar karya saya sendiri, baik gagasan, hasil, dan analisisnya. Selanjutnya saya juga tidak keberatan jika sebagian atau seluruhnya data didalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi, sepanjang nama saya disebutkan dan terdapat kesepakatan sebelum dilakukan publikasi.

Bandar Lampung, 14 Juli 2025
Yang menyatakan,



Marsanda Nur Wahyuningtyas
NPM. 2117011006

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Marsanda Nur Wahyuningtyas, lahir pada tanggal 26 Agustus 2003 di Labuhan Ratu I, Labuhan Ratu, Lampung Timur. Penulis merupakan anak tunggal dari pasangan Bapak Giwanto dan Ibu Piaten. Penulis menyelesaikan pendidikan di SMPN 1 Way Jepara pada tahun 2015-2018 dan SMAN 1 Labuhan Ratu pada tahun 2018-2021. Pada tahun 2021, penulis melanjutkan pendidikan sebagai mahasiswa Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai organisasi, di antaranya sebagai kader muda dan anggota inti Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAKI) pada tahun 2021 dan 2022. Pada tahun 2022, penulis menjabat sebagai anggota Biro Kesekretariatan HIMAKI. Pada tahun 2023, penulis menjabat sebagai anggota Bidang Sosial Masyarakat (SOSMAS) Himaki. Penulis mengikuti program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) Membangun Desa di Universitas Lampung pada tahun 2023. Selain itu, penulis juga pernah menjadi Asisten Praktikum Kimia Dasar untuk mahasiswa angkatan 2024 di Jurusan Kimia dan Asisten Praktikum Kimia Dasar 2 untuk mahasiswa angkatan 2024 di Prodi Geologi, Jurusan Geofisika.

Pada tahun 2024, penulis mengikuti program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) Riset di Universitas Lampung. Pada tahun 2025, penulis menjadi asisten editor Jurnal Analit: *Analytical and Environmental Chemistry* dan menjadi tim pengelola di *Journal of Interdisciplinary Research and Sustainability*. Penulis

menyelesaikan penelitian di Laboratorium Kimia Analitik dan Instrumentasi dengan judul "**Transpor *Malachite Green* Menggunakan Poli-Bisfenol A Diglisidil Eter (Poli-BADGE) 2:1 Sebagai Senyawa Pembawa Menggunakan *Polimer Inclusion Membrane* (PIM)**" pada tahun 2025.

MOTTO

“Jadikanlah sabar dan sholat sebagai penolongmu. Dan sesungguhnya yang demikian itu sungguh berat, kecuali bagi orang-orang yang khusyu”
(Q.S. Al-Baqarah:153)

“Jadilah baik. Sesungguhnya Allah menyukai orang-orang yang berbuat baik.”
(Q.S Al-Baqarah: 195)

“Kesuksesan tidak diukur dari seberapa sering Anda jatuh, tetapi seberapa sering Anda bangkit kembali”
(Vince Lombardi)

“Kalau mau menunggu hingga siap, kita akan menghabiskan waktu hidup kita hanya untuk menunggu.”
(Lemony Snicket)

“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, walaupun hanya 2 rakaat, pasti Allah akan berikan keberkahan hidup sepanjang harinya”
(Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc.)



Segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat, kasih sayang, dan hidayah-Nya yang tiada henti, sehingga penulis dapat menyelesaikan pendidikan di jenjang perguruan tinggi ini. Dengan penuh rasa syukur dan segala kerendahan hati, penulis mempersembahkan karya sederhana ini kepada:

Kedua Orang Tua Tercinta,

Bapak dan Ibuku tercinta yang telah membesarkan, membimbingku, mendoakan, mendukung, dan memberikan kasih sayang yang tak terbatas serta cinta yang sangat besar dan tak ternilai.

Melalui karya sederhana ini, aku sebagai putrimu mengucapkan terima kasih. Segala pencapaian yang putrimu raih saat ini tidak akan mungkin terwujud tanpa doa, dukungan, serta pengorbanan tiada henti yang telah kalian berikan sejak kecil. Seluruh keluarga besar yang selalu memberikan perhatian dan dukungan untukku.

Dengan segala rasa hormat kepada Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc., Ibu Dr. Eng. Ni Luh Gede Ratna Juliasih, M.Si., Ibu Prof. Dr. Buhani, S.Pd., M.Si., Bapak/Ibu Dosen Jurusan Kimia, yang telah membimbing, memberi ilmu, dan motivasi kepada penulis selama menjalankan studi ini. Seluruh kerabat yang telah memberikan banyak bantuan, dukungan, semangat dan motivasi.

Almamater Tercinta Universitas Lampung

SANWACANA

Alhamdulillahirabbil'alamin, Segala puji bagi Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Transpor *Malachite Green* Menggunakan Poli-Bisfenol A Diglisidil Eter (Poli-BADGE) 2:1 Sebagai Senyawa Pembawa Menggunakan *Polimer Inclusion Membrane* (PIM)” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Jurusan Kimia Universitas Lampung. Selama proses penyusunan skripsi ini, penulis banyak mendapatkan doa, dukungan, semangat, bimbingan, serta saran dan masukan dari berbagai pihak sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini dengan baik. Doa yang tulus dengan segala kerendahan hati, pada kesempatan ini penulis dengan hormat mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua yang saya cintai, Bapak Giwanto dan Ibu Piaten untuk segala cinta, kasih sayang dan dukungan yang telah diberikan selama ini. Segala pencapaian yang aku raih saat ini tidak akan mungkin terwujud tanpa doa, dukungan, serta pengorbanan tiada henti yang telah kalian berikan sejak kecil.
2. Kakek Koseri dan Nenek Supiyah, yang telah menjadi sumber inspirasi dan kekuatan moral bagi penulis.
3. Seluruh keluarga besar, yang selalu memberikan dukungan dan semangat, baik secara langsung maupun tidak langsung.
4. Bapak Dr. Agung Abadi Kiswandono, M.Sc. selaku Dosen Pembimbing I atas kebaikan, bimbingan, arahan, masukan, dan seluruh ilmu pengetahuan yang diberikan selama proses perkuliahan sampai dengan penyelesaian skripsi.
5. Ibu Dr. Eng. Ni Luh Gede Ratna Juliasih, M.Si. selaku Dosen Pembimbing II, atas kebaikan, bimbingan, arahan, masukan, dan seluruh ilmu pengetahuan yang diberikan dalam proses penyelesaian skripsi.

6. Ibu Prof. Dr. Buhani, S.Pd., M.Si. selaku Dosen Penguji/Pembahas atas masukan dan saran yang diberikan dalam proses penyelesaian skripsi.
7. Bapak Syaiful Bahri, S.Si., M.Si. selaku Pembimbing Akademik atas segala bimbingan, nasihat, serta motivasi yang telah diberikan kepada penulis.
8. Dr. Mita Rilyanti, M.Si. selaku Kepala Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung.
9. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung.
10. Bapak serta Ibu dosen Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, pengalaman, dan motivasi selama penulis menjalankan pendidikan di kampus.
11. Seluruh staf administrasi dan pegawai di lingkungan Jurusan Kimia, Dekanat FMIPA, serta Universitas Lampung yang senantiasa membantu dalam sistem akademik, perkuliahan, penelitian, serta penyusunan skripsi sehingga dapat terselesaikan dengan baik.
12. Sahabat seperjuangan Diah Vio Rahmadanti, Rita Ana Pristiani dan Adryan Daffa Dzulfikar, yang telah kebersamai penulis dalam menyelesaikan skripsinya.
13. Tim *Membrane Research* 21, Fildza Amalia, Trie Choirunnisa Dzilhaj dan Abdurachman yang selalu kebersamai dalam segala kondisi selama penelitian yang telah kita lakukan bersama-sama.
14. Kakak-kakak *Membrane Research*, Kak Kharisma, Kak Fadil, Kak Ayu, Kak Sefi, Kak Niswah, Kak Anisa, Kak Annur, dan yang lainnya, terima kasih untuk semua bantuan, dukungan, kesabaran, dan pengalamannya.
15. Sahabat terbaik Luis Yesi Apriliana dan Miftakhul Jannah, yang telah mendengarkan keluh kesah penulis, membantu dan memotivasi penulis dalam menyelesaikan skripsinya.
16. Teman-teman Kimia Angkatan 2021 serta Kimia kelas C 2021 yang senantiasa memberikan informasi dan membantu penulis.
17. Semua pihak yang telah membantu dan mendukung dalam menyelesaikan skripsi penulis serta almamater Universitas Lampung.

Demikian yang dapat penulis sampaikan, penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini belum sempurna dan masih terdapat kekurangan serta kesalahan. Oleh

karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dari pembaca agar karya ini dapat diperbaiki dan dikembangkan lebih baik. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis maupun bagi pembaca.

Bandar Lampung, 20 Juni 2025

Penulis

Marsanda Nur Wahyuningtyas

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR TABEL	vii
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 <i>Malachite Green</i>	5
2.2 Eugenol dan <i>Bisphenol A Diglycidly Ether</i> (BADGE)	6
2.3 Teknologi Membran	11
2.4 <i>Polymer Inclusion Membrane</i> (PIM)	12
2.5 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	13
2.6 Spektrofotometri UV-Vis (<i>Ultra Violet-Visible</i>).....	18
2.7 Spektrofotometri <i>Fourier Transform Infra Red</i> (FTIR).....	21
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	25
3.1 Waktu dan Tempat.....	25
3.2 Alat dan Bahan	25
3.3 Pembuatan Larutan Induk <i>Malachite Green</i> , Pengukuran Konsentrasi <i>Malachite Green</i> dan Pembuatan Limbah Buatan	26
3.4 Pembuatan Membran <i>Polimer Inclusion Membrane</i> (PIM).....	27
3.5 Uji Membran PIM.....	28
3.5.1 Uji Porositas Membran	28

3.5.2 Uji Serapan Air Membran	28
3.6 Optimasi Transpor <i>Malachite Green</i>	29
3.6.1 Variasi pH <i>Malachite Green</i> pada Fasa Sumber	29
3.6.2 Variasi Konsentrasi HNO ₃ pada Fasa Penerima	29
3.6.3 Variasi Ketebalan Membran	30
3.6.4 Variasi Konsentrasi Senyawa Pembawa	30
3.6.5 Variasi Waktu Transpor	31
3.6.6 Studi Kompetisi Transpor <i>Malachite Green</i> pada Limbah Buatan	31
3.6.7 Analisis Parameter Transpor.....	31
3.7 Diagram Alir Penelitian.....	33
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 Pembuatan Membran PIM	34
4.2 Penentuan Panjang Gelombang Maksimum <i>Malachite Green</i>	40
4.3 Uji Membran PIM	41
4.3.1 Uji Porositas Membran.....	41
4.3.2 Uji Serapan Air.....	42
4.4 Optimasi Transpor <i>Malachite Green</i>	43
4.4.1 Tranpor Variasi pH <i>Malachite Green</i> pada Fasa Sumber	43
4.4.2 Transpor Variasi Konsentrasi HNO ₃ pada Fasa Penerima	45
4.4.3 Transpor Variasi Ketebalan Membran	47
4.4.4. Transpor Variasi Konsentrasi Senyawa Pembawa	49
4.4.5 Transpor Variasi Waktu	51
4.4.6 Kompetisi Transpor <i>Malachite Green</i> pada Limbah Buatan.....	53
V. PENUTUP	59
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN	67

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Bilangan Gelombang FTIR untuk berbagai jenis ikatan.....	23
2. Komposisi penyusun membran PIM.....	27
3. Variasi konsentrasi senyawa pembawa	30
4. Berat total komponen, berat membran dan ketebalan membran PIM sebelum transpor.....	35
5. Perbandingan bilangan gelombang membran PIM Poli-BADGE 2:1 sebelum transpor dan setelah transpor <i>malachite green</i>	37
6. Perbandingan bilangan gelombang membran setelah transpor limbah buatan	56
7. Absorbansi larutan standar MG pada variasi pH fasa sumber	78
8. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pH fasa sumber.....	79
9. Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi pH fasa sumber	80
10. Absorbansi larutan standar MG pada variasi konsentrasi fasa penerima.....	80
11. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi fasa penerima	81
12. Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi fasa penerima.....	82
13. Absorbansi larutan standar MG pada variasi ketebalan membran.....	82
14. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi ketebalan membran.....	83

15. Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi ketebalan membran.....	84
16. Absorbansi larutan standar MG pada variasi konsentrasi senyawa pembawa	84
17. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	85
18. Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi konsentrasi senyawa pembawa	86
19. Absorbansi larutan standar MG pada variasi waktu transpor	86
20. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi waktu	87
21. Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada variasi waktu transpor	88
22. Absorbansi larutan standar MG pada limbah buatan	88
23. Absorbansi dan konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada studi kompetisi MG pada limbah buatan	89
24. Data $\bar{x}$, SD, dan %RSD konsentrasi MG di fasa sumber dan fasa penerima pada studi kompetisi MG pada limbah buatan.....	90
25. Data Transpor Waktu.....	91
26. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi pH fasa sumber	97
27. Massa membran setelah transpor MG pada Variasi pH fasa sumber	97
28. %LM <i>Loss</i> transpor MG pada variasi pH fasa sumber	98
29. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima	98
30. Massa membran setelah transpor MG pada variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima	98
31. %LM <i>Loss</i> tranpor MG pada variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.....	99
32. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi ketebalan membran.....	99
33. Massa membran setelah transpor MG pada variasi ketebalan membran	99

34. %LM <i>Loss</i> transpor MG pada variasi ketebalan membran.....	99
35. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi konsentrasi senyawa pembawa	100
36. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi konsentrasi senyawa pembawa	100
37. %LM <i>Loss</i> transpor MG pada variasi senyawa pembawa	100
38. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi waktu transpor	101
39. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi waktu transpor	101
40. % LM <i>Loss</i> transpor MG pada variasi waktu transpor	101
41. Massa membran sebelum transpor MG pada variasi kompetisi limbah buatan.	102
42. Massa membran setelah transpor MG pada variasi kompetisi limbah buatan ...	102
43. % LM <i>Loss</i> transpor MG pada variasi kompetisi limbah buatan.....	102
44. Ketebalan membran PIM pada variasi pH fasa sumber	103
45. Ketebalan membran PIM pada variasi konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima.	103
46. Ketebalan membran PIM pada variasi ketebalan membran.....	103
47. Ketebalan membran PIM pada variasi konsentrasi senyawa pembawa.....	103
48. Ketebalan membran PIM pada variasi waktu transpor	104
49. Ketebalan membran PIM pada variasi kompetisi pada limbah buatan	104

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Struktur <i>malachite green</i>	5
2. Struktur eugenol	7
3. Reaksi polimerisasi eugenol menjadi polieugenol	9
4. Prediksi struktur polieugenol-BADGE	10
5. Perbedaan Membran BLM, ELM, dan SLM	12
6. Skema Instrumen SEM	15
7. Morfologi hasil SEM dari serbuk poli-BADGE 2:1 (a) 700x (b) 2000x, poli-BADGE 4:1 (c) 700x, (d) 2000x dan poli-BADGE 6:1 (e) 700x, (f) 2000x	16
8. Perbedaan membran PIM pada perbesaran 500x (a) sebelum transpor dan (b) setelah transpor	17
9. Skema Spektrofotometer UV-Vis	19
10. Panjang gelombang maksimum <i>malachite green</i>	21
11. Bagan alat spektrofotometer FTIR	23
12. Spektra FTIR pada membran PIM yang mengandung polieugenol sebelum dan setelah transpor	24
13. Alat transpor terdiri dari 1) fasa sumber, 2) fasa penerima, dan 3) membran PIM	27
14. Diagram alir penelitian.....	33

15. Membran PIM yang telah dibuat dengan senyawa pembawa poli-BADGE 2:1 dengan variasi ketebalan (a) T ₂₇ , (b) T ₅₄ dan (c) T ₁₀₈	34
16. Perbandingan spektra FTIR (a) membran PIM sebelum transpor dan (b) membran PIM setelah transpor 24 jam	36
17. Morfologi permukaan membran PIM sebelum transpor perbesaran (a) 500x, dan (b) 2500x, dan setelah transpor perbesaran (c) 500x, dan (d) 2500x.....	39
18. Panjang gelombang maksimum MG	40
19. Persentase porositas membran PIM	41
20. Persentase serapan air membran PIM	42
21. Pengaruh pH MG pada fasa sumber terhadap konsentrasi MG yang tertranspor	44
22. Pengaruh konsentrasi HNO ₃ pada fasa penerima terhadap konsentrasi <i>malachite green</i> yang tertranspor.....	46
23. Pengaruh ketebalan membran terhadap konsentrasi MG yang tertranspor.....	48
24. Pengaruh konsentrasi senyawa pembawa terhadap konsentrasi MG yang tertranspor	50
25. Pengaruh waktu transpor terhadap konsentrasi MG yang tertranspor	51
26. Konsentrasi MG pada limbah buatan dengan logam Cu(II) dan Pb(II) sebagai kompetitor	54
27. Perbandingan spektra IR membran setelah transpor (a) MG (kontrol) (b) MG + Pb(II) (c) MG + Cu(II) dan (d) MG + Pb(II) + Cu(II).....	55
28. Morfologi permukaan membran setelah transpor pada limbah buatan dengan perbesaran (a) 1000x dan (b) 2500x	56
29. Spektrum EDS dari membran setelah transpor <i>malachite green</i> pada limbah buatan	57
30. Kurva kalibrasi MG pada variasi pH fasa sumber	78
31. Kurva kalibrasi MG pada variasi konsentrasi fasa penerima.....	80
32. Kurva kalibrasi MG pada variasi ketebalan membran.....	82
33. Kurva kalibrasi MG pada variasi konsentrasi senyawa pembawa	84

34. Kurva kalibrasi MG pada variasi waktu.....	86
35. Kurva kalibrasi MG pada studi kompetisi MG pada limbah buatan.....	88
36. Hasil uji normalitas.....	106
37. Grafik uji normalitas.....	106
38. Hasil uji t pada MG kontrol dan MG+Pb(II)+Cu(II).....	107
39. Membran PIM sebelum transpor.....	107
40. Transpor <i>malachite green</i> variasi ketebalan membran sebelum dan setelah transpor.....	108
41. Transpor <i>malachite green</i> pada variasi logam buatan sebelum dan setelah transpor.....	108
42. Membran PIM setelah transpor.....	109

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bidang ilmu pengetahuan mengalami perkembangan pesat terutama pada bidang industri dan teknologi. Industri tekstil di Indonesia telah mendorong kemajuan yang signifikan dalam sektor ekspor, namun berdampak negatif terhadap lingkungan. Banyak industri tekstil yang tidak diimbangi dengan pengelolaan limbah cair yang baik, menyebabkan pencemaran lingkungan. Limbah zat warna, jika tidak diolah dengan baik, dapat merugikan perairan dan ekosistemnya, membahayakan kesehatan manusia, karena bersifat reaktif. Zat warna reaktif mengandung logam Pb dan Cu sehingga sulit terlarut dan terurai. Pewarna sintetis digunakan secara luas dalam industri karena warna yang mencolok, kemudahan produksi, biaya rendah, dan stabilitasnya terhadap cahaya (Ling *and* Suah, 2017). Pewarna merupakan suatu bahan kimia yang berfungsi untuk menyerap atau mengendap pada permukaan larutan yang memberikan warna (Ashraf *et al.*, 2019).

Industri tekstil pewarna menjadi komponen utama yang terdapat pada limbah sehingga harus didaur ulang sebelum air limbah dibuang pada badan air. Pewarna yang banyak digunakan adalah *malachite green*. *Malachite green* adalah pewarna trifenilmetana, tidak dapat terbiodegradasi dan sulit terurai karena berasal dari sintetis (Chadi *et al.*, 2021). Saat ini MG menjadi permasalahan karena membahayakan sistem reproduksi dan kekebalan tubuh serta bersifat karsinogenik dan genotoksik (Ling *and* Suah, 2017). Beberapa teknik yang dapat digunakan untuk menghilangkan MG pada perairan diantaranya flokulasi, adsorpsi, presipitasi, penggunaan membran cair dan pertukaran ion (Ariyanto, 2009).

Salah satu cara efektif untuk mengatasi limbah MG adalah menggunakan teknologi membran. Membran merupakan lapisan tipis yang membatasi perpindahan suatu senyawa dan dapat memisahkan antara dua fase. Kata membran berasal dari Bahasa Latin (*membrana : thin skin*) yang artinya “suatu lapisan tipis” (Muralidhara, 2010). Proses pemisahan pada membran berdasarkan konsep filtrasi sederhana dikarenakan terjadi perbedaan ukuran pada partikel komponen yang dipisahkan pada ukuran membran. Selain itu, proses pemisahan pada membran berdasarkan prinsip difusi (Arahman, 2017). Membran cair merupakan jenis membran yang menggunakan komponen kimia *plasticizer* dan ekstrak pada fasa cair. Membran ini digunakan pada berbagai proses pemisahan yang mencantumkan ekstraksi atau transpor kimia senyawa target dari satu fase cair ke fase cair lainnya (Kiswandono *et al.*, 2024). Membran cair berperan dalam berbagai teknologi membran, baik dalam proses pemisahan dan pemurnian maupun dalam aplikasi analitik. Membran cair dapat dikategorikan dalam beberapa jenis utama, seperti membran cair emulsi, dan membran cair curah, membran cair terdukung, dan *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) (Ling and Suah, 2017). Proses pemisahan MG menggunakan satu jenis membran yaitu PIM.

Polymer Inclusion Membrane (PIM) adalah membran cair generasi terbaru yang digunakan untuk memisahkan senyawa kimia organik dan anorganik, dengan stabilitas PIM menjadi faktor kunci untuk efektivitas pemisahan yang berkelanjutan. (Rensini dkk., 2024). Berbeda dari membran cair lainnya, PIM memiliki ekstrak dan *plasticizer* yang tidak hanya berada di pori-pori membran, tetapi juga terintegrasi dalam rantai polimer pendukungnya (Hoque *et al.*, 2024). Kelebihan menggunakan PIM adalah kemudahan fabrikasinya, ketahanan pemakaian dalam jangka waktu lama, selektivitasnya tinggi, kemudahan regenerasi dan daur ulang pada siklus pemisahan (Aini *et al.*, 2022). Teknik ini menghasilkan membran yang lebih stabil karena ekstrak tidak mudah lepas ke larutan selama pemisahan dengan PIM, sehingga tertahan lebih kuat (Kiswandono *et al.*, 2024).

Polimer sebagai senyawa pembawa telah digunakan dengan beberapa metode membran cair di antaranya adalah Bis(piridilmetil) amina (Gardner *et al.*, 2006), kuaterner amina, piridin dan turunannya (Nghiem *et al.*, 2006) dan asam 2-(10-karboksi desilsulfanil) benzoik (Oberta dkk., 2011). Salah satu senyawa pembawa

berbasis senyawa bahan alam adalah polieugenol. Polieugenol adalah senyawa yang dihasilkan dari polimerisasi eugenol. Eugenol adalah komponen utama yang ditemukan dalam minyak atsiri dari daun cengkeh dan kayu manis, senyawa ini memiliki aroma yang khas, yaitu aroma pedas seperti cengkeh (Nirwana dkk., 2023). Tiga gugus fungsi yang dimiliki oleh eugenol adalah gugus metoksi, gugus alil, dan gugus hidroksi. Polimerisasi eugenol menjadi polieugenol dapat dilakukan melalui gugus alil.

Polieugenol dapat disintesis menggunakan katalis, asam sulfat (H_2SO_4) atau boron triflourodietil eter $\text{BF}_3\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$, tetapi polimer yang dihasilkan dari sintesis ini memiliki interaksi timbal balik dengan senyawa target potensi rendah. Hal ini dikarenakan masih rendahnya berat molekul polimer yang dihasilkan dalam sintesis ini. Telah dibuktikan oleh La Harimu dkk. (2009), dengan memperoleh hasil sintesis dengan berat molekul polieugenol sebesar 39380 mol/g. Polimer ini memiliki sisi aktif terbatas dikarenakan berat molekulnya yang rendah (La Harimu dkk., 2009). *Bisphenol A Diglycidyl Ether* (BADGE) dan DGEBA adalah senyawa organik dan merupakan resin epoksi cair. Senyawa epoksida BADGE berfungsi sebagai senyawa agen tautsilang sehingga bisa digunakan untuk memperpanjang rantai polimer bila direaksikan dengan polieugenol (Leach *et al.*, 2005).

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka pada penelitian ini telah dilakukan transpor *malachite green* menggunakan Poli-Bisphenol A Diglycidyl Ether (Poli-BADGE) 2:1 sebagai senyawa pembawa menggunakan metode *polimer inclusion membrane*. Karakterisasi yang dilakukan pada membran PIM adalah spektrofotometer FTIR untuk mengetahui adanya sisi aktif pada membran, dan *scanning electrone microscope* (SEM) untuk melihat bentuk pori-pori membran sebelum dan sesudah transpor dilakukan. Spektrofotometer UV-Vis digunakan untuk mengukur absorbansi dan konsentrasi larutan MG pada panjang gelombang maksimum. Dilakukan uji porositas dan serapan air pada membran, dimana uji porositas digunakan untuk mengetahui volume ruang kosong didalam membran. Sedangkan, uji serapan air digunakan untuk mengetahui kemampuan membran dalam menyerap air. Adapun parameter transpor yang dilakukan adalah pembuatan membran PIM, pengukuran konsentrasi *malachite green* pada sampel, variasi pH *malachite green* pada fasa sumber, variasi konsentrasi HNO_3 pada fasa penerima,

variasi ketebalan membran, variasi konsentrasi senyawa pembawa, variasi waktu transpor, dan studi kompetisi transpor *malachite green* pada limbah buatan.

1.2 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan optimasi transpor *malachite green* menggunakan metode *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) dengan senyawa pembawa Poli-Bisfenol A Diglisidil Eter (Poli-BADGE) 2:1.
2. Melakukan uji kompetisi transpor *malachite green* dengan logam berat Pb(II) dan Cu(II) pada limbah buatan.
3. Melakukan karakterisasi membran PIM sebelum dan sesudah transpor menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Fourier Transform Infra Red* (FTIR).

1.3 Manfaat

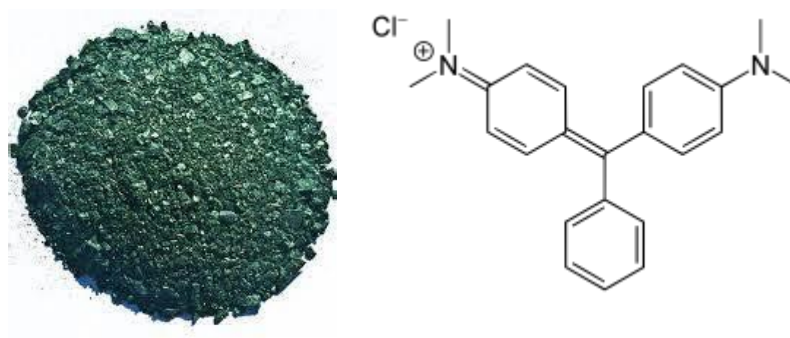
Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menambah pemahaman mengenai penggunaan poli-BADGE 2:1 sebagai senyawa pembawa dalam transpor *malachite green*.
2. Memberikan informasi berkaitan dengan polimer turunan polieugenol yang dapat digunakan untuk mengatasi polutan perairan yaitu zat warna khususnya *malachite green*.
3. Memperluas pengetahuan tentang penerapan polimer dalam bidang analisis kimia.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Malachite Green*

Malachite Green (MG) adalah pewarna celup dasar, yang berasal dari pewarna organik dan garam yang memiliki kandungan amino yang dikombinasikan menggunakan asam, yaitu asam klorida (HCl). MG sebagai zat warna sintesis banyak digunakan pada industri tekstil kain seperti wol, nilon dan sutra. MG memiliki karakteristik warna yang cerah, harganya lebih murah dan mudah didapatkan dibandingkan pewarna celup sintesis lainnya. MG memiliki senyawa dengan struktur cincin tiga benzen yang terhubung ke pusat karbon. MG (hijau malasit) yang juga dikenal dengan nama lain seperti *Basic Green 4*, *Victoria green B*, *Aniline Green* dan *Diamond Green B* memiliki nama kimia 4-4[(4-dimetilaminofenil)-fenil-metil]-N,N-dimetil-anilin. MG mempunyai rumus molekul $C_{23}H_{25}ClN_2$, dan bersifat toksik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur *malachite green*

Nama MG mengacu pada pewarna kationik dan larutan akan bermuatan positif. Kation MG mempunyai keseimbangan yang bergantung pada pH dengan bentuk karbinol yang sesuai. MG memiliki berat molekul 364,917 g/mol. MG mempunyai sifat yang tidak mudah terpengaruh oleh cahaya dan zat pengoksidasi lainnya. Zat warna ini bersifat toksik, sehingga menyebabkan berbagai masalah kesehatan yang timbul akibat penggunaan MG yang berlebih seperti diskrasia (penurunan jumlah sel darah merah), anemia (hemoglobin), gangguan pembekuan darah, leukositosis (peningkatan jumlah sel darah putih), kanker hingga yang lebih parah dapat menyebabkan terjadinya mutasi gen. MG biasanya ditemukan dalam bentuk kristal hijau atau serbuk hijau yang larut dalam air, menghasilkan larutan berwarna hijau cerah (Khairil dan Etika, 2022).

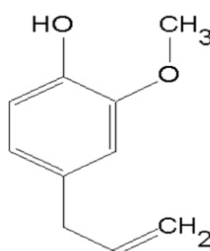
MG banyak digunakan sebagai biosida dalam industri akuakultur karena kemampuannya dalam mengobati infeksi jamur akuatik dan protozoa pada ikan dan telur. Di dalam air, MG berada dalam keseimbangan antara bentuk ionik berwarna dan *pseudobase* non ionik (bentuk karbinol) yang tidak berwarna. Proporsi relatif dari MG bergantung pada pH. Pada pH 4 (asam) MG hampir terionisasi seluruhnya (berwarna), sedangkan pada pH 10 (basa) berbentuk karbinol seluruhnya (tidak berwarna). Hanya bentuk ionik berwarna yang memiliki aktivitas antimikroba, sedangkan bentuk karbinol larut dalam lemak sehingga memungkinkan untuk melewati membran (yaitu melintasi insang). Toksisitas MG sangat dipengaruhi oleh suhu. Toksisitas akan meningkat seiring dengan meningkatnya suhu. MG lebih beracun pada pH rendah dan juga bersifat fitotoksik. Oleh karena itu, MG diinaktivasi (dioksidasi) oleh cahaya, sehingga pada saat proses perawatan pada ikan dan telur lampu akuarium harus dimatikan (Noga, 2010).

2.2 Eugenol dan Bisphenol A Diglycidly Ether (BADGE)

Eugenol adalah senyawa aromatik yang termasuk dalam golongan fenol. Eugenol umumnya banyak diperoleh dari minyak esensial alami dari tumbuhan dari *famili Lamiaceae, Lauraceae, Myrtaceae, Myristicaceae*, dan paling banyak komponen penting minyak cengkeh (*Syzygium aromaticum*). Eugenol berbentuk cairan bening

hingga sedikit berwarna kuning dan mudah menguap. Senyawa ini memiliki aroma yang khas, yaitu aroma pedas seperti cengkeh, yang sering digunakan dalam industri parfum dan makanan sebagai bahan pengharum. Eugenol tidak dapat larut dalam air, namun sangat mudah larut dalam pelarut organik. Eugenol sebagai inhibitor antioksidan dan *monoamine oxidase* (MAO) dan juga diketahui menunjukkan sifat neuroprotektif. Eugenol diketahui sebagai radikal bebas, menghambat pembentukan spesies oksigen reaktif, mencegah produksi bentuk reaktif nitrogen, meningkatkan potensi sitoantioksidan, dan melindungi fungsi DNA mikroba dan protein (Effendi, 2021).

Eugenol menjadi salah satu fenil propanoid tereduksi, dan komponen utama dari minyak cengkeh. Selain, didapatkan dengan cara diekstraksi dari minyak cengkeh, eugenol juga dapat diproduksi secara sintesis dari *alylasi guaiacol* dengan alilklorida. Saat ini eugenol banyak digunakan sebagai pewangi sabun dan kosmetik, produk perawatan kulit, penyedap makanan, sebagai pestisida, produk gigi dan farmasi. Tetapi jika dosis eugenol yang digunakan tinggi maka akan menjadi beracun. Eugenol memiliki nama lain 4-alil-2-metoksifenol dengan rumus molekul $C_{10}H_{12}O_2$ dan berat molekul 164,20 g/mol (Nejad *et al.*, 2017). Eugenol memiliki titik didih sebesar 250 - 255 °C. Terdapat beberapa jenis senyawa eugenol pada minyak atsiri yaitu *acetyl eugenol* dan *beta-caryophyllene* (Putri dan Fibrianto, 2018). Struktur eugenol dapat dilihat pada Gambar 2.

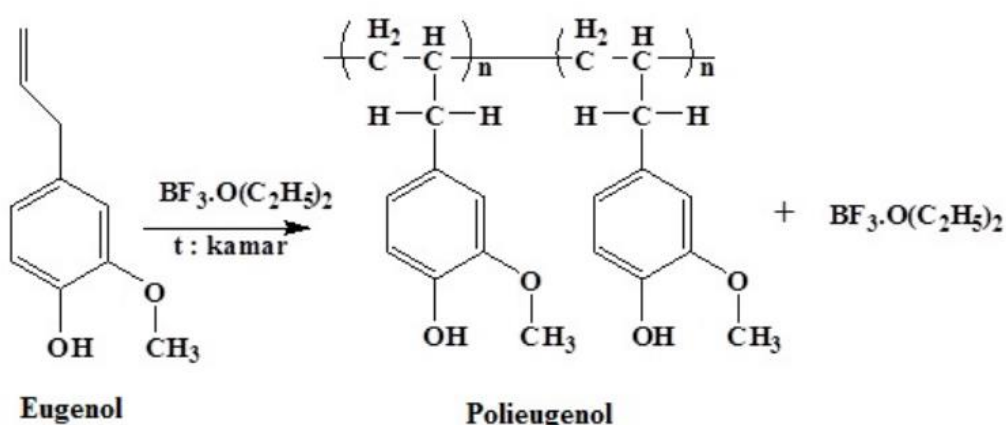


Gambar 2. Struktur eugenol

Eugenol memiliki nilai ekonomis tinggi dikarenakan banyak digunakan pada industri. Bahan baku pembuatan produk makanan banyak diperoleh dari eugenol, seperti dalam pembuatan vanili untuk aroma makanan. Eugenol menarik karena memiliki gugus aktif, termasuk cincin aromatik, hidroksil, dan alil, yang

memungkinkan modifikasi kimia menjadi senyawa turunan lainnya. Beberapa turunan eugenol, seperti isoeugenol, metil eugenol, dan vanili sintetis, banyak digunakan dalam industri kosmetik, flavor makanan, dan farmasi. Polieugenol merupakan bentuk polimer dari eugenol yang telah dimodifikasi dan memiliki banyak manfaat. Polieugenol dihasilkan melalui proses polimerisasi dari senyawa eugenol (Hikmah dkk., 2018).

Sintesis polieugenol dilakukan dengan penambahan katalis $\text{BF}_3\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ dan H_2SO_4 pekat. Polieugenol pada hasil sintesis menggunakan katalis $\text{BF}_3\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ berupa padatan, berwarna coklat dan titik leleh $75\text{ }^\circ\text{C} - 80\text{ }^\circ\text{C}$ dengan berat 3,2837 gram. Sedangkan, jika menggunakan katalis H_2SO_4 pekat memperoleh hasil berupa padatan coklat tua, dengan berat 1,7998 gram dengan titik leleh $78\text{ }^\circ\text{C} - 80\text{ }^\circ\text{C}$. Proses polimerisasi polieugenol dari eugenol disebut polimerisasi adisi kationik, dikarenakan gugus vinil dari eugenol mengalami reaksi adisi. Reaksi polimerisasi $\text{BF}_3\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ terjadi melalui 3 tahapan yaitu tahap inisiasi, propagasi dan terminasi. Pada tahap inisiasi terjadi reaksi adisi, yang menyebabkan gugus alil pada eugenol terjadi pemutusan ikatan rangkap. Pemutusan ikatan rangkap karena proton (H^+) yang dialihkan dari katalis asam ke monomer eugenol, sehingga terbentuk karbokation. Adisi yang terjadi pada tahapan ini sesuai dengan hukum *Markovnikov* dimana stabilitas karbokation yang terbentuk sebagai faktor penentu reaktivitas monomer. Tahap propagasi, terbentuk rantai dari monomer eugenol sehingga berkelanjutan sampai didapatkan rantai polimer yang panjang. Tahap terminasi, ditambahkan metanol supaya proses polimerisasi berhenti, dan diharapkan rantai polimer terakhir adalah gugus metoksi (Widodo dkk., 2010). Salah satu senyawa epoksida yang digunakan adalah *Bisphenol A Diglycidyl Ether* (BADGE). Proses polimerisasi eugenol untuk membentuk polieugenol dapat dilihat pada Gambar 3.

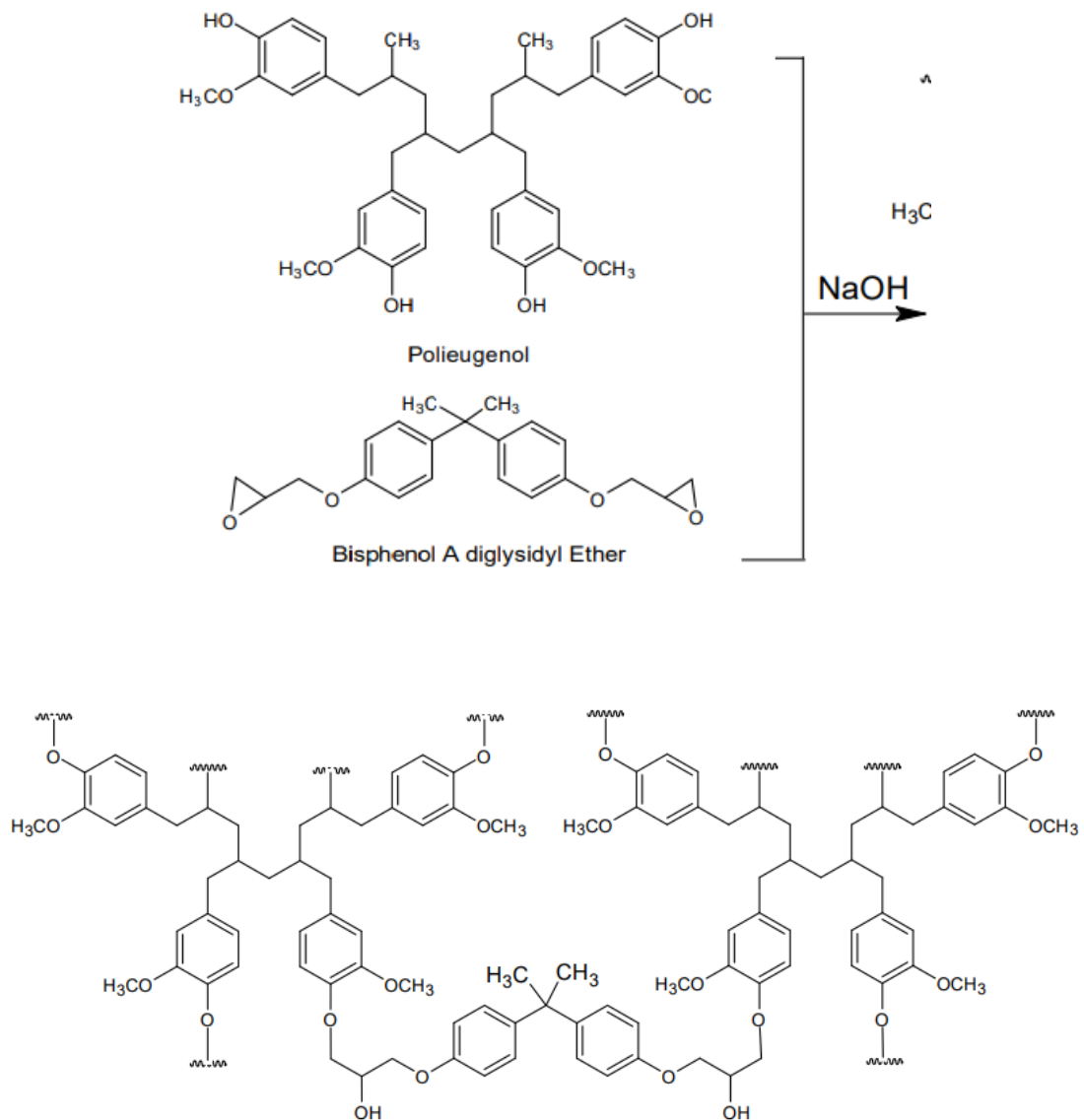


Gambar 3. Reaksi polimerisasi eugenol menjadi polieugenol (Kiswandono *et al.*, 2020)

Bisfenol A Diglisidil Eter (BADGE) merupakan senyawa epoksi yang berasal dari reaksi antara Bisfenol A dan Epiklorohidrin. Senyawa ini memiliki dua gugus epoksi reaktif yang memungkinkan pembentukan ikatan silang dengan amina atau anhidrida, sehingga menghasilkan material dengan sifat mekanik dan termal yang unggul (Bajpai *et al.*, 2021). Kelebihan utama BADGE terletak pada reaktivitas gugus epoksinya, yang memungkinkan polimerisasi dan pembentukan ikatan silang dengan senyawa lain. Secara fisik BADGE merupakan cairan kental yang tidak berwarna hingga kuning pucat, dan memiliki titik didih yang relatif tinggi yang menunjukkan stabilitas termal yang baik (Wang *et al.*, 2021).

Poli-BADGE memiliki titik leleh $>380^\circ\text{C}$ dan tidak larut dalam air atau kloroform. Secara signifikan titik leleh yang dimiliki poli-BADGE lebih tinggi dibandingkan dengan polieugenol yaitu sebesar $80,3 - 83,7^\circ\text{C}$, hal ini dikarenakan tingkat kerumitan produk dibandingkan dengan produk awal (Kiswandono *et al.*, 2020). Poli-BADGE diperoleh dengan cara disintesis dari polieugenol dan BADGE dengan menggunakan refluks dalam dioksan pada suasana basa. Reaksi ikatan silang dilakukan dalam kondisi basa karena untuk memfasilitasi reaksi substitusi nukleofilik bimolekuler ($\text{S}_\text{N}2$). Ikatan silang antara gugus hidroksi polieugenol dan epoksida BADGE membentuk obligasi eter. Senyawa epoksida yang dilakukan polimerisasi dengan memanfaatkan sisi aktif dari polieugenol yang terletak pada gugus hidroksinya. Polimer yang diperoleh dari sintesis ini memiliki berat molekul lebih tinggi sehingga pusat aktifnya lebih banyak (gugus $-\text{OH}$ dan cincin benzen).

Peningkatan situs aktif pada polimer yang disintesis diharapkan dapat meningkatkan laju transpor serta membuat proses transpor menjadi lebih cepat dan efisien (Kiswandono *et al.*, 2020). Prediksi struktur polimer taut silang polieugenol-BADGE dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Prediksi struktur polieugenol-BADGE (Kiswandono *et al.*, 2020)

2.3 Teknologi Membran

Membran merupakan penghalang selektif antara dua fase, dapat berbentuk heterogen atau homogen yang memiliki ketebalan dan ukuran pori tertentu yang memisahkan material (partikel, senyawa, molekul, ion) atau berdasarkan berat molekul. Oleh karena itu, membran merupakan media penyaringan (*filter*) yang dapat memisahkan partikel, senyawa, molekul, ion mulai dari yang mempunyai ukuran $1\ \mu\text{m}$ - $0,0001\ \mu\text{m}$. Prinsip dalam proses filtrasi membran adalah melewatkan zat yang akan dipisahkan melalui suatu membran ukuran pori tertentu pada seperangkat alat filtrasi membran, hasil filtrasi disebut permeat dan sisa umpan disebut *retentat*. Proses pemisahan di dalam membran terjadi melalui pergerakan zat yang melintasi membran menggunakan proses transpor aktif dan pasif. Transpor aktif merupakan pergerakan langsung zat-zat yang akan dipisahkan, sedangkan transpor pasif disebabkan oleh perbedaan konsentrasi, tekanan, atau suhu pada kedua sisi membran (Purwayanti dkk., 2022).

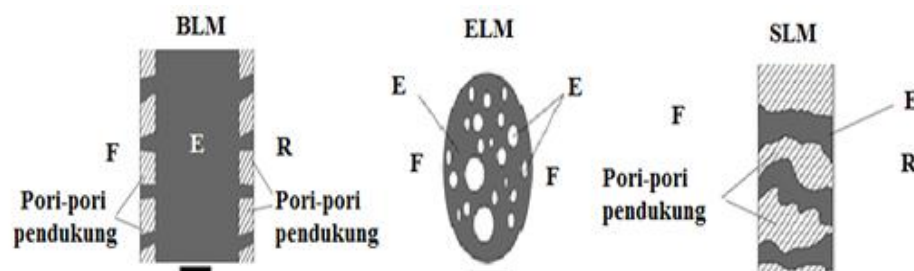
Teknologi membran telah berkembang pesat saat ini, karena sangat menunjang dalam proses pemisahan dari suatu larutan ataupun gas yang merupakan produk komersial yang sangat berpengaruh terhadap berbagai sektor industri. Membran berfungsi untuk memisahkan bahan berdasarkan ukuran dan bentuk molekul dengan menahan komponen yang lebih besar dari pori-pori membran, sementara komponen yang lebih kecil dapat melewati membran tersebut (Apriyanti dkk., 2024). Membran cair adalah salah satu jenis teknologi membran. Membran cair (*liquid membrane*) mengalami peningkatan yang sangat signifikan dalam kombinasi transpor yang melibatkan komponen tertentu seperti ion logam selektif, pada konsentrasi yang lebih tinggi yang melintasi membran cair. Meskipun pembentukan film cair tipis umumnya tidak menjadi masalah, terdapat beberapa kesulitan karena film dan sifat-sifatnya perlu dipertahankan dan dikontrol selama proses pemisahan masal.

Beberapa bentuk penguatan diperlukan untuk mendukung struktur membran yang lemah (Mozhdehvari *et al.*, 2009). Lapisan membran berupa cairan biasanya terdapat pada membran cair. Cairan ini dapat digunakan sebagai membran dengan beberapa syarat, yaitu:

1. Dapat larut dalam fase membran.

2. Tidak larut dalam fase umpan.
3. Dapat melepaskan kembali analit ke fase penerima.
4. Berikatan dengan analit (komponen zat) dan dapat dilepaskan kembali.

Membran cair dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis berdasarkan struktur dan pemisahannya antara lain adalah membran cair, membran berpori, dan membran tidak berpori. Beberapa peneliti mengklasifikasi membran cair menjadi tiga tipe, yaitu membran cair ruah (BLM, *Bulk Liquid Membrane*), membran cair emulsi (ELM, *Emulsion Liquid Membrane*) dan membran cair berpendukung (SLM, *Supported Liquid Membrane*). Proses membran cair menggabungkan tahap ekstraksi cair-cair dengan tahap penerimaan dalam satu proses yang berkelanjutan. Senyawa yang tereksitasi adalah larutan berair (Apriyanti dkk., 2024). Perbedaan ketiga jenis membran BLM, ELM, dan SLM dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbedaan Membran BLM, ELM, dan SLM (Kislik, 2010)

2.4 Polymer Inclusion Membrane (PIM)

Polymer Inclusion Membrane (PIM) adalah proses mengembangkan sistem ramah lingkungan yang bertujuan untuk analisis spesies, pemulihan, dan pemisahan. PIM memiliki stabilitas yang sangat tinggi, berbeda dengan SLM, karena dalam SLM, rangkaian polimer pada membran terlibat dalam pengikatan cairan dalam pori-pori membran. Kelebihan membran ini adalah sifat ekstraksi PIM dapat disesuaikan dengan mengubah jenis dan rasio komponen utama, seperti polimer dasar dan pembawa ion. Selain itu, karakteristik PIM juga dipengaruhi oleh jenis dan jumlah

plasticizer yang digunakan. *Plasticizer* dapat meningkatkan sifat mekanik dan kompatibilitas komponen dalam PIM (Ghaderi *et al.*, 2021).

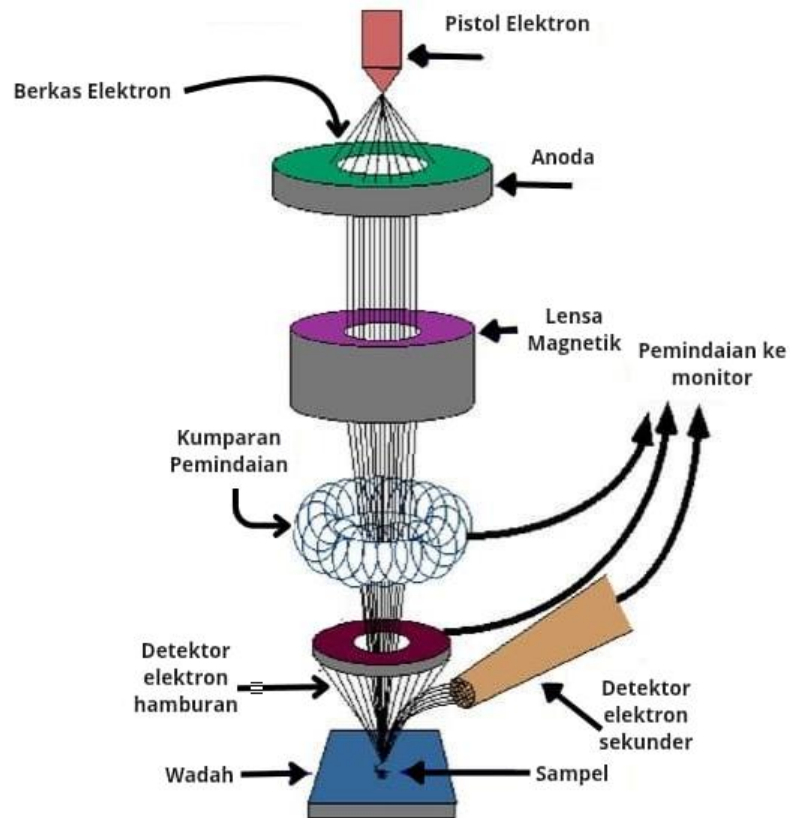
PIM adalah membran cair yang memiliki sifat tipis, fleksibel, transparan, dan stabil. Membran ini efektif untuk memisahkan molekul organik berukuran kecil serta ion logam dan non-logam. Struktur membran PIM mencakup pembawa ion, polimer dasar, dan *plasticizer* (Chikaatesa, 2019). Kemampuan membran PIM sangat bergantung pada morfologi dan struktur. Pemilihan polimer dasar, pembawa ion, *plasticizer*, serta penambahan modifier atau media sinergis memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi membran (Konczyk and Ciesielski, 2021). Selama formulasi membran PIM, *plasticizer* dipengaruhi oleh sifat fisik dan kimia membran seperti mempengaruhi efisiensi transpor ion logam dan meningkatkan fleksibilitasnya. Membran PIM ditinjau sebagai bahan yang berfungsi untuk menyerap kontaminan karena memiliki kemampuan adaptasi dan biaya yang murah jika dibandingkan dengan membran mineral. Biasanya membran polimer menjadi bahan baku yang digunakan dalam pemurnian air dan desalinasi (Besaadi *et al.*, 2022). Membran dan konfigurasi sistem dipilih berdasarkan pada minimal penyumbatan dan kerusakan yang disebabkan oleh membran (Yuliwati, 2020).

2.5 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan alat yang digunakan untuk menghasilkan gambar permukaan sampel dengan resolusi tinggi. Dengan memindai permukaan sampel menggunakan berkas elektron berenergi tinggi, SEM mampu menampilkan detail permukaan yang sangat kecil, termasuk struktur mikro dan topografi (Setiabudi dkk., 2012). SEM merupakan instrumen yang memanfaatkan berkas elektron pancaran tinggi yang akan memindai objek untuk memperoleh citra (*image*) dari objek tersebut. Gambar yang diperoleh dari SEM dibagi menjadi dua jenis, yaitu pemetaan komposisi sampel dan permukaan sampel. SEM mengalami perkembangan dari teori panjang gelombang *De Broglie*, yang menyatakan bahwa partikel yang bergerak memiliki sifat gelombang. Panjang gelombang ini berbanding terbalik dengan momentumnya. SEM umumnya digunakan dalam teknologi skala

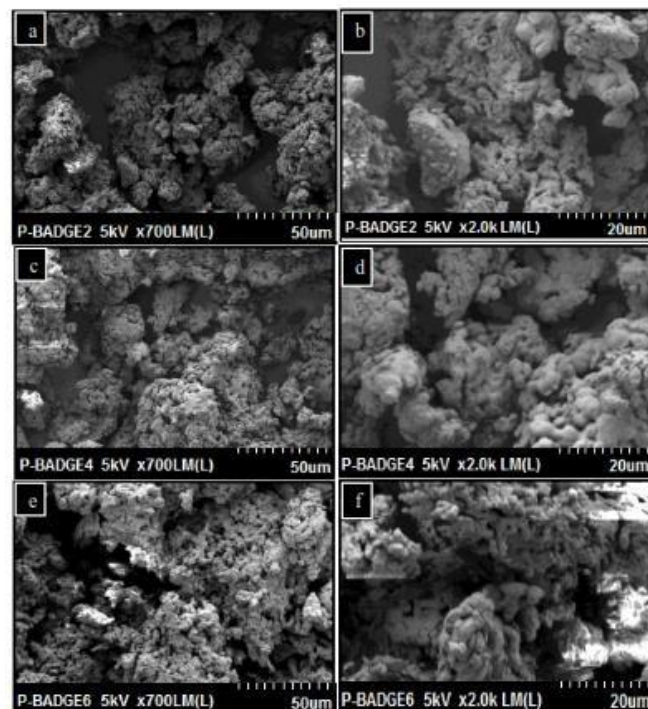
nano untuk berbagai aplikasi, termasuk identifikasi material, sains, ilmu korosi, forensik, material batuan, analisis kegagalan metalurgi dan elektronik, polimer, katalis, desain semikonduktor, serta pertambangan minyak dan gas. Gambar visual yang dihasilkan oleh SEM berupa gambar hitam putih karena panjang gelombang elektron pemindai tidak berada dalam spektrum sinar tampak. Secara umum instrumen SEM terdiri dari tiga komponen utama yaitu komponen pemindai, komponen penyajian gambar dan data (tampilan gambar), serta komponen pendukung (Masta, 2020).

Prinsip kerja *Scanning Electron Microscopy* (SEM) melibatkan penembakan berkas elektron dari pistol elektron yang dikirim ke sampel melalui anoda, lensa magnetik, dan pemindaian kumparan dalam ruang hampa. Setelah berkas elektron mengenai sampel, berkas tersebut dipantulkan kembali dan ditangkap oleh detektor. Detektor ini mengumpulkan sinyal dari X-Ray, elektron yang dipantulkan, dan elektron sekunder, kemudian mengubah sinyal-sinyal ini menjadi gambar yang ditampilkan di layar monitor. Gambar akhir yang dihasilkan menyerupai foto tiga dimensi, dengan energi elektron sekunder ≤ 50 eV dan energi elektron yang dipantulkan ≥ 50 eV. Posisi objek dan pembesaran gambar dapat diatur melalui komputer. SEM memungkinkan visualisasi mikrostruktur sampel, termasuk ukuran partikel, keseragaman, bentuk, dan rasio aspek partikel (Sembiring dkk., 2019). Skema SEM dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Skema Instrumen SEM (Sembiring dkk., 2019)

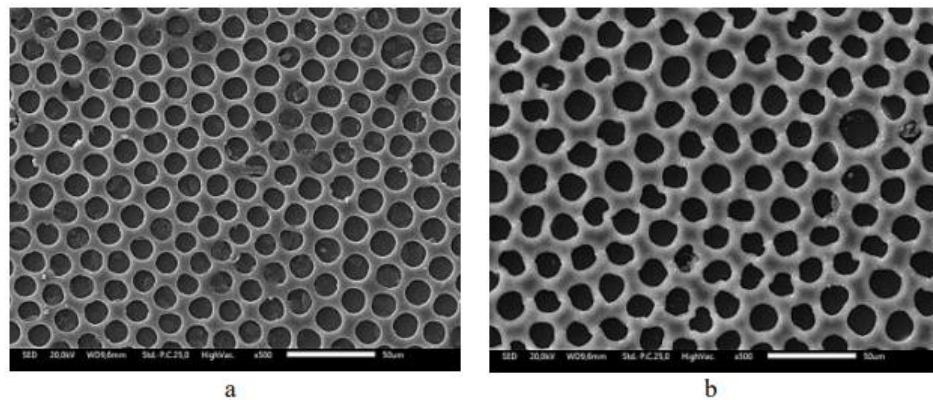
Kiswandono (2014), telah melakukan penelitian transpor fenol menggunakan metode PIM dengan poli-BADGE sebagai senyawa pembawa. Dari hasil penelitian memperlihatkan morfologi hasil SEM dari serbuk poli-BADGE 2:1, 4:1 dan 6:1. Perbedaan hasil morfologi permukaan poli-BADGE 2:1, 4:1 dan 6:1 dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Morfologi hasil SEM dari serbuk poli-BADGE 2:1 (a) 700x (b) 2000x, poli-BADGE 4:1 (c) 700x, (d) 2000x dan poli-BADGE 6:1 (e) 700x, (f) 2000x (Kiswandono, 2014)

Gambar 7 menunjukkan bahwa ketiga serbuk polimer memiliki tekstur permukaan hampir sama yaitu terikat kuat, menggerombol dan nampak kenyal. Serbuk polimer yang terbentuk ini pada awalnya berbentuk padatan yang liat dan kenyal, sehingga susah untuk ditumbuk atau dihaluskan. Hal ini menandakan bahwa ikatan silang antar rantai polimer tersebut menyebabkan terjadinya jaringan yang kaku dan membentuk bahan yang keras. Bertambahnya jumlah mol polieugenol menyebabkan jumlah ikatan silang semakin banyak sehingga polimer semakin kaku dan mudah patah. Hal ini tergambarkan oleh hasil SEM tersebut. Bentuknya yang bergerombol memperlihatkan bahwa ketiga polimer tersebut memiliki kekuatan ikatan yang sangat kuat sehingga polimer tersebut susah untuk dipisahkan (dihaluskan).

Kiswandono *et al.* (2024), telah melakukan penelitian transpor MG menggunakan metode PIM dengan polieugenol sebagai senyawa pembawa. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa morfologi hasil SEM dari membran PIM terdapat perbedaan pada morfologi permukaan membran PIM sebelum dan setelah transpor (Gambar 8).



Gambar 8. Perbedaan membran PIM pada perbesaran 500x (a) sebelum transpor dan (b) setelah transpor (Kiswandono *et al.*, 2024)

Pada membran sebelum transpor (Gambar 8a) permukaan membran masih ditutupi oleh *plasticizer* sebagai media cairnya, artinya pori-pori membran terlihat homogen. Membran PIM setelah transpor MG (Gambar 8b) dengan memiliki permukaan yang tidak rata dan membran memiliki pori-pori yang terlihat jelas, artinya selama transpor, komponen membrannya hilang (*leaching*). Penggunaan membran untuk transpor memungkinkan terjadinya kehilangan komponen membran. Kehilangan komponen membran tersebut akan menyebabkan permukaan membran PIM menjadi berpori yang terlihat sangat jelas. Kehilangan komponen membran PIM dapat disebabkan oleh hilangnya senyawa pembawa, polimer dasar, atau *plasticizer*.

Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDX) merupakan gabungan dari dua teknik analisis mikroskopis dan spektroskopis yang sering digunakan untuk karakterisasi morfologi permukaan dan komposisi unsur dari suatu sampel padat (Goldstein *et al.*, 2017). SEM memungkinkan pengamatan permukaan sampel dengan resolusi tinggi melalui pemindaian berkas elektron pada permukaan, yang menghasilkan citra topografi dengan detail mikron hingga nanometer (Reed, 2005). Sementara itu, EDX yang terintegrasi dalam SEM digunakan untuk menganalisis komposisi unsur berdasarkan deteksi sinyal sinar-X karakteristik yang dipancarkan oleh sampel ketika terkena berkas elektron (Williams and Carter, 2009). SEM-EDX menjadi metode yang secara luas digunakan untuk pengamatan morfologi permukaan, struktur, dan pemetaan kandungan berbagai jenis sampel mulai dari bahan alam, organik, anorganik, polimer, logam hingga sampel

biologi (Pretorius, 2010). Kelebihan utama dari SEM-EDX adalah kemampuannya untuk menganalisis area spesifik pada sampel dengan akurasi tinggi dan tanpa preparasi sampel yang kompleks dibandingkan dengan teknik spektroskopi lainnya (Newbury and Ritchie, 2013).

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

Spektrofotometri adalah metode yang digunakan untuk menganalisis komposisi sampel secara kuantitatif dan kualitatif melalui interaksi antara cahaya dan materi. Alat spektrofotometri UV-Vis khusus digunakan untuk mengukur reflektansi, transmitansi, dan absorbansi dari sampel pada berbagai panjang gelombang, serta untuk analisis di daerah *ultraviolet* dan tampak (Muller, 2001). Spektrum UV-Vis umumnya menunjukkan pita lebar, yang disebabkan oleh penyerapannya energi yang mengakibatkan transisi elektronik, rotasi, dan vibrasi dalam molekul. Sinar tampak memiliki panjang gelombang antara 400-800 nm, sedangkan sinar ultraviolet berada pada rentang panjang gelombang 200-400 nm. Spektrofotometri UV-Vis, senyawa organik mengalami eksitasi dari $n-\pi^*$ atau $\pi-\pi^*$ karena teknik ini memerlukan gugus kromofor pada molekul. Sampel yang berupa larutan, gas, atau uap dapat dianalisis dengan spektrofotometer UV-Vis, namun sampel harus diubah menjadi larutan jernih terlebih dahulu. Untuk sampel larutan, pelarut yang digunakan harus memenuhi beberapa persyaratan, yaitu:

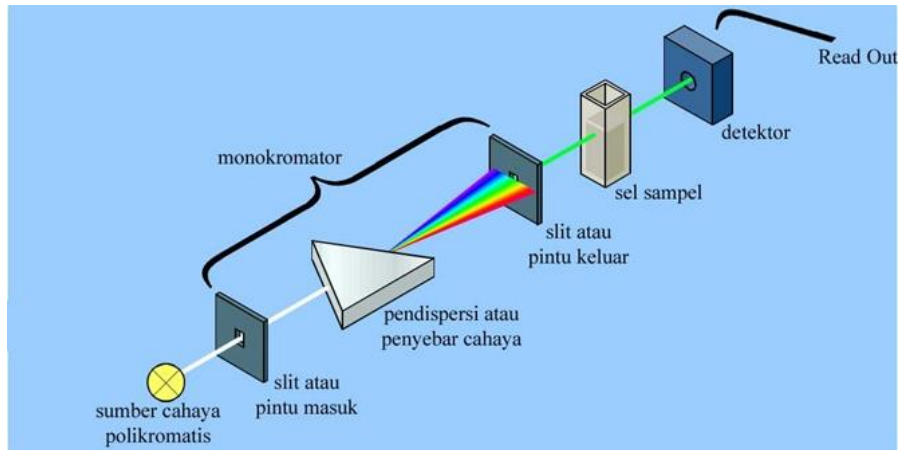
1. Pelarut tidak boleh mengandung ikatan rangkap terkonjugasi atau berwarna, sehingga tidak menyerap cahaya yang digunakan untuk sampel.
2. Pelarut harus dapat melarutkan sampel dengan sempurna.
3. Pelarut harus memiliki kemurnian tinggi.
4. Pelarut tidak boleh berinteraksi dengan molekul senyawa yang dianalisis (Suhartati, 2017).

Spektrofotometer UV-Vis adalah alat yang digunakan dalam analisis kimia untuk mendeteksi senyawa, baik cair maupun padat, berdasarkan absorbansi foton. Jika sampel menyerap foton dalam rentang panjang gelombang UV-Vis (200 – 700 nm), biasanya diperlukan proses derivatisasi, seperti penambahan reagen untuk membentuk garam kompleks. Senyawa kompleks ini kemudian perlu diidentifikasi

berdasarkan unsur-unsurnya. Untuk memastikan kualitas dan validitas hasil pengukuran, spektrofotometer harus mematuhi standar seperti ISO 17025, *Good Laboratory Practice* (GLP), atau rekomendasi dari Pharmacopeia (EP, DAB, USP) (Irawan, 2019). Secara umum, spektrofotometer UV-Vis terdiri dari:

- Sumber cahaya terdiri dari lampu Tungsten/Wolfarm untuk daerah tampak (400 – 800 nm) dan lampu Deuterium untuk daerah *ultraviolet* (200 – 400 nm), yang menyediakan cahaya polikromatis.
- Monokromator menggunakan lensa prisma dan filter optik untuk memilih panjang gelombang cahaya yang akan digunakan.
- Kuvet/sel sampel adalah wadah tempat sampel ditempatkan untuk analisis.
- Detektor menangkap cahaya yang telah melewati sampel.
- Read Out* adalah sistem yang mengubah sinyal listrik dari detektor menjadi angka transmitansi atau absorbansi, yang kemudian ditampilkan pada layar alat (Yanti dan Angraini, 2021).

Skema spektrofotometer UV-Vis dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Skema Spektrofotometer UV-Vis (Fitriyanti dkk., 2021)

Prinsip kerja spektrofotometer UV-Vis melibatkan interaksi antara cahaya monokromatis dari sumber cahaya dengan materi, seperti molekul. Energi cahaya yang diserap menyebabkan elektron berpindah dari keadaan dasar ke keadaan tereksitasi yang memiliki energi lebih tinggi. Spektrofotometer UV-Vis bekerja berdasarkan serapan cahaya, di mana atom dan molekul berinteraksi dengan cahaya. Alat ini dilengkapi dengan dua sumber cahaya berbeda, yaitu sinar UV dan sinar

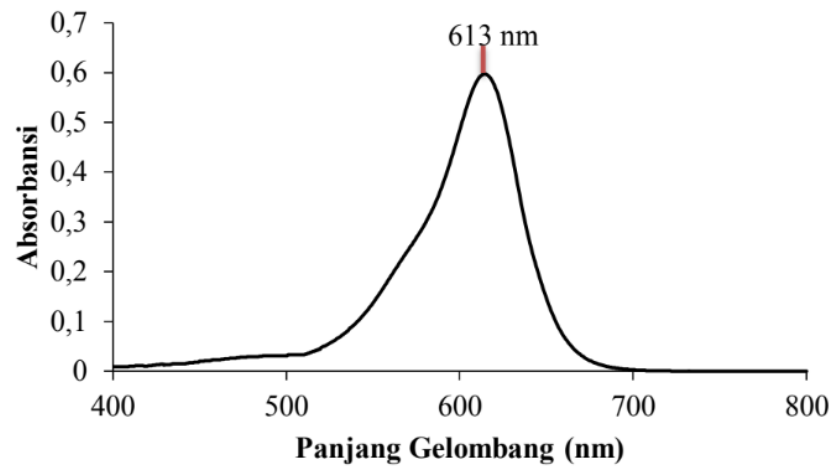
tampak. Prinsip kerja spektrofotometri UV-Vis mengikuti hukum *Lambert-Beer*. Ketika sinar monokromatik melewati sampel, sebagian sinar diserap, dipantulkan, dan sebagian lainnya dipancarkan. Cermin yang berputar di dalam spektrofotometer membagi cahaya dari sumber menjadi dua (Fitriyanti dkk., 2021).

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 (Harjadi, 1993).

Pengukuran panjang gelombang maksimum menggunakan spektrofotometer UV-Vis dilakukan dengan langkah-langkah berikut:

1. Disiapkan larutan yang akan dianalisis (pada penelitian ini menggunakan larutan *malachite green*) dan larutan blanko (akuades) sebagai kontrol .
2. Dinyalakan spektrofotometer UV-Vis, setelah itu dikalibrasi dengan larutan blanko untuk mengatur nol absorbansi.
3. Dilakukan pengukuran absorbansi pada rentang panjang gelombang yang diinginkan (karena *malachite green* merupakan larutan berwarna maka diukur pada panjang gelombang 400-800 nm).
4. Dicatat nilai absorbansi untuk setiap panjang gelombang.
5. Diplotkan grafik absorbansi terhadap panjang gelombang, dimana panjang gelombang maksimum ditentukan dari titik tertinggi pada grafik.

Awaliyah, (2019) telah melakukan penelitian studi transpor MG menggunakan metode PIM dengan *copoly-eugenol etilen glikol dimetakrilat* (Co-EEGDMA) 2% sebagai senyawa pembawa. Hasil penelitian tersebut diperoleh panjang gelombang maksimum MG sebesar 613 nm (Gambar 10).



Gambar 10. Panjang gelombang maksimum MG (Awaliyah, 2019)

Menurut penelitian Ling *and* Suah (2017), panjang gelombang maksimum yang digunakan untuk mengukur MG pada spektrofotometer UV-Vis yaitu sebesar 617 nm. Sedangkan pada penelitian Bhernama (2017), pengukuran serapan maksimum MG dilakukan dengan mengukur absorbansi MG pada rentang panjang gelombang 200-800 nm, dan didapatkan panjang gelombang maksimum sebesar 618,07 nm. Perbedaan hasil pengukuran ini dikarenakan jenis dan kondisi spektrofotometer UV-Vis yang digunakan berbeda.

2.7 Spektrofotometri *Fourier Transform Infra Red* (FTIR)

Spektrofotometri *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) adalah metode analisis yang didasarkan pada prinsip interaksi antara radiasi elektromagnetik dan senyawa kimia, yang menghasilkan getaran dari ikatan poliatomik atau gugus fungsi dalam senyawa tersebut. Alat spektrofotometer FTIR digunakan untuk menentukan spektrum vibrasi molekul dan struktur kimia suatu senyawa. Keunggulan spektrofotometri FTIR termasuk kecepatan analisis, sifat yang tidak merusak, dan proses preparasi sampel yang sederhana. Spektrofotometer FTIR bekerja berdasarkan interferensi radiasi antara dua berkas cahaya untuk menghasilkan interferogram, yaitu sinyal yang tergantung pada perubahan panjang jalan antara dua berkas cahaya. Dua domain (jarak dan frekuensi) dapat ditukar menggunakan transformasi *Fourier* (Sanjiwani dkk., 2020).

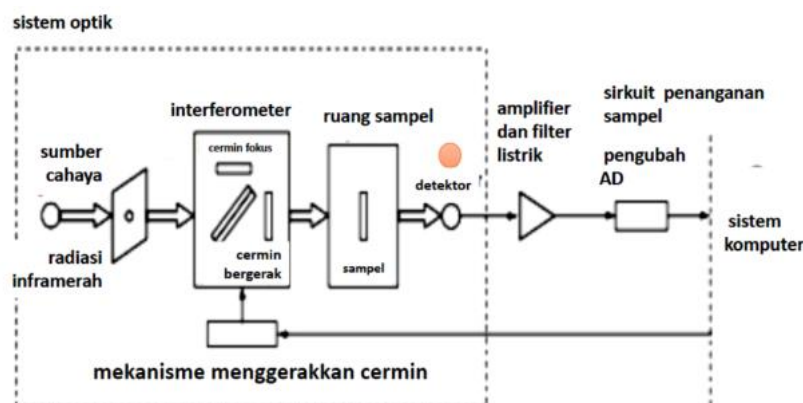
Spektrofotometri *Fourier Transform Infra Red* yaitu instrumen yang digunakan untuk menganalisis campuran dari sampel yang dianalisis tanpa merusak sampel, mengidentifikasi suatu senyawa dan mendeteksi gugus fungsi. Spektrofotometer FTIR umumnya digunakan untuk mengidentifikasi senyawa organik secara kualitatif maupun kuantitatif. Gelombang elektromagnetik di daerah inframerah (IR) memiliki panjang gelombang dari 14.000 cm^{-1} hingga 10 cm^{-1} , yang terbagi menjadi tiga daerah utama:

1. IR jauh ($400\text{-}10\text{ cm}^{-1}$): digunakan untuk menganalisis molekul yang mengandung atom berat, seperti senyawa anorganik.
2. IR sedang ($4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$): menyediakan informasi tentang gugus fungsi dalam molekul melalui transisi energi vibrasi.
3. IR dekat ($14.000\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$): Sensitif terhadap vibrasi *overtone*.

Gugus fungsi dalam suatu sampel dianalisis dengan membandingkan pita absorpsi yang terbentuk dengan spektrum senyawa pembanding yang sudah diketahui.

Biasanya, analisis dilakukan pada daerah IR sedang (Sari dkk., 2018).

Prinsip kerja spektrofotometri FTIR adalah interaksi antara materi dan energi. Sebagai pengganti monokromator berkas radiasi inframerah dari sumber radiasi diteruskan ke interferometer. Radiasi inframerah dari interferometer diteruskan ke sampel. Sebagian radiasi akan diabsorpsi oleh sampel, sedangkan yang diteruskan ke detektor adalah sebagian lainnya. Detektor mengubah sinyal listrik dari radiasi yang melewati sampel. Dari detektor sinyal listrik masuk ke *amplifier* dan filter listrik, kemudian diproses oleh *AD converter* menjadi angka. Lalu dipindahkan ke komputer untuk transformasi *fourier* (Setianingsih dan Prananto, 2020). Bagan alat spektrofotometer FTIR dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Bagan alat spektrofotometer FTIR (Setianingsih dan Prananto, 2020)

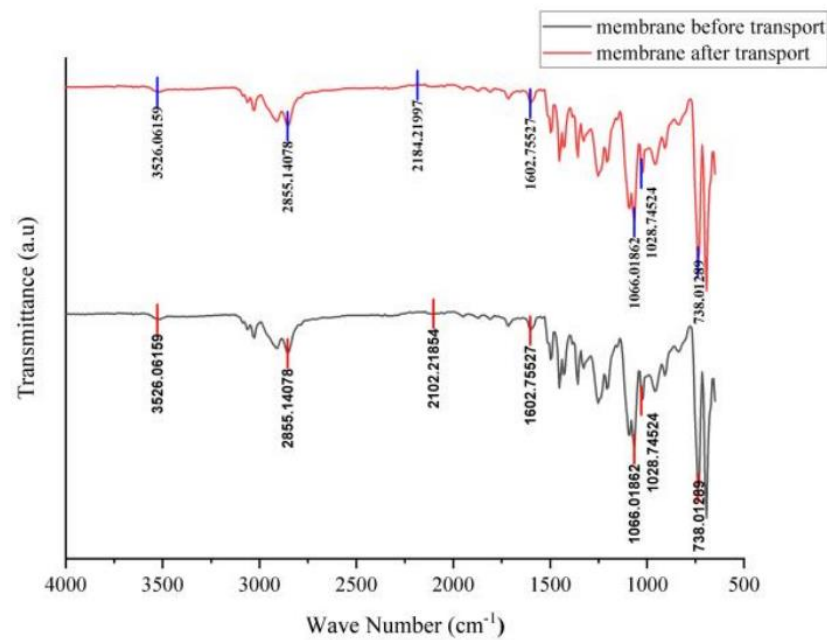
Pada proses taut silang diperoleh senyawa pembawa, lalu dilakukan karakterisasi FTIR dan setelah diketahui gugus fungsi senyawa pembawa melalui proses polimerisasi, sebagai tolak ukur keberhasilan sintesis pada suatu senyawa. Sebelum dan sesudah transpor pada membran PIM akan dilakukan karakterisasi FTIR, setelah itu hasil yang diperoleh dari karakterisasi akan menunjukkan spektrum serapan yang lebih spesifik untuk dilakukan identifikasi pada membran sebelum dan sesudah transpor untuk gugus fungsi yang terserap (Sunarsih, 2019). Pada tabel bilangan gelombang digunakan untuk menentukan jenis ikatan. Bilangan gelombang untuk berbagai jenis ikatan ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Bilangan Gelombang FTIR untuk berbagai jenis ikatan

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

(Dachriyanus, 2004).

Kiswandono *et al.* (2024), telah melakukan penelitian transpor MG menggunakan metode PIM dengan polieugenol sebagai senyawa pembawa. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa hasil FTIR dari membran PIM memiliki perbedaan pada hasil spektra sebelum dan setelah transpor (Gambar 12).



Gambar 12. Spektra FTIR pada membran PIM yang mengandung polieugenol sebelum dan setelah transpor (Kiswandono *et al.*, 2024)

Gambar 12 menunjukkan hasil perbandingan membran PIM sebelum dan setelah transpor, bahwa bilangan gelombang 3526 cm^{-1} , yaitu serapan gugus hidroksil (-OH) pada membran sebelum transpor mengalami pergeseran bilangan gelombang ke arah kanan yang menunjukkan adanya interaksi antar gugus pada MG dengan gugus -OH pada senyawa pembawa dalam membran selama waktu transpor. Selain itu, terdapat pergeseran gugus C-O sebelum dan sesudah transpor sehingga menghasilkan bilangan gelombang $1028,7\text{ cm}^{-1}$. Kemudian, juga terjadi pergeseran gugus $\text{C}\equiv\text{C}$ dimana sebelum transpor menghasilkan bilangan gelombang $2102,2\text{ cm}^{-1}$, dan setelah transpor menghasilkan bilangan gelombang 2184 cm^{-1} . Pergeseran bilangan gelombang pada gugus -OH dapat terjadi karena beberapa situs aktif pada membran yang mengandung polieugenol hilang selama proses transpor. Hilangnya komponen pada membran PIM setelah transpor juga dapat dilihat pada hasil karakterisasi menggunakan SEM.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini telah dilaksanakan pada bulan Desember 2024 sampai dengan April 2025 di Laboratorium Kimia Analitik dan Instrumentasi, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Karakterisasi senyawa pembawa poli-BADGE 2:1 dan membran PIM menggunakan instrumen *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) (JSM-6510LA JEOL) dilakukan di UPA Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (LTSIT) Universitas Lampung dan di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Serpong. Analisis menggunakan Spektrofotometer UV-Vis (Shimadzu UV-1780 *Double Beam*) dilakukan di Laboratorium Kimia Analitik dan Instrumentasi, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah neraca digital analitik (*Galaxy HR-150A* 152 gram x 0,1 mg), oven, botol gelap, pipet tetes, *magnetic stirrer*, gelas ukur, batang pengaduk, *magnetic bar*, spatula, tabung reaksi, chamber berdiameter 3,5 cm dengan kapasitas 50 mL, pH meter, cawan petri, gelas beaker, pinset, labu takar, *thickness gauge* (Mitutoyo 7301 *Dial Thickness Gauge* 0-10 mm), *Fourier Transform Infrared* (FTIR) (ASTM E1252-98R21), Spektrofotometer UV-Vis (Shimadzu UV-1780 *Double Beam*), *Scanning Electron Microscopy* (SEM) (JSM-6510LA JEOL), dan cetakan membran.

Bahan – bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah Polivinil klorida (PVC), *malachite green*, poli-BADGE 2:1, Dibenzil Eter (DBE), Tetrahidrofuran (THF), akuabides, asam nitrat (HNO_3), tisu, plastik *wrap*, aluminium foil, timbal(II) karbonat (PbCO_3), dan tembaga(II) sulfat pentahidrat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

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

a. Pembuatan Larutan Induk *Malachite Green*

Langkah awal dalam pembuatan larutan induk MG 1000 ppm dengan cara melarutkan 1 gram MG dalam 1000 mL akuabides.

b. Pembuatan Limbah Buatan

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

c. Pengukuran Konsentrasi *Malachite Green* dalam Fasa Sumber

Pengukuran konsentrasi 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 - 800 nm.

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

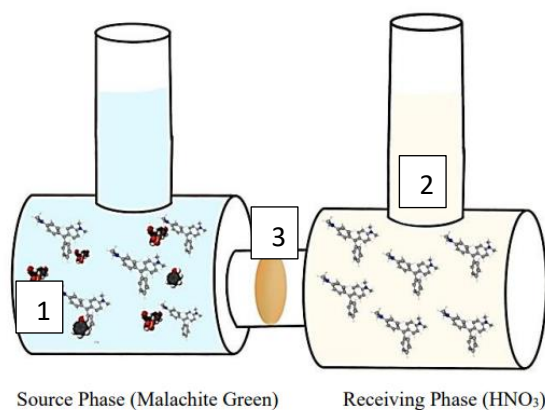
3.4 Pembuatan Membran *Polimer Inclusion Membrane* (PIM)

Membran PIM dibuat dengan mencampurkan poli-BADGE 2:1 sebagai senyawa pembawa, PVC sebagai polimer dasar, dan DBE sebagai *plasticizer* dengan rasio 10:32:58 (Nghiem *et al.*, 2006). Komposisi membran dapat dilihat pada Tabel 2. Tetrahidrofuran (THF) sebanyak 10 mL yang berfungsi sebagai pelarut ditambahkan ke dalam cetakan membran PIM. 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

Membran	Poli-BADGE 2:1 (g)	PVC (g)	DBE (g)	Total (g)
T ₂₇ (Tipis)	0,0270	0,0864	0,1556	0,2700
T ₅₄ (Normal)	0,0540	0,1728	0,3132	0,5400
T ₁₀₈ (Tebal)	0,1080	0,3456	0,6264	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 FTIR dan SEM. Ketebalan membran diukur menggunakan *thickness gauge*. Alat transpor yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Alat transpor terdiri dari 1) fasa sumber, 2) fasa penerima, dan 3) membran PIM

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 sehingga 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 untuk menentukan persen porositas membran seperti pada Persamaan 1 (Suryandari, 2020).

$$\text{Porositas} = \frac{W_1 - W_2}{\rho_w \cdot V_t} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Dengan : } V_t = \frac{W_1 - W_2}{\rho_w} + \frac{W_2}{\rho_p}$$

Keterangan :

W_1 : berat basah membran (g)

W_2 : berat kering membran (g)

ρ_w : densitas air (1 g/cm³)

ρ_p : densitas Poli-BADGE 2:1 (1,2 g/cm³)

V_1 : 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 kembali setelah perendaman. Hasil berat yang diperoleh digunakan untuk menentukan persen serapan air membran seperti pada Persamaan 2 (Lusiana dkk. 2020).

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

Keterangan :

W_w : berat basah membran (g)

W_d : berat kering membran (g)

3.6 Optimasi Transpor *Malachite Green*

3.6.1 Variasi pH *Malachite Green* 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 M sebagai fasa penerima dan 50 mL MG 25 ppm sebagai fase 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, 5 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 5 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 5 mL diambil dari fasa penerima dan fasa sumber. Analisis dilakukan dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

3.6.4 Variasi Konsentrasi Senyawa Pembawa

Membran PIM dengan komposisi optimum dicetak dan mengandung variasi massa senyawa pembawa. Membran PIM ditempatkan di tengah pipa transpor. 50 mL larutan HNO_3 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. 5 mL sampel dari fasa sumber dan penerima diambil, dianalisis dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

Tabel 3. Variasi konsentrasi senyawa pembawa

Membran	Konsentrasi (M)	Poli-BADGE 2:1 (g)	PVC (g)	DBE (g)	Total (g)
1	0,06	0,0067	0,1728	0,3132	0,5261
2	0,07	0,0134	0,1728	0,3132	0,5346
3	0,08	0,0201	0,1728	0,3132	0,5400
4	0,09	0,0267	0,1728	0,3132	0,5462
5	0,1	0,0334	0,1728	0,3132	0,5529

3.6.5 Variasi Waktu Transpor

Membran PIM dengan ketebalan optimum yang sudah dicetak dan mengandung senyawa pembawa ditempatkan di tengah-tengah pipa transpor. Kemudian, 50 mL larutan HNO_3 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. Ambil 5 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 *Malachite Green* pada Limbah Buatan

Untuk membuat sampel limbah buatan, ketiga larutan yaitu MG, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dan PbCO_3 dengan konsentrasi masing-masing 25 ppm dicampurkan menjadi satu. Setelah itu, dilakukan transpor dengan menggunakan membran PIM yang telah dicetak. Membran PIM dengan ketebalan optimum diletakkan di tengah pipa transpor, ditambahkan 50 mL limbah buatan sebagai fasa sumber dan 50 mL HNO_3 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. Kehadiran logam Cu(II) dan Pb(II) dilihat dari hasil karakterisasi dengan FTIR..

3.6.7 Analisis Parameter Transpor

Hasil dan data transpor yang diperoleh, lalu ditetapkan kinetika transpor yang terdiri dari orde reaksi, permeabilitas (P), fluks (J), koefisien rejeksi (R), persen *recovery* (%R), dan persen removal (%RE) pada transpor *malachite green*. Perhitungan seperti terlihat pada Persamaan 3, 4, 5, 6, dan 7 (Gherasim *et al.*, 2011).

$$\%Recovery = \frac{C_{penerima}}{C_0 \text{ sumber}} \times 100 \quad (3)$$

Keterangan:

$\%Recovery$ = % *Malachite green* pada fasa penerima
 $C_0 \text{ sumber}$ = Konsentrasi awal *malachite green* pada fasa sumber (ppm)
 $C_{penerima}$ = Konsentrasi *malachite green* pada fasa penerima (ppm)

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

Keterangan:

$\%Recovery$ = % *Malachite green* pada fasa penerima
 $C_0 \text{ sumber}$ = Konsentrasi awal *malachite green* pada fasa sumber (ppm)
 $C_1 \text{ sumber}$ = Konsentrasi *malachite green* 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)
 T = Waktu (jam)
 $[C]_t$ = Konsentrasi awal fasa sumber (ppm)
 $[C]_0$ = Konsentrasi *malachite green* yang ada pada fasa penerima (ppm)

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

Keterangan:

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

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

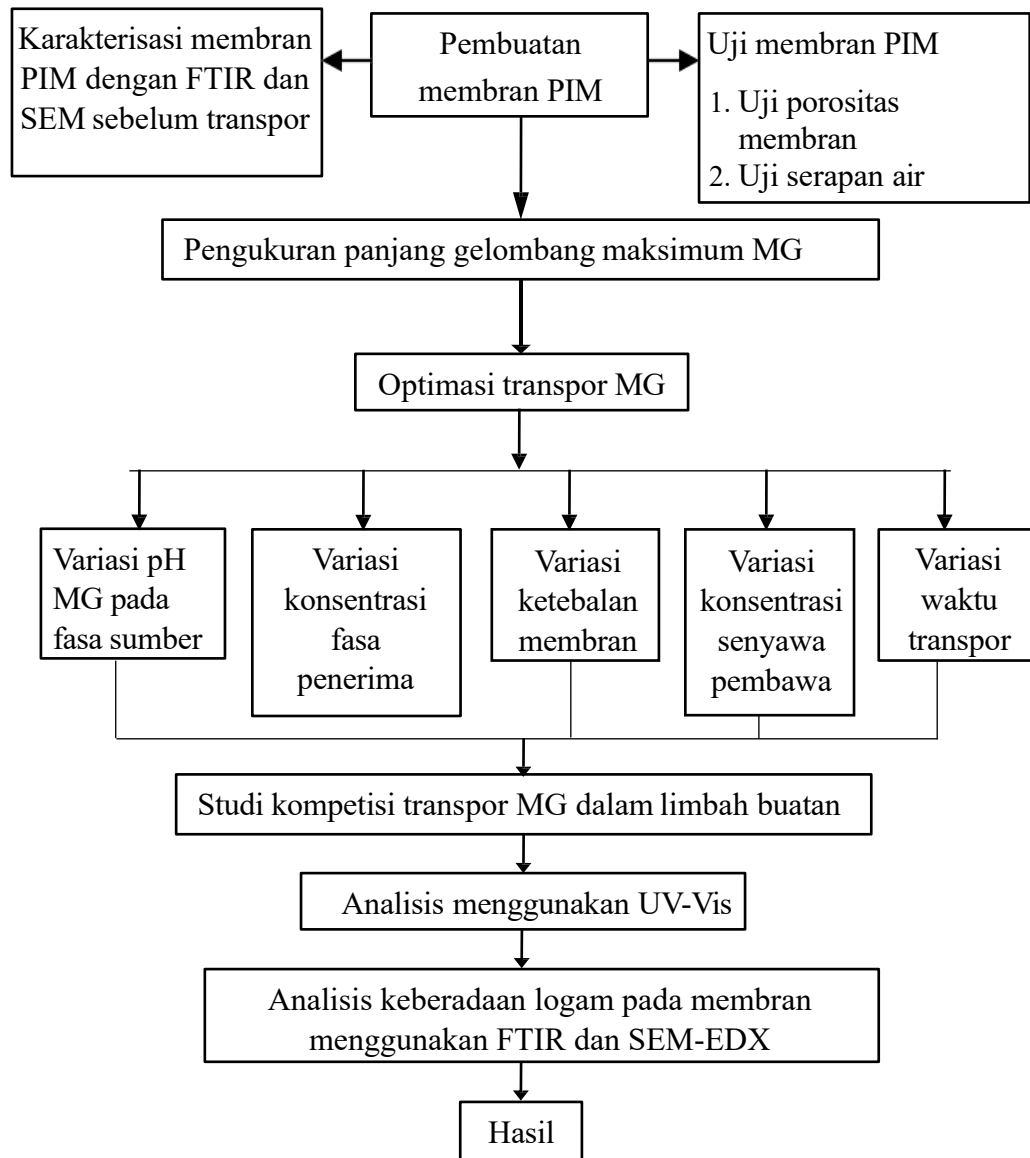
Keterangan:

R = Koefisien rejeksi (%)
 C_p = Konsentrasi *malachite green* 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 FTIR (*Fourier Transform Infra Red*) untuk gugus fungsi dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk melihat morfologi permukaan pada membran.

3.7 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Diagram alir penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Transpor MG mencapai keadaan optimum pada pH fasa sumber 7, konsentrasi HNO_3 pada fasa penerima sebesar 1,25 M, ketebalan membran PIM T₅₄ (Normal), dan konsentrasi senyawa pembawa 0,09 M selama waktu transpor 24 jam, serta jumlah MG yang tertranspor dengan %*removal* sebesar 90,90%.
2. Keberadaan logam Pb(II) dan Cu(II) sebagai kompetitor terhadap transpor MG dapat mempengaruhi proses pemisahan. Pada transpor tanpa logam dicapai %*removal* sebesar 91,32% lebih besar dibandingkan dengan jika terdapat logam Pb(II) dan Cu(II) maka %*removal* yang dihasilkan 85,67%.
3. Hasil karakterisasi membran PIM setelah transpor menggunakan SEM memiliki permukaan yang tidak rata dan terlihat adanya pori-pori yang mengindikasikan adanya komponen membran yang hilang selama proses transpor (*leaching*). Hal ini didukung dengan spektra FTIR yang menunjukkan adanya perbedaan serapan gugus fungsi.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian berikutnya adalah perlu adanya kajian dan penelitian lebih lanjut mengenai efisiensi transpor terhadap jenis zat warna lain selain MG, untuk mengetahui selektivitas membran terhadap berbagai polutan, dan melakukan

parameter variasi rasio komponen penyusun membran seperti PVC dan DBE untuk meningkatkan fluks dan stabilitas membran.

DAFTAR PUSTAKA

- Aini, H. N., Rumhayati, B., Fardiyah, Q., Wiryawan, A., Andayani, U., and Azzah, A. N. 2022. The Performance and Characterization of Polymeric Inclusion Membranes (PIMs) Containing 2-Nitro Phenyl Octyl Ether as Plasticizer on Phosphate Transport. *Jurnal Kimia Valensi*. 8(2):178-189.
- Apriyanti, E., Ummi, C., dan Sri, S. 2024. *Pengembangan Metode Filtrasi Menggunakan Membran Keramik Berbasis Fly Ash Batubara*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia. Jambi.
- Arahman, N. 2017. *Teknologi Membran*. Syiah Kuala University Press. Banda Aceh.
- Ariyanto, E. 2009. Adsorption Malachite Green on Natural Zeolite. *Jurnal Reaktor*. 12(3):161-165.
- Ashraf, W. M., 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(18):1-9.
- Awaliyah, A. B. 2019. *Studi Transpor Malachite Green Menggunakan Metode Polymer Inclusion Membrane (PIM) dengan Copoly-Eugenol Etilen Glikol Dimetakrilat (Co-EEGDMA) 2% sebagai Senyawa Pembawa*. Skripsi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung, Bandar Lampung. 1-68.
- Bajpai, A., Davidson, J. R., and Robert, C. 2021. Studies on The Modification of Commercial Bisphenol -A-Based Epoxy Resin Using Different Multifunctional Epoxy Systems. *Applied Water Science*. 8(17):1-6.
- Besaadi, S., Draï, N., Arous, O., Berbar, Y., Hammache, Z. E., Amara, M., and Bruggen, B. 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(531653):1-7.
- Bhernama, B. G. 2017. Degradasi Zat Warna *Malachite Green* secara Ozonolisis dengan Penambahan Katalis TiO₂ Anatase dan ZnO. *Elkawnie*. 3(1): 1-10.

- Chadi, A., Ayo, O., Nurul, Y., Wan, S., and Faiz, B. 2021. Comparative Removal of Malachite Green Dye From Aqueous Solution Using Deep Eutectic Solvents Modified Magnetic Chitosan Nanoparticles and Modified Protonated Chitosan Beads. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 1-11.
- Chikaatesa, T. 2019. *Pengaruh Jenis dan Konsentrasi Pembawa Ion dalam Polymer Inclusion Membrane (PIM) Terhadap Transpor Cr(VI)*. Skripsi. Universitas Brawijaya. Malang.
- Chen, L., Zhang, Y., and Wang, X. 2020. Water Absorption Behavior and Hydrophilicity Evaluation of Polymeric Membranes For Separation Applications. *Journal of Membrane Science*. 598: 117682.
- Dachriyanus. 2004. *Analisis Struktur Senyawa Organik Secara Spektroskopi*. Universitas Andalas. Sumatera Barat.
- Effendi, M. C. 2021. *Monograf Nanopartikel Zinc Oxide Propolis Sebagai Liner Untuk Proteksi Pulpa Gigi Terhadap Bakteri Streptococcus Mutans*. UMM Press. Malang.
- Fan, J., Fan, Y., Pei, Y., Wu, K., Wang, J., and Fan, M. 2008. Solvent Extraction of Selected Endocrine-Disrupting Phenols Using Ionic Liquids. 61: 324–331.
- Fitriyanti, A. dan Zelviani. 2021. Analisis Nilai Absorbansi Untuk Menentukan Kadar Flavonoid Daun Jarak Merah (*Jatropha gossypifolia L.*) Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis. *Jurnal Fisika dan Terapannya*. 8(2): 56-64.
- Gardner, J. S., Peterson, Q. P., Walker, J. O., Jensen, B. D., Adhikary, B., Harrison, R. G., and Lamb, J. D. 2006. Anion Transport Through Polymer Inclusion Membranes Facilitated by Transition Metal Containing Carriers. *J. Membr. Sci.* 277: 165 – 167.
- Ghaderi, N., Dolatyari, L., Kazemi, D., Sharafi, H. R., Shayanijam, H., and Yafthian, M. Z. 2021. Application of A Polymer Inclusion Membrane Made of Cellulose Triacetate Base Polymer and Trioctylamine For the Selective Extraction of Bismuth(III) From Chloride Solutions. *Journal of Applied Polymer Science*. 1-13.
- 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.
- Gherasim, C. M. and Mikhelashvili, T. 2014. Polymer Inclusion Membranes: Preparation, Characterization and Application in Separation Processes. *Desalination and Water Treatment*. 52(25): 4897–4904.
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Joy, D. C., Lyman, C. E., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., and Michael, J. R. 2017. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis* (4th ed.). Springer.

- Harimu, L., Matsjeh, S., Siswanta, D., and Santosa, J. 2009. Synthesis of Polyeugenyl Oxyacetic Acid as A Carrier to Separate Heavy Metal Ion Fe(III), Cr(III), Cu(II), Ni(II), Co(II), and Pb(II) That using Solvent Extraction Method. *Indo. J. Chem.* 9(2): 261–266.
- Harjadi, W. 1993. *Ilmu Kimia Analitik Dasar*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- Hikmah, S. T., Rahim, E. A., dan Musafira. 2018. Sintesis dan Karakteristik Polieugenol dari Eugenol Menggunakan Katalis $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{CH}_3\text{COOH}$. *Jurnal Riset Kimia*. 4(2): 285-296.
- Hoque, B., Bobrowska D. M., and Poltorak, L. 2024. Advantage of 3D Printed Casting Mold Induced Microstructure on The Extraction and Transport of Cd(II) Through Polymer Inclusion Membranes. *Separation and Purification Technology*. 328: 124998.
- Hussein, A. S. and Atiyah, A. J. 2024. Removal of Malachite Green Dye by Adsorption over the Synthesized Composites of Iron Oxide and Nickel Oxide Nanoparticles. 14(1): 295-310.
- Irawan, A. 2019. Kalibrasi Spektrofotometer sebagai Penjaminan Mutu Hasil Pengukuran dalam Kegiatan Penelitian dan Pengujian. *Indonesian Journal of Laboratory*. 1(2): 1-9.
- Khairati, R. M., Kiswandono, A. A., Rinawati, and Maruf, 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.
- Khairil, D. F. dan Etika, S. B. 2022. Optimasi pH dan Konsentrasi Penyerapan Malachite Green Menggunakan C-Sinamalkaliks[4]Resorsinarena Sebagai Adsorben. *Chemistry Journal*. 11(2): 56–60.
- 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, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta. 1–305.
- Kiswandono, A. A. dan Maslahat, M. 2011. Studi Transpor Fenol dengan Menggunakan Membran Cair Polieugenol dengan Pelarut Diklorometana. *Jurnal Sains Natural*. 2: 145-155.
- Kiswandono, A. A., Rahmawati, A., Rafi, F. M., Dewi, N. P., Ferdias, P., Putra, H. E and Rinawati. 2024. The Effect of Comparative Concentrations of Polybadge As A Carrier on the Polymer Inclusion Membrane Method of Phenol Transport. *Rasayan Journal of Chemistry*. 17(01):221-229.
- 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): 2013382.

- Kiswandono, A. A., Mudasir, Siswanta, D., Aprilita, N. H., Santosa, S. J., and Hadi, S. L. 2020. Synthesis of a New Crosslinked Poly-Bisphenol A Diglycidyl Ether (Poly-BADGE) as a Carrier in Phenol Transport. *Kuwait J. Sci.* 47(4): 39-48.
- Kislik, V. S., 2010. *Liquid Membranes: Principles and Applications in Chemical Separations and Wastewater Treatment*. Elsevier. Israel.
- Konczyk, J. and Ciesielski, W. 2021. Calixresorcin[4]arene-Mediated Transport of Pb(II) Ions Through Polymer Inclusion Membrane. *Membranes*. 11(285): 1-19.
- La Harimu, Matsjeh, S., Siswanta, D., dan Santosa, S. J. 2009. Sintesis Polieugenol Oksiasetat sebagai Pengemban untuk Pemisahan Ion Logam Berat Fe(III), Cr(III), Cu(II), Ni(II), Co(II), dan Pb(II) Menggunakan Metode Ekstraksi Pelarut. *Indo. J. Chem.* 9(2): 261-266.
- Leach, J. B., Wolinsky, J. B., Stone P. J., and Wong, J. Y. 2005. Crosslinked α -elastin Biomaterials: Towards A Processable Elastin Mimetic Scaffold. *Acta Biomaterials*. 1: 155-164.
- Ling, Y. Y. and Suah, F. B. M. 2017. Extraction of Malachite Green from Wastewater by Using Polymer Inclusion Membrane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 5(1): 785-794.
- Lusiana, R. A., Saputry, A. P., dan Prasetya, N. B. A. 2020. Pengaruh Penambahan Aditif terhadap Karakterisasi Fisikokimia Membran Polisulfon. *Indonesia Journal of Chemical Science*. 9(3): 195-200.
- Masta, N. 2020. *Buku Materi Pembelajaran Scanning Electron Microscopy*. Universitas Kristen Indonesia. Jakarta.
- Mozhdehvari, H., Tabatabatei, S., M., and Tajkhalili, A. 2009. *Catalytic Ozonation of Phenol Occurring in Power Plants Oily*. Waste Water 24th International Power System Conference. Teheran.
- Muller. 2001. *Fundamental of Quantum Chemistry*. Kluwer Academic/Plenum Publisher. New York.
- Muralidhara, Z. F. C. 2010. *Membrane Technology: A Practical Guide to Membrane Technology and Applications in Food and Bioprocessing*. Elsevier. London.
- Nejad, S. M., Ozgunes, H., and Basaran, N. 2017. Pharmacological and Toxicological Properties of Eugenol. *Turk J Pharm Sci*. 14(2): 201-206.
- Newbury, D. E. and Ritchie, N. W. M. 2013. Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-Ray Spectrometry (SEM/EDS) Quantitative *Scanning*. 35(3): 141–168.
- 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): Review. *J. Membr. Sci.* 281: 7 – 41.

- Nirwana, W. O. C., Sarosa, A. H., dan Hapsari, S. 2023. *Teknologi Produksi Vanilin Alami, Sintetik, Bio-vanilin*. UB Press. Malang.
- Noga, E. J. 2010. *Fish Disease Diagnosis and Treatment*. Wiley Blackwell. Singapura.
- Nurcholis, M., Subagja, R., dan Nurhasanah, S. 2021. Pengaruh Komposisi Plasticizer Terhadap Karakteristik dan Kinerja Membran Polimer Inklusi (PIM) dalam Pemisahan Logam Berat. *Jurnal Riset Kimia*. 13(1): 56-63.
- Oberta, A., Wasilewski, J., and Wódzki, R. 2011. Structure and Transport Properties of Polymer Inclusion Membranes for Pb(II) Separation. *Desalination*. 271: 132–138.
- Pretorius, E. 2010. Influence of Acceleration Voltage on Scanning Electron Microscopy of Human Blood Platelets. *Microscopy Research and Technique*, 73(3): 225–228.
- Purwayantie, S., Saputri, N. E., dan Priyono, S. 2022. *Metode Pemisahan Senyawa Fenolat Dengan Filtrasi Membran*. NEM. Pekalongan.
- Putri, A. A. 2019. Studi Transpor Malachite Green Menggunakan Metode Polymer Inclusion Membrane (PIM) Dengan Poly-Bisphenol A Diglycidyl Ether (Poly-Badge) 1:1 sebagai Senyawa Pembawa. *Skripsi*. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung, Bandar Lampung. 1-107.
- Putri, W., dan Fibrianto, K. 2018. *Rempah Untuk Pangan dan Kesehatan*. UB Press.
- Rakhila, A., Bennajeh, M., Bouabidi, A., and Morsli, A. 2021. Selective Removal of Dyes From Aqueous Solutions Using Polymer Inclusion Membranes Containing Aliquat 336. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9(2): 105078.
- Reed, S. J. B. 2005. *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. Cambridge University Press.
- 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, Ekstraktan D2EHPA, dan Plasticizer Asam Oleat pada Kondisi Asam. *Jurnal Beta Kimia*. 4(1): 1-3.
- Safitri, N. U. 2019. Studi Transpor Malachite Green Menggunakan Metode Polymer Inclusion Membrane (PIM) Dengan Copoly-Eugenol Divinil Benzena (Co-EDVB) 2% sebagai Senyawa Pembawa. *Skripsi*. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung, Bandar Lampung. 1-103
- Sanjiwani, N. M. S., Paramitha, D. A. I., Wibawa, A. A. C., Ariawan, I. M. D., Megawati, F., Dewi, N. W. T., Mariati, N. P. A. M., dan Sudiarsa, I. W. 2020. Pembuatan Hair Tonic Berbahan Dasar Lidah Buaya dan Analisis dengan Fourier Transform Infrared. *Widyadari*. 21(1): 249-262.

- Sari, N. W., Fajri, M. Y., dan Anjas, W. 2018. Analisis Fitokimia dan Gugus Fungsi Dari Ekstrak Etanol Pisang Goroho Merah (*Musa Acuminata (L)*). *IJOB*. 2(1): 30-34.
- Sembiring, T., Dayana, I., dan Rianna, M. 2019. *Alat Penguji Material*. Guepedia. Bogor.
- Setiabudi, A., Hardian, R., dan Mudzakir, A. 2012. *Karakterisasi Material Prinsip dan Aplikasinya Dalam Penelitian Kimia*. UPI Press. Bandung.
- Setianingsih, T. dan Prananto, Y. P. 2020. *Spektroskopi Inframerah Untuk Karakterisasi Material Anorganik*. UB Press. Malang.
- Soo, C. Y., Lim, W. Y., and Tan, K. H. 2021. Spectrophotometric Analysis of Malachite Green Dye In Aqueous Solution Using UV–Vis Spectroscopy. *Journal of Environmental Chemical Analysis*. 45(3): 210–216.
- Suhartati, T. 2017. *Dasar – Dasar Spektrofotometri UV-Vis dan Spektrofotometri Massa Untuk Penentuan Struktur Senyawa Organik*. Aura. Bandar Lampung.
- Sunarsih, F. 2019. Sintesis Copoli Eugenol Etilen Glikol Dimetakrilat (Co-EGDMA) sebagai Senyawa Pembawa Menggunakan Metode Polymer Inclusion Membrane (PIM). *Skripsi*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Suryandari, E. T. 2020. Sintesis Membran Komposit PVDF-Zeolit untuk Penghilangan Metilen Biru. *Al-kimiya*. 6(2):58-66.
- Wang, D., Zhao, H., Fei, X., Synder, S. A., Fang, M., and Liu, M. 2021. A Comprehensive Review on The Analytical Method, Occurrence, Transformation And Toxicity of A Reactive Pollutant: Badge. *Environment International*. 155:1-15.
- Widodo, D. S., Nuryanto, R., Asy'ari, M., Ismiyarto dan Sriatun. 2010. *Eksplorasi dan Inovasi Sumber Daya Lokal Untuk Penguatan Daya Saing Bangsa dalam Bidang Sains, Pendidikan, Teknologi dan Industri Kimia*. Universitas Diponegoro Semarang. Semarang.
- Williams, D. B., and Carter, C. B. 2009. *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*. Springer.
- Yanti dan Angraini. 2021. Penggunaan Spektrofotometer UV-Vis Untuk Analisis Nutrien Fosfat Pada Sedimen dalam Rangka Pengembangan Modul Praktikum Oseanografi Kimia. *Jurnal Penelitian Sains*. 23(2): 79-80.
- Yuliwati, E. 2020. *Membran untuk Reklamasi Air Limbah*. CV Andi Offset. Yogyakarta.
- 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.