

TESIS

**BIO-MEMBRAN BERBASIS SERAT BAMBU SEBAGAI
ADSORBEN ALAMI UNTUK MENURUNKAN LOGAM
BERAT KADMIUM (Cd^{2+}) PADA LINDI TEMPAT
PEMROSESAN AKHIR (TPA)**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Magister (S2) Teknik Lingkungan**



**IKHWANUL HABIB AL HABSY
23927009**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2026**

TESIS

**BIO-MEMBRAN BERBASIS SERAT BAMBU SEBAGAI
ADSORBEN ALAMI UNTUK MENURUNKAN LOGAM
BERAT KADMIUM (Cd^{2+}) PADA LINDI TEMPAT
PEMROSESAN AKHIR (TPA)**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Magister (S2) Teknik Lingkungan**



**IKHWANUL HABIB AL HABSY
23927009**

Disetujui,
Dosen Pembimbing:

Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., I.P.U.

NIK. 025100406

Tanggal: 23 Juni 2026

Mengetahui
Ketua Prodi Magister Teknik Lingkungan FTSP UII

Dr. Ir. Andik Yulianto, S.T., M.T., I.P.M.

NIK. 025100407

Tanggal: 25/6/2026

HALAMAN PENGESAHAN

BIO-MEMBRAN BERBASIS SERAT BAMBU SEBAGAI ADSORBEN ALAMI UNTUK MENURUNKAN LOGAM BERAT KADMIUM (Cd^{2+}) PADA LINDI TEMPAT PEMROSESAN AKHIR (TPA)

Telah diterima dan disahkan oleh Tim Penguji

Hari : Jum'at
Tanggal : 19 Juni 2026

Disusun Oleh:

IKHWANUL HABIB AL HABSY
23927009

Tim Penguji :

Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., I.P.U.

() 23/6 2026

Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.

() 23/06 26

Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.

() 23/06 '26

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini adalah merupakan gagasan, rumusan dan penelitian penulis sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan Dosen Pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini penulis buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka penulis bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.



Yogyakarta, 12 Juni 2026.
Yang membuat pernyataan,

Ikhtwanul Habib Al Habsy

Ikhtwanul Habib Al Habsy
NIM. 23927009

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis selalu diberikan kesehatan serta dapat menyelesaikan penelitian ini. Sholawat dan salam tercurahkan kepada Rasulullah SAW beserta keluarga dan sahabat- sahabatnya.

Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Dua Teknik pada Program Studi Magister Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Penelitian ini berjudul .”Bio-Membran Berbasis Serat Bambu Sebagai Adsorben Alami Untuk Menurunkan Logam Berat Kadmium Cd^{2+} pada Lindi Tempat Pemrosesan Akhir (TPA)”.

Dalam penelitian ini, penulis banyak sekali menemukan hambatan dan rintangan yang dihadapi, namun pada akhirnya, penulis dapat melaluinya berkat adanya bimbingan, bantuan, serta dukungan dari banyak pihak baik secara moral maupun spiritual. Untuk itu pada kesempatan ini peneliti menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Hari Purnomo, M.T., IPU., ASEAN Eng. selaku Rektor Universitas Islam Indonesia.
2. Bapak Prof. Dr.-Eng. Ar. Ilya Fadjar Maharika, MA., IAI. selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Dr.Eng. Ir. Awaluddin Nurmiyanto, S.T., M.Eng., I.P.M. selaku Ketua Jurusan Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Dr. Andik Yulianto, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia.
5. Bapak Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., IPU. selaku Dosen Pembimbing Tesis yang telah memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis.
6. Keluarga penulis yang selalu mendo’akan, memberikan dukungan, dan semangat.

7. Pihak-pihak yang telah membantu dalam penyusunan tesis ini yang tidak dapat disebut satu persatu.

Penulis menyadari bahwa penyusunan tesis ini masih jauh dari sempurna dan masih terdapat berbagai kekurangan, baik dari segi penulisan maupun isi. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan di masa yang akan datang. Semoga segala bantuan dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan pahala dari Allah SWT, Aamiin.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Yogyakarta, 12 Juni 2026

Penulis



Ikhsanul Habib Al Habsy

ABSTRAK

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh tingginya potensi pencemaran logam berat kadmium (Cd^{2+}) pada air lindi TPA Piyungan yang berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan. Penelitian bertujuan untuk menganalisis kemampuan bio-membran berbasis serat bambu teraktivasi asam sitrat sebagai adsorben alami dalam menurunkan kadar Cd^{2+} serta menentukan kondisi optimum adsorpsi. Penelitian dilakukan secara eksperimental melalui preparasi bio-membran yang diaktivasi menggunakan asam sitrat, kemudian dikarakterisasi menggunakan FTIR dan SEM. Pengujian adsorpsi dilakukan dengan metode batch melalui variasi massa adsorben, pH, waktu kontak, dan konsentrasi awal Cd^{2+} . Sampel air lindi didestruksi menggunakan HNO_3 selama 3 jam sebelum dianalisis menggunakan AAS, sedangkan mekanisme adsorpsi dianalisis menggunakan model isoterm Langmuir dan Freundlich. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bio-membran mengandung gugus fungsi hidroksil ($-\text{OH}$) dan karboksil ($-\text{COOH}$) yang berperan dalam pengikatan Cd^{2+} . Kondisi optimum diperoleh pada massa adsorben 75 mg, pH 6, waktu kontak 90 menit, dan konsentrasi awal 50 ppm dengan efisiensi penyisihan sebesar 76,97% dan kapasitas adsorpsi 25,57 mg/g. Efisiensi tertinggi pada variasi pH mencapai 88,54%. Analisis isoterm menunjukkan proses adsorpsi mengikuti model Langmuir dengan nilai R^2 sebesar 0,9692 dan q_{max} sebesar 26,32 mg/g, yang mengindikasikan adsorpsi monolayer pada permukaan homogen. Penerapan pada air lindi nyata menunjukkan penurunan konsentrasi Cd^{2+} dari 2,927 ppm menjadi 0,525 ppm dengan efisiensi sebesar 82%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa bio-membran serat bambu teraktivasi asam sitrat berpotensi sebagai adsorben alternatif yang ramah lingkungan, ekonomis, *biodegradable*, dan efektif untuk pengolahan air lindi terkontaminasi Cd^{2+} .

Kata kunci: Adsorpsi, Air Lindi, Asam Sitrat, Bio-Membran, Kadmium, Serat Bambu.

ABSTRACT

This study was motivated by the high potential for cadmium (Cd^{2+}) heavy metal contamination in leachate from the Piyungan Landfill, which poses significant risks to the environment and human health. The study aimed to analyze the capability of citric acid-activated bamboo fiber bio-membranes as natural adsorbents for reducing Cd^{2+} concentrations and to determine the optimum adsorption conditions. The research was conducted experimentally through the preparation of bio-membranes activated using citric acid, followed by characterization using FTIR and SEM analyses. Adsorption experiments were performed using the batch method with variations in adsorbent mass, solution pH, contact time, and initial Cd^{2+} concentration. Leachate samples were digested using HNO_3 for 3 hours prior to analysis by Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS), while the adsorption mechanism was evaluated using Langmuir and Freundlich isotherm models. The results showed that the bio-membrane contained hydroxyl ($-\text{OH}$) and carboxyl ($-\text{COOH}$) functional groups that played important roles in Cd^{2+} binding. The optimum conditions were obtained at an adsorbent mass of 75 mg, pH 6, contact time of 90 minutes, and an initial concentration of 50 ppm, resulting in a removal efficiency of 76.97% and an adsorption capacity of 25.57 mg/g. The highest removal efficiency in the pH variation reached 88.54%. Isotherm analysis indicated that the adsorption process followed the Langmuir model with an R^2 value of 0.9692 and a q_{max} value of 26.32 mg/g, suggesting monolayer adsorption on a homogeneous surface. Application to real leachate samples demonstrated a decrease in Cd^{2+} concentration from 2.927 ppm to 0.525 ppm with a removal efficiency of 82%. This study concludes that citric acid-activated bamboo fiber bio-membranes have strong potential as environmentally friendly, economical, biodegradable, and effective alternative adsorbents for the treatment of Cd^{2+} -contaminated leachate.

Keywords: Adsorption, Bamboo Fiber, Bio-Membrane, Cadmium, Citric Acid, Leachate.

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Manfaat Penelitian.....	4
1.5. Kerangka Berpikir Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1. Air Lindi (<i>Leachate</i>).....	8
2.1.1. Definisi Air Lindi	8
2.1.2. Karakteristik Air Lindi	8
2.1.3. Sumber Air Lindi	9
2.1.4. Dampak Air Lindi Terhadap Lingkungan	10
2.1.5. Faktor yang Mempengaruhi Kualitas Air Lindi	11
2.1.6. Tantangan Pengolahan Air Lindi	11
2.2. Logam Berat Kadmium (Cd^{2+}).....	11
2.2.1. Pengertian dan Sifat Karakteristik.....	11
2.2.2. Sumber Pencemaran Kadmium	12
2.2.3. Dampak Terhadap Kesehatan dan Lingkungan.....	12
2.2.4. Buku Mutu Kadmium (Cd^{2+})	13
2.2.5. Perilaku Kadmium Dalam Lingkungan Perairan	13
2.2.6. Tantangan Pengolahan kadmium dalam Air Lindi	14
2.3. Metode Pengolahan Logam Berat dalam Air Lindi	14

2.3.1. Metode Fisika dan Kimia	15
2.3.2. Metode Biologis	15
2.3.3. Metode Adsorpsi	16
2.3.4. Perbandingan Metode Pengolahan	16
2.3.5. Pemilihan Metode Efektif	18
2.4. Adsorpsi	18
2.4.1. Pengertian Adsorpsi.....	18
2.4.2. Jenis Adsorpsi (Fisika dan Kimia)	18
2.4.3. Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi	19
2.4.4. Model/Isoterm Adsorpsi.....	19
2.4.5. Mekanisme Adsorpsi Logam Berat	20
2.4.6. Aplikasi Adsorpsi dalam Penelitian	20
2.5. <i>Bio-Membrane</i>	21
2.5.1. Pengertian Bio-Membrane	21
2.5.2. Prinsip Kerja Bio-Membrane	21
2.5.3. Keunggulan dan Kelemahan	22
2.5.4. Aplikasi dalam Pengolahan Limbah	23
2.6. Serat Bambu	23
2.6.1. Pengertian dan Struktur Serat Bambu	23
2.6.2. Kandungan Kimia	24
2.6.3. Potensi sebagai Adsorben.....	25
2.7. Selulosa	26
2.7.1. Pengertian Selulosa	26
2.7.2. Struktur dan Gugus Fungsi.....	26
2.7.3. Peran Selulosa dalam Adsorpsi Logam Berat	27
2.8. Aktivasi Adsorben	28
2.8.1. Pengertian Aktivasi	28
2.8.2. Metode Aktivasi	28
2.8.3. Pengaruh Aktivasi terhadap Adsorpsi	29
2.9. Asam Sitrat (C ₆ H ₈ O ₇).....	29
2.9.1. Sifat dan Karakteristik.....	29

2.9.2. Peran sebagai Aktivator Adsorben	30
2.9.3. Mekanisme Interaksi dengan Biomassa	30
2.10. Karakteristik Adsorben.....	31
2.10.1. <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR)	31
2.10.2. <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	32
2.10.3. <i>Atomic Absorption Spectrophotometer</i> (AAS).....	33
2.11. Penelitian Terdahulu	34
2.11.1. Analisis Penelitian Terdahulu	36
2.11.2. <i>Research Gap</i> (Kebaruan Penelitian)	37
2.11.3. Posisi Penelitian	37
BAB III METODE PENELITIAN.....	38
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	38
3.2. Alat dan Bahan	38
3.2.1. Alat.....	38
3.2.2. Bahan.....	39
3.3. Variabel Penelitian	39
3.3.1. Variabel Bebas.....	39
3.3.2. Variabel Terikat	39
3.3.3. Variabel Kontrol	39
3.4. Prosedur Penelitian.....	40
3.4.1. Preparasi Adsorben.....	40
3.4.2. Pembuatan Larutan Kadmium.....	43
3.4.3. Proses Adsorpsi Metode Batch.....	44
3.4.4. Analisis Konsentrasi Kadmium (AAS)	45
3.4.5. Karakteristik Adsorben (FTIR dan SEM)	45
3.5. Metode Analisis Data	46
3.5.1. Kapasitas Adsorpsi (q_e)	46
3.5.2. Efisiensi Penurunan Konsentrasi.....	47
3.5.3. Analisis Isoterm Adsorpsi	47
3.5.4. Analisis Statistik dan Evaluasi Data.....	48
3.5.5. Pengolahan Data Menggunakan Software	48

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	50
4.1. Gambaran Umum Hasil Penelitian.....	50
4.2. Hasil Preparasi Adsorben	51
4.3. Karakteristik Adsorben.....	54
4.3.1. Karakteristik Kimia	54
4.3.2. Karakteristik Morfologi.....	57
4.4. Kinerja Adsorpsi Adsorben	63
4.4.1. Massa Adsorben	64
4.4.2. <i>Potential of Hydrogen</i> (pH).....	68
4.4.3. Waktu Kontak.....	72
4.4.4. Konsentrasi.....	76
4.5. Isoterm.....	80
4.5.1. Langmuir	80
4.5.2. Freundlich.....	82
4.5.3. Perbandingan Kedua Isoterm	85
4.5.4. Isoterm terbaik.....	85
4.6. Mekanisme Adsorpsi Adsorben.....	87
4.7. Aplikasi Bio-Membran Pada Air Lindi	89
4.7.1. Karakteristik Awal Air Lindi	89
4.7.2. Hasil Pengujian Adsorpsi Pada Air Lindi.....	92
4.7.3. Perbandingan Dengan Larutan Sintetis	93
4.7.4. Evaluasi Kinerja Bio-Membran	95
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	97
5.1. Kesimpulan.....	97
5.2. Saran.....	98
DAFTAR PUSTAKA	100
LAMPIRAN.....	107

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Karakteristik Air Lindi Berdasarkan Umur <i>Landfill</i>	9
Tabel 2. 2. Perbandingan Metode Pengolahan	16
Tabel 2. 3. Penelitian Terdahulu	34
Tabel 4. 1. Interpretasi FTIR Adsorben Sebelum dan Sesudah Aktivasi	55
Tabel 4. 2. Perbandingan Komposisi Unsur Adsorben Berdasarkan EDX	62
Tabel 4. 3. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Massa	65
Tabel 4. 4. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi pH.....	69
Tabel 4. 5. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Waktu Kontak.....	74
Tabel 4. 6. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Konsentrasi	77
Tabel 4. 7. Data Isoterm Langmuir Bio-Membran.....	80
Tabel 4. 8. Data Isoterm Freundlich Bio-Membran	83
Tabel 4. 9. Perbandingan Kedua Isoterm	85
Tabel 4. 10. Karakteristik Awal Air Lindi Piyungan (<i>Inlate</i> IPAL).....	90
Tabel 4. 11. Data Hasil Pengujian Adsorpsi Air Lindi	92
Tabel 4. 12. Perbandingan Hasil Adsorpsi Larutan Sintetis dan Air Lindi	94

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1. Kerangka Berfikir Penelitian.....	7
Gambar 2. 1. Serat Bambu	23
Gambar 2. 2. Kandungan Kimia Serat Bambu.....	25
Gambar 2. 3. Struktur dan Gugus Fungsi Selulosa	27
Gambar 2. 4. <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR)	32
Gambar 2. 5. <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	33
Gambar 2. 6. <i>Atomic Absorption Spectrophotometer</i> (AAS).....	34
Gambar 3. 1. Diagram Alir Preparasi Adsorben	40
Gambar 4. 1. Bentuk Visual Serat bambu	51
Gambar 4. 2. Pencetakan Lembaran Bio-Membran.....	52
Gambar 4. 3. Proses Aktivasi Bio-Membran	52
Gambar 4. 4. Proses Pemanasan Lembaran Bio-Membran.....	53
Gambar 4. 5. Bentuk Visual Lembaran Bio-Membran	53
Gambar 4. 6. Grafik FTIR Adsorben Sebelum dan Sesudah Aktivasi	54
Gambar 4. 7. Visual Permukaan Adsorben Pembesaran 3000x	58
Gambar 4. 8. Grafik EDX Adsorben.....	60
Gambar 4. 9. Grafik Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Massa.....	67
Gambar 4. 10. Grafik Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi pH	71
Gambar 4. 11. Grafik Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Waktu Kontak	75
Gambar 4. 12. Grafik Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Konsentrasi	78
Gambar 4. 13. Grafik Data Isoterm Langmuir Bio-Membran	81
Gambar 4. 14. Grafik Data Isoterm Freundlich Bio-Membran.....	84
Gambar 4. 15. Proses Sampling Air Lindi Piyungan (<i>Inlate</i> IPAL).....	90

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Peningkatan jumlah penduduk, urbanisasi yang cepat, serta perubahan pola konsumsi masyarakat telah menyebabkan peningkatan signifikan dalam volume dan kompleksitas sampah yang dihasilkan setiap tahunnya. Kondisi ini menjadikan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) masih sebagai komponen utama dalam sistem pengelolaan sampah di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia. Meskipun TPA berperan penting dalam menampung residu sampah yang tidak dapat dimanfaatkan kembali, keberadaannya juga menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan yang serius. Salah satu dampak lingkungan paling signifikan dari operasional TPA adalah terbentuknya limbah cair air lindi (*leachate*), yaitu cairan hasil perkolasi air hujan melalui timbunan sampah yang bercampur dengan produk dekomposisi bahan organik dan anorganik. Air lindi umumnya memiliki karakteristik kompleks dengan kandungan bahan organik berkonsentrasi tinggi, nutrisi, senyawa toksik, serta logam berat yang berpotensi mencemari tanah, air permukaan, dan air tanah apabila tidak dikelola secara memadai [1]. Ketidakefektifan sistem pengelolaan lindi di banyak TPA berpotensi menimbulkan pencemaran kronis terhadap air tanah dan badan air di sekitarnya, yang dalam jangka panjang sulit untuk dipulihkan [2].

Dalam konteks Indonesia, permasalahan ini semakin nyata pada beberapa TPA aktif, salah satunya TPA Piyungan di Daerah Istimewa Yogyakarta. Air lindi di lokasi tersebut dilaporkan memiliki kandungan pencemar yang tinggi, seperti nilai COD, BOD, serta logam berat yang berpotensi melampaui baku mutu lingkungan apabila tidak diolah secara optimal [3]. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengolahan air lindi di lapangan masih menghadapi tantangan serius, baik dari segi teknologi maupun operasional.

Karakteristik air lindi yang kompleks tidak hanya didominasi oleh senyawa organik, tetapi juga mengandung logam berat yang bersifat

persisten, salah satunya adalah kadmium (Cd^{2+}). Kadmium merupakan logam berat non-esensial yang memiliki toksisitas tinggi bahkan pada konsentrasi rendah, serta tidak dapat terdegradasi secara alami di lingkungan [4]. Sifat bioakumulatif kadmium menyebabkan logam ini dapat terakumulasi dalam jaringan organisme hidup dan mengalami biomagnifikasi dalam rantai makanan. Dampak toksik yang ditimbulkan tidak hanya terbatas pada kerusakan ginjal, tetapi juga mencakup gangguan sistem saraf, kerusakan tulang, hingga efek karsinogenik [5]. Hal ini menegaskan bahwa keberadaan kadmium dalam air lindi merupakan ancaman serius yang memerlukan penanganan khusus.

Upaya pengolahan air lindi yang mengandung logam berat hingga saat ini masih menghadapi berbagai keterbatasan. Metode konvensional seperti presipitasi kimia, koagulasi-flokulasi, dan filtrasi seringkali tidak mampu menghilangkan logam berat secara efektif pada konsentrasi rendah, serta menghasilkan limbah sekunder berupa lumpur berbahaya yang memerlukan pengolahan lanjutan [6]. Di sisi lain, metode biologi yang umum digunakan dalam pengolahan air limbah tidak efektif untuk logam berat karena sifatnya yang non-biodegradable. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan antara kebutuhan teknologi pengolahan yang efektif dengan metode yang tersedia saat ini.

Dalam konteks tersebut, metode adsorpsi muncul sebagai alternatif yang menjanjikan karena memiliki efisiensi tinggi, proses yang relatif sederhana, serta mampu menghilangkan logam berat hingga konsentrasi rendah [7]. Namun demikian, penggunaan adsorben komersial seperti karbon aktif masih terkendala oleh biaya produksi yang tinggi, sehingga kurang aplikatif untuk skala besar. Oleh karena itu, pengembangan adsorben berbasis biomaterial menjadi fokus penelitian yang relevan dan strategis.

Serat bambu merupakan salah satu biomaterial yang memiliki potensi besar sebagai adsorben alami. Ketersediaannya yang melimpah di Indonesia, sifatnya yang terbarukan, serta kandungan lignoselulosa yang tinggi menjadikan bambu sebagai kandidat yang ideal untuk dikembangkan [8].

Gugus fungsi seperti hidroksil dan karboksil dalam struktur selulosa dan lignin berperan dalam proses pengikatan ion logam. Namun demikian, penggunaan langsung serat bambu masih memiliki keterbatasan dalam kapasitas adsorpsi dan stabilitas material.

Pendekatan yang lebih inovatif adalah melalui pengembangan bio-membran berbasis serat bambu, yang mengombinasikan mekanisme filtrasi dan adsorpsi dalam satu sistem [9]. Selain itu, aktivasi kimia menggunakan asam sitrat dapat meningkatkan jumlah gugus fungsi aktif sehingga memperkuat interaksi dengan ion logam berat [10]. Meskipun demikian, penelitian terkait aplikasi bio-membran berbasis serat bambu untuk pengolahan air lindi, khususnya dalam penyisihan kadmium, masih sangat terbatas.

Meskipun berbagai teknologi pengolahan air lindi telah dikembangkan, hingga saat ini belum terdapat pendekatan yang mampu secara simultan memenuhi aspek efisiensi penyisihan logam berat, biaya operasional rendah, serta keberlanjutan material, khususnya dalam konteks pengolahan air lindi di Indonesia. Hal ini menjadi semakin krusial mengingat beberapa studi melaporkan bahwa konsentrasi kadmium (Cd) dalam air lindi TPA dapat berada pada kisaran 0,01–1,0 mg/L, yang dalam beberapa kondisi dapat melampaui baku mutu lingkungan [2], [11]. Sebagai perbandingan, batas maksimum kadmium dalam air minum yang direkomendasikan oleh WHO (*World Health Organization*) adalah sebesar 0,003 mg/L [4]. Ketimpangan ini menunjukkan adanya risiko pencemaran yang signifikan apabila tidak dilakukan pengolahan yang efektif.

Kesenjangan penelitian (*research gap*) yang dapat diidentifikasi adalah belum adanya kajian yang komprehensif mengenai kinerja bio-membran serat bambu dalam sistem nyata air lindi, khususnya terkait karakteristik material, efisiensi adsorpsi terhadap Cd^{2+} , serta pengaruh parameter operasional seperti pH, waktu kontak, dan konsentrasi awal. Selain itu, integrasi antara konsep bio-membran dan biosorben alami dalam satu sistem pengolahan masih belum banyak dieksplorasi secara mendalam.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada pengembangan bio-membran berbasis serat bambu sebagai adsorben alami untuk menurunkan kadar logam berat kadmium (Cd^{2+}) pada air lindi TPA. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi pengolahan limbah yang lebih berkelanjutan, ekonomis, dan aplikatif, khususnya dalam konteks pengelolaan lingkungan di Indonesia.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana karakteristik bio-membran berbasis serat bambu sebagai adsorben dalam penjerapan Cd^{2+} ?
2. Bagaimana pengaruh variasi kondisi operasi terhadap proses adsorpsi Cd^{2+} pada air lindi?
3. Seberapa besar efisiensi bio-membran serat bambu dalam menurunkan kadar Cd^{2+} pada air lindi?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis karakteristik bio-membran berbasis serat bambu sebagai adsorben.
2. Menentukan pengaruh variasi kondisi operasi terhadap proses adsorpsi Cd^{2+} .
3. Menghitung efisiensi penurunan konsentrasi kadmium pada air lindi.

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini antara lain:

1. Manfaat Ilmiah

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknik lingkungan terkait pengolahan limbah cair menggunakan metode adsorpsi berbasis biomaterial. Selain itu, penelitian ini memperkaya kajian mengenai pemanfaatan serat bambu sebagai bio-membran dalam penyisihan logam berat, serta memberikan pemahaman yang lebih

mendalam mengenai mekanisme adsorpsi, karakteristik material, dan pengaruh parameter operasional terhadap kinerja adsorben. Hasil penelitian ini juga dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya dalam pengembangan material adsorben berbasis sumber daya alam yang berkelanjutan.

2. Manfaat Praktis

Secara praktis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan alternatif teknologi pengolahan air lindi yang lebih sederhana, ekonomis, dan mudah diaplikasikan, terutama pada TPA dengan keterbatasan teknologi dan biaya operasional. Pemanfaatan serat bambu sebagai bahan baku utama juga memberikan nilai tambah karena ketersediaannya yang melimpah dan biaya yang relatif rendah. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dalam pengembangan skala pilot maupun implementasi di lapangan untuk meningkatkan efektivitas pengolahan air lindi, khususnya dalam menurunkan kandungan logam berat kadmium (Cd^{2+}).

3. Manfaat Lingkungan

Dari aspek lingkungan, penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam mengurangi tingkat pencemaran akibat air lindi yang mengandung logam berat, sehingga dapat menurunkan risiko kontaminasi terhadap tanah, air permukaan, dan air tanah. Penggunaan biomaterial yang ramah lingkungan sebagai adsorben juga mendukung konsep teknologi berkelanjutan (*sustainable technology*) dan pengelolaan limbah berbasis sumber daya lokal. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mendukung upaya perlindungan lingkungan serta peningkatan kualitas ekosistem di sekitar TPA.

4. Manfaat Kebijakan (*Policy Impact*)

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam aspek kebijakan, khususnya dalam mendukung pengembangan sistem pengelolaan air lindi yang lebih efektif dan berkelanjutan di Indonesia. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar ilmiah bagi pemerintah dan

pemangku kepentingan dalam merumuskan kebijakan terkait pengolahan limbah cair di TPA, terutama dalam penerapan teknologi berbasis biomaterial yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis.

Selain itu, penelitian ini dapat mendukung implementasi kebijakan pengelolaan sampah terpadu dengan mendorong pemanfaatan sumber daya lokal, seperti serat bambu, sebagai bahan baku teknologi pengolahan limbah. Hal ini sejalan dengan prinsip circular economy dan pembangunan berkelanjutan, di mana limbah dan sumber daya alam dimanfaatkan secara optimal untuk mengurangi dampak lingkungan.

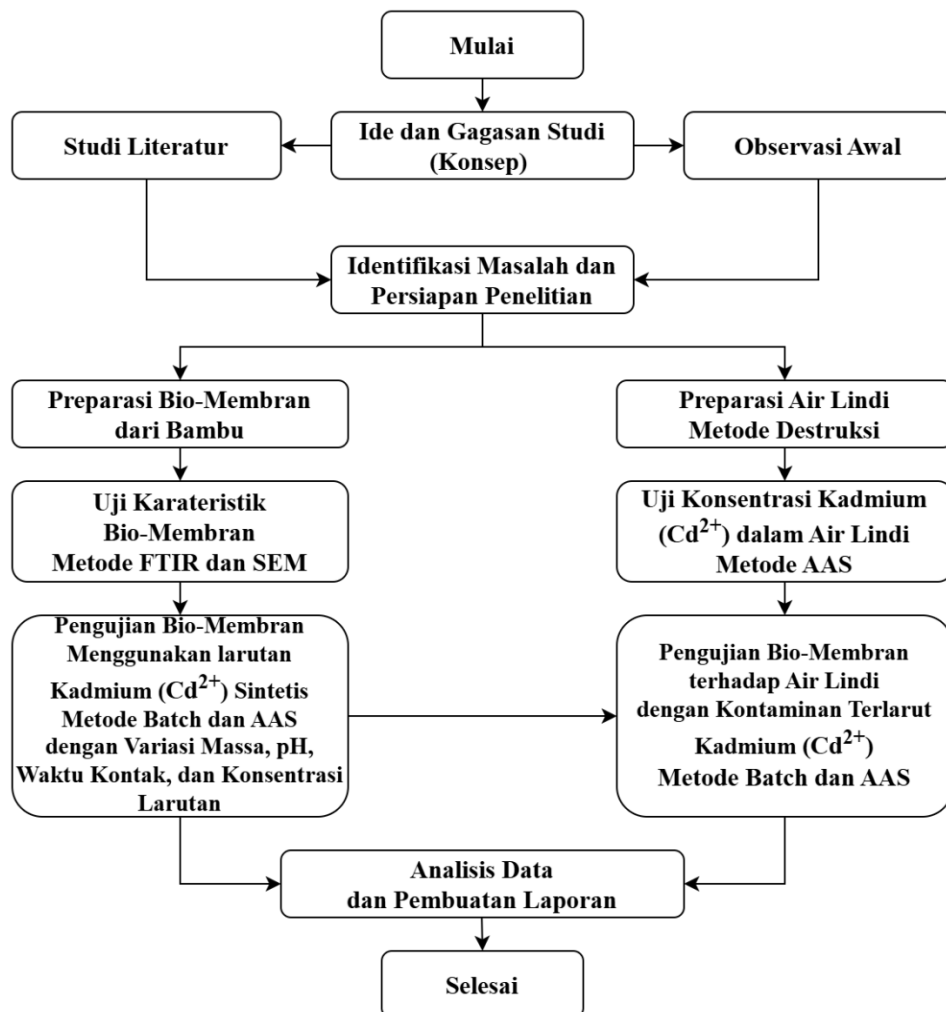
Lebih lanjut, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam penyusunan standar teknis atau pedoman operasional pengolahan air lindi, khususnya dalam upaya peningkatan efisiensi penyisihan logam berat seperti kadmium. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi pada aspek teknis, tetapi juga berpotensi mendorong penguatan kebijakan lingkungan yang berbasis bukti (*evidence-based policy*) di tingkat lokal maupun nasional.

1.5. Kerangka Berpikir Penelitian

Kerangka berfikir menunjukkan alur penelitian yang dimulai dari tahap awal berupa studi literatur, ide dan gagasan studi (konsep), serta observasi awal sebagai dasar perumusan penelitian. Tahapan ini dilanjutkan dengan identifikasi masalah dan persiapan penelitian untuk memastikan fokus kajian yang jelas. Selanjutnya, proses penelitian terbagi menjadi dua jalur utama, yaitu preparasi bio-membran dari bambu yang diikuti uji karakteristik menggunakan metode FTIR dan SEM, serta preparasi air lindi melalui metode destruksi yang kemudian dianalisis kandungan kadmium (Cd^{2+}) menggunakan metode AAS.

Pada tahap berikutnya, dilakukan pengujian bio-membran baik menggunakan larutan kadmium sintesis maupun langsung pada air lindi yang terkontaminasi, dengan metode batch dan analisis AAS, disertai variasi parameter seperti massa adsorben, pH, waktu kontak, dan konsentrasi larutan. Seluruh hasil pengujian kemudian dianalisis secara komprehensif untuk

memperoleh kesimpulan yang mendukung tujuan penelitian, yang akhirnya dirangkum dalam tahap analisis data dan pembuatan laporan hingga penelitian dinyatakan selesai. Untuk mempermudah pemahaman terhadap kerangka berpikir penelitian, maka disajikan dalam bentuk diagram alir sebagai berikut.



Gambar 1. 1. Kerangka Berfikir Penelitian

Sumber: Ilustrasi Peneliti, 2026.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Air Lindi (*Leachate*)

2.1.1. Definisi Air Lindi

Air lindi (leachate) merupakan cairan yang terbentuk akibat proses infiltrasi air (terutama air hujan) ke dalam timbunan sampah di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), yang kemudian melarutkan serta membawa berbagai senyawa hasil dekomposisi bahan organik dan anorganik. Proses ini melibatkan interaksi kompleks antara air, mikroorganisme, serta material limbah sehingga menghasilkan cairan dengan karakteristik yang sangat bervariasi dan kompleks [12].

Secara umum, air lindi mengandung bahan organik terlarut, senyawa nitrogen (seperti amonia), logam berat, serta senyawa xenobiotik yang bersifat toksik dan sulit terdegradasi. Kandungan tersebut menjadikan air lindi sebagai salah satu limbah cair dengan tingkat pencemaran tinggi yang memerlukan pengolahan khusus sebelum dilepas ke lingkungan [13]. Selain itu, air lindi juga dapat didefinisikan sebagai indikator kondisi biokimia di dalam landfill, karena komposisinya mencerminkan tahapan degradasi sampah yang sedang berlangsung [14].

2.1.2. Karakteristik Air Lindi

Karakteristik air lindi sangat dipengaruhi oleh umur *landfill*, jenis sampah, kondisi iklim, serta sistem pengelolaan TPA. Secara umum, parameter utama yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik air lindi meliputi:

1. Parameter Fisika

- Warna: coklat tua hingga hitam
- Bau: menyengat akibat senyawa organik volatil
- Kekeruhan tinggi

2. Parameter Kimia

- COD: 2.000 – 60.000 mg/L
- BOD: 1.000 – 30.000 mg/L

- pH: 4,5 – 8,5
- Amonia (NH₃-N): tinggi
- Logam berat: Cd, Pb, Hg, Cr

3. Parameter Biologi

- Kandungan mikroorganisme tinggi
- Aktivitas biodegradasi berlangsung intensif

Berdasarkan umur landfill, air lindi diklasifikasikan menjadi:

1. Lindi muda (*young leachate*)

Memiliki rasio BOD/COD tinggi ($>0,5$), menunjukkan senyawa organik mudah terurai.

2. Lindi tua (*stabilized leachate*)

Memiliki rasio BOD/COD rendah ($<0,1$), didominasi senyawa humik yang sulit terdegradasi [15].

Karakteristik ini sangat penting dalam menentukan metode pengolahan yang tepat. Berikut disajikan tabel karakteristik air lindi berdasarkan umur landfill, sebagai berikut.

Tabel 2. 1. Karakteristik Air Lindi Berdasarkan Umur *Landfill*

Parameter	Lindi Muda (<5 Tahun)	Lindi Menengah (5 – 10 tahun)	Lindi Tua (>10 Tahun)
pH	4,5 – 6,5	6,5 – 7,5	7,5 – 8,5
COD (mg/L)	10.000 – 60.000	3.000 – 10.000	< 3.000
BOD (mg/L)	5.000 – 30.000	1.000 – 5.000	< 1.000
BOD/COD	0,5 – 0,7	0,3 – 0,5	< 0,1
NH ₃ -N (mg/L)	500 – 1.500	800 – 2.000	1.000 – 3.000
Logam berat	Rendah–sedang	Sedang	Tinggi
Biodegradabilitas	Tinggi	Sedang	Rendah

Sumber: Modifikasi dari Berbagai Literatur [12], [13], [15].

2.1.3. Sumber Air Lindi

Air lindi terbentuk dari berbagai sumber yang saling berinteraksi dalam sistem landfill, yaitu:

1. Air Hujan (Infiltrasi)

Air hujan merupakan sumber utama pembentukan lindi. Semakin tinggi curah hujan, semakin besar volume lindi yang dihasilkan [16].

2. Kelembaban Alami Sampah

Sampah organik mengandung kadar air yang tinggi, terutama limbah makanan, yang berkontribusi terhadap pembentukan lindi.

3. Proses Dekomposisi Biologis

Aktivitas mikroorganisme dalam menguraikan bahan organik menghasilkan cairan tambahan serta senyawa terlarut.

4. Air Permukaan dan Runoff

Air dari luar area landfill yang masuk akibat sistem drainase yang kurang baik juga dapat meningkatkan volume lindi.

5. Resirkulasi Lindi

Pada beberapa TPA modern, lindi disirkulasikan kembali untuk mempercepat degradasi sampah, namun hal ini juga meningkatkan konsentrasi polutan [17].

2.1.4. Dampak Air Lindi Terhadap Lingkungan

Air lindi yang tidak dikelola dengan baik dapat menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap lingkungan, antara lain:

1. Pencemaran Air Tanah

Lindi dapat meresap ke dalam tanah dan mencemari akuifer, terutama jika sistem liner TPA tidak memadai [18].

2. Pencemaran Air Permukaan

Aliran lindi ke sungai atau badan air dapat menurunkan kualitas air, meningkatkan COD, serta menyebabkan eutrofikasi.

3. Akumulasi Logam Berat

Logam berat seperti kadmium bersifat bioakumulatif dan dapat masuk ke rantai makanan, membahayakan organisme hidup [18].

4. Dampak terhadap Kesehatan Manusia

Paparan jangka panjang terhadap air tercemar lindi dapat menyebabkan gangguan kesehatan seperti kerusakan organ, gangguan saraf, hingga kanker.

5. Gangguan Ekosistem

Kandungan toksik dalam lindi dapat mengganggu keseimbangan ekosistem, terutama organisme akuatik yang sensitif terhadap perubahan kualitas air [19].

2.1.5. Faktor yang Mempengaruhi Kualitas Air Lindi

Beberapa faktor utama yang mempengaruhi kualitas air lindi meliputi:

1. Umur landfill
2. Komposisi sampah
3. Kondisi iklim (curah hujan, suhu)
4. Sistem pengelolaan TPA
5. Kedalaman timbunan sampah

Faktor-faktor ini menyebabkan variasi karakteristik lindi yang sangat tinggi antar lokasi, sehingga diperlukan pendekatan pengolahan yang spesifik [20].

2.1.6. Tantangan Pengolahan Air Lindi

Pengolahan air lindi menghadapi berbagai tantangan, antara lain:

1. Komposisi yang kompleks dan berubah-ubah
2. Kandungan logam berat yang persisten
3. Senyawa organik yang sulit terdegradasi
4. Biaya operasional yang tinggi

Oleh karena itu, diperlukan teknologi alternatif seperti adsorpsi berbasis biomaterial yang lebih ekonomis dan berkelanjutan [16].

2.2. Logam Berat Kadmium (Cd^{2+})

2.2.1. Pengertian dan Sifat Karakteristik

Kadmium (Cd) merupakan logam berat non-esensial yang memiliki tingkat toksisitas tinggi terhadap organisme hidup, bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah. Kadmium memiliki nomor atom 48 dan termasuk dalam golongan logam transisi yang umumnya ditemukan dalam bentuk ion divalen (Cd^{2+}) di lingkungan perairan [21].

Dalam sistem lingkungan, kadmium bersifat persisten dan tidak dapat terdegradasi secara biologis, sehingga cenderung terakumulasi dalam lingkungan. Mobilitas kadmium dalam perairan dipengaruhi oleh kondisi kimia seperti pH, suhu, serta keberadaan ion lain. Pada kondisi asam,

kelarutan kadmium meningkat sehingga lebih mudah mencemari air tanah dan badan air permukaan [22], [23].

Selain itu, kadmium memiliki kemampuan untuk berikatan dengan bahan organik dan partikel tersuspensi, yang menyebabkan distribusinya di lingkungan menjadi kompleks. Hal ini juga mempengaruhi efektivitas metode pengolahan yang digunakan [24].

Logam berat dalam limbah cair termasuk kadmium dapat berada dalam berbagai bentuk spesiasi kimia yang mempengaruhi tingkat toksisitas dan mekanisme penjerapannya oleh adsorben [25].

2.2.2. Sumber Pencemaran Kadmium

Kadmium di lingkungan berasal dari berbagai aktivitas antropogenik maupun alami. Sumber utama pencemaran kadmium meliputi:

1. **Limbah Industri**

Industri elektroplating, baterai (Ni-Cd), pigmen, dan plastik merupakan penyumbang utama kadmium ke lingkungan [26].

2. **Air Lindi TPA**

Sampah elektronik, baterai bekas, dan limbah rumah tangga menjadi sumber utama kadmium dalam air lindi [27].

3. **Kegiatan Pertambangan dan Metalurgi**

Kadmium sering dihasilkan sebagai produk samping dalam proses ekstraksi logam seperti seng dan timbal [28].

4. **Penggunaan Pupuk dan Pestisida**

Pupuk fosfat diketahui mengandung kadmium sebagai pengotor yang dapat terakumulasi di tanah dan terbawa ke perairan [29].

Menurut Siswoyo, peningkatan jumlah limbah domestik dan elektronik tanpa pengelolaan yang baik menyebabkan meningkatnya kandungan logam berat dalam air lindi di Indonesia [30].

2.2.3. Dampak Terhadap Kesehatan dan Lingkungan

1. **Dampak terhadap Kesehatan Manusia**

Kadmium bersifat bioakumulatif dan dapat terakumulasi dalam tubuh manusia melalui konsumsi air atau makanan yang terkontaminasi.

Paparan jangka panjang terhadap kadmium dapat menyebabkan kerusakan ginjal, gangguan tulang, serta meningkatkan risiko kanker [26], [31]. Kasus keracunan kronis kadmium yang terkenal adalah penyakit itai-itai di Jepang, yang menunjukkan dampak serius dari kontaminasi logam berat dalam lingkungan [31].

2. Dampak terhadap Lingkungan

Dalam lingkungan perairan, kadmium dapat mengganggu pertumbuhan organisme akuatik, menurunkan keanekaragaman hayati, serta terakumulasi dalam sedimen. Selain itu, kadmium dapat masuk ke rantai makanan dan mengalami biomagnifikasi [27]. Menurut Siswoyo, keberadaan logam berat dalam air limbah seperti lindi dapat memberikan dampak jangka panjang terhadap ekosistem, terutama melalui proses akumulasi dalam organisme hidup [25].

2.2.4. Buku Mutu Kadmium (Cd^{2+})

Baku mutu kadmium ditetapkan untuk melindungi kesehatan manusia dan lingkungan dari dampak toksik.

1. WHO menetapkan batas maksimum kadmium dalam air minum sebesar 0,003 mg/L [31]
2. USEPA juga mengatur batas konsentrasi kadmium dalam air permukaan dan limbah industri.

Dalam konteks Indonesia, baku mutu air limbah diatur melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Namun, beberapa penelitian menunjukkan bahwa kandungan kadmium dalam air lindi masih dapat melebihi baku mutu yang ditetapkan [27]. Menurut Siswoyo, kondisi ini menunjukkan perlunya teknologi pengolahan yang efektif, khususnya berbasis adsorpsi yang mampu menghilangkan logam berat hingga konsentrasi rendah [32].

2.2.5. Perilaku Kadmium Dalam Lingkungan Perairan

Kadmium dalam perairan mengalami berbagai proses fisikokimia seperti adsorpsi, presipitasi, dan kompleksasi dengan bahan organik. Pada kondisi pH rendah, kadmium cenderung berada dalam bentuk terlarut

sehingga lebih mudah berpindah dan mencemari lingkungan. Sebaliknya, pada pH tinggi, kadmium dapat mengendap sebagai senyawa karbonat atau hidroksida [24]. Perilaku ini menjadi dasar penting dalam proses pengolahan air limbah menggunakan metode adsorpsi, karena efisiensi penjerapan sangat dipengaruhi oleh kondisi pH larutan.

2.2.6. Tantangan Pengolahan kadmium dalam Air Lindi

Pengolahan kadmium dalam air lindi menghadapi berbagai tantangan, antara lain:

1. Konsentrasi rendah namun sangat toksik
2. Tidak dapat terdegradasi secara biologis
3. Berinteraksi dengan senyawa kompleks dalam lindi
4. Membutuhkan teknologi dengan efisiensi tinggi

Metode konvensional seperti presipitasi kimia seringkali tidak efektif pada konsentrasi rendah dan menghasilkan limbah sekunder. Oleh karena itu, metode adsorpsi menggunakan biomaterial menjadi alternatif yang menjanjikan [23]. Menurut Siswoyo, penggunaan adsorben berbasis biomaterial lokal seperti serat alami memiliki potensi besar dalam pengolahan logam berat karena bersifat ekonomis, ramah lingkungan, dan efektif [32]

2.3. Metode Pengolahan Logam Berat dalam Air Lindi

Pengolahan air lindi yang mengandung logam berat seperti kadmium (Cd^{2+}) memerlukan teknologi yang efektif karena karakteristiknya yang kompleks, mengandung senyawa organik tinggi, serta logam berat yang bersifat toksik dan persisten. Berbagai metode telah dikembangkan untuk menghilangkan logam berat dari air limbah, baik secara fisika, kimia, maupun biologis [11].

Secara umum, metode pengolahan logam berat dapat diklasifikasikan menjadi metode konvensional dan metode alternatif. Pemilihan metode sangat bergantung pada konsentrasi logam, karakteristik air lindi, serta efisiensi dan biaya operasional [33].

2.3.1. Metode Fisika dan Kimia

1. Presipitasi Kimia

Presipitasi kimia merupakan metode yang paling umum digunakan untuk menghilangkan logam berat dengan cara mengubah ion logam terlarut menjadi bentuk padatan yang tidak larut melalui penambahan bahan kimia seperti hidroksida atau sulfida [11]. Kelebihan metode ini adalah mudah diaplikasikan dan relatif murah. Namun, metode ini memiliki kelemahan berupa produksi lumpur dalam jumlah besar serta kurang efektif pada konsentrasi logam rendah [7], [34].

2. Koagulasi-Flokulasi

Koagulasi-flokulasi digunakan untuk menggabungkan partikel-partikel kecil menjadi flok yang lebih besar sehingga mudah dipisahkan. Proses ini biasanya menggunakan koagulan seperti alum atau FeCl_3 [35]. Namun, efektivitasnya terhadap logam berat terlarut relatif terbatas sehingga sering dikombinasikan dengan metode lain.

3. Pertukaran Ion (Ion Exchange)

Metode ini menggunakan resin untuk menukar ion logam berat dengan ion lain yang tidak berbahaya. Ion exchange memiliki efisiensi tinggi dalam menghilangkan logam berat, namun biaya operasionalnya relatif mahal dan sensitif terhadap kondisi air limbah [36].

4. Filtrasi Membran

Teknologi membran seperti ultrafiltrasi, nanofiltrasi, dan reverse osmosis banyak digunakan dalam pengolahan air lindi karena mampu menghilangkan logam berat hingga tingkat yang sangat rendah [37]. Kelemahan utama metode ini adalah biaya tinggi dan potensi fouling membran yang dapat menurunkan kinerja sistem.

2.3.2. Metode Biologis

Metode biologis memanfaatkan mikroorganisme untuk menghilangkan logam berat melalui proses biosorpsi, bioakumulasi, atau biotransformasi.

Beberapa mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan alga memiliki kemampuan untuk mengikat logam berat melalui dinding selnya [36]. Meskipun ramah lingkungan, metode ini memiliki keterbatasan dalam hal kestabilan proses dan sensitivitas terhadap kondisi lingkungan seperti pH dan suhu.

2.3.3. Metode Adsorpsi

Adsorpsi merupakan metode yang paling banyak dikembangkan dalam pengolahan logam berat karena memiliki efisiensi tinggi, biaya relatif rendah, serta dapat menggunakan bahan alami sebagai adsorben [11]. Proses adsorpsi terjadi melalui interaksi antara ion logam dengan permukaan adsorben melalui mekanisme fisika maupun kimia. Faktor-faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi antara lain:

1. pH larutan
2. Waktu kontak
3. Konsentrasi awal
4. Dosis/massa adsorben

Menurut Siswoyo, adsorpsi menggunakan biomaterial lokal seperti serat alami dan biochar memiliki potensi besar dalam menghilangkan logam berat dari air limbah karena sifatnya yang ekonomis dan ramah lingkungan [33].

2.3.4. Perbandingan Metode Pengolahan

Perbandingan metode pengolahan disajikan dalam bentuk tabel sebagai berikut.

Tabel 2. 2. Perbandingan Metode Pengolahan

Metode	Kelebihan	Kekurangan
Presipitasi	Murah, mudah	Lumpur banyak
Koagulasi	Sederhana	Kurang efektif untuk ion terlarut
Ion Exchange	Efisiensi tinggi	Mahal
Membran	Sangat efektif	Fouling, biaya tinggi
Biologis	Ramah lingkungan	Tidak stabil
Adsorpsi	Efisien, fleksibel	Dipengaruhi kondisi opera

Sumber: Dimodifikasi dari [11], [38], [36], [37]

Berbagai metode pengolahan logam berat dalam air lindi memiliki karakteristik, keunggulan, dan keterbatasan yang berbeda-beda. Oleh karena itu, pemilihan metode yang tepat harus mempertimbangkan efisiensi penyisihan, biaya operasional, kemudahan aplikasi, serta dampak lingkungan yang ditimbulkan [11], [38].

Metode presipitasi kimia dan koagulasi–flokulasi merupakan teknologi konvensional yang banyak digunakan karena relatif sederhana dan ekonomis. Namun, kedua metode ini cenderung menghasilkan lumpur dalam jumlah besar yang memerlukan penanganan lanjutan, serta kurang efektif dalam menghilangkan logam berat pada konsentrasi rendah [34], [35].

Di sisi lain, metode pertukaran ion dan filtrasi membran memiliki efisiensi yang lebih tinggi dalam menghilangkan logam berat hingga konsentrasi yang sangat rendah. Meskipun demikian, biaya investasi dan operasional yang tinggi, serta potensi fouling pada membran, menjadi kendala utama dalam penerapan skala besar [36], [37].

Metode biologis menawarkan keunggulan dari segi keberlanjutan dan ramah lingkungan, namun memiliki keterbatasan dalam hal kestabilan proses serta sensitivitas terhadap perubahan kondisi lingkungan seperti pH dan suhu [14].

Dibandingkan dengan metode lainnya, adsorpsi menjadi salah satu metode yang paling menjanjikan dalam pengolahan logam berat, khususnya pada air lindi. Hal ini disebabkan oleh kemampuannya dalam menghilangkan logam berat pada konsentrasi rendah, fleksibilitas dalam penggunaan berbagai jenis adsorben, serta biaya yang relatif lebih rendah. Selain itu, penggunaan biomaterial sebagai adsorben juga memberikan nilai tambah dari segi keberlanjutan dan pemanfaatan limbah [38].

Dengan mempertimbangkan berbagai aspek tersebut, metode adsorpsi dipilih sebagai pendekatan utama dalam penelitian ini karena dinilai paling sesuai untuk mengatasi permasalahan logam berat dalam air lindi secara efektif dan berkelanjutan.

2.3.5. Pemilihan Metode Efektif

Pemilihan metode pengolahan logam berat harus mempertimbangkan beberapa aspek seperti efisiensi, biaya, kemudahan operasional, serta dampak lingkungan. Dalam konteks penelitian ini, metode adsorpsi dipilih karena memiliki keunggulan dalam menghilangkan logam berat pada konsentrasi rendah serta dapat dikombinasikan dengan biomaterial seperti serat bambu dan bio-membran. Selain itu, metode ini juga lebih berkelanjutan dibandingkan metode konvensional [33].

2.4. Adsorpsi

2.4.1. Pengertian Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses penyerapan zat (adsorbat) dari fase cair atau gas ke permukaan zat padat (adsorben) melalui interaksi fisika maupun kimia. Dalam konteks pengolahan air limbah, adsorpsi digunakan untuk menghilangkan kontaminan seperti logam berat, senyawa organik, dan zat berbahaya lainnya dari larutan [39].

Proses ini terjadi akibat adanya gaya tarik antara molekul adsorbat dengan permukaan adsorben, yang menyebabkan akumulasi zat tersebut pada permukaan. Adsorpsi menjadi metode yang efektif karena mampu menghilangkan polutan hingga konsentrasi rendah serta dapat menggunakan berbagai jenis material alami sebagai adsorben [38].

2.4.2. Jenis Adsorpsi (Fisika dan Kimia)

Adsorpsi dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu:

1. Adsorpsi Fisika (*Physisorption*)

Adsorpsi fisika terjadi akibat gaya van der Waals yang lemah antara adsorbat dan adsorben. Proses ini bersifat reversibel dan umumnya terjadi pada suhu rendah. Ciri-ciri adsorpsi fisika:

- Energi ikatan rendah
- Tidak spesifik
- Dapat terjadi multilayer

2. Adsorpsi Kimia (*Chemisorption*)

Adsorpsi kimia melibatkan pembentukan ikatan kimia antara adsorbat dan adsorben, sehingga bersifat lebih kuat dan spesifik. Ciri-ciri adsorpsi kimia:

- Energi ikatan tinggi
- Spesifik terhadap jenis adsorbat
- Umumnya membentuk monolayer

Dalam pengolahan logam berat seperti kadmium, kedua mekanisme ini dapat terjadi secara bersamaan tergantung kondisi sistem [40].

2.4.3. Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi

Efektivitas proses adsorpsi dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, antara lain:

1. pH Larutan

pH merupakan faktor paling penting karena mempengaruhi spesiasi logam dan muatan permukaan adsorben. Pada pH rendah, ion H^+ bersaing dengan logam sehingga menurunkan efisiensi adsorpsi.

2. Konsentrasi Awal

Semakin tinggi konsentrasi logam, semakin besar driving force untuk proses adsorpsi.

3. Waktu Kontak

Waktu kontak yang cukup diperlukan untuk mencapai kesetimbangan adsorpsi.

4. Dosis Adsorben

Semakin banyak adsorben, semakin besar luas permukaan yang tersedia untuk adsorpsi.

Faktor-faktor ini menjadi dasar dalam penentuan kondisi optimum pada penelitian adsorpsi [33].

2.4.4. Model/Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi digunakan untuk menggambarkan hubungan antara jumlah adsorbat yang teradsorpsi dengan konsentrasi dalam larutan pada kondisi kesetimbangan.

1. Isoterm Langmuir

Model Langmuir mengasumsikan bahwa adsorpsi terjadi pada permukaan homogen dan membentuk lapisan tunggal (monolayer).

$$qe = \frac{q_{max} b C_e}{1 + b C_e}$$

Keterangan:

qe : jumlah adsorbat teradsorpsi (mg/g)

q_{max} : kapasitas maksimum adsorben (mg/g)

C_e : konsentrasi kesetimbangan (mg/L)

b : konstanta Langmuir

2. Isoterm Freundlich

Model Freundlich digunakan untuk permukaan heterogen dan adsorpsi multilayer.

$$qe = K_f C_e^{1/n}$$

Keterangan:

K_f : konstanta kapasitas adsorpsi

n : intensitas adsorpsi

Model ini lebih fleksibel dan sering digunakan dalam sistem nyata seperti air lindi [41].

2.4.5. Mekanisme Adsorpsi Logam Berat

Adsorpsi logam berat seperti kadmium dapat terjadi melalui beberapa mekanisme, yaitu:

1. Pertukaran ion
2. Kompleksasi
3. Ikatan elektrostatik
4. Presipitasi permukaan

Mekanisme ini dipengaruhi oleh karakteristik adsorben, seperti luas permukaan, gugus fungsi, dan struktur pori [39].

2.4.6. Aplikasi Adsorpsi dalam Penelitian

Penggunaan *biomaterial* sebagai adsorben semakin berkembang karena ketersediaannya yang melimpah, biaya rendah, serta ramah lingkungan. Contoh *biomaterial* yang banyak digunakan antara lain:

1. Serat bambu
2. Biochar

3. Selulosa
4. Limbah pertanian

Biomaterial umumnya mengandung gugus fungsi seperti $-OH$, $-COOH$, dan $-NH_2$ yang berperan dalam mengikat logam berat [38], [33]. Dalam penelitian ini, penggunaan bio-membran berbasis serat alami diharapkan mampu meningkatkan efisiensi adsorpsi kadmium dari air lindi secara signifikan.

2.5. Bio-Membrane

2.5.1. Pengertian Bio-Membrane

Bio-membran merupakan membran yang tersusun dari bahan alami (biomaterial) yang memiliki kemampuan untuk memisahkan zat melalui mekanisme filtrasi, difusi, dan adsorpsi. Dalam pengolahan air limbah, bio-membran digunakan sebagai alternatif teknologi yang ramah lingkungan karena bersifat biodegradable, ekonomis, serta memiliki potensi untuk dikembangkan dari sumber daya lokal [42].

Selain berfungsi sebagai penyaring secara fisik, bio-membran juga berperan sebagai media aktif yang mampu mengikat kontaminan seperti logam berat melalui gugus fungsi yang terdapat pada material penyusunnya. Oleh karena itu, bio-membran sering dikombinasikan dengan proses adsorpsi untuk meningkatkan efisiensi pengolahan limbah cair [43].

2.5.2. Prinsip Kerja Bio-Membrane

Prinsip kerja bio-membran dalam pengolahan limbah cair melibatkan beberapa mekanisme utama, yaitu:

1. Filtrasi (penyaringan)

Membran menyaring partikel berdasarkan ukuran pori, sehingga zat dengan ukuran lebih besar akan tertahan.

2. Difusi

Zat terlarut berpindah melalui membran akibat perbedaan konsentrasi.

3. Adsorpsi

Kontaminan seperti logam berat terikat pada permukaan membran melalui interaksi fisika dan kimia.

4. Interaksi kimia

Gugus fungsi pada biomaterial seperti –OH dan –COOH berperan dalam mengikat ion logam melalui mekanisme kompleksasi atau pertukaran ion.

Kombinasi mekanisme tersebut menjadikan bio-membran lebih efektif dibandingkan metode filtrasi konvensional, terutama dalam menghilangkan logam berat pada konsentrasi rendah [44].

2.5.3. Keunggulan dan Kelemahan

1. Keunggulan

Bio-membran memiliki beberapa keunggulan, antara lain:

- Ramah lingkungan dan biodegradable
- Biaya relatif rendah karena menggunakan bahan alami
- Ketersediaan bahan baku melimpah
- Dapat mengombinasikan proses filtrasi dan adsorpsi
- Efektif untuk menghilangkan logam berat pada konsentrasi rendah

2. Kelemahan

Selain keunggulan, bio-membran juga memiliki beberapa keterbatasan, yaitu:

- Stabilitas mekanik relatif lebih rendah dibanding membran sintesis
- Umur pakai lebih pendek
- Rentan terhadap fouling (penyumbatan pori)
- Kinerja dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti pH dan suhu

Oleh karena itu, diperlukan modifikasi atau perlakuan tertentu untuk meningkatkan performa bio-membran dalam aplikasi pengolahan limbah [45].

2.5.4. Aplikasi dalam Pengolahan Limbah

Bio-membran telah banyak digunakan dalam pengolahan limbah cair, terutama untuk menghilangkan kontaminan seperti logam berat, zat organik, dan partikel tersuspensi.

Dalam pengolahan air lindi, bio-membran memiliki peran penting karena mampu mengombinasikan proses filtrasi dan adsorpsi secara simultan. Penggunaan bio-membran berbasis biomaterial seperti serat alami dapat meningkatkan efisiensi penyisihan logam berat seperti kadmium (Cd^{2+}) dari air lindi [33].

Selain itu, bio-membran juga memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai teknologi berkelanjutan karena memanfaatkan limbah biomassa dan mengurangi ketergantungan terhadap bahan sintetis.

Dalam penelitian ini, bio-membran digunakan sebagai media adsorpsi untuk menghilangkan logam berat kadmium dari air lindi, dengan harapan dapat memberikan solusi yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan.

2.6. Serat Bambu

2.6.1. Pengertian dan Struktur Serat Bambu

Serat bambu merupakan material alami yang berasal dari jaringan penyusun batang bambu yang memiliki struktur berlapis dan berpori. Secara mikroskopis, serat bambu tersusun atas sel-sel memanjang yang membentuk struktur fibril dengan orientasi tertentu, sehingga memberikan kekuatan mekanik yang tinggi serta luas permukaan yang cukup besar [46]. Berikut disajikan bentuk visual serat bambu yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 2. 1. Serat Bambu

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026.

Struktur serat bambu terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu dinding sel primer, dinding sel sekunder, serta lumen (rongga sel). Keberadaan lumen dan pori-pori mikro pada serat bambu memungkinkan terjadinya difusi dan penyerapan zat, sehingga menjadikan material ini potensial sebagai adsorben [47].

Selain itu, struktur berlapis pada bambu juga berkontribusi terhadap kestabilan mekanik serta ketahanan terhadap degradasi, yang penting dalam aplikasi pengolahan limbah cair.

2.6.2. Kandungan Kimia

Serat bambu tersusun atas tiga komponen utama, yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang masing-masing memiliki peran penting dalam proses adsorpsi. Berikut persentase masing-masing gugus fungsi:

1. Selulosa

Selulosa merupakan komponen utama dalam serat bambu dengan kandungan sekitar 40–50%. Selulosa memiliki gugus hidroksil ($-OH$) yang berperan dalam pembentukan ikatan hidrogen dan interaksi dengan ion logam [48].

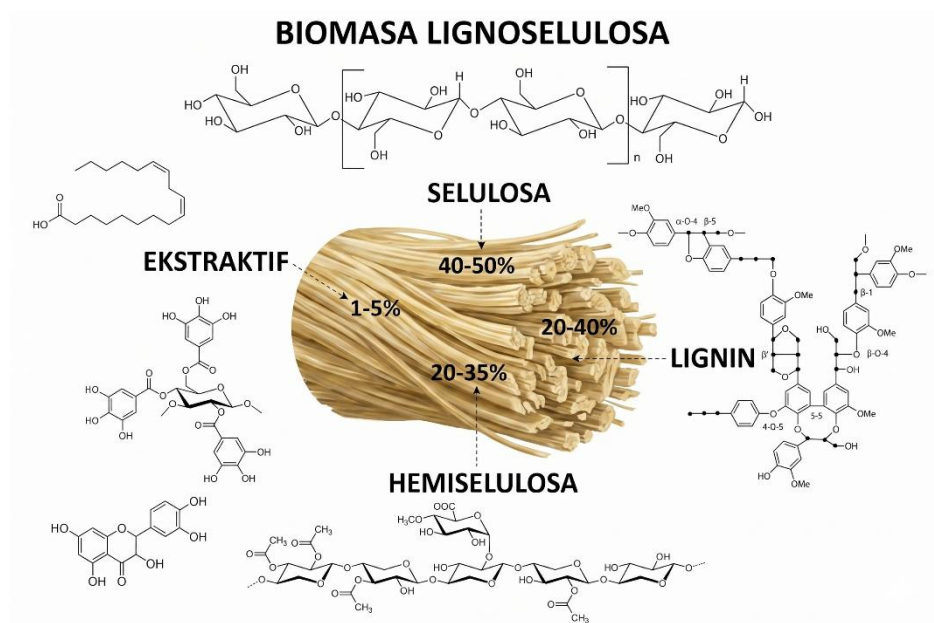
2. Hemiselulosa

Hemiselulosa memiliki struktur amorf dan mengandung gugus fungsi aktif yang dapat berinteraksi dengan logam berat. Komponen ini berperan dalam meningkatkan fleksibilitas dan reaktivitas biomaterial.

3. Lignin

Lignin merupakan polimer kompleks yang memberikan kekuatan dan ketahanan pada struktur bambu. Lignin juga mengandung gugus aromatik yang dapat berinteraksi dengan kontaminan melalui mekanisme adsorpsi.

Ilustrasi struktur dan gugus fungsi dari serat bambu dapat dilihat pada Gambar 2.2, berikut ini.



Gambar 2. 2. Kandungan Kimia Serat Bambu

Sumber: Ilustrasi Peneliti, 2026.

Tingginya kandungan selulosa yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, memperkuat potensi serat bambu sebagai bahan baku pembuatan adsorben berbasis serat alami.

2.6.3. Potensi sebagai Adsorben

Serat bambu memiliki potensi besar sebagai adsorben maupun bahan dasar bio-membran dalam pengolahan limbah cair. Hal ini didukung oleh beberapa karakteristik utama, yaitu:

1. Memiliki luas permukaan dan struktur pori yang baik
2. Mengandung gugus fungsi aktif ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$)
3. Ketersediaan melimpah dan biaya rendah
4. Ramah lingkungan dan biodegradable

Dalam aplikasi pengolahan limbah, serat bambu dapat digunakan secara langsung maupun setelah dimodifikasi menjadi arang aktif (biochar) atau membran komposit. Modifikasi ini dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap logam berat seperti kadmium [44]. Selain itu, penggunaan serat bambu sebagai bahan bio-membran memungkinkan kombinasi proses filtrasi dan adsorpsi dalam satu sistem, sehingga meningkatkan efisiensi pengolahan air lindi.

Dalam penelitian ini, serat bambu dimanfaatkan sebagai material utama dalam pembuatan bio-membran untuk menyerap logam berat kadmium dari air lindi, dengan harapan dapat menghasilkan teknologi pengolahan yang efektif, ekonomis, dan berkelanjutan.

2.7. Selulosa

2.7.1. Pengertian Selulosa

Selulosa merupakan polisakarida alami yang paling melimpah di alam dan merupakan komponen utama penyusun dinding sel tumbuhan. Selulosa tersusun atas unit-unit β -D-glukosa yang terikat melalui ikatan β -1,4-glikosidik, membentuk rantai panjang yang bersifat linear dan tidak bercabang [49].

Dalam biomaterial seperti serat bambu, selulosa berperan sebagai komponen utama yang memberikan kekuatan struktural sekaligus menyediakan gugus fungsi aktif yang berperan dalam proses adsorpsi. Karena sifatnya yang hidrofilik dan memiliki banyak gugus hidroksil, selulosa sangat potensial digunakan sebagai bahan adsorben dalam pengolahan limbah cair [50].

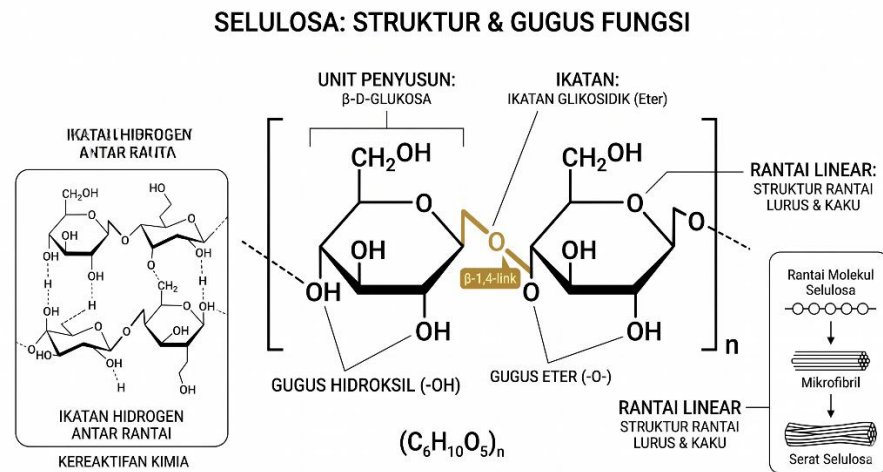
2.7.2. Struktur dan Gugus Fungsi

Struktur selulosa terdiri dari rantai panjang glukosa yang tersusun secara teratur dan membentuk struktur kristalin maupun amorf. Ikatan hidrogen antar rantai menyebabkan selulosa memiliki kekuatan mekanik yang tinggi dan stabilitas yang baik. Gugus fungsi utama dalam selulosa adalah gugus hidroksil ($-OH$) yang terdapat pada setiap unit glukosa. Gugus ini memiliki peran penting dalam proses adsorpsi karena dapat:

1. Membentuk ikatan hidrogen
2. Berinteraksi dengan ion logam
3. Menjadi situs aktif untuk proses pertukaran ion

Selain itu, struktur pori dan luas permukaan selulosa juga berkontribusi terhadap kapasitas adsorpsi. Modifikasi selulosa, seperti aktivasi kimia, dapat meningkatkan jumlah gugus aktif dan memperbaiki

kinerja adsorpsi [51]. Bentuk struktur dan gugus fungsi selulosa dapat dilihat pada ilustrasi berikut.



Gambar 2. 3. Struktur dan Gugus Fungsi Selulosa

Sumber: Ilustrasi Peneliti, 2026.

2.7.3. Peran Selulosa dalam Adsorpsi Logam Berat

Selulosa memiliki peran penting dalam proses adsorpsi logam berat karena keberadaan gugus hidroksil yang mampu berinteraksi dengan ion logam seperti kadmium (Cd^{2+}). Mekanisme adsorpsi yang terjadi meliputi:

1. Interaksi elektrostatik antara ion logam dan permukaan selulosa
2. Pertukaran ion dengan gugus aktif pada selulosa
3. Kompleksasi antara ion logam dan gugus hidroksil
4. Difusi ke dalam struktur pori

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa selulosa dan turunannya memiliki kapasitas adsorpsi yang baik terhadap logam berat, terutama setelah dilakukan modifikasi seperti oksidasi atau penambahan gugus fungsi tertentu [52].

Dalam konteks penelitian ini, selulosa yang terkandung dalam serat bambu berperan sebagai komponen utama yang berkontribusi terhadap kemampuan adsorpsi bio-membran dalam menghilangkan logam berat kadmium dari air lindi.

2.8. Aktivasi Adsorben

2.8.1. Pengertian Aktivasi

Aktivasi adsorben merupakan proses perlakuan terhadap material adsorben untuk meningkatkan sifat fisik dan kimianya, seperti luas permukaan, volume pori, serta jumlah gugus fungsi aktif. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan kemampuan adsorben dalam menyerap kontaminan, khususnya logam berat dalam air limbah [53].

Pada biomaterial seperti serat bambu atau selulosa, aktivasi sangat penting karena material alami umumnya masih memiliki keterbatasan dalam hal jumlah pori dan situs aktif. Melalui proses aktivasi, struktur internal adsorben dapat terbuka sehingga meningkatkan aksesibilitas adsorbat ke dalam pori-pori adsorben [54].

2.8.2. Metode Aktivasi

1. Aktivasi Fisik

Aktivasi fisik dilakukan melalui perlakuan panas (termal) pada suhu tinggi, biasanya dalam kondisi terbatas oksigen. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan komponen volatil dan membuka struktur pori pada adsorben. Beberapa karakteristik aktivasi fisik:

- Menggunakan suhu tinggi (300–800°C)
- Tidak menggunakan bahan kimia
- Ramah lingkungan
- Menghasilkan struktur pori yang lebih berkembang

Namun, aktivasi fisik umumnya membutuhkan energi yang besar dan waktu proses yang lebih lama [53].

2. Aktivasi Kimia

Aktivasi kimia dilakukan dengan menggunakan bahan kimia seperti asam, basa, atau garam tertentu (misalnya H_3PO_4 , KOH , NaOH). Proses ini bertujuan untuk meningkatkan jumlah gugus fungsi aktif serta memperbesar luas permukaan adsorben. Keunggulan aktivasi kimia:

- Suhu lebih rendah dibanding aktivasi fisik
- Waktu proses lebih singkat

- Meningkatkan gugus fungsi aktif

Namun, metode ini memerlukan proses pencucian lanjutan untuk menghilangkan residu bahan kimia [55].

2.8.3. Pengaruh Aktivasi terhadap Adsorpsi

Proses aktivasi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja adsorben dalam proses adsorpsi. Beberapa pengaruh utama aktivasi antara lain:

1. Peningkatan luas permukaan

Aktivasi membuka pori-pori adsorben sehingga meningkatkan area kontak dengan adsorbat.

2. Peningkatan volume dan ukuran pori

Struktur pori yang lebih berkembang memudahkan difusi ion logam ke dalam adsorben.

3. Penambahan gugus fungsi aktif

Aktivasi kimia dapat menambahkan gugus seperti $-OH$, $-COOH$, dan $-NH_2$ yang berperan dalam pengikatan logam berat.

4. Peningkatan kapasitas adsorpsi

Adsorben yang telah diaktivasi umumnya memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan tanpa aktivasi.

Dalam konteks pengolahan logam berat seperti kadmium, aktivasi adsorben berbasis biomaterial terbukti mampu meningkatkan efisiensi penyisihan secara signifikan. Oleh karena itu, proses aktivasi menjadi salah satu tahap penting dalam pengembangan adsorben untuk pengolahan air lindi [52].

2.9. Asam Sitrat ($C_6H_8O_7$)

2.9.1. Sifat dan Karakteristik

Asam sitrat ($C_6H_8O_7$) merupakan asam organik lemah yang termasuk dalam golongan asam trikarboksilat. Senyawa ini banyak ditemukan secara alami dalam buah-buahan, terutama buah sitrus seperti jeruk dan lemon. Asam sitrat memiliki tiga gugus karboksil ($-COOH$) dan satu gugus hidroksil ($-OH$) yang berperan penting dalam reaktivitas kimianya [56].

Secara fisik, asam sitrat berbentuk kristal putih, mudah larut dalam air, dan memiliki sifat higroskopis. Dalam larutan, asam sitrat dapat terdisosiasi menjadi ion sitrat yang mampu berinteraksi dengan ion logam melalui pembentukan kompleks. Sifat ini menjadikan asam sitrat banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk sebagai agen pengompleks, pengatur pH, dan aktivator dalam pembuatan adsorben [57].

2.9.2. Peran sebagai Aktivator Adsorben

Asam sitrat banyak digunakan sebagai aktivator kimia dalam proses modifikasi biomaterial karena kemampuannya dalam meningkatkan jumlah gugus fungsi aktif pada permukaan adsorben. Dalam proses aktivasi, asam sitrat dapat:

1. Menambahkan gugus karboksil ($-\text{COOH}$) pada permukaan adsorben
2. Meningkatkan hidrofilisitas material
3. Memperbesar jumlah situs aktif untuk adsorpsi
4. Membantu membuka struktur pori adsorben

Penggunaan asam sitrat sebagai aktivator dinilai lebih ramah lingkungan dibandingkan bahan kimia lain seperti KOH atau H_3PO_4 , karena bersifat biodegradable dan tidak menghasilkan limbah berbahaya dalam jumlah besar [58]. Selain itu, aktivasi menggunakan asam sitrat juga relatif mudah dilakukan dan tidak memerlukan kondisi operasi yang ekstrem, sehingga cocok untuk pengembangan adsorben berbasis biomaterial seperti serat bambu.

2.9.3. Mekanisme Interaksi dengan Biomassa

Interaksi antara asam sitrat dan biomassa terjadi melalui reaksi kimia antara gugus karboksil asam sitrat dengan gugus hidroksil pada biomaterial seperti selulosa. Proses ini dapat menghasilkan ikatan ester yang meningkatkan jumlah gugus aktif pada permukaan adsorben. Mekanisme utama yang terjadi meliputi:

1. Esterifikasi, yaitu pembentukan ikatan antara gugus $-\text{COOH}$ dari asam sitrat dengan $-\text{OH}$ dari selulosa

2. Penambahan gugus fungsi, yang meningkatkan kemampuan adsorben dalam mengikat logam
3. Pembentukan kompleks, antara ion logam dengan gugus karboksilat yang terbentuk

Dengan adanya modifikasi ini, biomaterial memiliki kemampuan yang lebih tinggi dalam mengadsorpsi logam berat seperti kadmium melalui mekanisme kompleksasi dan pertukaran ion [59].

Dalam penelitian ini, penggunaan asam sitrat sebagai aktivator diharapkan dapat meningkatkan kinerja bio-membran berbasis serat bambu dalam menyerap logam berat dari air lindi.

2.10. Karakteristik Adsorben

2.10.1. *Fourier Transform Infrared (FTIR)*

Fourier Transform Infrared (FTIR) merupakan teknik analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada suatu material berdasarkan interaksi antara radiasi inframerah dengan molekul sampel. Setiap gugus fungsi memiliki karakteristik serapan pada panjang gelombang tertentu, sehingga dapat digunakan untuk mengetahui komposisi kimia adsorben [60]. Dalam penelitian adsorpsi, FTIR digunakan untuk:

1. Mengidentifikasi gugus fungsi aktif seperti $-OH$, $-COOH$, dan $-NH_2$
2. Mengetahui perubahan kimia sebelum dan sesudah proses adsorpsi
3. Mengonfirmasi keberhasilan proses aktivasi atau modifikasi adsorben

Perubahan puncak spektrum FTIR setelah proses adsorpsi menunjukkan adanya interaksi antara adsorben dan adsorbat, seperti pembentukan ikatan kimia atau kompleksasi [61]. Visual instrumen FTIR disajikan pada gambar berikut.



Gambar 2. 4. Fourier Transform Infrared (FTIR)

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026.

2.10.2. Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) merupakan teknik karakterisasi yang digunakan untuk mengamati morfologi permukaan adsorben dengan resolusi tinggi. SEM bekerja dengan memanfaatkan interaksi antara elektron dan permukaan sampel sehingga menghasilkan citra yang detail mengenai struktur permukaan [62]. Dalam penelitian adsorben, SEM digunakan untuk:

1. Mengamati struktur pori dan tekstur permukaan
2. Mengetahui distribusi ukuran partikel
3. Membandingkan kondisi adsorben sebelum dan sesudah adsorpsi

Perubahan morfologi permukaan, seperti penutupan pori setelah adsorpsi, dapat menjadi indikasi bahwa proses penjerapan telah terjadi secara efektif. Visual instrumen SEM disajikan pada gambar berikut.



Gambar 2. 5. Scanning Electron Microscope (SEM)

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026.

2.10.3. Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) merupakan teknik analisis kuantitatif yang digunakan untuk menentukan konsentrasi logam dalam suatu sampel berdasarkan penyerapan radiasi oleh atom bebas pada panjang gelombang tertentu. Metode ini banyak digunakan dalam analisis logam berat seperti kadmium karena memiliki sensitivitas dan akurasi yang tinggi [62]. Dalam penelitian adsorpsi, AAS digunakan untuk:

1. Mengukur konsentrasi awal dan akhir logam dalam larutan
2. Menentukan efisiensi penyisihan logam
3. Menghitung kapasitas adsorpsi adsorben

Prinsip kerja AAS didasarkan pada kemampuan atom logam untuk menyerap cahaya pada panjang gelombang spesifik, sehingga jumlah cahaya yang diserap sebanding dengan konsentrasi logam dalam sampel. Visual instrumen AAS disajikan pada gambar berikut.



Gambar 2. 6. Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026.

2.11. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang digunakan dalam kajian pustaka dipilih berdasarkan kesesuaiannya dengan topik adsorpsi logam berat menggunakan biomaterial, modifikasi adsorben berbasis selulosa, aktivasi menggunakan asam sitrat, serta pengolahan air lindi. Untuk mempermudah identifikasi posisi penelitian dan celah penelitian (*research gap*), hasil kajian tersebut disajikan dalam bentuk matriks perbandingan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3. Penelitian Terdahulu

Referensi	Material Adsorben	Modifikasi	Target Polutan	Temuan Utama	Keterbatasan Penelitian
[55]	Karbon aktif biomassa	Aktivasi kimia	Kontaminan air	Aktivasi meningkatkan luas permukaan dan volume pori sehingga	Belum dalam bentuk membran

				kapasitas adsorpsi meningkat	
[58]	Selulosa	Modifikasi asam sitrat	Logam berat	Gugus aktif meningkatkan interaksi elektrostatik dan pertukaran ion	Fokus pada selulosa murni
[50]	Selulosa termodifikasi	Modifikasi kimia	Logam berat	Gugus karboksil meningkatkan kompleksasi ion logam	Tidak diaplikasikan pada air lindi
[56]	Biosorben	Aktivasi asam sitrat	Logam berat	Gugus -COOH meningkat dan memperkuat adsorpsi	Tidak dikembangkan sebagai bio-membran
[59]	Biomassa alami	Asam organik	Logam berat	Efisiensi adsorpsi meningkat melalui mekanisme fisik dan kimia	Masih berbentuk biomassa serbuk
[63]	Air lindi dan eceng gondok	<i>Constructed Wetland</i>	Pb	Efektif menurunkan Pb melalui fitoremediasi dan adsorpsi	Tidak menggunakan adsorben biomaterial
[44]	Biosorben berbasis biomassa	Adsorpsi	Logam berat	Biomaterial memiliki potensi tinggi sebagai adsorben ramah lingkungan	Karakterisasi material terbatas
[38]	Biochar biomassa	Pirolisis dan aktivasi	Logam berat	Kapasitas adsorpsi meningkat akibat porositas tinggi	Memerlukan temperatur tinggi
[64]	Selulosa termodifikasi	Modifikasi gugus aktif	Logam berat	Gugus aktif berperan penting dalam pengikatan logam	Belum dikombinasikan dengan filtrasi
[65]	Tanah TPA Piyungan	Analisis AAS	Cd, Cu, Pb	Cd pada beberapa titik melebihi baku	Tidak membahas metode

				mutu dan menunjukkan akumulasi logam berat dari aktivitas TPA	pengolahan logam berat
[66]	Air lindi dan eceng gondok	<i>Constructed Wetland</i>	Pb	Sistem mampu menurunkan Pb melalui phytoaccumulation dan phytoextraction	Membutuhkan waktu operasi relatif lama dan area luas

Sumber: Data Sekunder.

Berdasarkan Tabel 2.3, sebagian besar penelitian terdahulu menunjukkan bahwa biomaterial yang dimodifikasi secara kimia memiliki potensi yang baik dalam menyisihkan logam berat dari air limbah. Aktivasi menggunakan asam sitrat terbukti mampu meningkatkan jumlah gugus karboksilat (-COOH) yang berperan sebagai situs aktif adsorpsi. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih menggunakan adsorben dalam bentuk serbuk, biochar, atau selulosa termodifikasi, sedangkan pengembangan adsorben dalam bentuk bio-membran masih sangat terbatas. Selain itu, penelitian yang secara khusus mengkaji penyisihan kadmium (Cd^{2+}) pada air lindi menggunakan biomaterial lokal juga masih sedikit.

Oleh karena itu, penelitian ini dikembangkan dengan memanfaatkan bio-membran berbasis serat bambu teraktivasi asam sitrat yang mengombinasikan mekanisme adsorpsi dan filtrasi untuk penyisihan ion Cd^{2+} pada air lindi, sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dan praktis dalam pengembangan teknologi pengolahan limbah yang berkelanjutan.

2.11.1. Analisis Penelitian Terdahulu

Berdasarkan tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa penggunaan biomaterial sebagai adsorben merupakan pendekatan yang efektif dalam pengolahan limbah cair, khususnya dalam penyisihan logam berat. Faktor utama yang mempengaruhi keberhasilan adsorpsi meliputi luas permukaan, struktur pori, serta keberadaan gugus fungsi aktif seperti -OH dan -COOH.

Penelitian juga menunjukkan bahwa proses aktivasi, baik secara fisik maupun kimia, memiliki peran penting dalam meningkatkan kinerja adsorben. Aktivasi kimia menggunakan asam sitrat terbukti mampu meningkatkan jumlah gugus aktif serta memperkuat interaksi dengan ion logam.

Selain itu, studi oleh Eko Siswoyo menunjukkan bahwa adsorben alami memiliki potensi besar dalam pengolahan limbah cair, terutama dengan mempertimbangkan parameter operasional seperti pH dan waktu kontak. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih menggunakan adsorben dalam bentuk serbuk atau biochar, sementara pengembangan dalam bentuk bio-membran masih terbatas.

2.11.2. Research Gap (Kebaruan Penelitian)

Berdasarkan analisis tersebut, terdapat beberapa celah penelitian, yaitu:

1. Bentuk adsorben masih konvensional
Dominan serbuk / biochar, belum banyak dalam bentuk membran
2. Minim integrasi teknologi
Belum banyak yang mengombinasikan adsorpsi + filtrasi
3. Pemanfaatan serat bambu masih terbatas
Padahal potensinya besar sebagai biomaterial lokal
4. Spesifik logam kadmium masih terbatas
Banyak studi umum logam berat, belum fokus Cd dalam air lindi

2.11.3. Posisi Penelitian

Penelitian ini memiliki kebaruan sebagai berikut:

1. Menggunakan bio-membran berbasis serat bambu
2. Mengombinasikan adsorpsi dan filtrasi
3. Menggunakan aktivasi asam sitrat (*green activator*)
4. Fokus pada penyisihan logam kadmium (Cd) dalam air lindi

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada periode bulan September tahun 2025 hingga Mei tahun 2026. Kegiatan penelitian meliputi preparasi adsorben, proses adsorpsi, serta analisis laboratorium.

Preparasi dan pengujian adsorpsi dilakukan di Laboratorium Kualitas Air, Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia. Analisis karakteristik adsorben menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM), serta analisis kadar kadmium (Cd^{2+}) menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS).

3.2. Alat dan Bahan

3.2.1. Alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Oven
2. Timbangan analitik
3. Magnetic stirrer
4. Indikator pH
5. Gelas ukur
6. Labu ukur 1000mL, 500mL dan 25mL
7. Pipet volumetrik 50mL
8. Pipet ukur 5mL
9. Erlenmeyer 50mL
10. Gelas beker 1000mL, 500mL dan 50mL
11. Orbital shaker
12. Kertas saring
13. Botol vial 5ml
14. Alat *fourier transform infrared* (FTIR)
15. Alat *scanning electron microscope* (SEM)
16. Alat *atomic absorption spectrophotometer* (AAS)

3.2.2. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Serat bambu
2. *Carboxymethyl Cellulose* (CMC)
3. *Polyvinyl Alcohol* (PVA)
4. Asam sitrat ($C_6H_8O_7$) sebagai aktivator
5. Kadmium nitrat tetrahidrat ($Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$)
6. Aquades
7. Asam nitrat (HNO_3) untuk destruksi
8. Natrium Hidroksida NaOH untuk pengaturan pH
9. Larutan buffer pH
10. Air lindi dari TPA Piyungan

3.3. Variabel Penelitian

3.3.1. Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini meliputi:

1. Variasi massa adsorben (25, 50, 75, 100, 200, dan 300) mg.
2. Variasi pH larutan 3, 4, 5, 6, 7 dan 8.
3. Variasi waktu kontak adsorpsi (30, 60, 90, 120, dan 180) menit.
4. Variasi konsentrasi awal (Cd^{2+}) (10, 25, 50, 75, 100 dan 200) ppm.

3.3.2. Variabel Terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah:

1. Konsentrasi akhir Cd^{2+} dalam larutan.
2. Kapasitas adsorpsi (q_e).
4. Efisiensi penurunan konsentrasi Cd^{2+} .

3.3.3. Variabel Kontrol

Variabel kontrol dalam penelitian ini meliputi:

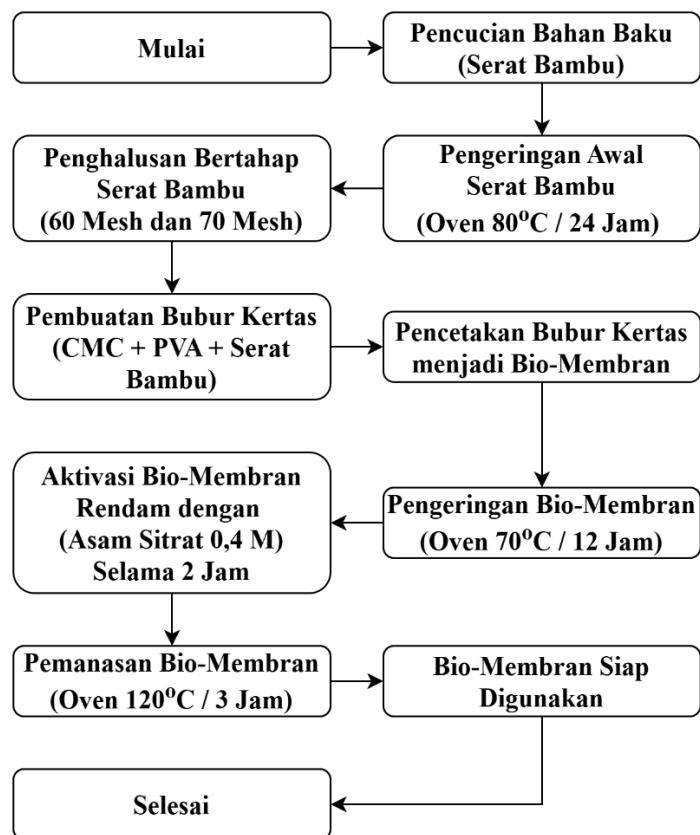
1. Volume larutan (50 mL).
2. Suhu operasi (suhu ruang).
3. Kecepatan pengadukan (150 rpm).
5. Kondisi alat dan metode analisis.

3.4. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan utama, yaitu preparasi adsorben, pembuatan larutan kadmium, proses adsorpsi metode batch, analisis kadar kadmium, serta karakterisasi adsorben. Seluruh tahapan dilakukan secara sistematis untuk memperoleh data yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan.

3.4.1. Preparasi Adsorben

Preparasi adsorben dilakukan melalui beberapa tahapan, mulai dari persiapan bahan baku hingga terbentuk bio-membran yang siap digunakan sebagai adsorben. Tahapan preparasi ini bertujuan untuk memperoleh bio-membran berbasis serat bambu dengan karakteristik fisik yang baik serta memiliki kemampuan adsorpsi yang optimal. Untuk mempermudah pemahaman mengenai proses preparasi adsorben, tahapan penelitian disajikan dalam diagram alir sebagai berikut.



Gambar 3. 1. Diagram Alir Preparasi Adsorben

Sumber: Ilustrasi Peneliti, 2026

Berdasarkan diagram alir pada Gambar 3.1, di atas dijelaskan sebagai berikut:

1. Pencucian Serat Bambu

Tahap awal preparasi adsorben diawali dengan proses pencucian serat bambu menggunakan air bersih untuk menghilangkan kotoran, debu, dan pengotor lain yang masih menempel pada permukaan serat. Proses pencucian dilakukan hingga serat bambu tampak bersih sehingga tidak mengganggu proses preparasi selanjutnya.

2. Pengeringan Awal Serat Bambu

Setelah proses pencucian selesai dilakukan, serat bambu kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 80 °C selama 24 jam. Proses pengeringan ini bertujuan untuk mengurangi kadar air yang terkandung di dalam serat bambu sehingga mempermudah proses penghalusan dan meningkatkan kestabilan bahan.

3. Penghalusan Serat Bambu

Serat bambu yang telah kering selanjutnya dihaluskan secara bertahap menggunakan ayakan berukuran 60 mesh dan 70 mesh. Proses penghalusan dilakukan untuk memperoleh ukuran serat yang lebih homogen sehingga dapat menghasilkan struktur bio-membran yang lebih merata.

4. Pembuatan Bubur Kertas

Serat bambu yang telah melalui proses delignifikasi, pengeringan, dan penghalusan selanjutnya digunakan sebagai bahan utama dalam pembuatan bubur kertas bio-membran. Serat bambu dicampurkan dengan *Carboxymethyl Cellulose* (CMC) dan *Polyvinyl Alcohol* (PVA) menggunakan rasio komposisi serat bambu : CMC : PVA sebesar 80 : 10 : 10. Rasio tersebut ditetapkan berdasarkan formulasi yang dikembangkan dalam penelitian ini dengan mengacu pada penelitian Xu et al. [67], yang melaporkan bahwa kombinasi CMC dan PVA mampu membentuk matriks film yang stabil melalui interaksi ikatan hidrogen antar gugus fungsional polimer. Hasil penelitian tersebut menunjukkan

bahwa penggunaan CMC dan PVA dapat meningkatkan sifat mekanik, homogenitas struktur, serta stabilitas material berbasis selulosa, sehingga keduanya dipilih sebagai bahan pendukung dalam pembentukan bio-membran berbasis serat bambu.

Pada penelitian ini, serat bambu digunakan sebagai komponen utama pembentuk kerangka (*supporting matrix*) bio-membran karena memiliki kandungan selulosa yang tinggi dan struktur serat yang mampu membentuk jaringan berpori. Pemilihan proporsi serat bambu yang lebih dominan bertujuan untuk mempertahankan karakteristik alami serat sebagai media filtrasi, sedangkan CMC digunakan sebagai bahan pengikat (*binder*) untuk meningkatkan adhesi antarserat dan memperbaiki sifat hidrofilik membran. PVA ditambahkan sebagai agen penguat (*strengthening agent*) yang berfungsi meningkatkan kekuatan tarik, fleksibilitas, serta kestabilan struktur membran selama proses pembentukan dan pengeringan. Dengan demikian, rasio 80 : 10 : 10 dipilih untuk memperoleh keseimbangan antara kekuatan mekanik, kestabilan struktur, dan porositas membran yang dibutuhkan dalam aplikasi filtrasi air.

Pencampuran dilakukan dengan menambahkan serat bambu, CMC, dan PVA ke dalam media air kemudian diaduk hingga seluruh komponen terdispersi secara merata dan membentuk suspensi homogen. Proses homogenisasi dilakukan untuk memastikan distribusi serat dan polimer berlangsung seragam sehingga meminimalkan terbentuknya aglomerasi yang dapat memengaruhi kualitas bio-membran. Bubur kertas yang dihasilkan selanjutnya digunakan pada tahap pencetakan untuk memperoleh lembaran bio-membran dengan ketebalan dan struktur yang lebih seragam.

5. Pencetakan Bio-Membran

Bubur kertas yang telah homogen selanjutnya dicetak menjadi lembaran bio-membran sesuai bentuk yang diinginkan. Tahap

pencetakan dilakukan secara merata untuk menghasilkan ketebalan membran yang seragam.

6. Pengeringan Bio-Membran

Bio-membran hasil pencetakan kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 70 °C selama 12 jam. Tahap ini bertujuan untuk mengurangi kadar air pada bio-membran serta membantu proses pembentukan struktur membran yang lebih padat dan stabil.

7. Aktivasi Bio-Membran

Setelah proses pengeringan selesai, bio-membran diaktivasi dengan cara direndam ke dalam larutan asam sitrat 0,4 M selama 2 jam. Proses aktivasi ini bertujuan untuk meningkatkan jumlah gugus aktif pada permukaan bio-membran sehingga kemampuan adsorpsinya terhadap ion logam menjadi lebih optimal.

8. Pemanasan Bio-Membran

Tahap selanjutnya yaitu pemanasan bio-membran menggunakan oven pada suhu 120 °C selama 3 jam. Proses ini bertujuan untuk memperkuat ikatan struktur bio-membran serta membantu proses aktivasi lanjutan akibat interaksi antara serat bambu dan asam sitrat.

9. Bio-Membran Siap Digunakan

Bio-membran yang telah melalui seluruh tahapan preparasi kemudian didinginkan pada suhu ruang dan selanjutnya siap digunakan sebagai adsorben pada proses penelitian.

3.4.2. Pembuatan Larutan Kadmium

Larutan kadmium dibuat untuk simulasi kontaminasi logam berat dengan tahapan sebagai berikut:

1. Pembuatan Larutan Stok

Larutan stok Cd^{2+} berkonsentrasi 1000 ppm (1000 mg/L) dibuat dari senyawa kadmium nitrat tetrahidrat ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{HO}$) dengan menggunakan akuades sebagai pelarut, kemudian diencerkan hingga volume akhir 1000 mL dalam labu ukur.

2. Pengenceran Larutan

Larutan stok diencerkan menggunakan aquades untuk mendapatkan variasi konsentrasi: 10 ppm, 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm, 100 ppm, dan 200 ppm.

3. Perhitungan Pengenceran

Pengenceran dilakukan menggunakan persamaan:

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

Keterangan:

- C_1 : Konsentrasi larutan pekat/stok (1000 ppm).
- V_1 : Volume larutan stok yang perlu diambil (yang dicari).
- C_2 : Konsentrasi larutan yang ingin dibuat (10 ppm, 25 ppm, dst).
- V_2 : Volume akhir larutan yang diinginkan (500mL, 50mL, dst).

4. Penyimpanan Larutan

Larutan disimpan dalam botol tertutup dan ditambahkan HNO_3 sampai $\text{pH} < 2$, untuk menghindari kontaminasi sebelum digunakan dalam proses adsorpsi.

3.4.3. Proses Adsorpsi Metode Batch

Proses adsorpsi dilakukan menggunakan metode batch untuk mengetahui kemampuan adsorben dalam menyerap Cd^{2+} . Tahapannya sebagai berikut:

1. Persiapan Sampel

Larutan Cd^{2+} dengan konsentrasi tertentu dimasukkan ke dalam erlenmeyer dengan volume tetap (50mL).

2. Pengaturan pH

pH larutan diatur sesuai variasi (misalnya pH 3, 5, 6, dst..) menggunakan larutan NaOH.

3. Penambahan Adsorben

Adsorben ditambahkan dengan massa tertentu (misalnya 75mg) ke dalam larutan.

4. Proses Pengadukan

Campuran diaduk menggunakan orbital shaker dengan kecepatan konstan (± 150 rpm) selama waktu kontak tertentu (misalnya 30, 60, 90, dan 120 menit).

5. Pemisahan Fase

Setelah waktu kontak selesai, larutan dipisahkan dari adsorben menggunakan kertas saring (filtrasi).

6. Pengambilan Sampel

Filtrat yang diperoleh digunakan untuk analisis konsentrasi Cd^{2+} menggunakan AAS.

7. Pengulangan (Duplo/Triplo)

Setiap percobaan dilakukan minimal dua atau tiga kali untuk memastikan keakuratan data.

3.4.4. Analisis Konsentrasi Kadmium (AAS)

Analisis kadar kadmium dilakukan menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) dengan tahapan sebagai berikut:

1. Preparasi Sampel

Sampel hasil adsorpsi ditambahkan asam nitrat (HNO_3) $\text{pH} < 2$ untuk memastikan seluruh logam berada dalam bentuk larut.

2. Pembuatan Kurva Kalibrasi

Larutan standar Cd^{2+} dengan konsentrasi tertentu digunakan untuk membuat kurva kalibrasi.

3. Pengukuran Sampel

Sampel dimasukkan ke dalam alat AAS dan diukur absorbansinya pada panjang gelombang spesifik untuk kadmium.

4. Penentuan Konsentrasi

Konsentrasi Cd^{2+} dihitung berdasarkan kurva kalibrasi.

3.4.5. Karakteristik Adsorben (FTIR dan SEM)

Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dan kimia adsorben sebelum dan sesudah adsorpsi.

1. Analisis FTIR

- Sampel dianalisis menggunakan FTIR pada rentang bilangan gelombang 4000–400 cm^{-1}
- Digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi seperti –OH, –COOH, dan –C=O
- Perubahan spektrum menunjukkan interaksi antara adsorben dan Cd^{2+}

2. Analisis SEM

- Digunakan untuk mengamati morfologi permukaan adsorben
- Mengidentifikasi struktur pori sebelum dan sesudah adsorpsi
- Menunjukkan adanya penutupan pori akibat penyerapan logam

3.5. Metode Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja bio-membran berbasis serat bambu dalam menyerap logam berat kadmium (Cd^{2+}). Data yang diperoleh dari hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif menggunakan perhitungan kapasitas adsorpsi, efisiensi penurunan konsentrasi, serta pemodelan isoterm. Selain itu, dilakukan analisis hubungan antar variabel untuk mengetahui pengaruh kondisi operasi terhadap proses adsorpsi.

3.5.1. Kapasitas Adsorpsi (q_e)

Kapasitas adsorpsi menunjukkan jumlah logam kadmium yang mampu diserap oleh adsorben per satuan massa pada kondisi kesetimbangan.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

Keterangan:

q_e : Kapasitas adsorpsi (mg/g)

C_0 : Konsentrasi awal (mg/L)

C_e : Konsentrasi akhir (mg/L)

V : Volume larutan (L)

m : Massa adsorben (mg)

Interpretasi:

Nilai q_e yang lebih besar menunjukkan kemampuan adsorben yang lebih tinggi dalam menyerap Cd^{2+} . Analisis ini digunakan untuk membandingkan performa adsorben pada berbagai kondisi percobaan.

3.5.2. Efisiensi Penurunan Konsentrasi

Efisiensi penurunan konsentrasi digunakan untuk mengetahui persentase logam kadmium yang berhasil dihilangkan dari larutan.

$$\% \text{Removal} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\%$$

Interpretasi:

Semakin tinggi nilai efisiensi (% removal), maka semakin efektif adsorben dalam menghilangkan Cd^{2+} dari larutan. Nilai ini sangat penting untuk mengevaluasi kinerja sistem secara praktis.

3.5.3. Analisis Isoterm Adsorpsi

Analisis isoterm dilakukan untuk memahami mekanisme interaksi antara adsorben dan adsorbat pada kondisi kesetimbangan. Model isoterm yang digunakan dalam penelitian ini adalah isoterm Langmuir dan Freundlich.

1. Isoterm Langmuir

Model Langmuir mengasumsikan bahwa adsorpsi terjadi pada permukaan homogen dengan pembentukan lapisan tunggal (monolayer).

$$q_e = \frac{q_{max} b C_e}{1 + b C_e}$$

Untuk analisis linear:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{max}} + \frac{1}{q_{max} b} \times \frac{1}{C_e}$$

Keterangan:

q_{max} : Kapasitas maksimum adsorpsi (mg/g)

b : Konstanta langmuir (L/g)

Interpretasi:

Model ini menunjukkan kapasitas maksimum adsorben dan kecenderungan pembentukan lapisan tunggal.

2. Isoterm Freundlich

Model Freundlich digunakan untuk permukaan heterogen dan adsorpsi multilayer.

$$qe = K_f C_e^{1/n}$$

Bentuk linear:

$$\log qe = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e$$

Keterangan:

K_f : Konstanta kapasitas adsorpsi

n : Intensitas adsorpsi

Interpretasi:

Jika nilai $1/n < 1$, maka proses adsorpsi bersifat *favorable* (menguntungkan).

Penentuan Model Terbaik:

Model isoterm terbaik ditentukan berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2). Model dengan nilai R^2 mendekati 1 dianggap paling sesuai menggambarkan sistem adsorpsi.

3.5.4. Analisis Statistik dan Evaluasi Data

Untuk memastikan keandalan data, dilakukan analisis sebagai berikut:

1. Perhitungan rata-rata dan standar deviasi dari data duplo/triplo
2. Uji kesesuaian model (R^2) pada isoterm dan kinetika
3. Analisis tren grafik antara:
 - Konsentrasi vs efisiensi
 - Waktu vs kapasitas adsorpsi
 - pH vs efisiensi
4. Identifikasi anomali data

Data yang menunjukkan penyimpangan signifikan dianalisis lebih lanjut untuk mengetahui kemungkinan kesalahan eksperimen atau fenomena khusus (misalnya desorpsi atau saturasi adsorben).

3.5.5. Pengolahan Data Menggunakan Software

Data hasil penelitian diolah menggunakan software seperti:

1. Microsoft Excel untuk perhitungan dasar dan grafik

2. Microsoft Word untuk penulisan laporan
3. Software Originlab untuk analisis grafik FTIR

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Gambaran Umum Hasil Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja bio-membran berbasis serat bambu sebagai adsorben dalam menyerap logam berat kadmium (Cd^{2+}) dari larutan sintetis serta air lindi sebagai sampel nyata. Fokus utama penelitian terletak pada kemampuan adsorpsi bio-membran yang dipengaruhi oleh beberapa parameter operasional, yaitu pH larutan, massa adsorben, waktu kontak, dan konsentrasi awal logam. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk memahami karakteristik fisik dan kimia adsorben serta mekanisme interaksi yang terjadi selama proses adsorpsi.

Tahapan penelitian diawali dengan preparasi bio-membran melalui proses perlakuan kimia yang bertujuan untuk meningkatkan jumlah dan aktivitas situs aktif pada permukaan adsorben. Hasil preparasi kemudian dikarakterisasi menggunakan analisis *Fourier Transform Infrared* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang berperan dalam proses adsorpsi, serta *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengamati morfologi permukaan dan struktur pori adsorben. Karakterisasi ini menjadi dasar dalam menjelaskan hubungan antara sifat material dengan performa adsorpsinya.

Selanjutnya, pengujian kinerja adsorpsi dilakukan secara batch dengan variasi parameter yang telah ditentukan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan kondisi operasi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi penyerapan Cd^{2+} . Secara umum, peningkatan massa adsorben dan waktu kontak cenderung meningkatkan jumlah logam yang teradsorpsi, sedangkan pH dan konsentrasi awal menentukan mekanisme interaksi serta kapasitas maksimum adsorpsi. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan parameter kapasitas adsorpsi (q_e) dan efisiensi penurunan konsentrasi persen (%) removal sebagai indikator utama keberhasilan proses.

Untuk memahami lebih lanjut karakteristik sistem adsorpsi, data kesetimbangan dianalisis menggunakan model isoterm Langmuir dan Freundlich. Kedua model ini digunakan untuk menggambarkan pola

distribusi adsorbat pada permukaan adsorben serta menentukan jenis interaksi yang dominan, apakah bersifat monolayer pada permukaan homogen atau multilayer pada permukaan heterogen. Hasil analisis isoterm ini juga memberikan gambaran mengenai kapasitas maksimum adsorpsi dan intensitas interaksi antara Cd^{2+} dan bio-membran.

Pada tahap akhir, bio-membran diaplikasikan pada air lindi untuk mengevaluasi kinerjanya dalam kondisi nyata yang lebih kompleks. Hasil pengujian menunjukkan adanya perbedaan efisiensi adsorpsi dibandingkan dengan larutan sintesis, yang disebabkan oleh keberadaan berbagai ion dan senyawa lain dalam air lindi yang dapat berkompetisi dalam proses adsorpsi. Meskipun demikian, bio-membran tetap menunjukkan potensi yang baik dalam menurunkan konsentrasi Cd^{2+} , sehingga dapat dipertimbangkan sebagai alternatif material adsorben yang ramah lingkungan dan aplikatif dalam pengolahan limbah cair.

4.2. Hasil Preparasi Adsorben

Hasil preparasi adsorben menunjukkan bahwa bio-membran berbasis serat bambu berhasil terbentuk dengan karakteristik fisik yang cukup baik dan mampu mempertahankan bentuk lembarannya setelah melalui seluruh tahapan preparasi. Secara visual, serat bambu yang digunakan sebagai bahan baku memiliki tekstur berserat halus dengan warna cokelat muda alami. Serat yang telah dipreparasi menunjukkan ukuran yang relatif homogen sehingga mempermudah proses pembentukan bio-membran. Bentuk visual serat bambu sebagai berikut.



Gambar 4. 1. Bentuk Visual Serat bambu
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026.

Pada tahap pencetakan lembaran, bio-membran yang dihasilkan tampak memiliki struktur yang menyatu dan cukup merata. Ikatan antarserat terlihat mampu membentuk lapisan menyerupai kertas dengan tingkat kepadatan yang cukup baik. Selain itu, permukaan bio-membran menunjukkan distribusi serat yang relatif homogen meskipun masih terdapat beberapa serat halus yang tampak pada bagian permukaan. Bentuk visual pencetakan bio-membran sebagai berikut.



Gambar 4. 2. Pencetakan Lembaran Bio-Membran

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026.

Setelah terbentuk menjadi lembaran, bio-membran kemudian mengalami proses aktivasi. Secara visual, bio-membran setelah aktivasi menunjukkan perubahan karakteristik berupa struktur yang lebih padat dan kompak dibandingkan sebelum proses aktivasi dilakukan. Hal ini mengindikasikan bahwa perlakuan aktivasi memberikan pengaruh terhadap kestabilan dan kekuatan struktur bio-membran. Bentuk visual proses aktivasi bio-membran sebagai berikut.



Gambar 4. 3. Proses Aktivasi Bio-Membran

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026.

Tahap selanjutnya yaitu proses pemanasan bio-membran. Setelah dilakukan pemanasan, bio-membran mengalami perubahan warna menjadi cokelat muda kekuningan dengan tekstur yang lebih kaku dan stabil. Struktur lembaran tetap terjaga tanpa mengalami kerusakan yang signifikan sehingga bio-membran dapat digunakan pada tahap pengujian adsorpsi. Bentuk visual pemanasan bio-membran sebagai berikut.



Gambar 4. 4. Proses Pemanasan Lembaran Bio-Membran

Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026.

Secara keseluruhan, hasil preparasi menghasilkan adsorben berbentuk lembaran bio-membran dengan karakteristik fisik yang cukup baik, yaitu memiliki bentuk yang utuh, permukaan relatif homogen, serta struktur yang stabil. Bio-membran yang dihasilkan juga menyerupai lembaran kertas tipis dengan susunan serat yang saling terikat membentuk struktur padat. Bentuk visual bio-membran teraktivasi asam sitrat sebagai berikut.



Gambar 4. 5. Bentuk Visual Lembaran Bio-Membran

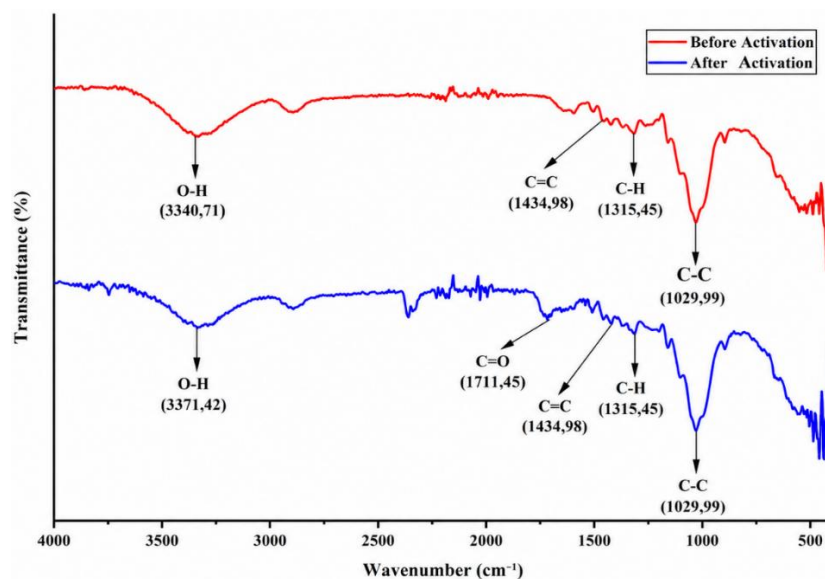
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026.

4.3. Karakteristik Adsorben

4.3.1. Karakteristik Kimia

Untuk mengidentifikasi perubahan karakteristik kimia permukaan bio-membran akibat proses aktivasi, dilakukan analisis menggunakan metode *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Analisis FTIR ini bertujuan untuk mengidentifikasi jenis gugus fungsi yang terdapat pada permukaan adsorben, serta untuk mengetahui perubahan yang terjadi setelah perlakuan aktivasi kimia. Perubahan gugus fungsi ini menjadi aspek penting karena berkaitan langsung dengan peningkatan sifat aktif permukaan adsorben dalam mengikat ion logam, khususnya Cd^{2+} , melalui mekanisme interaksi kimia seperti ikatan elektrostatis dan kompleksasi.

Selain itu, analisis FTIR juga digunakan untuk membandingkan karakteristik spektrum antara bio-membran sebelum dan sesudah aktivasi, sehingga dapat diketahui efektivitas proses aktivasi dalam memodifikasi struktur kimia permukaan. Dengan demikian, hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah dalam menjelaskan peningkatan kinerja adsorpsi yang diperoleh pada pengujian sebelumnya. Hasil spektrum FTIR bio-membran sebelum dan sesudah aktivasi selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik, sebagai berikut.



Gambar 4. 6. Grafik FTIR Adsorben Sebelum dan Sesudah Aktivasi

Sumber: Data Primer, 2026

Gambar 4.6, menunjukkan spektrum *Fourier Transform Infrared* (FTIR) bio-membran berbasis bambu sebelum dan sesudah proses aktivasi menggunakan asam. Secara umum, kedua spektrum memperlihatkan pola serapan yang relatif serupa, namun terdapat beberapa pergeseran bilangan gelombang serta perubahan intensitas puncak yang mengindikasikan adanya modifikasi struktur kimia permukaan akibat proses aktivasi.

Pada daerah bilangan gelombang tinggi (sekitar 3300 cm^{-1}), terlihat pita serapan yang cukup lebar yang berkaitan dengan gugus hidroksil (-OH). Setelah aktivasi, puncak ini mengalami sedikit pergeseran dari $3340,71\text{ cm}^{-1}$ menjadi $3321,42\text{ cm}^{-1}$, yang menunjukkan adanya perubahan lingkungan kimia gugus -OH akibat interaksi dengan agen aktivator. Selain itu, pada spektrum sesudah aktivasi muncul pita baru pada sekitar $1711,45\text{ cm}^{-1}$ yang mengindikasikan keberadaan gugus karbonil (C=O), yang tidak terdeteksi secara signifikan pada kondisi sebelum aktivasi.

Perubahan lainnya juga terlihat pada daerah sidik jari (*fingerprint region*), khususnya pada pita serapan yang berkaitan dengan ikatan C=C , C-H , dan C-C , yang menunjukkan adanya reorganisasi struktur lignoselulosa akibat proses aktivasi. Untuk memperjelas identifikasi gugus fungsi yang terdeteksi. Daerah bilangan gelombang $1500\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ dikenal sebagai *fingerprint region* (daerah sidik jari), yang memiliki pola serapan khas untuk setiap material. Perubahan intensitas dan bentuk puncak pada daerah ini menunjukkan adanya modifikasi struktur kimia bio-membran akibat proses aktivasi, khususnya pada ikatan C=C , C-H , dan C-C yang berkaitan dengan komponen lignoselulosa. Hasil analisis FTIR tersebut kemudian dirangkum dalam bentuk tabel sebagai berikut.

Tabel 4. 1. Interpretasi FTIR Adsorben Sebelum dan Sesudah Aktivasi

Bilangan Gelombang (cm^{-1})	Gugus Fungsi	Sebelum Aktivasi (Merah)	Sesudah Aktivasi (Biru)	Interpretasi
$3340,71 \rightarrow 3321,42$	-OH (Hidroksil)	Ada (lebih lebar)	Ada (bergeser & lebih tajam)	Peningkatan gugus -OH akibat aktivasi

1711,45	C=O (Karbonil/- COOH)	Tidak tampak	Muncul jelas	Indikasi terbentuknya gugus karboksilat
1434,98	C=C (Aromatik)	Ada	Ada	Struktur karbon tetap stabil
1315,45	C-H Bending	Ada	Ada	Perubahan intensitas akibat aktivasi
1029,99	C-O / C-C (Selulosa)	Sangat kuat	Melemah	Indikasi perubahan struktur selulosa dan pembukaan pori

Sumber: Data Primer, 2026.

Berdasarkan Tabel 4.1, dapat diketahui bahwa bio-membran sebelum aktivasi didominasi oleh gugus fungsi khas material lignoselulosa, seperti gugus hidroksil (-OH), ikatan rangkap karbon (C=C), serta ikatan C-H dan C-C . Gugus -OH yang muncul pada bilangan gelombang sekitar $3340,71\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan keberadaan komponen selulosa dan hemiselulosa yang bersifat hidrofilik.

Setelah proses aktivasi, terjadi beberapa perubahan penting pada gugus fungsi. Pergeseran pita -OH menjadi $3321,42\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan peningkatan interaksi hidrogen atau perubahan kekuatan ikatan akibat proses aktivasi asam. Selain itu, munculnya gugus karbonil (C=O) pada bilangan gelombang $1711,45\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan bahwa proses aktivasi berhasil memperkenalkan gugus fungsi baru pada permukaan adsorben, yang umumnya berasal dari oksidasi parsial struktur biomassa.

Keberadaan gugus -OH dan C=O ini sangat penting dalam proses adsorpsi, karena kedua gugus tersebut berperan sebagai situs aktif dalam mengikat ion logam, termasuk Cd^{2+} , melalui mekanisme interaksi elektrostatik maupun pembentukan kompleks (kompleksasi). Sementara itu, keberadaan gugus C=C dan C-C menunjukkan bahwa struktur dasar karbon

dari biomassa masih tetap terjaga setelah aktivasi, sehingga memberikan kestabilan struktur pada bio-membran.

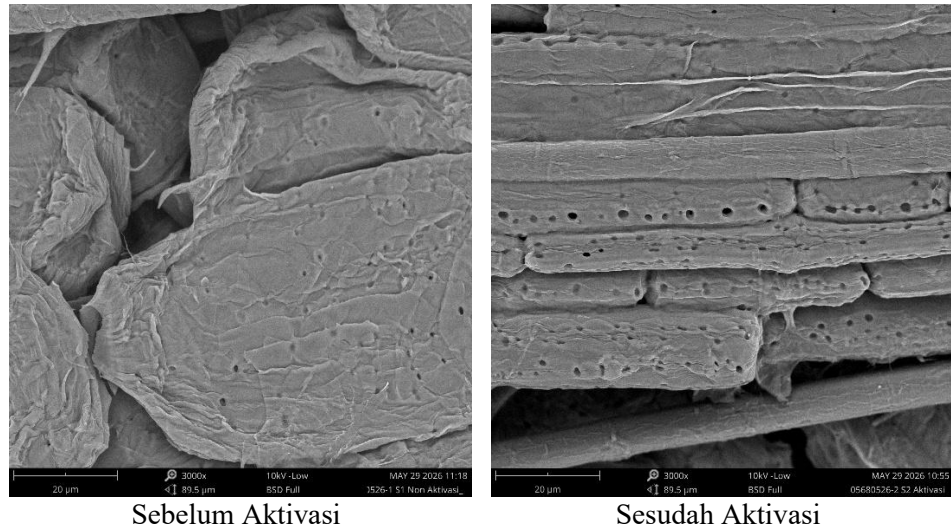
Dengan demikian, hasil analisis FTIR ini membuktikan bahwa proses aktivasi tidak hanya meningkatkan jumlah gugus fungsi aktif di permukaan bio-membran, tetapi juga memodifikasi karakter kimia permukaan sehingga lebih reaktif terhadap ion logam. Hal ini sejalan dengan peningkatan kinerja adsorpsi yang diperoleh pada pengujian sebelumnya, di mana efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi menunjukkan nilai yang tinggi pada kondisi optimum.

4.3.2. Karakteristik Morfologi

Karakterisasi morfologi dilakukan untuk mengamati perubahan struktur permukaan bio-membran serat bambu sebelum dan sesudah proses aktivasi menggunakan asam sitrat. Analisis ini dilakukan menggunakan metode Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk memperoleh informasi mengenai bentuk permukaan, distribusi pori, tingkat kekasaran, serta perubahan struktur mikro yang terjadi akibat perlakuan aktivasi. Karakteristik morfologi merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi kinerja adsorben karena berkaitan langsung dengan luas permukaan dan ketersediaan situs aktif yang berperan dalam proses adsorpsi ion logam berat Cd^{2+} . Semakin berkembang struktur pori dan semakin kasar permukaan adsorben, maka peluang terjadinya interaksi antara adsorben dan adsorbat akan semakin besar.

Selain analisis morfologi menggunakan SEM, karakterisasi unsur penyusun bio-membran dilakukan menggunakan Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX). Analisis EDX bertujuan untuk mengidentifikasi komposisi unsur yang terdapat pada permukaan bio-membran serta mengevaluasi perubahan kandungan unsur setelah proses aktivasi. Informasi mengenai komposisi unsur sangat penting untuk mendukung hasil karakterisasi FTIR dan SEM dalam menjelaskan mekanisme adsorpsi yang terjadi. Hasil pengamatan SEM dan analisis EDX pada bio-membran serat

bambu sebelum dan sesudah aktivasi disajikan pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.



Gambar 4. 7. Visual Permukaan Adsorben Pembesaran 3000x

Sumber: Data Primer, 2026.

Hasil karakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan bahwa proses aktivasi menggunakan asam sitrat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap morfologi permukaan bio-membran serat bambu. Perbandingan citra SEM sebelum dan sesudah aktivasi yang disajikan pada Gambar 4.7, memperlihatkan adanya perubahan struktur permukaan yang berkaitan erat dengan peningkatan potensi adsorpsi material. Pada kondisi sebelum aktivasi, permukaan bio-membran masih didominasi oleh susunan serat yang relatif padat, kompak, dan saling bertumpuk. Permukaan serat tampak lebih halus dengan jumlah pori yang terbatas, sementara sebagian rongga masih tertutupi oleh komponen non-selulosa seperti lignin, hemiselulosa dan senyawa ekstraktif lainnya. Keberadaan lapisan tersebut menyebabkan struktur serat cenderung membentuk agregat sehingga akses menuju pori internal menjadi terbatas. Kondisi ini mengindikasikan bahwa luas permukaan efektif adsorben masih relatif rendah dan jumlah situs aktif yang tersedia untuk berinteraksi dengan ion logam berat belum berkembang secara optimal.

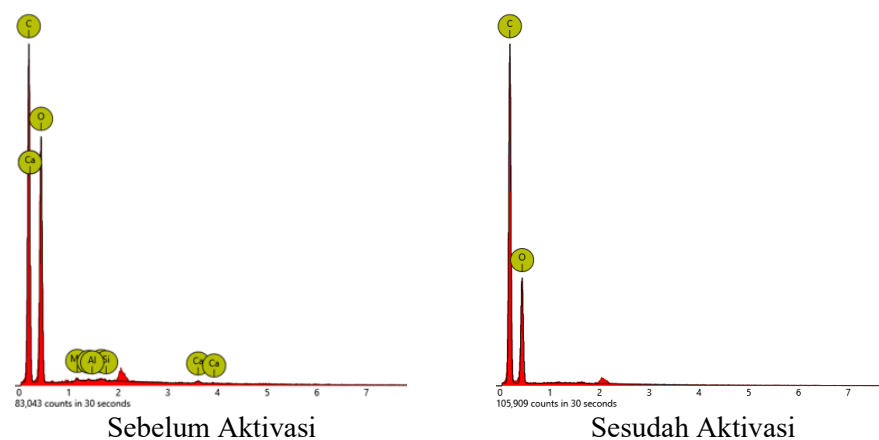
Setelah dilakukan aktivasi menggunakan asam sitrat, terjadi perubahan morfologi yang cukup nyata yang ditandai dengan munculnya pori-pori mikro pada permukaan serat serta meningkatnya tingkat kekasaran permukaan bio-membran. Struktur serat yang sebelumnya tampak rapat menjadi lebih terbuka dengan distribusi pori yang lebih banyak dan diameter pori yang relatif lebih besar dibandingkan sampel sebelum aktivasi. Selain itu, permukaan serat menunjukkan tekstur yang lebih tidak beraturan disertai adanya indikasi erosi ringan pada lapisan luar serat. Perubahan ini mengindikasikan bahwa proses aktivasi berhasil melarutkan dan menghilangkan sebagian fraksi amorf, terutama hemiselulosa, ekstraktif, serta komponen pengotor lain yang sebelumnya menutupi permukaan biomaterial. Hilangnya lapisan penghalang tersebut menyebabkan terbukanya jalur difusi menuju bagian internal adsorben dan meningkatkan aksesibilitas adsorbat terhadap situs-situs aktif yang terdapat pada matriks serat bambu.

Peningkatan porositas yang ditunjukkan oleh terbentuknya pori-pori baru setelah aktivasi merupakan faktor penting yang mendukung kinerja adsorpsi bio-membran. Semakin berkembangnya struktur pori akan memperbesar luas permukaan spesifik sehingga area kontak antara adsorben dan ion Cd^{2+} menjadi lebih luas. Kondisi ini memungkinkan lebih banyak ion logam untuk teradsorpsi melalui mekanisme interaksi fisik maupun kimia pada permukaan adsorben. Di sisi lain, peningkatan kekasaran permukaan juga berkontribusi terhadap bertambahnya jumlah lokasi potensial yang dapat berfungsi sebagai situs adsorpsi. Dengan demikian, asam sitrat tidak hanya berperan sebagai agen aktivasi kimia yang membersihkan permukaan material, tetapi juga sebagai agen modifikasi yang mampu merekayasa struktur morfologi bio-membran menjadi lebih poros dan reaktif.

Secara keseluruhan, hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa aktivasi asam sitrat berhasil meningkatkan kualitas permukaan bio-membran serat bambu melalui pembentukan pori baru, peningkatan

kekasaran permukaan, serta terbukanya struktur internal material. Perubahan morfologi tersebut memberikan indikasi kuat bahwa bio-membran teraktivasi memiliki luas permukaan dan jumlah situs aktif yang lebih besar dibandingkan bio-membran tanpa aktivasi. Oleh karena itu, bio-membran hasil aktivasi diperkirakan memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih tinggi terhadap ion logam berat kadmium (Cd^{2+}), sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi penyisihan logam berat pada proses pengolahan air lindi.

Untuk memperkuat interpretasi hasil karakterisasi morfologi, dilakukan analisis komposisi unsur menggunakan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX). Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan kandungan unsur pada permukaan bio-membran yang terjadi akibat proses aktivasi asam sitrat. Informasi mengenai komposisi unsur menjadi penting karena keberhasilan aktivasi tidak hanya ditunjukkan oleh terbentuknya struktur pori yang lebih berkembang, tetapi juga oleh berkurangnya kandungan pengotor anorganik serta meningkatnya dominasi unsur-unsur penyusun utama biomaterial. Dengan demikian, hasil EDX dapat digunakan untuk mengonfirmasi efektivitas proses aktivasi dan menjelaskan keterkaitannya dengan peningkatan potensi adsorpsi bio-membran terhadap ion kadmium dalam air lindi. Grafik EDX disajikan pada Gambar 4.8, sebagai berikut.



Gambar 4. 8. Grafik EDX Adsorben

Sumber: Data Primer, 2026.

Hasil analisis EDX menunjukkan bahwa bio-membran sebelum aktivasi didominasi oleh unsur karbon (C) dan oksigen (O) dengan konsentrasi berat masing-masing sebesar 47,90% dan 51,48%. Selain kedua unsur utama tersebut, masih terdeteksi keberadaan unsur mineral lain dalam jumlah kecil, yaitu kalsium (Ca) sebesar 0,30%, magnesium (Mg) sebesar 0,18%, silikon (Si) sebesar 0,08%, dan aluminium (Al) sebesar 0,05%. Keberadaan unsur-unsur mineral tersebut mengindikasikan bahwa permukaan bio-membran masih mengandung pengotor anorganik yang berasal dari proses biosintesis internal tanaman selama masa pertumbuhannya. Sebagai material berbasis biomassa, jaringan serat tanaman menyerap unsur-unsur tersebut secara biologis dari dalam tanah sebagai nutrisi esensial, di mana Ca berperan dalam kekokohan dinding sel, Mg merupakan inti klorofil, serta Si bertindak sebagai akumulator silika untuk kekuatan mekanis batang. Selain itu, kemunculan mineral tersebut juga mengindikasikan adanya sisa partikel tanah atau debu silikat lingkungan yang terperangkap erat di dalam pori-pori mikroskopis permukaan material sebelum dilakukan proses pengarangan. Kondisi ini sejalan dengan hasil SEM yang menunjukkan permukaan serat masih relatif padat dan sebagian pori tertutup oleh lapisan material non-selulosa.

Setelah proses aktivasi menggunakan asam sitrat, hasil EDX menunjukkan perubahan komposisi unsur yang cukup jelas. Unsur-unsur mineral seperti Ca, Mg, Si, dan Al tidak lagi terdeteksi pada permukaan bio-membran, sedangkan unsur karbon dan oksigen tetap menjadi komponen dominan dengan konsentrasi berat masing-masing sebesar 47,86% dan 52,14%. Hilangnya unsur-unsur mineral tersebut menunjukkan bahwa proses aktivasi berhasil membersihkan permukaan biomaterial dari senyawa anorganik dan komponen pengotor yang sebelumnya menutupi permukaan serat. Selain itu, peningkatan kandungan oksigen setelah aktivasi mengindikasikan adanya peningkatan gugus fungsi yang mengandung oksigen, seperti gugus hidroksil (-OH) dan karboksilat (-COOH), yang

berpotensi berperan sebagai situs aktif dalam proses adsorpsi ion logam berat.

Peningkatan kandungan oksigen yang disertai dengan hilangnya unsur-unsur pengotor menunjukkan bahwa asam sitrat tidak hanya berfungsi sebagai agen pembersih permukaan (*surface cleaning agent*), tetapi juga sebagai agen modifikasi kimia yang mampu meningkatkan karakteristik adsorben. Hasil ini konsisten dengan visual SEM yang memperlihatkan terbentuknya pori-pori baru dan meningkatnya kekasaran permukaan setelah aktivasi. Hilangnya lapisan pengotor yang terkonfirmasi melalui EDX diduga menjadi penyebab terbukanya struktur pori yang sebelumnya tertutup, sehingga menghasilkan permukaan yang lebih poros dan memiliki luas permukaan spesifik yang lebih besar. Kondisi tersebut sangat menguntungkan dalam proses adsorpsi karena meningkatkan aksesibilitas ion Cd^{2+} terhadap situs aktif yang tersedia pada bio-membran.

Untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai pengaruh aktivasi asam sitrat terhadap karakteristik bio-membran, hasil analisis EDX dibandingkan antara sampel sebelum dan sesudah aktivasi. Data ini memberikan informasi mengenai perubahan kandungan unsur yang berkontribusi terhadap peningkatan kualitas permukaan adsorben. Ringkasan hasil analisis komposisi unsur bio-membran berdasarkan pengujian EDX disajikan pada Tabel 4.2, sebagai berikut.

Tabel 4. 2. Perbandingan Komposisi Unsur Adsorben Berdasarkan EDX

Unsur	Sebelum Aktivasi (% Berat)	Sesudah Aktivasi (% Berat)	Perubahan
Oksigen (O)	51,48	52,14	Meningkat
Karbon (C)	47,90	47,86	Relatif tetap
Kalsium (Ca)	0,30	Tidak terdeteksi	Hilang
Magnesium (Mg)	0,18	Tidak terdeteksi	Hilang
Silikon (Si)	0,08	Tidak terdeteksi	Hilang
Aluminium (Al)	0,05	Tidak terdeteksi	Hilang

Sumber: Data Primer, 2026

Berdasarkan hasil analisis EDX pada Tabel 4.2, bio-membran sebelum aktivasi didominasi oleh unsur karbon (C) sebesar 47,90% dan oksigen (O) sebesar 51,48%, serta masih mengandung sejumlah unsur mineral seperti Ca, Mg, Si, dan Al dalam jumlah kecil. Setelah aktivasi menggunakan asam sitrat, unsur-unsur mineral tersebut tidak lagi terdeteksi, sementara kandungan oksigen meningkat menjadi 52,14% dan karbon relatif tetap pada 47,86%. Hilangnya unsur-unsur pengotor tersebut menunjukkan bahwa proses aktivasi berhasil membersihkan permukaan bio-membran dan meningkatkan kemurnian material. Peningkatan kandungan oksigen mengindikasikan adanya peningkatan gugus fungsi yang mengandung oksigen, seperti hidroksil (-OH) dan karboksilat (-COOH), yang berperan sebagai situs aktif dalam proses adsorpsi. Hasil ini sejalan dengan pengamatan SEM yang menunjukkan terbentuknya pori-pori baru, meningkatnya kekasaran permukaan, dan terbukanya struktur serat setelah aktivasi.

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi SEM dan EDX menunjukkan bahwa aktivasi asam sitrat berhasil memperbaiki karakteristik fisik maupun kimia bio-membran serat bambu. Secara fisik, aktivasi menghasilkan struktur yang lebih poros dan kasar, sedangkan secara kimia ditunjukkan oleh berkurangnya kandungan unsur pengotor serta meningkatnya dominasi unsur oksigen pada permukaan adsorben. Sinergi antara peningkatan porositas dan bertambahnya gugus fungsi aktif tersebut diperkirakan menjadi faktor utama yang mendukung peningkatan kemampuan adsorpsi bio-membran terhadap ion logam berat kadmium (Cd^{2+}).

4.4. Kinerja Adsorpsi Adsorben

Kinerja adsorpsi bio-membran dalam menyerap ion kadmium (Cd^{2+}) dianalisis melalui serangkaian pengujian dengan variasi parameter operasional, meliputi massa adsorben, pH larutan, waktu kontak, dan konsentrasi awal. Evaluasi kinerja dilakukan dengan menggunakan dua parameter utama, yaitu kapasitas adsorpsi (q_e) dan efisiensi penurunan konsentrasi (% removal). Kedua parameter ini memberikan gambaran

kuantitatif mengenai kemampuan bio-membran dalam mengikat dan menghilangkan ion logam dari larutan.

Secara umum, hasil pengujian menunjukkan bahwa bio-membran berbasis serat bambu memiliki kemampuan adsorpsi yang cukup baik terhadap Cd^{2+} . Hal ini ditunjukkan oleh adanya peningkatan nilai q_e dan efisiensi adsorpsi pada kondisi tertentu yang mendukung, seperti peningkatan waktu kontak dan massa adsorben. Namun demikian, setiap parameter memiliki pengaruh yang berbeda terhadap mekanisme dan kapasitas adsorpsi, sehingga perlu dianalisis secara lebih rinci untuk memahami kondisi optimum proses.

Pada setiap variasi perlakuan, digunakan *orbital shaker* dalam metode batch dengan kecepatan pengadukan 150 rpm. Volume larutan yang digunakan adalah 50 mL, dengan konsentrasi Cd^{2+} yang disesuaikan pada masing-masing perlakuan. Setelah proses pengujian selesai, setiap sampel dianalisis menggunakan instrumen *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS), dengan pengenceran yang disesuaikan terhadap karakteristik masing-masing variasi. Penelitian ini menerapkan metode triplo (tiga kali pengulangan) pada setiap variasi untuk meningkatkan akurasi, presisi, dan reliabilitas data yang diperoleh. Selain itu, pada setiap pengulangan digunakan larutan kontrol sebagai pembanding untuk memastikan validitas hasil pengujian. Data yang disajikan pada setiap variasi merupakan nilai rata-rata dari hasil pengulangan (triplo), yang bertujuan untuk meningkatkan akurasi dan presisi, mengurangi pengaruh kesalahan acak, serta menghasilkan data yang lebih representatif dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Analisis data pada setiap variasi disajikan sebagai berikut.

4.4.1. Massa Adsorben

Variasi massa adsorben dilakukan untuk menentukan massa optimum yang menghasilkan kinerja adsorpsi paling efektif, yang ditinjau berdasarkan efisiensi penyisihan (*removal efficiency*) dan kapasitas adsorpsi (q_e), serta untuk memahami pengaruh perubahan massa adsorben terhadap proses penjerapan ion Cd^{2+} dalam sistem. Pada variasi ini, digunakan larutan

sebanyak 50 mL dengan konsentrasi Cd^{2+} sebesar 10 ppm. Bio-membran siap pakai kemudian ditimbang ke dalam beberapa variasi massa, yaitu 25, 50, 100, 200, dan 300 mg. Masing-masing massa adsorben selanjutnya dimasukkan ke dalam erlenmeyer yang berisi 50 mL larutan Cd^{2+} 10 ppm untuk setiap perlakuan. Data di setiap massa dapat dilihat pada tabel di bawah ini sebagai berikut.

Tabel 4. 3. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Massa

Variasi Massa (mg)	Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Akhir (ppm)	Persen Removal (%)	pH Awal	pH Akhir	Kapasitas Adsorpsi (qe) (mg/g)
25	9,33	4,68	49,78	7	7	9,29
50	9,33	3,77	59,54	7	7	5,56
75	9,33	2,58	71,70	7	7	4,50
100	9,33	1,97	78,59	7	7	3,68
200	9,33	1,44	84,21	7	7	1,97

Sumber: Data Primer, 2026.

Berdasarkan Tabel 4.3, hasil uji adsorpsi menunjukkan bahwa variasi massa adsorben memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja penyisihan ion Cd^{2+} dalam larutan. Pada kondisi konsentrasi awal yang relatif konstan, yaitu sebesar 9,33 ppm, peningkatan massa adsorben dari 25 mg hingga 200 mg menyebabkan terjadinya penurunan konsentrasi akhir secara bertahap, dari 4,68 ppm menjadi 1,44 ppm. Penurunan konsentrasi akhir ini mengindikasikan bahwa semakin besar massa adsorben yang digunakan, semakin banyak ion Cd^{2+} yang dapat diserap dari larutan.

Sejalan dengan hal tersebut, nilai efisiensi penyisihan (*removal efficiency*) juga mengalami peningkatan yang cukup signifikan, yaitu dari 49,78% pada massa 25 mg, meningkat menjadi 59,54% (50 mg), 71,70% (75 mg), 78,59% (100 mg), hingga mencapai 84,21% pada massa 200 mg. Peningkatan efisiensi ini menunjukkan bahwa penambahan massa adsorben berbanding lurus dengan jumlah situs aktif yang tersedia, sehingga peluang terjadinya interaksi antara ion Cd^{2+} dan permukaan adsorben menjadi semakin besar.

Namun demikian, jika ditinjau dari kapasitas adsorpsi (qe), terlihat adanya kecenderungan yang berlawanan, di mana nilai qe justru mengalami

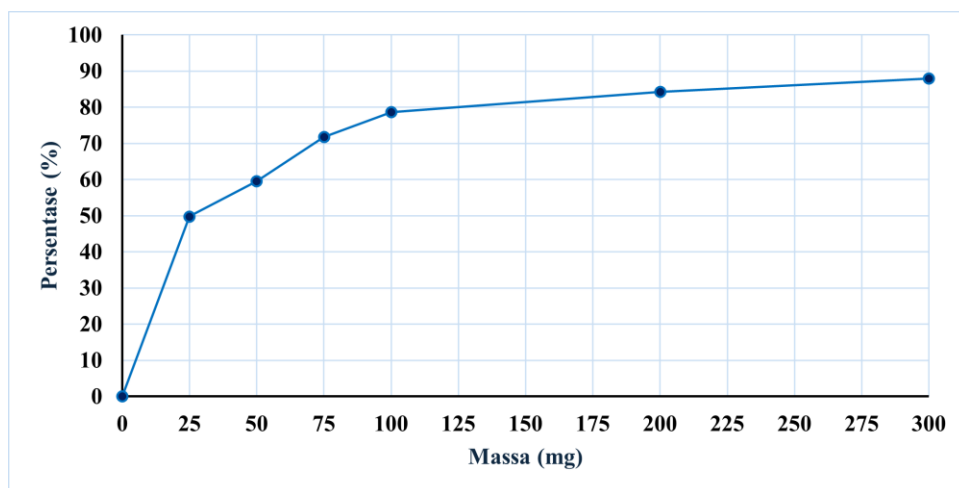
penurunan seiring dengan bertambahnya massa adsorben. Nilai kapasitas adsorpsi tercatat sebesar 9,29 mg/g pada massa 25 mg, kemudian menurun menjadi 5,56 mg/g (50 mg), 4,50 mg/g (75 mg), 3,68 mg/g (100 mg), hingga mencapai 1,97 mg/g pada massa 200 mg. Penurunan ini menunjukkan bahwa pada massa adsorben yang lebih besar, tidak seluruh situs aktif dapat dimanfaatkan secara optimal akibat jumlah ion Cd^{2+} yang terbatas dalam larutan, sehingga terjadi ketidakseimbangan antara jumlah adsorben dan adsorbat.

Tren peningkatan efisiensi penyisihan kation Cd^{2+} seiring dengan bertambahnya massa bio-membran ini sejalan dengan fenomena yang dilaporkan dalam penelitian terdahulu [68]. Peningkatan dosis adsorben berbasis biomassa bambu secara signifikan memperluas total luas permukaan efektif serta melipatgandakan jumlah situs aktif yang tersedia dalam sistem. Namun, penurunan kapasitas adsorpsi (q_e) per satuan berat yang terjadi pada penelitian ini dari 9,29 mg/g turun menjadi 1,97 mg/g mengonfirmasi temuan yang menyatakan bahwa pada dosis adsorben yang terlalu tinggi, terjadi ketidakseimbangan stoikiometri antara jumlah ion logam penjerap dengan kapasitas ruang ikat bebas [68]. Redundansi atau tumpang tindih (*overlapping*) situs aktif pada bio-membran dengan massa tinggi memicu aglomerasi struktur selulosa, sehingga menurunkan rasio pemanfaatan kapasitas situs secara spesifik.

Selain itu, kemungkinan terjadinya *aglomerasi* partikel adsorben pada massa yang lebih tinggi juga dapat menyebabkan penurunan luas permukaan efektif, sehingga mengurangi kemampuan adsorpsi per satuan massa. Dengan demikian, meskipun efisiensi penyisihan meningkat, efektivitas penggunaan adsorben secara spesifik justru menurun.

Berdasarkan hasil tersebut, massa 75 mg menunjukkan kinerja yang relatif optimal dengan efisiensi penyisihan sebesar 71,70% dan kapasitas adsorpsi sebesar 4,50 mg/g. Pada kondisi ini, terjadi keseimbangan antara jumlah situs aktif yang tersedia dan jumlah ion Cd^{2+} dalam larutan, sehingga proses adsorpsi berlangsung secara lebih efektif dan efisien. Oleh karena itu,

massa 75 mg dapat ditetapkan sebagai massa adsorben optimum dalam penelitian ini. Untuk memperjelas, data pada Tabel 4.3, ditampilkan dalam bentuk grafik sebagai berikut.



Gambar 4. 9. Grafik Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Massa

Sumber: Data Primer, 2026.

Grafik di atas menunjukkan bahwa peningkatan massa adsorben memberikan pengaruh positif terhadap efisiensi penyisihan, yang ditunjukkan oleh tren kurva yang meningkat seiring bertambahnya massa adsorben.

Pada rentang massa awal, yaitu dari 25 mg hingga 75 mg, terlihat adanya peningkatan efisiensi penyisihan yang cukup signifikan, dari 49,78% menjadi 71,70%. Peningkatan yang tajam pada rentang ini mengindikasikan bahwa penambahan massa adsorben secara langsung meningkatkan jumlah situs aktif yang tersedia, sehingga memperbesar peluang interaksi antara ion Cd^{2+} dan permukaan adsorben. Dengan demikian, proses adsorpsi berlangsung lebih efektif pada tahap ini.

Namun demikian, setelah massa adsorben mencapai 75 mg, kurva grafik mulai menunjukkan kecenderungan melandai. Peningkatan efisiensi penyisihan pada massa yang lebih tinggi, yaitu 100 mg dan 200 mg, masih terjadi, tetapi tidak signifikan, masing-masing hanya meningkat menjadi 78,59% dan 84,21%. Fenomena ini menunjukkan bahwa sistem mulai mengalami kondisi penurunan efisiensi tambahan (*diminishing return*), di

mana penambahan massa adsorben tidak lagi diikuti oleh peningkatan kinerja adsorpsi yang sebanding.

Kondisi tersebut dapat dijelaskan oleh keterbatasan jumlah ion Cd^{2+} dalam larutan dibandingkan dengan jumlah situs aktif yang tersedia pada adsorben. Akibatnya, sebagian situs aktif tidak terisi secara optimal. Selain itu, pada massa adsorben yang lebih besar, terdapat kemungkinan terjadinya aglomerasi partikel yang dapat mengurangi luas permukaan efektif dan menghambat difusi ion Cd^{2+} ke dalam pori-pori adsorben. Hal ini sejalan dengan penurunan nilai kapasitas adsorpsi (q_e) yang telah dijelaskan sebelumnya pada Tabel 4.3.

Dengan demikian, berdasarkan tren grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.9, serta didukung oleh data pada Tabel 4.3, dapat disimpulkan bahwa massa adsorben 75 mg merupakan kondisi optimum. Pada titik ini, peningkatan efisiensi penyisihan masih signifikan dan pemanfaatan situs aktif adsorben berlangsung secara relatif optimal sebelum terjadi kecenderungan penurunan efektivitas pada massa yang lebih tinggi.

4.4.2. *Potential of Hydrogen (pH)*

Variasi pH dilakukan untuk menentukan kondisi pH optimum yang menghasilkan kinerja adsorpsi paling efektif, yang ditinjau berdasarkan efisiensi penyisihan (*removal efficiency*) dan kapasitas adsorpsi (q_e), serta untuk memahami pengaruh perubahan pH terhadap proses penjerapan ion Cd^{2+} dalam sistem. Pada variasi ini, digunakan larutan sebanyak 50 mL dengan konsentrasi Cd^{2+} sebesar 10 ppm. Nilai pH larutan kemudian diatur ke dalam beberapa variasi, yaitu pH 3, 4, 5, 6, 7, dan 8, menggunakan larutan HNO_3 atau NaOH .

Selanjutnya, Bio-membran siap pakai ditambahkan dengan massa optimum yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya, yaitu 75 mg, ke dalam masing-masing erlenmeyer yang berisi 50 mL larutan Cd^{2+} 10 ppm pada setiap variasi pH. Proses adsorpsi dilakukan menggunakan orbital shaker dengan kecepatan pengadukan 150 rpm selama 120 menit. Setelah proses adsorpsi selesai, sampel dianalisis menggunakan instrumen (AAS)

dengan pengenceran 10 kali. Data pada setiap variasi pH kemudian dianalisis dan disajikan dalam bentuk tabel sebagai berikut.

Tabel 4. 4. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi pH

Variasi pH	Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Akhir (ppm)	Persen Removal (%)	pH Awal	pH Akhir	Kapasitas Adsorpsi (qe) (mg/g)
3	9,59	8,29	13,26	3	3	0,86
4	9,59	7,87	17,83	4	4	1,15
5	9,59	4,67	51,33	5	5	3,28
6	9,59	1,10	88,54	6	6	5,66
7	9,59	2,52	74,00	7	7	4,71
8	9,59	1,42	85,37	8	8	5,44

Sumber: Data Primer, 2026.

Berdasarkan Tabel 4.4, variasi pH memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja adsorpsi ion Cd^{2+} oleh bio-membran. Pada kondisi konsentrasi awal yang relatif konstan, yaitu sebesar 9,59 ppm, perubahan pH dari kondisi asam hingga basa menunjukkan pola peningkatan efisiensi penyisihan yang cukup jelas. Pada pH 3, efisiensi penyisihan masih rendah, yaitu sebesar 13,26% dengan kapasitas adsorpsi sebesar 0,86 mg/g. Nilai ini kemudian meningkat secara bertahap pada pH 4 menjadi 17,83% dan 1,15 mg/g, serta meningkat signifikan pada pH 5 menjadi 51,33% dengan kapasitas adsorpsi 3,28 mg/g.

Peningkatan paling signifikan terjadi pada pH 6, di mana efisiensi penyisihan mencapai 88,54% dengan kapasitas adsorpsi sebesar 5,66 mg/g, yang merupakan nilai tertinggi dibandingkan variasi pH lainnya. Namun demikian, pada pH 7, terjadi penurunan efisiensi penyisihan menjadi 74,00% dan kapasitas adsorpsi menjadi 4,71 mg/g. Selanjutnya, pada pH 8, efisiensi penyisihan kembali meningkat menjadi 85,37% dengan kapasitas adsorpsi sebesar 5,44 mg/g, meskipun nilainya masih sedikit lebih rendah dibandingkan kondisi optimum pada pH 6.

Capaian efisiensi penyisihan optimum pada pH 6 (88,54%) menunjukkan karakteristik adsorpsi fisikokimia yang sangat dipengaruhi oleh konsentrasi ion hidrogen di perairan. Karakteristik ini didukung kuat oleh pemodelan spesiasi kimia yang menegaskan bahwa ion Cd^{2+}

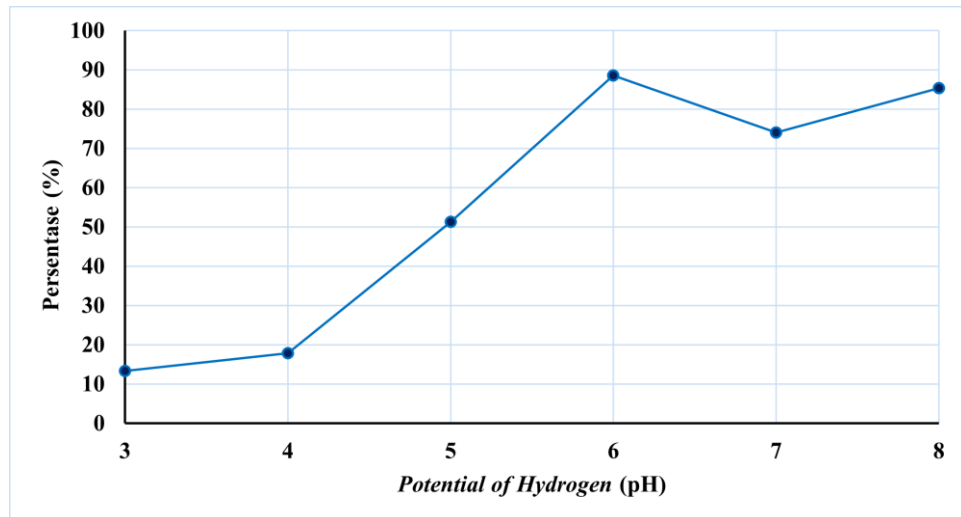
merupakan spesies divalen tunggal yang dominan berada dalam larutan pada kondisi $\text{pH} < 6,0$ [68]. Pada rentang asam kaku (pH 3–4), terjadi kompetisi elektrostatis yang sengit antara ion H^+ dan kation Cd^{2+} dalam memperebutkan gugus aktif permukaan bio-membran. Keberadaan gugus fungsi karboksilat ($-\text{COOH}$) hasil aktivasi asam sitrat pada bio-membran baru akan mengalami deprotonasi secara optimal menjadi gugus bermuatan negatif ($-\text{COO}^-$) ketika pH lingkungan dinaikkan mendekati netral (pH 6). Sinergi gaya tarik menarik elektrostatis inilah yang memicu lonjakan penyerapan. Lebih lanjut, fluktuasi minor pada pH 7 dan pH 8 terjadi karena sistem mulai memasuki batas ambang pembentukan endapan mikro kation hidroksida H^+ atau Cd^{2+} sebagaimana diuraikan dalam analisis termodinamika larutan logam berat.

Secara umum, peningkatan efisiensi adsorpsi seiring kenaikan pH dari kondisi asam menuju netral disebabkan oleh berkurangnya konsentrasi ion H^+ dalam larutan. Pada pH rendah, tingginya konsentrasi ion H^+ menyebabkan terjadinya kompetisi dengan ion Cd^{2+} dalam memperebutkan situs aktif pada permukaan adsorben, sehingga menghambat proses adsorpsi. Selain itu, pada kondisi asam, permukaan adsorben cenderung terprotonasi sehingga bermuatan positif, yang menyebabkan terjadinya gaya tolak-menolak dengan ion Cd^{2+} yang juga bermuatan positif.

Seiring dengan meningkatnya pH , jumlah ion H^+ berkurang sehingga kompetisi terhadap situs aktif menurun dan permukaan adsorben mulai mengalami deprotonasi, yang meningkatkan afinitas terhadap ion Cd^{2+} . Kondisi ini menyebabkan peningkatan efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi hingga mencapai kondisi optimum pada pH 6.

Pada kondisi pH yang lebih tinggi (pH 7 dan 8), meskipun efisiensi penyisihan relatif masih tinggi, terjadi fluktuasi kinerja adsorpsi yang diduga disebabkan oleh mulai terbentuknya spesies hidroksida dari Cd^{2+} , seperti $\text{Cd}(\text{OH})^+$ atau $\text{Cd}(\text{OH})_2$. Pembentukan spesies ini dapat mengurangi jumlah ion Cd^{2+} bebas dalam larutan serta mempengaruhi mekanisme

interaksi dengan adsorben. Untuk memperjelas, data pada Tabel 4.4, ditampilkan dalam bentuk grafik sebagai berikut.



Gambar 4. 10. Grafik Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi pH

Sumber: Data Primer, 2026.

Lebih lanjut, data pada Tabel 4.4, divisualisasikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.10, untuk memperjelas hubungan antara pH dan efisiensi penyisihan ion Cd^{2+} . Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa peningkatan pH dari kondisi asam menuju netral menyebabkan peningkatan efisiensi penyisihan yang cukup signifikan. Pada pH 3 hingga 5, kurva menunjukkan tren kenaikan yang tajam, yang mengindikasikan bahwa pengaruh pH terhadap proses adsorpsi sangat dominan pada rentang ini.

Puncak efisiensi penyisihan terjadi pada pH 6, dengan nilai sebesar 88,54%, yang menunjukkan kondisi optimum dalam proses adsorpsi ion Cd^{2+} . Setelah mencapai titik optimum tersebut, kurva menunjukkan penurunan pada pH 7 menjadi 74,00%, kemudian kembali mengalami peningkatan pada pH 8 menjadi 85,37%, meskipun tidak melampaui nilai maksimum pada pH 6.

Pola grafik ini menunjukkan bahwa hubungan antara pH dan efisiensi adsorpsi tidak bersifat linier, melainkan dipengaruhi oleh kondisi kimia larutan dan interaksi antara ion Cd^{2+} dengan permukaan adsorben. Kenaikan efisiensi pada pH rendah ke pH optimum disebabkan oleh berkurangnya

kompetisi ion H^+ terhadap situs aktif adsorben, sehingga meningkatkan peluang terjadinya adsorpsi. Sementara itu, fluktuasi yang terjadi pada pH lebih tinggi menunjukkan adanya pengaruh perubahan spesiasi ion Cd^{2+} dalam larutan serta kemungkinan terbentuknya senyawa hidroksida yang dapat mempengaruhi proses adsorpsi.

Dengan demikian, berdasarkan hasil analisis data pada Tabel 4.4, dan Gambar 4.10, dapat disimpulkan bahwa pH 6 merupakan kondisi optimum dalam proses adsorpsi ion Cd^{2+} menggunakan bio-membran, karena memberikan nilai efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi yang paling tinggi dibandingkan variasi pH lainnya.

4.4.3. Waktu Kontak

Variasi waktu kontak dilakukan untuk menentukan waktu optimum yang menghasilkan kinerja adsorpsi paling efektif, yang ditinjau berdasarkan efisiensi penyisihan (*removal efficiency*) dan kapasitas adsorpsi (q_e), serta untuk memahami pengaruh lama interaksi antara adsorben dan ion Cd^{2+} terhadap proses penjerapan dalam sistem. Pada variasi ini, digunakan larutan sebanyak 50 mL dengan konsentrasi Cd^{2+} sebesar 10 ppm. Nilai pH larutan diatur pada kondisi optimum yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya, yaitu pH 6.

Selanjutnya, Bio-membran siap pakai ditambahkan dengan massa optimum, yaitu 75 mg, ke dalam masing-masing erlenmeyer yang berisi 50 mL larutan Cd^{2+} 10 ppm. Proses adsorpsi dilakukan menggunakan *orbital shaker* dengan kecepatan pengadukan 150 rpm pada beberapa variasi waktu kontak, yaitu (30, 60, 90, 120, dan 180 menit).

Pemilihan rentang waktu kontak 30, 60, 90, 120, dan 180 menit pada penelitian ini dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik adsorpsi logam berat yang umumnya memerlukan waktu puluhan hingga ratusan menit untuk mencapai kondisi optimum. Rentang waktu tersebut banyak digunakan pada penelitian adsorpsi berbasis bio-material dan bio-adsorben karena mampu menggambarkan fase awal, fase transisi, hingga fase mendekati kesetimbangan adsorpsi secara lebih efektif. Penggunaan interval

waktu yang terlalu pendek, seperti setiap 5 menit, umumnya diterapkan pada penelitian kinetika adsorpsi yang secara khusus bertujuan memodelkan laju adsorpsi menggunakan model *pseudo-first-order*, *pseudo-second-order*, atau difusi intrapartikel. Sementara itu, tujuan utama penelitian ini adalah menentukan waktu kontak optimum sebagai parameter operasional adsorpsi sehingga interval 30 menit dianggap cukup untuk menggambarkan perubahan kinerja adsorpsi secara representatif.

Selain mempertimbangkan tujuan penelitian, penggunaan interval waktu 30 menit juga bertujuan untuk meningkatkan efisiensi pelaksanaan eksperimen dan mengurangi ketidakpastian pengukuran yang dapat muncul akibat pengambilan sampel yang terlalu sering. Menurut penelitian terdahulu [69], penentuan waktu kontak optimum pada studi adsorpsi umumnya dilakukan menggunakan rentang waktu yang mampu menangkap tren peningkatan adsorpsi hingga tercapainya kondisi kesetimbangan.

Oleh karena itu, variasi waktu kontak 30 sampai 180 menit yang digunakan dalam penelitian ini dinilai telah memadai untuk mengidentifikasi waktu optimum adsorpsi ion Cd^{2+} oleh bio-membran tanpa harus melakukan pengamatan pada interval waktu yang sangat rapat. Berdasarkan hasil yang diperoleh, waktu kontak 90 menit ditetapkan sebagai waktu optimum karena merepresentasikan kondisi adsorpsi yang mendekati kesetimbangan, sehingga proses penjerapan berlangsung lebih stabil dan konsisten dibandingkan pada waktu kontak yang lebih singkat.

Setelah proses adsorpsi selesai pada masing-masing variasi waktu, sampel dianalisis menggunakan instrumen (AAS) dengan pengenceran 10 kali. Data pada setiap variasi waktu kontak kemudian dianalisis untuk mengetahui kecenderungan peningkatan efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi hingga mencapai kondisi kesetimbangan, serta disajikan dalam bentuk tabel dan grafik sebagai berikut.

Tabel 4. 5. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Waktu Kontak

Variasi Waktu Kontak (menit)	Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Akhir (ppm)	Persen Removal (%)	pH Awal	pH Akhir	Kapasitas Adsorpsi (qe) (mg/g)
30	9,53	1,20	87,44	6	6	5,55
60	9,53	1,46	84,71	6	6	5,38
90	9,53	1,25	86,98	6	6	5,52
120	9,53	1,32	86,20	6	6	5,47
180	9,53	1,53	84,14	6	6	5,33

Sumber: Data Primer, 2026.

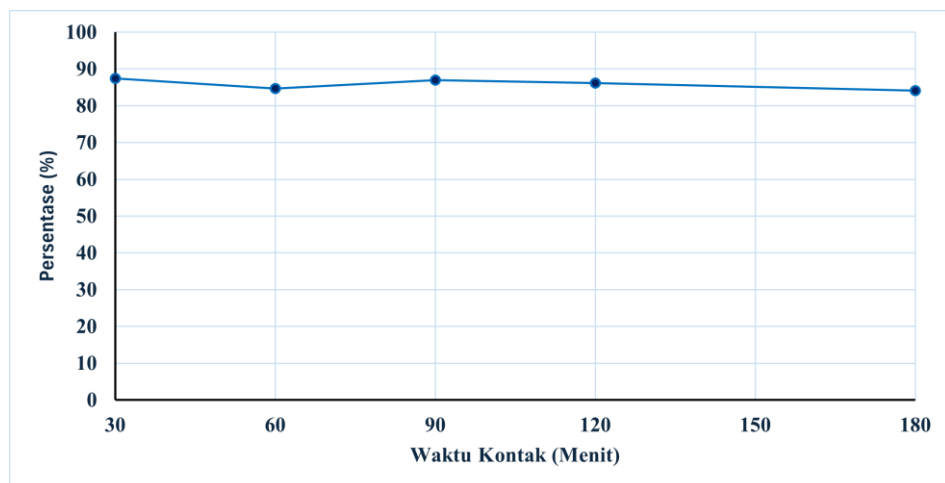
Berdasarkan Tabel 4.5, waktu kontak 30 menit telah menghasilkan kapasitas adsorpsi (qe) sebesar 5,55 mg/g yang merupakan nilai tertinggi dibandingkan variasi waktu kontak lainnya.

Fenomena laju penjerapan yang berlangsung amat cepat pada 30 menit pertama sebelum akhirnya melandai dan mencapai kesetimbangan stabil pada menit ke-90 merepresentasikan pola perpindahan massa multi-tahap. Percepatan kinetika di fase awal dikendalikan oleh tingginya gaya dorong potensial (*mass transfer driving force*) akibat perbedaan gradien konsentrasi yang ekstrem antara fasa cair air lindi dengan fasa padat bio-membran [69]. Pola transisi kurva menuju kondisi jenuh setelah menit ke-90 ini merefleksikan proses difusi intra-partikel yang lambat, di mana ion Cd^{2+} mulai bermigrasi dari lapisan eksternal menuju pori-pori mikroskopis di dalam matriks serat bambu. Kesetimbangan konstan yang tercapai pada menit ke-90 membuktikan bahwa seluruh situs pengkelat aktif selulosa-sitrat telah tersaturasi penuh oleh adsorbat, sebuah kondisi mantap yang serupa dengan pemodelan waktu kontak optimum biosorben lignoselulosa alami [69].

Meskipun demikian, penentuan waktu kontak optimum tidak hanya didasarkan pada nilai kapasitas adsorpsi semata, tetapi juga mempertimbangkan kestabilan proses adsorpsi serta efisiensi penyisihan yang dicapai. Pada penelitian ini, waktu kontak 90 menit dipilih sebagai waktu optimum karena menunjukkan kondisi adsorpsi yang lebih stabil dengan persentase removal sebesar 86,98% dan kapasitas adsorpsi sebesar

5,52 mg/g. Perbedaan kapasitas adsorpsi antara 30 menit dan 90 menit relatif kecil, yaitu hanya sekitar 0,03 mg/g, sehingga secara praktis dapat dianggap tidak berbeda signifikan. Selain itu, waktu kontak 90 menit menunjukkan bahwa proses adsorpsi telah berlangsung lebih sempurna karena ion Cd^{2+} tidak hanya terikat pada permukaan luar adsorben, tetapi juga telah berdifusi ke dalam pori-pori dan situs aktif internal bio-membran. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem adsorpsi telah mendekati keadaan kesetimbangan yang lebih representatif untuk menggambarkan kinerja adsorben.

Untuk memperjelas hubungan antara waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi ion Cd^{2+} oleh bio-membran, data pada Tabel 4.5 selanjutnya divisualisasikan dalam bentuk grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 11. Grafik Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Waktu Kontak
Sumber: Data Primer, 2026.

Berdasarkan Gambar 4.11, terlihat bahwa efisiensi penyisihan sudah tinggi sejak waktu kontak awal, kemudian mengalami fluktuasi kecil seiring bertambahnya waktu kontak.

Kurva menunjukkan bahwa setelah waktu kontak 30 menit, sistem belum sepenuhnya mencapai kondisi kesetimbangan yang stabil, meskipun nilai efisiensi penyisihan sudah tinggi. Peningkatan kembali pada 90 menit menunjukkan bahwa proses difusi dan interaksi antara ion Cd^{2+} dengan situs

aktif adsorben masih berlangsung hingga mencapai kondisi yang lebih seimbang.

Setelah waktu kontak 90 menit, kurva cenderung menunjukkan kecenderungan menurun dan mendatar, yang mengindikasikan bahwa sistem telah mencapai kondisi kesetimbangan adsorpsi (equilibrium). Penambahan waktu kontak hingga 120 menit dan 180 menit tidak memberikan peningkatan yang signifikan terhadap efisiensi penyisihan.

Dengan demikian, grafik pada Gambar 4.11, memperkuat hasil pada Tabel 4.5, bahwa waktu kontak 90 menit merupakan kondisi optimum, karena pada titik ini sistem adsorpsi berada pada kondisi yang paling stabil dan mendekati kesetimbangan, dengan efisiensi penyisihan yang tinggi dan relatif konstan.

4.4.4. Konsentrasi

Variasi konsentrasi dilakukan untuk menentukan pengaruh konsentrasi awal ion Cd^{2+} terhadap kinerja adsorpsi, yang ditinjau berdasarkan efisiensi penyisihan (removal efficiency) dan kapasitas adsorpsi (q_e), serta untuk memahami perilaku adsorpsi dalam sistem. Pada variasi ini, digunakan larutan sebanyak 50 mL dengan variasi konsentrasi awal Cd^{2+} , yaitu 10, 25, 50, 75, 100, dan 200 ppm. Nilai pH larutan diatur pada kondisi optimum yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya, yaitu pH 6.

Selanjutnya, bio-membran siap pakai ditambahkan dengan massa optimum, yaitu 75 mg, ke dalam masing-masing erlenmeyer yang berisi 50 mL larutan Cd^{2+} sesuai variasi konsentrasi. Proses adsorpsi dilakukan menggunakan orbital shaker dengan kecepatan pengadukan 150 rpm pada waktu kontak optimum, yaitu 90 menit.

Setelah proses adsorpsi selesai, sampel dianalisis menggunakan instrumen Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS). Sebelum analisis, dilakukan pengenceran sampel yang disesuaikan dengan konsentrasi awal larutan untuk memastikan hasil pembacaan berada dalam rentang kerja alat. Faktor pengenceran yang digunakan masing-masing adalah 5 kali (10 ppm),

12,5 kali (25 ppm), 25 kali (50 ppm), 37,5 kali (75 ppm), 50 kali (100 ppm), dan 100 kali (200 ppm).

Data pada setiap variasi konsentrasi kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh peningkatan konsentrasi awal terhadap efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi, serta untuk mengidentifikasi kecenderungan kejenuhan adsorben dalam sistem. Hasil analisis tersebut selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel dan grafik sebagai berikut.

Tabel 4. 6. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Konsentrasi

Variasi Konsentrasi (ppm)	Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Akhir (ppm)	Persen Removal (%)	pH Awal	pH Akhir	Kapasitas Adsorpsi (qe) (mg/g)
10	9,27	0,33	96,41	6	6	5,96
25	24,71	1,56	93,70	6	6	15,44
50	49,83	11,48	76,97	6	6	25,57
75	74,33	41,74	43,84	6	6	21,73
100	98,05	55,13	43,78	6	6	28,62
200	197,30	113,50	42,47	6	6	55,87

Sumber: Data Primer, 2026.

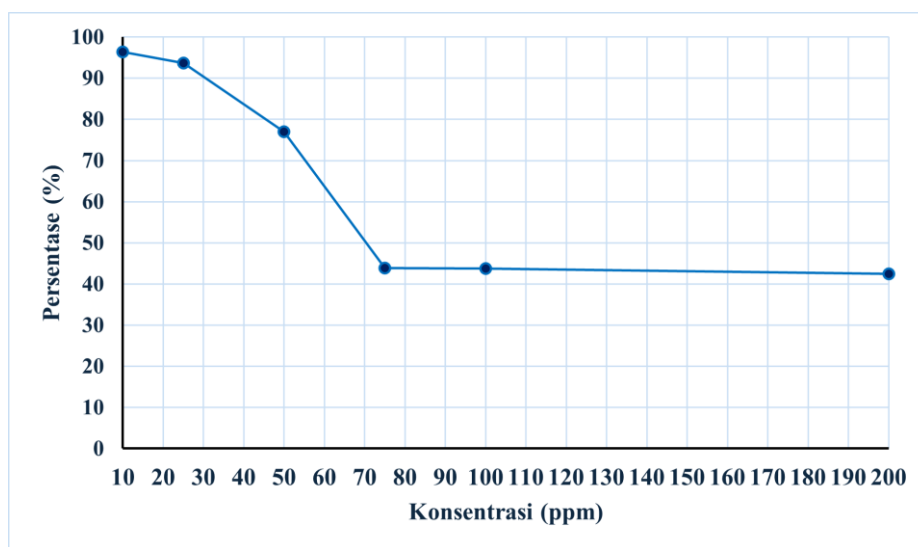
Berdasarkan Tabel 4.6, variasi konsentrasi awal ion Cd^{2+} memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja adsorpsi oleh bio-membran. Pada kondisi pH optimum 6, terlihat bahwa efisiensi penyisihan (removal efficiency) tertinggi diperoleh pada konsentrasi 10 ppm, yaitu sebesar 96,41%, dengan kapasitas adsorpsi sebesar 5,96 mg/g.

Seiring dengan meningkatnya konsentrasi awal menjadi 25 ppm, efisiensi penyisihan masih tergolong tinggi, yaitu 93,70%, dengan peningkatan kapasitas adsorpsi menjadi 15,44 mg/g. Namun, pada konsentrasi 50 ppm, efisiensi penyisihan mulai menurun menjadi 76,97%, meskipun kapasitas adsorpsi meningkat signifikan menjadi 25,57 mg/g.

Penurunan efisiensi semakin terlihat pada konsentrasi 75 ppm, 100 ppm, dan 200 ppm, dengan nilai berturut-turut sebesar 43,84%, 43,78%, dan 42,47%. Meskipun demikian, kapasitas adsorpsi terus mengalami peningkatan hingga mencapai 55,87 mg/g pada konsentrasi 200 ppm.

Fenomena ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi rendah hingga sedang, jumlah situs aktif adsorben masih mencukupi untuk mengadsorpsi

ion Cd^{2+} secara efektif. Namun, pada konsentrasi yang lebih tinggi, jumlah ion Cd^{2+} yang meningkat menyebabkan keterbatasan situs aktif, sehingga terjadi kejenuhan adsorben dan penurunan efisiensi penyisihan. Untuk memperjelas hubungan antara konsentrasi awal dan efisiensi penyisihan ion Cd^{2+} , data pada Tabel 4.6, divisualisasikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12. Grafik Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Konsentrasi
Sumber: Data Primer, 2026.

Berdasarkan grafik tersebut, terlihat adanya tren penurunan efisiensi penyisihan seiring dengan meningkatnya konsentrasi awal larutan. Pada rentang konsentrasi 10 ppm hingga 25 ppm, efisiensi penyisihan masih berada pada nilai yang sangat tinggi. Namun, setelah memasuki konsentrasi 50 ppm, kurva menunjukkan penurunan yang cukup signifikan, dan cenderung stabil pada kisaran 42–44% untuk konsentrasi yang lebih tinggi (75–200 ppm).

Pola ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi rendah, jumlah ion Cd^{2+} masih sebanding dengan jumlah situs aktif adsorben, sehingga proses adsorpsi berlangsung secara optimal. Sebaliknya, pada konsentrasi tinggi, jumlah ion Cd^{2+} yang berlebih menyebabkan kejenuhan pada permukaan adsorben, sehingga efisiensi penyisihan menurun dan cenderung mencapai kondisi mendatar (plateau). Dengan demikian, grafik pada Gambar 4.12

memperkuat hasil pada Tabel 4.6, bahwa peningkatan konsentrasi awal berbanding terbalik dengan efisiensi penyisihan akibat keterbatasan kapasitas adsorben.

Berdasarkan hasil pada Tabel 4.6, dan Gambar 4.12, konsentrasi 10 ppm memang menunjukkan efisiensi penyisihan tertinggi. Namun, dalam penentuan konsentrasi optimum tidak hanya mempertimbangkan nilai efisiensi maksimum, tetapi juga mempertimbangkan kapasitas adsorpsi dan representasi kondisi sistem.

Konsentrasi 50 ppm dipilih sebagai konsentrasi optimum karena pada titik ini terjadi keseimbangan antara efisiensi penyisihan yang masih cukup tinggi (76,97%) dan kapasitas adsorpsi yang meningkat signifikan (25,57 mg/g). Kondisi ini menunjukkan bahwa adsorben bekerja secara lebih optimal dalam menangani beban pencemar yang lebih besar, sehingga lebih representatif untuk menggambarkan kinerja adsorpsi secara nyata.

Sementara itu, pada konsentrasi di atas 50 ppm, efisiensi penyisihan mengalami penurunan yang cukup drastis dan cenderung stabil pada nilai rendah, yang mengindikasikan bahwa adsorben telah mencapai kondisi jenuh dan tidak mampu lagi mengadsorpsi ion Cd^{2+} secara efektif.

Hubungan timbal balik antara peningkatan kapasitas adsorpsi (q_e) hingga mencapai nilai tertinggi pada konsentrasi 200 ppm yang diiringi dengan penurunan efisiensi removal pada konsentrasi awal yang lebih tinggi (> 50 ppm) merupakan sifat dasar dari kinetika interaksi fasa dalam sistem pembatasan ruang. Secara mekanistik, peningkatan konsentrasi awal kation Cd^{2+} bertindak sebagai stimulan pendorong (*driving force*) hidrodinamis yang kuat untuk mengatasi hambatan transfer massa kation antara fasa cair air lindi dan fasa padat bio-membran [68]. Kondisi gradien osmotik yang tinggi ini mengoptimalkan frekuensi tumbukan kation Cd^{2+} untuk berdifusi masuk ke dalam pori-pori mikroskopis terdalam dari bio-membran berbasis bambu [68]. Namun, ketika konsentrasi input terus dipasok melampaui batas optimum setelah melewati ambang batas 50 ppm, total kation Cd^{2+} yang melimpah tidak lagi sebanding dengan jumlah situs pengkelat aktif

tetap fasa padat yang tersedia [68]. Fenomena kurva yang mulai mendatar (*plateau*) ini mengindikasikan terjadinya kejenuhan ruang batas fasa akibat keterbatasan situs penjerapan aktif selulosa-sitrat [68].

Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa konsentrasi 50 ppm merupakan kondisi optimum yang dipilih karena memberikan keseimbangan antara efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi, serta merepresentasikan kondisi kerja adsorben yang lebih realistis.

4.5. Isoterm

4.5.1. Langmuir

Isoterm Langmuir digunakan untuk menggambarkan proses adsorpsi yang berlangsung pada permukaan homogen dengan asumsi bahwa adsorpsi terjadi secara monolayer (satu lapis) dan tidak terjadi interaksi antar molekul adsorbat. Model ini menyatakan bahwa terdapat jumlah situs aktif yang terbatas pada permukaan adsorben. Data isoterm langmuir disajikan dalam tabel sebagai berikut.

Tabel 4. 7. Data Isoterm Langmuir Bio-Membran

Variasi Konsentrasi (ppm)	Konsentrasi Awal (C_0) (ppm)	Konsentrasi Akhir (C_e) (ppm)	Persen Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (q_e) (mg/g)	C_e/q_e
10	9,27	0,33	96,41	5,96	0,0558
25	24,71	1,56	93,70	15,44	0,1008
50	49,83	11,48	76,97	25,57	0,4488
75	74,33	41,74	43,84	21,73	1,9212
100	98,05	55,13	43,78	28,62	1,9263
200	197,30	113,50	42,47	55,87	2,0316

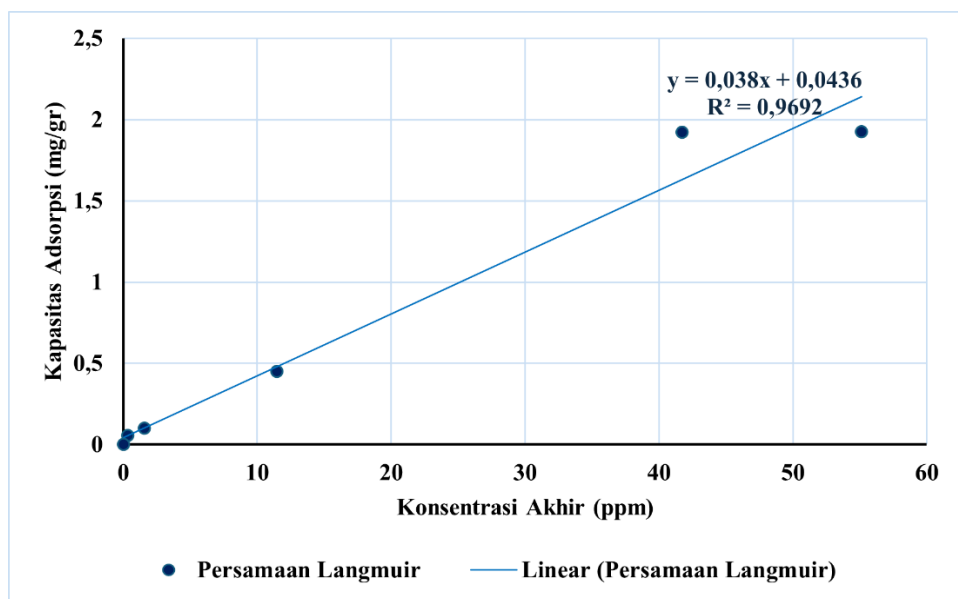
Sumber: Data Primer, 2026.

Berdasarkan Tabel 4.7, data hasil uji adsorpsi telah diolah untuk keperluan analisis isoterm Langmuir dengan menambahkan parameter C_e/q_e . Nilai ini diperoleh dari perbandingan antara konsentrasi akhir larutan (C_e) dan kapasitas adsorpsi (q_e).

Terlihat bahwa seiring meningkatnya konsentrasi awal, nilai C_e dan q_e juga mengalami peningkatan, yang menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi larutan, semakin besar jumlah ion Cd^{2+} yang teradsorpsi oleh bio-membran. Namun demikian, nilai C_e/q_e juga meningkat secara

signifikan pada konsentrasi tinggi, yang mengindikasikan bahwa efisiensi pemanfaatan situs aktif mulai menurun akibat kejenuhan adsorben.

Pola ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi rendah, adsorpsi berlangsung lebih efisien karena ketersediaan situs aktif masih mencukupi. Sebaliknya, pada konsentrasi tinggi, terjadi kompetisi antar ion Cd^{2+} untuk menempati situs aktif, sehingga menyebabkan peningkatan nilai C_e/q_e . Data ini kemudian digunakan untuk membangun hubungan linier pada model isoterm Langmuir disajikan pada Gambar 4.13, sebagai berikut.



Gambar 4. 13. Grafik Data Isoterm Langmuir Bio-Membran
Sumber: Data Primer, 2026.

Hubungan antara C_e/q_e dan C_e divisualisasikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.13. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa data cenderung membentuk hubungan linier dengan persamaan regresi:

$y = 0,038x + 0,0436$ dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,9692$.

Berdasarkan persamaan garis tersebut, dapat ditentukan parameter Langmuir, di mana:

1. Persamaan linier:

$$y = 0,038x + 0,0436$$

2. Bentuk linier langmuir:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max}} C_e + \frac{1}{K_L q_{max}}$$

3. Hasil Perhitungan:

$$a. \text{ Slope } \left(\frac{1}{q_{max}} \right) = 0,038$$

$$q_{max} = \frac{1}{0,038} = 26,316 \text{ mg/gr}$$

$$b. \text{ Intercept } \left(\frac{1}{K_L q_{max}} \right) = 0,0436$$

$$K_L = \frac{1}{0,0436 \times 26,316} = 0,872 \text{ L/mg}$$

Berdasarkan hasil analisis isoterm Langmuir yang ditunjukkan pada Gambar 4.13, diperoleh persamaan regresi linear sebesar $y = 0,038x + 0,0436$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9692. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa model isoterm Langmuir memiliki tingkat kecocokan yang sangat baik dalam merepresentasikan proses adsorpsi ion Cd^{2+} oleh bio-membran.

Berdasarkan nilai *slope* dan *intercept* dari persamaan tersebut, diperoleh kapasitas adsorpsi maksimum (q_{max}) sebesar 26,32 mg/g dan konstanta Langmuir (K_L) sebesar 0,87 L/mg. Nilai q_{max} menunjukkan kapasitas maksimum bio-membran dalam mengadsorpsi ion Cd^{2+} hingga kondisi jenuh, sedangkan nilai K_L yang relatif tinggi mengindikasikan adanya afinitas yang kuat antara adsorben dan adsorbat.

Hasil analisis isoterm Langmuir menunjukkan bahwa bio-membran memiliki kemampuan adsorpsi yang baik terhadap ion Cd^{2+} dengan mekanisme pembentukan lapisan tunggal pada permukaan adsorben. Hal ini sejalan dengan hasil variasi sebelumnya (massa, pH, waktu kontak, dan konsentrasi), di mana pada kondisi optimum diperoleh kinerja adsorpsi yang tinggi sebelum akhirnya mencapai kejenuhan pada konsentrasi yang lebih tinggi.

4.5.2. Freundlich

Isoterm Freundlich digunakan untuk menggambarkan proses adsorpsi pada permukaan heterogen dan memungkinkan terjadinya adsorpsi multilayer. Data isoterm freundlich disajikan dalam tabel sebagai berikut.

Tabel 4. 8. Data Isoterm Freundlich Bio-Membran

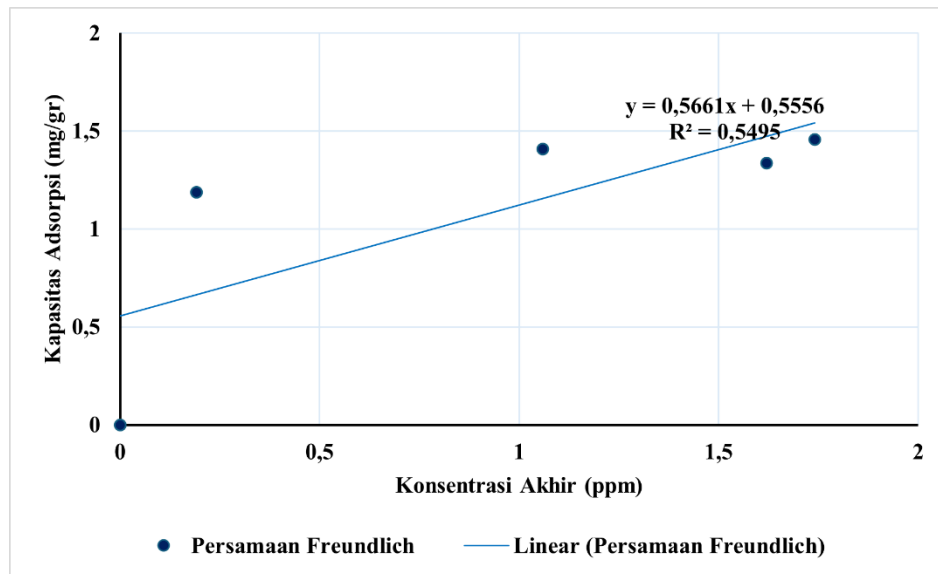
Variasi Konsentrasi (ppm)	Konsentrasi Awal (C_0) (ppm)	Konsentrasi Akhir (C_e) (ppm)	Persen Removal (%)	Kapasitas Adsorpsi (q_e) (mg/g)	Log C_e	Log q_e
10	9,27	0,33	96,41	5,96	0,4782	0,7749
25	24,71	1,56	93,70	15,44	0,1921	1,1886
50	49,83	11,48	76,97	25,57	1,0598	1,4077
75	74,33	41,74	43,84	21,73	1,6205	1,3370
100	98,05	55,13	43,78	28,62	1,7413	1,4566
200	197,30	113,50	42,47	55,87	2,0550	1,7472

Sumber: Data Primer, 2026.

Berdasarkan Tabel 4.8, terlihat bahwa peningkatan konsentrasi awal Cd^{2+} dari 10 hingga 200 ppm menyebabkan peningkatan nilai kapasitas adsorpsi (q_e) dari 5,96 mg/g hingga 55,87 mg/g. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi awal, semakin besar jumlah ion Cd^{2+} yang dapat teradsorpsi oleh bio-membran.

Namun demikian, persentase removal justru mengalami penurunan, dari 96,41% pada konsentrasi 10 ppm menjadi sekitar 42,47% pada 200 ppm. Fenomena ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi tinggi terjadi keterbatasan jumlah situs aktif pada adsorben sehingga tidak seluruh ion Cd^{2+} dapat teradsorpsi secara efektif.

Data log C_e dan log q_e pada tabel digunakan untuk membangun model isoterm Freundlich dalam bentuk linear, disajikan pada Gambar 4,14, sebagai berikut.



Gambar 4. 14. Grafik Data Isoterm Freundlich Bio-Membran
Sumber: Data Primer, 2026.

Berdasarkan grafik data 4.14, terlihat bahwa data cenderung membentuk hubungan linier dengan persamaan regresi:

$y = 0,5661x + 0,5556$ dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,5495$.

Berdasarkan persamaan garis tersebut, dapat ditentukan parameter Freundlich, di mana:

1. Persamaan linier:

$$y = 0,5661x + 0,5556$$

2. Bentuk linier langmuir:

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e$$

3. Hasil Perhitungan:

$$c. \text{ Slope } \left(\frac{1}{n} \right) = 0,5661$$

$$n = \frac{1}{0,5661} = 1,766$$

$$d. \text{ Intercept } (10^x) = 0,5556$$

$$K_L = 10^{0,5556} = 3,594 \text{ mg/gr}$$

4. Interpretasi:

Nilai $n > 1$ menunjukkan bahwa proses adsorpsi bersifat *favorable* (menguntungkan). Namun nilai $R^2 = 0,5495$ menunjukkan bahwa

model Freundlich kurang mampu menjelaskan data eksperimen dengan baik.

4.5.3. Perbandingan Kedua Isoterm

Berdasarkan hasil analisis kedua model isoterm disajikan dalam tabel sebagai berikut.

Tabel 4. 9. Perbandingan Kedua Isoterm

Paramater	Langmuir	Freundlich
R²	0,9692	0,5495
Kesesuaian model	Sangat baik	Rendah
Mekanisme	Monolayer	Multilayer

Sumber: Data Primer, 2026.

Dari tabel di atas dapat disimpulkan bahwa:

1. Model Langmuir lebih dominan dalam menggambarkan proses adsorpsi pada penelitian ini.
2. Adsorpsi Cd^{2+} oleh bio-membran cenderung terjadi pada permukaan homogen.
3. Mekanisme yang terjadi adalah pembentukan lapisan tunggal (*monolayer*).

4.5.4. Isoterm terbaik

Penentuan model isoterm terbaik dalam penelitian ini dilakukan dengan membandingkan kesesuaian model Langmuir dan Freundlich terhadap data hasil adsorpsi ion Cd^{2+} oleh bio-membran. Evaluasi dilakukan berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2) serta parameter isoterm yang dihasilkan dari masing-masing model.

Berdasarkan hasil analisis isoterm Langmuir, diperoleh persamaan linear sebesar $y = 0,038x + 0,0436$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9692. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa model Langmuir memiliki tingkat kesesuaian yang sangat baik dalam merepresentasikan data adsorpsi. Dari persamaan tersebut diperoleh kapasitas adsorpsi maksimum (q_{max}) sebesar 26,316 mg/g dan konstanta Langmuir (KL) sebesar 0,872 L/mg. Nilai q_{max} menunjukkan kapasitas maksimum bio-membran dalam mengadsorpsi ion Cd^{2+} hingga mencapai

kondisi jenuh, sedangkan nilai KL mengindikasikan adanya afinitas yang kuat antara adsorben dan adsorbat.

Sementara itu, hasil analisis isoterm Freundlich menghasilkan persamaan linear $y = 0,5661x + 0,5556$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,5495. Nilai R^2 yang relatif lebih rendah menunjukkan bahwa model Freundlich kurang mampu menggambarkan hubungan antara konsentrasi dan kapasitas adsorpsi secara akurat. Meskipun demikian, nilai konstanta Freundlich yang diperoleh, yaitu $n = 1,766$ dan $K_f = 3,594 \text{ mg/g}$, menunjukkan bahwa proses adsorpsi masih bersifat menguntungkan ($n > 1$), namun dengan tingkat kesesuaian model yang lebih rendah dibandingkan Langmuir.

Kesesuaian data eksperimen yang sangat linier terhadap model Langmuir ini membuktikan secara ilmiah bahwa mekanisme penjerapan kation Cd^{2+} pada permukaan bio-membran serat bambu teraktivasi asam sitrat murni berlangsung secara lapisan tunggal (*monolayer*). Fenomena pembentukan matriks monolayer homogen ini sejalan dengan kajian yang dilakukan penelitian terdahulu mengenai adsorpsi Kadmium menggunakan material karbon berbasis bambu [68]. Berdasarkan analogi tersebut, nilai koefisien determinasi yang tinggi ($R^2 = 0,9692$) mengonfirmasi bahwa setiap situs pengkelat aktif pada permukaan selulosa-sitrat bio-membran memiliki tingkat energi adsorpsi yang setara atau seragam [68]. Ketika seluruh situs aktif yang merepresentasikan gugus fungsi hidroksil ($-\text{OH}$) dan karboksilat ($-\text{COOH}$) telah mengikat ion Cd^{2+} hingga mencapai kapasitas maksimumnya ($q_{\text{max}} = 26,32 \text{ mg/g}$), maka sistem fasa padat akan mengalami saturasi total [68]. Setelah titik jenuh tersebut tercapai, tidak ada lagi interaksi penjerapan lanjutan yang dapat terjadi karena molekul adsorbat yang telah terikat tidak saling berinteraksi satu sama lain, sehingga mencegah terbentuknya lapisan fasa jamak (*multilayer*) di atas permukaan adsorben [68]. Hal ini sekaligus menegaskan mengapa pemodelan Isoterm Freundlich memberikan nilai kesesuaian yang sangat rendah ($R^2 = 0,5495$) dalam menjelaskan perilaku kesetimbangan sistem ini.

Berdasarkan perbandingan kedua model isoterm tersebut, dapat disimpulkan bahwa model Langmuir merupakan model yang paling sesuai untuk menggambarkan proses adsorpsi ion Cd^{2+} oleh bio-membran dalam penelitian ini. Hal ini didukung oleh nilai R^2 yang lebih tinggi serta parameter isoterm yang lebih representatif dalam menjelaskan kapasitas dan karakteristik adsorpsi.

Dengan demikian, mekanisme adsorpsi yang terjadi cenderung mengikuti asumsi model Langmuir, yaitu berlangsung secara monolayer pada permukaan adsorben yang relatif homogen, di mana setiap situs aktif memiliki energi adsorpsi yang seragam dan hanya dapat mengikat satu molekul atau ion adsorbat. Hasil ini menunjukkan bahwa bio-membran yang digunakan memiliki potensi yang baik sebagai adsorben dalam penyisihan logam berat Cd^{2+} dari larutan.

4.6. Mekanisme Adsorpsi Adsorben

Berdasarkan hasil penelitian yang meliputi variasi massa adsorben, pH, waktu kontak, konsentrasi awal, serta analisis isoterm adsorpsi, mekanisme penjerapan ion Cd^{2+} oleh bio-membran dapat dijelaskan secara komprehensif sebagai berikut.

Pada tahap awal proses adsorpsi, peningkatan efisiensi penyisihan pada variasi massa adsorben menunjukkan bahwa jumlah situs aktif pada permukaan adsorben berperan penting dalam mengikat ion Cd^{2+} . Semakin besar massa adsorben, semakin banyak situs aktif yang tersedia, sehingga peluang interaksi antara ion Cd^{2+} dan permukaan adsorben meningkat. Namun, setelah mencapai massa optimum, peningkatan massa tidak lagi memberikan peningkatan signifikan, yang mengindikasikan adanya keterbatasan difusi dan kemungkinan terjadinya agregasi partikel adsorben.

Pengaruh pH menunjukkan bahwa kondisi optimum terjadi pada pH 6, yang mengindikasikan bahwa mekanisme adsorpsi sangat dipengaruhi oleh muatan permukaan adsorben dan spesiasi ion Cd^{2+} dalam larutan. Pada pH rendah, keberadaan ion H^+ yang tinggi menyebabkan kompetisi dengan ion Cd^{2+} dalam menempati situs aktif, sehingga menurunkan efisiensi adsorpsi.

Sebaliknya, pada pH mendekati netral, jumlah ion H^+ berkurang sehingga interaksi elektrostatis antara permukaan adsorben yang bermuatan negatif dan ion Cd^{2+} meningkat. Pada pH yang lebih tinggi, kemungkinan terbentuknya spesies hidroksida mulai terjadi, yang dapat mempengaruhi mekanisme adsorpsi.

Variasi waktu kontak menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung cepat pada tahap awal dan mencapai kondisi mendekati kesetimbangan pada waktu optimum 90 menit. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi diawali dengan proses difusi eksternal yang cepat, diikuti oleh difusi intrapartikel yang lebih lambat hingga seluruh situs aktif yang tersedia terisi. Setelah mencapai kesetimbangan, penambahan waktu kontak tidak memberikan peningkatan signifikan karena sebagian besar situs aktif telah terisi oleh ion Cd^{2+} .

Pada variasi konsentrasi, terlihat bahwa peningkatan konsentrasi awal menyebabkan peningkatan kapasitas adsorpsi (q_e), namun diikuti dengan penurunan efisiensi penyisihan. Hal ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi tinggi terjadi kompetisi antar ion Cd^{2+} untuk menempati situs aktif yang terbatas, sehingga menyebabkan kejenuhan adsorben. Fenomena ini memperkuat bahwa jumlah situs aktif pada bio-membran bersifat terbatas.

Hasil analisis isoterm menunjukkan bahwa model Langmuir memberikan kecocokan terbaik dibandingkan model Freundlich, yang mengindikasikan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara monolayer pada permukaan adsorben yang relatif homogen. Hal ini berarti bahwa setiap situs aktif hanya dapat mengikat satu ion Cd^{2+} , dan tidak terjadi interaksi antar molekul yang teradsorpsi. Nilai kapasitas maksimum adsorpsi (q_{max}) yang diperoleh juga menunjukkan bahwa bio-membran memiliki kemampuan yang cukup baik dalam mengadsorpsi ion Cd^{2+} .

Secara keseluruhan, mekanisme adsorpsi ion Cd^{2+} oleh bio-membran dalam penelitian ini dapat dijelaskan sebagai kombinasi dari interaksi elektrostatis, pertukaran ion, dan kemungkinan pembentukan ikatan kompleks (kompleksasi) antara ion Cd^{2+} dengan gugus fungsi aktif pada

permukaan adsorben, seperti gugus hidroksil ($-\text{OH}$), karboksil ($-\text{COOH}$), dan gugus fungsional lainnya. Proses ini diawali dengan difusi ion Cd^{2+} dari larutan menuju permukaan adsorben, diikuti oleh penjerapan pada situs aktif hingga mencapai kondisi kesetimbangan.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa mekanisme adsorpsi yang terjadi bersifat monolayer dengan dominasi interaksi kimia-fisik (fisikokimia), yang dipengaruhi oleh kondisi pH, waktu kontak, konsentrasi, serta karakteristik permukaan bio-membran sebagai adsorben.

4.7. Aplikasi Bio-Membran Pada Air Lindi

Setelah dilakukan pengujian adsorpsi menggunakan larutan sintesis Cd^{2+} untuk menentukan kondisi optimum adsorben, tahap selanjutnya adalah penerapan bio-membran pada sampel air lindi sebagai limbah nyata (real wastewater). Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan bio-membran dalam menyisihkan kontaminan logam pada matriks limbah yang lebih kompleks dibandingkan larutan sintesis.

Air lindi umumnya mengandung berbagai senyawa organik, anorganik, padatan terlarut, serta ion-ion pengganggu lainnya yang dapat memengaruhi proses adsorpsi. Oleh karena itu, pengujian pada air lindi diperlukan untuk mengetahui efektivitas bio-membran dalam kondisi aplikasi sebenarnya serta untuk membandingkan kinerjanya terhadap hasil pengujian menggunakan larutan sintesis.

Pada pengujian ini, proses adsorpsi dilakukan menggunakan kondisi optimum yang telah diperoleh dari tahap sebelumnya, meliputi massa adsorben optimum, pH optimum, waktu kontak optimum, dan kondisi pengadukan yang sama. Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui efisiensi penyisihan, kapasitas adsorpsi, serta kestabilan kinerja bio-membran pada sistem air lindi.

4.7.1. Karakteristik Awal Air Lindi

Sebelum dilakukan proses adsorpsi, sampel air lindi terlebih dahulu dianalisis untuk mengetahui karakteristik awalnya. Analisis ini bertujuan untuk menentukan kondisi awal limbah serta mengidentifikasi parameter

pencemar yang terkandung di dalam air lindi sebelum perlakuan menggunakan bio-membran. Karakteristik air lindi umumnya dipengaruhi oleh umur timbunan sampah, kondisi lingkungan, proses dekomposisi bahan organik, serta jenis limbah yang masuk ke lokasi TPA. Air lindi diketahui memiliki kandungan bahan organik, logam berat, warna, bau, dan tingkat kekeruhan yang relatif tinggi sehingga berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dilakukan pengolahan secara tepat. Pada penelitian ini, parameter yang dianalisis meliputi pH, konsentrasi logam Cd^{2+} , serta parameter pendukung lainnya sesuai kebutuhan penelitian. Proses sampling air lindi disajikan dalam gambar sebagai berikut.



Gambar 4. 15. Proses Sampling Air Lindi Piyungan (*Inlate* IPAL)
Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026.

Hasil karakterisasi awal tersebut selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi efektivitas proses adsorpsi menggunakan bio-membran pada tahap pengujian berikutnya. Karakteristik awal air lindi disajikan dalam tabel sebagai berikut.

Tabel 4. 10. Karakteristik Awal Air Lindi Piyungan (*Inlate* IPAL)

Parameter	Satuan	Hasil Analisis
pH	-	9
Konsentrasi Cd^{2+}	ppm	2,927
Warna	-	Cokelat kehitaman
Bau	-	Menyengat

Temperatur	°C	28
Cuaca	-	Cerah Berawan

Sumber: Data Primer, 2026.

Berdasarkan Tabel 4.10, air lindi yang digunakan pada penelitian ini memiliki nilai pH sebesar 9, yang menunjukkan kondisi basa. Nilai pH tersebut mengindikasikan bahwa air lindi telah berada pada fase matang (*mature leachate*), di mana proses dekomposisi bahan organik telah berlangsung cukup lama. Kondisi pH yang cenderung basa umumnya dipengaruhi oleh tingginya kandungan senyawa humat dan fulvat hasil degradasi sampah organik di dalam timbunan TPA.

Hasil analisis juga menunjukkan bahwa konsentrasi awal logam Cd^{2+} pada air lindi sebesar 2,927 mg/L. Keberadaan logam Cd^{2+} dalam jumlah tersebut menunjukkan bahwa air lindi berpotensi menjadi sumber pencemar logam berat yang berbahaya bagi lingkungan apabila tidak dilakukan pengolahan lebih lanjut. Ion Cd^{2+} diketahui bersifat toksik dan dapat terakumulasi dalam lingkungan maupun organisme hidup, sehingga diperlukan metode pengolahan yang efektif untuk menurunkan konsentrasinya.

Secara visual, air lindi memiliki warna coklat kehitaman dan bau yang menyengat. Warna yang pekat menunjukkan tingginya kandungan bahan organik terlarut, sedangkan bau menyengat berasal dari hasil proses dekomposisi anaerobik sampah yang menghasilkan berbagai senyawa organik volatil. Selain itu, temperatur air lindi sebesar 28°C menunjukkan kondisi yang masih berada pada suhu lingkungan normal sehingga tidak memberikan pengaruh termal yang signifikan terhadap proses adsorpsi.

Karakteristik awal tersebut menunjukkan bahwa air lindi memiliki kandungan pencemar yang cukup kompleks, baik berupa bahan organik maupun logam berat. Oleh karena itu, penggunaan bio-membran berbasis bambu yang telah diaktivasi diharapkan mampu menurunkan konsentrasi ion Cd^{2+} melalui proses adsorpsi dengan memanfaatkan gugus fungsi aktif pada permukaan adsorben.

4.7.2. Hasil Pengujian Adsorpsi Pada Air Lindi

Pengujian aplikasi bio-membran terhadap air lindi dilakukan menggunakan kondisi optimum hasil penelitian sebelumnya, yaitu massa adsorben sebesar 75 mg, pH 6, dan waktu kontak 90 menit. Pengujian dilakukan terhadap sampel air lindi alami tanpa penambahan konsentrasi sintetis maupun pengenceran, sehingga kondisi pengujian merepresentasikan karakteristik asli air lindi dari lokasi pengambilan sampel. Setelah proses adsorpsi selesai, sampel kemudian didestruksi menggunakan larutan HNO_3 selama 3 jam untuk melarutkan logam secara sempurna sebelum dilakukan analisis menggunakan instrumen *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS). Proses adsorpsi dilakukan menggunakan orbital shaker pada kecepatan pengadukan yang sama dengan tahap optimasi sebelumnya. Data hasil pengujian adsorpsi air lindi disajikan dalam tabel sebagai berikut.

Tabel 4. 11. Data Hasil Pengujian Adsorpsi Air Lindi

Pengulangan	Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Akhir (ppm)	Persen Removal (%)	pH Awal	pH Akhir	Kapasitas Adsorpsi (q_e) (mg/g)
1	2,927	0,521	82,20	6	6	1,604
2	2,927	0,525	82,06	6	6	1,601

Sumber: Data Primer, 2026.

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.11, diperoleh konsentrasi awal logam Cd^{2+} pada air lindi sebesar 2,927 ppm. Setelah proses adsorpsi menggunakan bio-membran, konsentrasi Cd^{2+} mengalami penurunan menjadi 0,521 ppm pada pengulangan pertama dan 0,525 ppm pada pengulangan kedua. Penurunan konsentrasi tersebut menunjukkan bahwa bio-membran mampu mengadsorpsi ion logam Cd^{2+} secara efektif pada sampel air lindi nyata.

Nilai efisiensi penyisihan (removal efficiency) yang diperoleh masing-masing sebesar 82,20% dan 82,06%, dengan kapasitas adsorpsi (q_e) sebesar 1,604 mg/g dan 1,601 mg/g. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara konsisten pada kedua pengulangan, ditandai dengan selisih nilai yang relatif kecil. Stabilitas hasil ini

mengindikasikan bahwa bio-membran memiliki performa adsorpsi yang cukup baik dan reproducible dalam menyerap ion Cd^{2+} pada matriks air lindi.

Selain itu, nilai pH awal dan pH akhir tetap berada pada kondisi pH 6, yang menunjukkan bahwa proses adsorpsi tidak menyebabkan perubahan pH yang signifikan pada air lindi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa bio-membran relatif stabil selama proses adsorpsi berlangsung. Penurunan konsentrasi Cd^{2+} pada air lindi diduga terjadi akibat interaksi antara ion logam dengan gugus fungsi aktif pada permukaan bio-membran, seperti gugus hidroksil ($-\text{OH}$) dan karboksilat ($-\text{COOH}$), yang sebelumnya telah teridentifikasi melalui analisis FTIR. Gugus fungsi tersebut berperan sebagai situs aktif dalam mengikat ion logam melalui mekanisme adsorpsi fisik maupun kimia.

Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa bio-membran berbahan dasar bambu teraktivasi asam sitrat memiliki potensi yang baik sebagai adsorben ramah lingkungan untuk menurunkan kadar logam Cd^{2+} pada air lindi.

4.7.3. Perbandingan Dengan Larutan Sintetis

Untuk mengetahui kemampuan bio-membran dalam kondisi aplikasi nyata, dilakukan perbandingan antara hasil adsorpsi menggunakan larutan sintetis Cd^{2+} dan air lindi asli. Larutan sintetis yang digunakan merupakan larutan Cd^{2+} buatan dengan kondisi optimum hasil penelitian sebelumnya, yaitu massa adsorben 75 mg, pH 6, waktu kontak 90 menit, dan konsentrasi awal Cd^{2+} sebesar ± 50 ppm. Sementara itu, pengujian air lindi dilakukan menggunakan sampel asli tanpa penambahan konsentrasi maupun pengenceran sehingga merepresentasikan kondisi limbah sebenarnya di lapangan.

Perbandingan ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh kompleksitas matriks air lindi terhadap kinerja adsorpsi bio-membran. Larutan sintetis umumnya hanya mengandung ion Cd^{2+} sebagai zat terlarut utama sehingga proses adsorpsi berlangsung lebih sederhana dan minim

kompetisi ion. Sebaliknya, air lindi mengandung berbagai senyawa organik, ion anorganik, padatan terlarut, serta kemungkinan logam lain yang dapat bersaing dengan ion Cd^{2+} dalam menempati situs aktif adsorben.

Hasil perbandingan adsorpsi antara larutan sintetis dan air lindi disajikan pada Tabel 4.12, berikut.

Tabel 4. 12. Perbandingan Hasil Adsorpsi Larutan Sintetis dan Air Lindi

Parameter	Satuan	Larutan Sintetis	Air Lindi
Konsentrasi awal Cd^{2+}	ppm	49,83	2,927
Konsentrasi akhir Cd^{2+}	ppm	11,48	0,525
Persen removal	%	76,97	82,06
Kapasitas adsorpsi (q_e)	mg/gr	25,57	1,601
pH optimum	-	6	6
Massa adsorben	mg	75	75
Waktu kontak	menit	90	90

Sumber: Data Primer, 2026.

Berdasarkan Tabel 4.12, bio-membran menunjukkan kinerja adsorpsi yang lebih tinggi pada air lindi dibandingkan pada larutan sintetis. Persen removal pada air lindi mencapai 82,06%, sedangkan pada larutan sintetis sebesar 76,97%. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa keberadaan senyawa lain dalam air lindi mempengaruhi efektivitas adsorpsi ion Cd^{2+} .

Selain itu, kapasitas adsorpsi pada larutan sintetis jauh lebih tinggi dibandingkan air lindi. Hal ini disebabkan karena pada larutan sintetis hampir seluruh situs aktif adsorben berinteraksi langsung dengan ion Cd^{2+} , sedangkan pada air lindi terjadi kompetisi adsorpsi antara Cd^{2+} dengan ion-ion lain maupun bahan organik yang terkandung di dalamnya. Kompetisi tersebut menyebabkan sebagian situs aktif bio-membran tidak hanya ditempati oleh ion Cd^{2+} sehingga kapasitas adsorpsi menjadi lebih rendah.

Meskipun demikian, bio-membran tetap menunjukkan performa yang cukup baik pada aplikasi air lindi nyata dengan efisiensi penyisihan di atas 80%. Hasil ini menunjukkan bahwa bio-membran berbahan dasar bambu teraktivasi asam sitrat memiliki potensi untuk diaplikasikan sebagai adsorben ramah lingkungan dalam pengolahan limbah cair, khususnya untuk menurunkan kandungan logam berat Cd^{2+} pada air lindi.

4.7.4. Evaluasi Kinerja Bio-Membran

Evaluasi kinerja bio-membran dilakukan untuk menilai kemampuan adsorben berbahan dasar bambu teraktivasi asam sitrat dalam menyerap ion logam Cd^{2+} berdasarkan seluruh hasil pengujian yang telah dilakukan, baik pada larutan sintesis maupun pada air lindi asli. Evaluasi ini meliputi pengaruh massa adsorben, pH, waktu kontak, konsentrasi awal, model isotherm adsorpsi, serta aplikasi bio-membran pada sampel limbah nyata.

Berdasarkan hasil optimasi, kondisi adsorpsi terbaik diperoleh pada massa adsorben 75 mg, pH 6, dan waktu kontak 90 menit. Pada kondisi tersebut, bio-membran mampu menghasilkan efisiensi penyisihan Cd^{2+} yang relatif tinggi. Pengaruh pH menunjukkan bahwa kondisi netral cenderung memberikan proses adsorpsi yang lebih optimal karena gugus fungsi aktif pada permukaan adsorben berada dalam kondisi stabil dan mampu berinteraksi secara efektif dengan ion logam Cd^{2+} . Sementara itu, peningkatan waktu kontak menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung hingga mencapai kondisi mendekati kesetimbangan pada menit ke-90.

Hasil variasi konsentrasi menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi awal Cd^{2+} menyebabkan kapasitas adsorpsi (q_e) meningkat, namun efisiensi penyisihan cenderung menurun pada konsentrasi tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah situs aktif pada permukaan bio-membran memiliki keterbatasan dalam mengadsorpsi ion logam ketika jumlah ion Cd^{2+} dalam larutan semakin besar. Fenomena tersebut sesuai dengan karakteristik umum proses adsorpsi, dimana adsorben akan mengalami kejenuhan setelah sebagian besar situs aktif terisi.

Analisis isoterm adsorpsi menunjukkan bahwa model Langmuir memiliki nilai koefisien determinasi ($R^2 : 0,9692$) yang lebih tinggi dibandingkan model Freundlich ($R^2 : 0,5495$). Hal ini mengindikasikan bahwa proses adsorpsi Cd^{2+} oleh bio-membran cenderung mengikuti model isoterm Langmuir, yang menggambarkan bahwa adsorpsi terjadi secara monolayer pada permukaan adsorben homogen. Dengan demikian, proses adsorpsi diduga berlangsung pada situs aktif tertentu yang memiliki energi adsorpsi relatif seragam.

Karakterisasi menggunakan FTIR menunjukkan adanya gugus fungsi aktif seperti hidroksil ($-OH$), karbonil ($C=O$), dan gugus lain berbasis karbon pada permukaan bio-membran. Setelah proses aktivasi menggunakan asam sitrat, terjadi perubahan intensitas dan kemunculan beberapa puncak serapan yang menunjukkan peningkatan jumlah gugus aktif pada permukaan adsorben. Gugus-gugus tersebut berperan penting dalam mekanisme pengikatan ion Cd^{2+} melalui interaksi elektrostatik maupun pembentukan ikatan kompleks.

Pada pengujian aplikasi menggunakan air lindi nyata, bio-membran tetap menunjukkan kemampuan adsorpsi yang baik dengan efisiensi penyisihan lebih dari 80%. Meskipun nilai removal jauh lebih rendah dibandingkan larutan sintesis, hasil ini menunjukkan bahwa bio-membran masih efektif bekerja pada sistem limbah kompleks yang mengandung berbagai ion dan senyawa pengganggu. Penurunan performa pada air lindi diduga disebabkan oleh adanya kompetisi antar ion dan kandungan bahan organik yang turut mempengaruhi proses adsorpsi.

Secara keseluruhan, bio-membran berbahan dasar bambu teraktivasi asam sitrat memiliki potensi yang baik sebagai adsorben alternatif ramah lingkungan dalam pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat Cd^{2+} . Selain memiliki efisiensi adsorpsi yang tinggi, bahan baku biomassa bambu juga mudah diperoleh, bersifat *biodegradable*, serta memiliki nilai ekonomis yang relatif rendah sehingga berpotensi dikembangkan lebih lanjut pada skala aplikasi yang lebih besar.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai penggunaan bio-membran berbasis serat bambu sebagai adsorben alami untuk menurunkan logam berat kadmium (Cd^{2+}) pada air lindi, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Bio-membran berbasis serat bambu yang diaktivasi menggunakan asam sitrat memiliki karakteristik adsorben yang baik karena mengandung gugus fungsi aktif seperti hidroksil ($-\text{OH}$) dan karboksilat ($-\text{COOH}$) yang berperan dalam proses adsorpsi ion Cd^{2+} .
2. Proses aktivasi menggunakan asam sitrat mampu meningkatkan jumlah gugus fungsi aktif serta memperbaiki struktur pori bio-membran, sehingga meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap logam berat kadmium.
3. Kondisi operasi sangat mempengaruhi efektivitas adsorpsi Cd^{2+} . Kondisi optimum diperoleh pada massa adsorben 75 mg dengan efisiensi penyisihan sebesar 71,70%.
4. Variasi pH menunjukkan bahwa kondisi optimum adsorpsi terjadi pada pH 6 dengan efisiensi penyisihan mencapai 88,54%, karena pada kondisi tersebut gugus fungsi aktif berada dalam keadaan stabil dan mampu berinteraksi optimal dengan ion Cd^{2+} .
5. Waktu kontak optimum diperoleh pada 90 menit dengan efisiensi adsorpsi sebesar 86,98%, yang menunjukkan bahwa proses adsorpsi telah mencapai kondisi kesetimbangan.
6. Variasi konsentrasi awal Cd^{2+} menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi menyebabkan kapasitas adsorpsi (q_e) meningkat, namun efisiensi penyisihan menurun akibat keterbatasan jumlah situs aktif pada permukaan adsorben. Konsentrasi optimum dipilih pada 50 ppm dengan kapasitas adsorpsi sebesar 25,57 mg/g dan efisiensi removal sebesar 76,97%.

7. Hasil analisis isoterm menunjukkan bahwa proses adsorpsi lebih sesuai mengikuti model Langmuir dibandingkan Freundlich dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9692. Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi berlangsung secara monolayer pada permukaan adsorben yang relatif homogen dengan kapasitas adsorpsi maksimum (q_{max}) sebesar 26,32 mg/g.
8. Mekanisme adsorpsi Cd^{2+} oleh bio-membran berlangsung melalui kombinasi interaksi fisik dan kimia (fisikokimia), meliputi interaksi elektrostatik, pertukaran ion, serta pembentukan kompleks antara ion Cd^{2+} dengan gugus aktif pada permukaan adsorben.
9. Pengujian pada sampel air lindi nyata menunjukkan bahwa bio-membran mampu menurunkan konsentrasi Cd^{2+} dari 2,927 ppm menjadi sekitar 0,525 ppm dengan efisiensi penyisihan mencapai lebih dari 82%, sehingga menunjukkan potensi yang baik untuk aplikasi pengolahan limbah cair nyata.
10. Secara keseluruhan, bio-membran berbasis serat bambu teraktivasi asam sitrat memiliki potensi sebagai adsorben alternatif yang ramah lingkungan, ekonomis, biodegradable, dan aplikatif dalam pengolahan air lindi yang mengandung logam berat kadmium (Cd^{2+}).

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai regenerasi, stabilitas, dan umur pakai bio-membran untuk mengetahui efektivitas adsorben dalam penggunaan berulang dan jangka panjang.
2. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji kemampuan bio-membran terhadap berbagai jenis logam berat lain serta mengkaji pengaruh parameter operasional tambahan seperti temperatur, ion kompetitor, dan kecepatan pengadukan terhadap proses adsorpsi.

3. Perlu dilakukan pengembangan dan modifikasi bio-membran disertai karakterisasi tambahan seperti BET, XRD untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi serta memahami mekanisme adsorpsi secara lebih mendalam.
4. Pengujian pada skala pilot plant atau sistem kontinyu perlu dilakukan guna mengevaluasi efektivitas dan kelayakan aplikasi bio-membran pada kondisi lapangan yang sebenarnya, termasuk kajian ekonomi dan keberlanjutannya.
5. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengombinasikan metode adsorpsi bio-membran dengan teknologi pengolahan limbah lainnya serta mengembangkan biomassa lokal lain sebagai bahan adsorben alternatif yang lebih efektif dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Wang and Z. Qiao, “A comprehensive review of landfill leachate treatment technologies,” 2024, *Frontiers Media SA*. doi: 10.3389/fenvs.2024.1439128.
- [2] S. Renou, J. G. Givaudan, S. Poulain, F. Dirassouyan, and P. Moulin, “Landfill leachate treatment: Review and opportunity,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 150, no. 3, pp. 468–493, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077>.
- [3] B. Toukoniitty, E. Toukoniitty, J. Kuusisto, J.-P. Mikkola, T. Salmi, and D. Yu. Murzin, “Suppression of catalyst deactivation by means of acoustic irradiation—Application on fine and specialty chemicals,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 120, no. 1, pp. 91–98, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.03.028>.
- [4] P. B. Tchounwou, C. G. Yedjou, A. K. Patlolla, and D. J. Sutton, “Heavy metal toxicity and the environment,” 2012. doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6.
- [5] “Cadmium in Drinking-water Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality,” 2004.
- [6] K. Y. Foo and B. H. Hameed, “Insights into the modeling of adsorption isotherm systems,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 156, no. 1, pp. 2–10, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>.
- [7] G. Crini, “Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review,” *Bioresour. Technol.*, vol. 97, no. 9, pp. 1061–1085, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>.
- [8] M. Köhl, “Tropical Forestry Series Editor,” Hamburg, Germany, Jan. 2015. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/5439>
- [9] M. A. Hubbe, S. H. Hasan, and J. J. Ducoste, “Metal ion sorption: Review,” 2011.
- [10] A. L. Sepeda, “Lessons learned from process incident databases and the process safety incident database (PSID) approach sponsored by the Center for Chemical Process Safety,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 130, no. 1, pp. 9–14, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.061>.
- [11] F. Fu and Q. Wang, “Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review,” 2011, *Academic Press*. doi: 10.1016/j.jenvman.2010.11.011.

- [12] H. Luo, Y. Zeng, Y. Cheng, D. He, and X. Pan, "Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment," *Science of The Total Environment*, vol. 703, p. 135468, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135468>.
- [13] C. Teng, K. Zhou, C. Peng, and W. Chen, "Characterization and treatment of landfill leachate: A review," *Water Res.*, vol. 203, p. 117525, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117525>.
- [14] X. Zhao *et al.*, "A full-scale survey of sludge landfill: Sludge properties, leachate characteristics and microbial community structure," *Water Science and Technology*, vol. 80, no. 6, pp. 1185–1195, Sep. 2019, doi: [10.2166/wst.2019.362](https://doi.org/10.2166/wst.2019.362).
- [15] L. Lindamulla, N. Nanayakkara, M. Othman, S. Jinadasa, G. Herath, and V. Jegatheesan, "Municipal Solid Waste Landfill Leachate Characteristics and Their Treatment Options in Tropical Countries," 2022, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: [10.1007/s40726-022-00222-x](https://doi.org/10.1007/s40726-022-00222-x).
- [16] R. Xiang *et al.*, "A Review on Landfill Leachate Treatment Technologies: Comparative Analysis of Methods and Process Innovation," Apr. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: [10.3390/app15073878](https://doi.org/10.3390/app15073878).
- [17] L. Wang *et al.*, "Microplastics in Landfill Leachate: A Comprehensive Review on Characteristics, Detection, and Their Fates during Advanced Oxidation Processes," Jan. 01, 2023, *MDPI*. doi: [10.3390/w15020252](https://doi.org/10.3390/w15020252).
- [18] R. Xiang *et al.*, "A Review on Landfill Leachate Treatment Technologies: Comparative Analysis of Methods and Process Innovation," Apr. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: [10.3390/app15073878](https://doi.org/10.3390/app15073878).
- [19] C. Teng, K. Zhou, C. Peng, and W. Chen, "Characterization and treatment of landfill leachate: A review," *Water Res.*, vol. 203, p. 117525, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117525>.
- [20] L. Lindamulla, N. Nanayakkara, M. Othman, S. Jinadasa, G. Herath, and V. Jegatheesan, "Municipal Solid Waste Landfill Leachate Characteristics and Their Treatment Options in Tropical Countries," 2022, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: [10.1007/s40726-022-00222-x](https://doi.org/10.1007/s40726-022-00222-x).
- [21] S. Kim *et al.*, "Practical scale evaluation of a photocatalytic air purifier equipped with a Titania-zeolite composite bead filter for VOC removal and

- viral inactivation,” *Environ. Res.*, vol. 204, p. 112036, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112036>.
- [22] A. D. Le and S. K. Alzghari, “Systematic review of the clinical consequences of butyrfentanyl and corresponding analogues,” *Interdiscip. Toxicol.*, vol. 12, no. 2, pp. 83–88, 2020, doi: 10.2478/intox-2019-0009.
 - [23] H. Ali, E. Khan, and I. Ilahi, “Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation,” 2019, *Hindawi Limited*. doi: 10.1155/2019/6730305.
 - [24] A. Kaurin, S. Gluhar, N. Tilikj, and D. Lestan, “Soil washing with biodegradable chelating agents and EDTA: Effect on soil properties and plant growth,” *Chemosphere*, vol. 260, p. 127673, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127673>.
 - [25] H. Maulana, G. Gumelar, and G. Irianda, “Do gender and age affect an individual’s sense of coherence? an environmental psychology perspective of flood survivals in Indonesia,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Jan. 2021. doi: 10.1088/1755-1315/623/1/012030.
 - [26] F. Fu and Q. Wang, “Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review,” 2011, *Academic Press*. doi: 10.1016/j.jenvman.2010.11.011.
 - [27] R. Shen, X. Gu, H. Chen, Z. Mao, Q. Zeng, and E. Jeppesen, “Combining bivalve (*Corbicula fluminea*) and filter-feeding fish (*Aristichthys nobilis*) enhances the bioremediation effect of algae: An outdoor mesocosm study,” *Science of The Total Environment*, vol. 727, p. 138692, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138692>.
 - [28] L. Míguez, M. Esperanza, M. Seoane, and Á. Cid, “Assessment of cytotoxicity biomarkers on the microalga *Chlamydomonas reinhardtii* exposed to emerging and priority pollutants,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 208, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111646.
 - [29] O. M. Kronik, J. Prothmann, G. Troché, B. Svensmark, N. J. Nielsen, and J. H. Christensen, “A study of the spatial distribution patterns of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons in crowberry (*Empetrum nigrum*) in Ilulissat, Greenland”, doi: 10.1007/s11356-021-12365-3/Published.
 - [30] P. Pillai, P. Banwasi, Y. Lakhtaria, N. Kahadiya, Z. Timaniya, and S. Dharaskar, “Removal of heavy metals using low cost adsorbent from ground water.”

- [31] “Guidelines for Drinking-water Quality FOURTH EDITION INCORPORATING THE FIRST ADDENDUM.”
- [32] I. Pengolahan Air dan Limbah Berkelanjutan Menggunakan Adsorben Ramah Lingkungan Ir Eko Siswoyo and I. Profesor Bidang Rekayasa Pengolahan Air dan Limbah Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, “2 Pidato Pengukuhan Profesor.”
- [33] X. Chen *et al.*, “Isotherm models for adsorption of heavy metals from water - A review,” *Chemosphere*, vol. 307, p. 135545, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135545>.
- [34] S. Babel and T. A. Kurniawan, “Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 97, no. 1, pp. 219–243, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00263-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00263-7).
- [35] M. Baghbanzadeh *et al.*, “Malaria epidemics in India: Role of climatic condition and control measures,” *Science of The Total Environment*, vol. 712, p. 136368, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136368>.
- [36] H. Qin *et al.*, “Prevalence of breastfeeding: Findings from the first health service household interview in Hunan province, China,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 14, no. 2, Feb. 2017, doi: 10.3390/ijerph14020150.
- [37] B. Qiu *et al.*, “Ethanol mass transfer during pervaporation with PDMS membrane based on solution-diffusion model considering concentration polarization,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 220, pp. 276–282, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.03.021>.
- [38] H. Luo, Y. Zeng, Y. Cheng, D. He, and X. Pan, “Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment,” *Science of The Total Environment*, vol. 703, p. 135468, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135468>.
- [39] J. J. Chruściel and E. Leśniak, “Modification of epoxy resins with functional silanes, polysiloxanes, silsesquioxanes, silica and silicates,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 41, pp. 67–121, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.08.001>.
- [40] K. Y. Foo and B. H. Hameed, “Insights into the modeling of adsorption isotherm systems,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 156, no. 1, pp. 2–10, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>.
- [41] N. Ayawei, A. N. Ebelegi, and D. Wankasi, “Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms,” 2017, *Hindawi Limited*. doi: 10.1155/2017/3039817.

- [42] R. Wang and S. Lin, "Pore model for nanofiltration: History, theoretical framework, key predictions, limitations, and prospects," *J. Memb. Sci.*, vol. 620, p. 118809, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118809>.
- [43] G. Crini and E. Lichtfouse, "Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment," Mar. 01, 2019, *Springer Verlag*. doi: 10.1007/s10311-018-0785-9.
- [44] P. Parthasarathy, A. Fernandez, T. Al-Ansari, H. R. Mackey, R. Rodriguez, and G. McKay, "Thermal degradation characteristics and gasification kinetics of camel manure using thermogravimetric analysis," *J. Environ. Manage.*, vol. 287, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112345.
- [45] T. Wang *et al.*, "Co-pyrolysis behavior of sewage sludge and rice husk by TG-MS and residue analysis," *J. Clean. Prod.*, vol. 250, p. 119557, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119557>.
- [46] M. Köhl, "Tropical Forestry Series Editor." [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/5439>
- [47] K. Hu and Z. Sun, "Influence of polycarboxylate superplasticizers with different functional units on the early hydration of C3A-gypsum," *Materials*, vol. 12, no. 7, 2019, doi: 10.3390/ma12071132.
- [48] P. Kumari, Alka, S. Kumar, K. Nisa, and D. Kumar Sharma, "Efficient system for encapsulation and removal of paraquat and diquat from aqueous solution: 4-Sulfonatocalix[n]arenes and its magnetite modified nanomaterials," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 7, no. 3, p. 103130, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103130>.
- [49] D. Klemm, B. Heublein, H. P. Fink, and A. Bohn, "Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material," May 30, 2005. doi: 10.1002/anie.200460587.
- [50] J. Y. Song, Y.-M. Kim, B.-H. Lee, and S.-H. Yoo, "Increasing the dietary fiber contents in isomaltooligosaccharides by dextranucrase reaction with sucrose as a glucosyl donor," *Carbohydr. Polym.*, vol. 230, p. 115607, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115607>.
- [51] M. Wang, B. Zhang, J. Wang, C. Cai, Y. Xin, and H. Liu, "Degradation of lincomycin in aqueous solution with hydrothermal treatment: Kinetics, pathway, and toxicity evaluation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 343, pp. 138–145, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.008>.

- [52] X. Chen *et al.*, “Isotherm models for adsorption of heavy metals from water - A review,” *Chemosphere*, vol. 307, p. 135545, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135545>.
- [53] H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. H. Lee, and C. Zheng, “Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis,” *Fuel*, vol. 86, no. 12, pp. 1781–1788, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>.
- [54] M. Thommes *et al.*, “Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report),” *Pure and Applied Chemistry*, vol. 87, no. 9–10, pp. 1051–1069, Oct. 2015, doi: 10.1515/pac-2014-1117.
- [55] F. H. de Melo Ribeiro and L. P. Naval, “Reuse alternatives for effluents from the fish processing industry through multi-criteria analysis,” *J. Clean. Prod.*, vol. 227, pp. 336–345, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.110>.
- [56] S. Sathya, V. Ragul, V. P. Veeraraghavan, L. Singh, and M. I. Niyas Ahamed, “An in vitro study on hexavalent chromium [Cr(VI)] remediation using iron oxide nanoparticles based beads,” *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.*, vol. 14, p. 100333, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100333>.
- [57] R. Datta and M. Henry, “Lactic acid: Recent advances in products, processes and technologies - A review,” Jul. 2006. doi: 10.1002/jctb.1486.
- [58] T. Su *et al.*, “Polysaccharide metallohydrogel obtained from Salecan and trivalent chromium: Synthesis and characterization,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 181, pp. 285–291, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.10.088>.
- [59] N. Yang, Y. Li, W. Zhang, L. Wang, and Y. Gao, “Reduction of bacterial integrity associated with dam construction: A quantitative assessment using an index of biotic integrity improved by stability analysis,” *J. Environ. Manage.*, vol. 230, pp. 75–83, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.071>.
- [60] P. Bruździak, “Vapor correction of FTIR spectra – A simple automatic least squares approach,” *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 223, p. 117373, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.117373>.
- [61] J. Coates, “Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach,” in *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, Wiley, 2000. doi: 10.1002/9780470027318.a5606.

- [62] L. Tang *et al.*, “Precipitation and phase transformation mechanism of additive manufactured Ni-Co base superalloy,” *Mater. Charact.*, vol. 151, pp. 252–259, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.03.015>.
- [63] E. Siswoyo and dan L. Subhan Abdullah, “Penurunan Logam Timbal (Pb) pada Limbah Cair TPA Piyungan Yogyakarta dengan Constructed Wetlands Menggunakan Tumbuhan Eceng Gondok (*Eichornia Crassipes*),” *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, vol. 3, no. 1, pp. 73–079, 2011.
- [64] J. Li *et al.*, “The role of surface functional groups of pectin and pectin-based materials on the adsorption of heavy metal ions and dyes,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 276, p. 118789, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118789>.
- [65] L. Muhammad Faathir Chalid, “TUGAS AKHIR ANALISIS KANDUNGAN LOGAM BERAT Cd, Cu dan Pb MENGGUNAKAN METODE SPEKTROMETER SERAPAN ATOM PADA TANAH TPA PIYUNGAN, BANTUL. Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana (S1) Teknik Lingkungan,” 2022.
- [66] E. Siswoyo, “Penyerapan Logam Berat Timbal (Pb) Air Lindi Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) oleh Eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dalam Sistem Constructed Wetland,” 2023.
- [67] Y. Xu, Q. Li, and L. Man, “Bamboo-derived carboxymethyl cellulose for liquid film as renewable and biodegradable agriculture mulching,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 192, pp. 611–617, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.152>.
- [68] F. Y. Wang, H. Wang, and J. W. Ma, “Adsorption of cadmium (II) ions from aqueous solution by a new low-cost adsorbent-Bamboo charcoal,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 177, no. 1–3, pp. 300–306, May 2010, doi: [10.1016/j.jhazmat.2009.12.032](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.032).
- [69] O. P. Murphy, M. Vashishtha, P. Palanisamy, and K. V. Kumar, “A Review on the Adsorption Isotherms and Design Calculations for the Optimization of Adsorbent Mass and Contact Time,” May 23, 2023, *American Chemical Society*. doi: [10.1021/acsomega.2c08155](https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08155).

LAMPIRAN

Lampiran A

Perhitungan

1. Preparasi larutan stok Kadmium (Cd^{2+}) 1000ppm / 1000mL.

Di penelitian ini penulis menggunakan Kadmium Nitrat Tetrahidrat ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) dengan:

Mr Cd = 308,41 g/mol

Ar Cd = 112,41 g/mol

Sehingga :

$$m = \frac{\text{Mr Cd}}{\text{Ar Cd}} m_{\text{Cd}}$$

$$m = \frac{308,41}{112,41} \times 1$$

$$m = 2,74 \text{ gr}$$

Jadi, untuk membuat larutan stok kadmium peneliti membutuhkan 2,74gr $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ lalu dilarutkan menggunakan aquades 1000mL dan diaduk hingga homogen.

2. Preparasi larutan standar kurva kalibrasi (Cd^{2+}) dengan variasi konsentrasi (0,05 ; 0,1 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 3 ; 5)ppm / 100mL dari larutan stok.

Dengan rumus yang digunakan $M_1 \times V_2 = M_2 \times V_1$

M_1 : 1000mL

V_2 : 100mL

M_2 : Konsentrasi yang diperlukan

- a. Larutan Standar 0,05ppm / 100ppm

$$V_1 = \frac{0,05 \times 100}{1000}$$

$$V_1 = 0,005 \text{ mL}$$

$$V_1 = 5 \mu\text{L}$$

Jadi, untuk membuat larutan kadmium berkonsentrasi 0,05 ppm / 100 mL dari larutan stok kadmium 1000 ppm, diperlukan 5 μL larutan stok,

kemudian diencerkan dan dihomogenkan menggunakan akuades hingga mencapai volume akhir 100 mL.

- b. Larutan Standar 0,1ppm / 100ppm

$$V1 = \frac{0,1 \times 100}{1000}$$

$$V1 = 0,01mL$$

$$V1 = 10\mu L$$

Jadi, untuk membuat larutan kadmium berkonsentrasi 0,1 ppm / 100 mL dari larutan stok kadmium 1000 ppm, diperlukan 10 μ L larutan stok, kemudian diencerkan dan dihomogenkan menggunakan akuades hingga mencapai volume akhir 100 mL.

- c. Larutan Standar 0,5ppm / 100ppm

$$V1 = \frac{0,5 \times 100}{1000}$$

$$V1 = 0,05mL$$

$$V1 = 50\mu L$$

Jadi, untuk membuat larutan kadmium berkonsentrasi 0,5 ppm / 100 mL dari larutan stok kadmium 1000 ppm, diperlukan 50 μ L larutan stok, kemudian diencerkan dan dihomogenkan menggunakan akuades hingga mencapai volume akhir 100 mL.

- d. Larutan Standar 1ppm / 100ppm

$$V1 = \frac{1 \times 100}{1000}$$

$$V1 = 0,1mL$$

Jadi, untuk membuat larutan kadmium berkonsentrasi 1 ppm / 100 mL dari larutan stok kadmium 1000 ppm, diperlukan 0,1 mL larutan stok, kemudian diencerkan dan dihomogenkan menggunakan akuades hingga mencapai volume akhir 100 mL.

- e. Larutan Standar 2ppm / 100ppm

$$V1 = \frac{2 \times 100}{1000}$$

$$V1 = 0,2mL$$

Jadi, untuk membuat larutan kadmium berkonsentrasi 2 ppm / 100 mL dari larutan stok kadmium 1000 ppm, diperlukan 0,2 mL larutan stok, kemudian diencerkan dan dihomogenkan menggunakan akuades hingga mencapai volume akhir 100 mL.

- f. Larutan Standar 3ppm / 100ppm

$$V1 = \frac{3 \times 100}{1000}$$

$$V1 = 0,3mL$$

Jadi, untuk membuat larutan kadmium berkonsentrasi 3 ppm / 100 mL dari larutan stok kadmium 1000 ppm, diperlukan 0,3 mL larutan stok, kemudian diencerkan dan dihomogenkan menggunakan akuades hingga mencapai volume akhir 100 mL.

- g. Larutan Standar 5ppm / 100ppm

$$V1 = \frac{5 \times 100}{1000}$$

$$V1 = 0,5mL$$

Jadi, untuk membuat larutan kadmium berkonsentrasi 5 ppm / 100 mL dari larutan stok kadmium 1000 ppm, diperlukan 0,5 mL larutan stok, kemudian diencerkan dan dihomogenkan menggunakan akuades hingga mencapai volume akhir 100 mL.

3. Preparasi larutan aktivasi menggunakan Asam Sitrat ($C_6H_8O_7$) 0,4 M.

Larutan Asam Sitrat ($C_6H_8O_7$) digunakan untuk mengaktivasi adsorben sumpit bekas dengan perbandingan antara massa adsorben dan larutan asam sitrat sebesar 1 : 5. Maka, untuk 300 gram bio-membran membutuhkan 1500 mL atau 1,5 Liter larutan asam sitrat. Dengan:

Mol yang dibutuhkan = 0,4 M

Mr $C_6H_8O_7$ = 192 gr/mol

Sehingga:

$$M = \frac{Massa}{Mr \times V}$$

$$0,4 \text{ mol/L} = \frac{Massa}{192 \frac{gr}{mol} \times 1,5 \text{ L}}$$

$$\text{Massa} = 0,4 \text{ mol/L} \times 192 \text{ gr/mol} \times 1,5 \text{ L}$$

$$\text{Massa} = 115,2 \text{ gram}$$

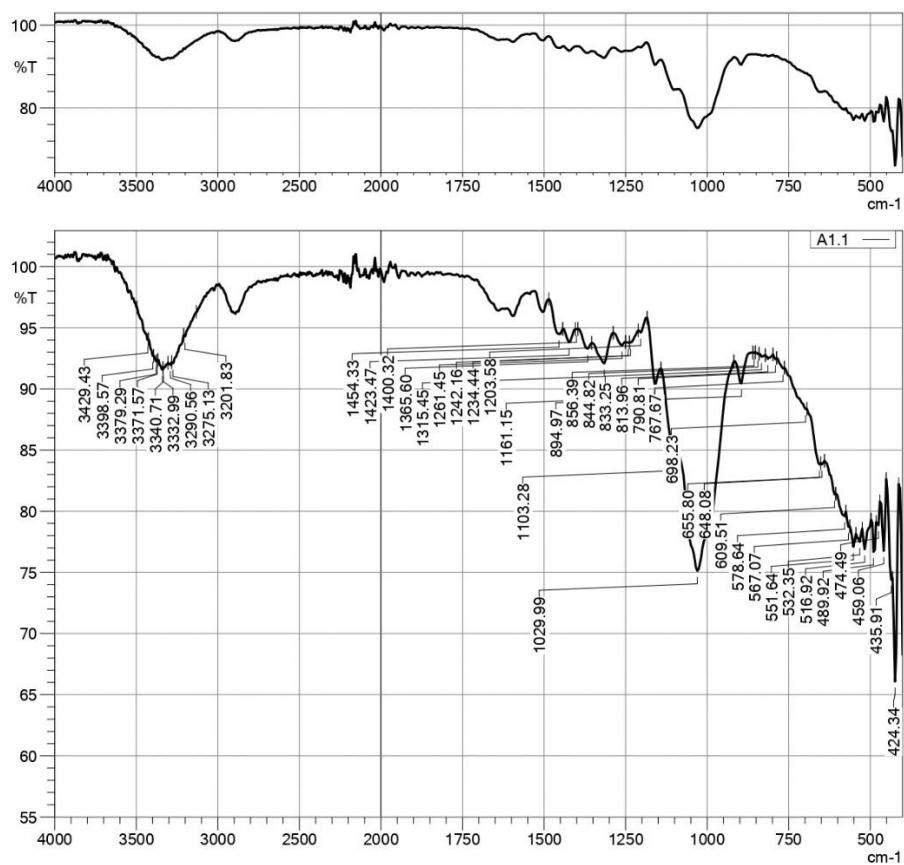
Jadi, untuk membuat larutan aktivasi menggunakan asam sitrat 0,4 M, dengan melarutkan 115,2 gram $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ lalu diencerkan dan dihomogenkan menggunakan aquades hingga mencapai volume akhir 1,5 L.

Lampiran B

Data Pembacaan Instrumen

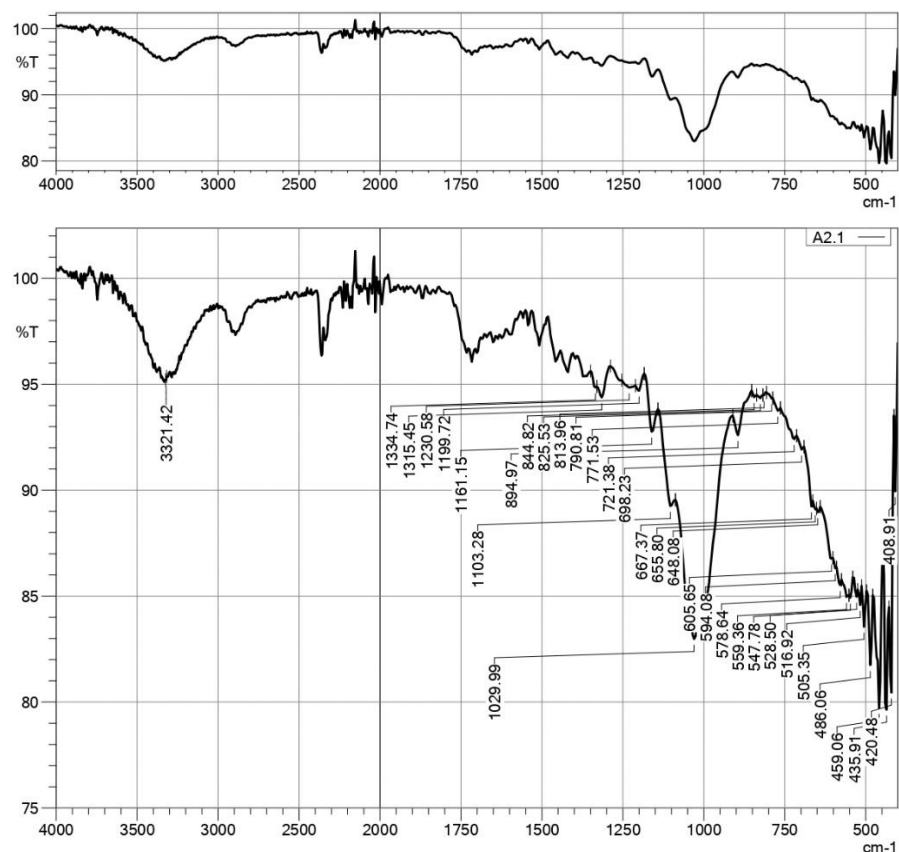
1. Data Pembacaan Instrument FTIR

a. Sebelum Aktivasi



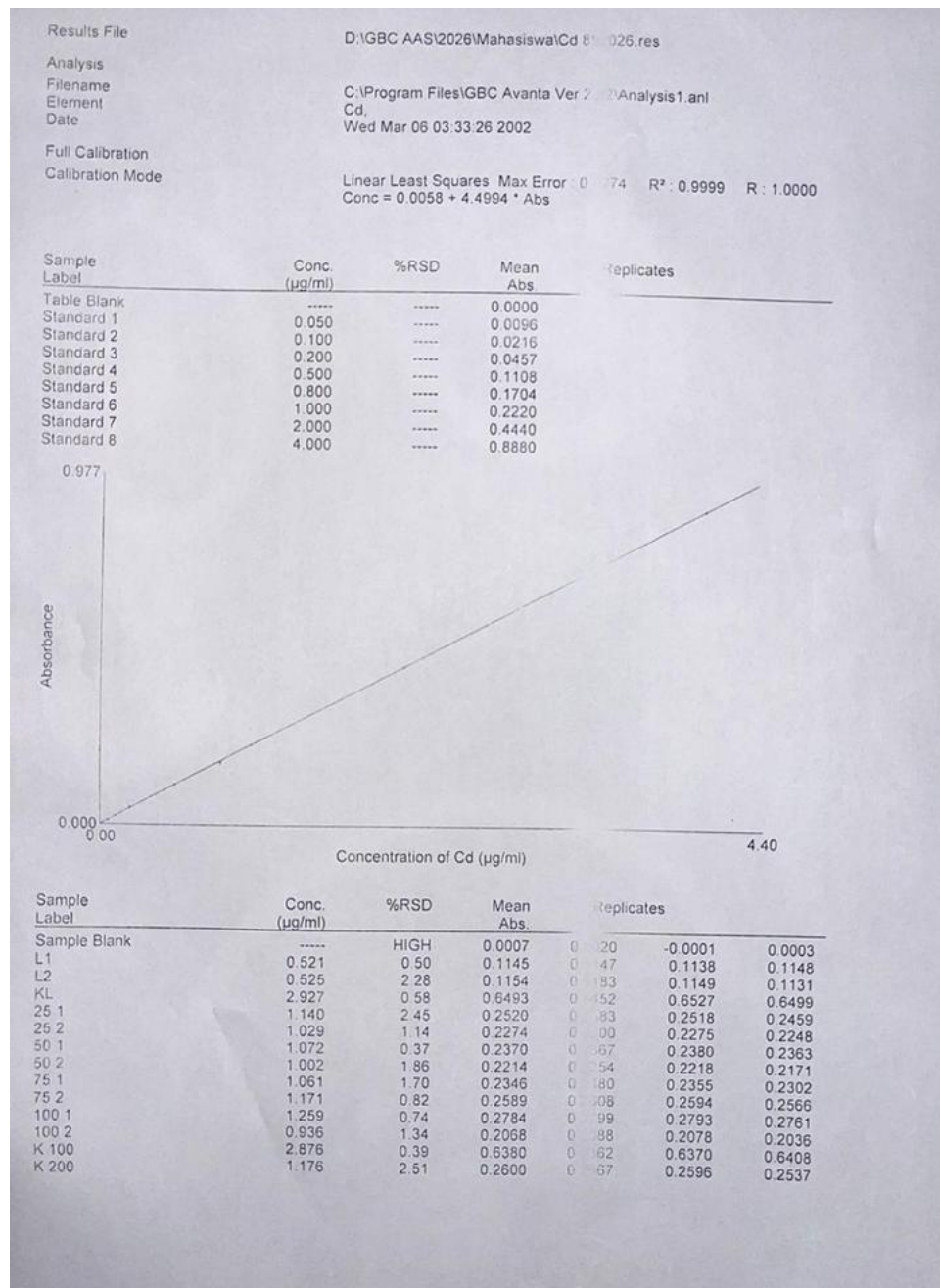
	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	424.34	66.09	11.52	432.05	412.77	533.630	116.579	
2	435.91	74.41	1.74	451.34	432.05	426.431	13.344	
3	459.06	76.76	5.14	470.63	451.34	400.475	47.802	
4	474.49	78.87	1.36	482.20	470.63	239.973	7.894	
5	489.92	76.69	2.51	497.63	482.20	340.329	19.424	
6	516.92	76.90	1.88	524.64	497.63	591.776	23.023	
7	532.35	77.50	0.89	543.93	524.64	425.741	8.167	
8	551.64	77.10	1.29	563.21	543.93	426.494	10.958	
9	567.07	78.73	0.44	574.79	563.21	241.490	2.726	
10	578.64	79.60	0.54	605.65	574.79	607.621	11.939	
11	609.51	81.38	0.36	640.37	605.65	595.617	-2.119	
12	648.08	83.83	0.16	651.94	640.37	185.820	1.001	
13	655.80	83.83	0.50	694.37	651.94	592.326	4.647	
14	698.23	88.36	0.20	763.81	694.37	702.216	11.653	
15	767.67	91.67	0.20	786.96	763.81	184.521	2.384	
16	790.81	92.43	0.19	798.53	786.96	86.049	1.281	
17	813.96	92.45	0.33	821.68	798.53	170.780	4.019	
18	833.25	92.63	0.21	840.96	821.68	140.215	1.772	
19	844.82	92.85	0.07	852.54	840.96	81.986	0.236	
20	856.39	92.95	0.04	860.25	852.54	54.275	0.140	
21	894.97	90.45	2.10	918.12	860.25	464.475	37.298	
22	1029.99	75.13	12.15	1091.71	918.12	3116.831	1102.631	
23	1103.28	84.39	1.79	1141.86	1091.71	641.235	44.558	
24	1161.15	90.43	3.13	1184.29	1141.86	326.927	61.266	
25	1203.58	94.61	0.47	1211.30	1184.29	131.643	4.737	
26	1234.44	93.80	0.15	1238.30	1211.30	157.075	3.134	
27	1242.16	93.78	0.03	1249.87	1238.30	71.734	0.271	
28	1261.45	93.56	0.50	1288.45	1249.87	231.977	8.848	
29	1315.45	92.09	2.16	1354.03	1288.45	448.719	66.513	
30	1365.60	93.30	0.77	1396.46	1354.03	257.398	16.693	
31	1400.32	94.87	0.02	1404.18	1396.46	39.480	0.093	
32	1423.47	93.83	1.07	1442.75	1404.18	216.584	19.707	
33	1454.33	94.49	1.08	1485.19	1442.75	193.945	29.346	
34	1501.83	94.29	0.30	1509.55	1485.19	365.895	6.959	
35	1575.13	92.09	0.34	1582.84	1509.55	509.534	18.350	
36	1590.56	91.95	0.22	1605.99	1582.84	183.776	2.372	
37	1632.99	91.64	0.12	1636.85	1605.99	250.960	1.527	
38	1640.71	91.58	0.22	1667.71	1636.85	249.216	3.469	
39	1671.57	92.28	0.05	1675.43	1667.71	59.417	0.178	
40	1679.29	92.27	0.10	1694.72	1675.43	145.034	0.306	
41	1698.57	92.70	0.18	1725.58	1694.72	207.210	3.343	
42	1729.43	94.01	0.21	1795.01	1725.58	334.021	13.015	

b. Sesudah Aktivasi



	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	408.91	89.95	4.71	412.77	401.19	87.016	31.837	
2	420.48	80.45	8.55	428.20	412.77	228.766	58.995	
3	435.91	79.64	6.08	447.49	428.20	325.856	56.398	
4	459.06	79.73	6.90	478.35	447.49	523.161	100.692	
5	486.06	81.75	3.36	497.63	478.35	316.227	29.521	
6	505.35	83.56	1.80	513.07	497.63	238.934	12.978	
7	516.92	84.59	0.83	524.64	513.07	173.442	4.383	
8	528.50	84.97	0.48	540.07	524.64	224.955	2.706	
9	547.78	84.93	0.40	551.64	540.07	171.164	2.961	
10	559.36	84.96	0.33	574.79	551.64	340.266	2.539	
11	578.64	85.52	0.40	590.22	574.79	219.162	4.136	
12	594.08	86.32	0.19	601.79	590.22	156.199	0.903	
13	605.65	86.77	0.27	640.37	601.79	462.916	0.451	
14	648.08	88.96	0.21	651.94	640.37	126.701	1.464	
15	655.80	89.10	0.15	663.51	651.94	124.755	1.078	
16	667.37	89.24	0.62	690.52	663.51	251.991	2.824	
17	698.23	91.92	0.31	713.66	690.52	180.880	3.034	
18	721.38	92.42	0.36	763.81	713.66	348.007	8.363	
19	771.53	93.76	0.28	786.96	763.81	139.882	3.609	
20	790.81	94.33	0.07	806.25	786.96	106.828	0.390	
21	813.96	94.48	0.06	817.82	806.25	63.051	0.064	
22	825.53	94.35	0.15	837.11	817.82	107.394	1.256	
23	844.82	94.39	0.21	852.54	837.11	84.892	1.533	
24	894.97	92.60	1.23	910.40	852.54	366.307	25.087	
25	1029.99	82.98	7.85	1087.85	910.40	2219.033	714.879	
26	1103.28	89.26	1.51	1141.86	1087.85	486.206	36.910	
27	1161.15	92.77	1.82	1184.29	1141.86	261.390	34.810	
28	1199.72	94.70	0.48	1211.30	1184.29	135.160	5.987	
29	1230.58	94.85	0.20	1253.73	1211.30	214.599	5.186	
30	1315.45	94.38	0.86	1330.88	1288.45	211.522	15.064	
31	1334.74	94.86	0.18	1350.17	1330.88	93.208	1.665	
32	3321.42	95.20	0.09	3325.28	3317.56	36.675	0.339	

2. Data Pembacaan Instrumen AAS



Results File

D:\GBC AAS\2026\Mahasiswa\Cd 2522026 p joni.res

Analysis

Filename

C:\Program Files\GBC AAS\Ver 2.02\Analysis1.anl

Element

Cd,

Date

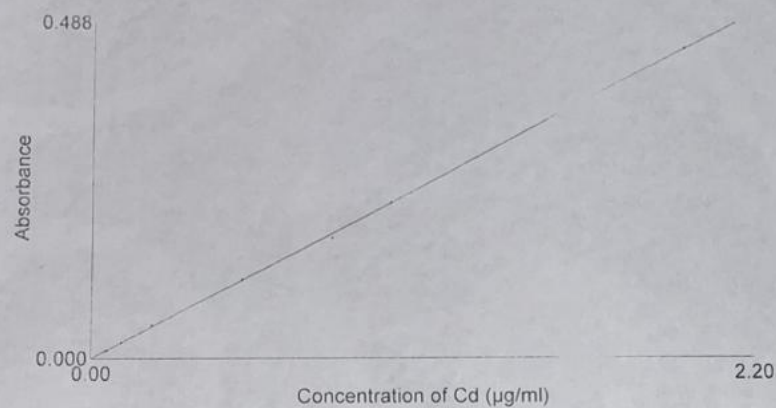
Wed Oct 23 03:58:11 2002

Full Calibration

Calibration Mode

Linear Least Squares Max Error: 0.0270 R²: 0.9997 R: 0.9998
Conc = 0.0050 + 4.5066 * Abs

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates
Table Blank	-----	-----	0.0000	
Standard 1	0.050	-----	0.0096	
Standard 2	0.100	-----	0.0216	
Standard 3	0.200	-----	0.0457	
Standard 4	0.500	-----	0.1108	
Standard 5	0.800	-----	0.1704	
Standard 6	1.000	-----	0.2220	
Standard 7	2.000	-----	0.4440	



Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates
blanko	-----	18.33	-0.0048	-0.0012 -0.0038 -0.0055
Kontrol 1	0.981	0.41	0.2166	0.2170 0.2155
Kontrol 2	1.057	2.06	0.2334	0.2355 0.2367
Kontrol 3	0.884	1.28	0.1949	0.1971 0.1922
25 1	0.486	1.40	0.1068	0.1053 0.1068
25 2	0.387	1.45	0.0849	0.0845 0.0839
25 3	0.450	2.83	0.0987	0.0979 0.0965
50 1	0.391	1.97	0.0857	0.0862 0.0870
50 2	0.381	3.23	0.0835	0.0849 0.0804
50 3	0.363	1.15	0.0795	0.0796 0.0785
75 1	0.149	6.06	0.0319	0.0341 0.0309
75 2	0.199	0.68	0.0431	0.0432 0.0433

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates
75 3	0.366	3.08	0.0800	0.0810 0.0818
100 1	0.156	2.41	0.0335	0.0333 0.0328
100 2	0.163	6.28	0.0350	0.0346 0.0330
100 3	0.238	1.72	0.0516	0.0526 0.0511
200 1	0.089	11.47	0.0186	0.0204 0.0191
200 2	0.199	4.47	0.0431	0.0419 0.0421
200 3	0.119	2.55	0.0253	0.0246 0.0255
300 1	0.101	5.47	0.0214	0.0208 0.0227
300 2	0.123	5.71	0.0263	0.0259 0.0279
300 3	0.099	3.84	0.0208	0.0215 0.0211

Results File

D:\GBC AAS\2026\Metode\ (9 April 2026).res

Analysis

Filename

C:\Program Files\GBC Avanti Ver 2.02\Analysis1.anl

Element

Cd

Date

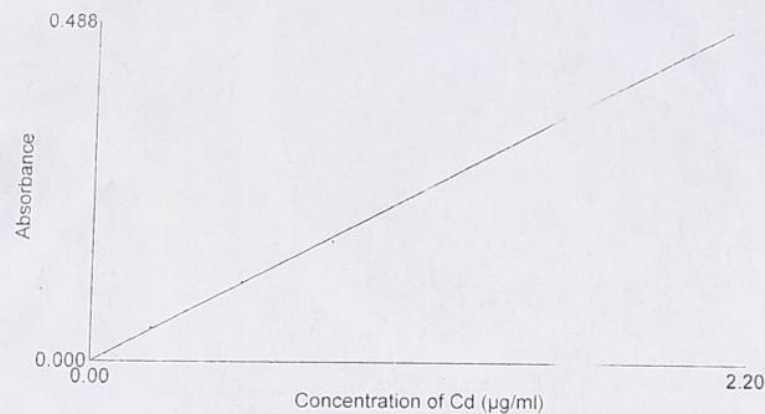
Tue Feb 05 00:15:41 2002

Full Calibration

Calibration Mode

Linear Least Squares Max Error: 0.0270 R²: 0.9997 R: 0.9998
Conc = 0.0050 + 4.5066 * Abs

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates
Table Blank	-----	-----	0.0000	
Standard 1	0.050	-----	0.0096	
Standard 2	0.100	-----	0.0216	
Standard 3	0.200	-----	0.0457	
Standard 4	0.500	-----	0.1108	
Standard 5	0.800	-----	0.1704	
Standard 6	1.000	-----	0.2220	
Standard 7	2.000	-----	0.4440	



Sample Label	Conc (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates
Sample Blank	-----	HIGH	0.0030	-0.0009 0.0051 0.0047
Sample 1	0.782	0.61	0.1724	0.1735 0.1714 0.1723
Sample 2	0.779	2.07	0.1717	0.1777 0.1743 0.1732
Sample 3	0.483	1.21	0.1060	0.1072 0.1047 0.1063
Sample 4	0.103	3.23	0.0217	0.0206 0.0224 0.0210
Sample 5	0.330	3.14	0.0720	0.0696 0.0742 0.0722
Sample 6	0.201	1.17	0.0435	0.0437 0.0439 0.0430
Sample 7	0.876	0.60	0.1933	0.1929 0.1946 0.1924
Sample 8	0.794	1.59	0.1752	0.1720 0.1763 0.1772
Sample 9	0.450	2.34	0.0986	0.0980 0.0967 0.1012
Sample 10	0.116	4.38	0.0247	0.0260 0.0241 0.0241
Sample 11	0.173	5.71	0.0374	0.0363 0.0396 0.0371

PH

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates
Sample 12	0.083	6.29	0.0173	0.0185 0.0166 0.0167

Results File

D:\GBC AAS\2026\Mahasiswa\cd 14042026.res

Analysis

C:\Program Files\GBC Avance\Ver 2.02\Analysis1.anl

Filename

Cd,

Element

Date

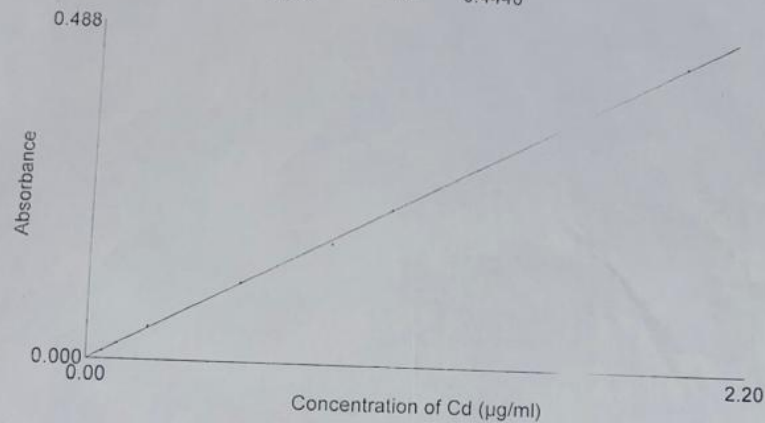
Sat Feb 09 22:54:58 2002

Full Calibration

Calibration Mode

Linear Least Squares Max Error: 0.0270 R²: 0.9997 R: 0.9997
Conc = 0.0050 + 4.5066 * Abs

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates
Table Blank	-----	-----	0.0000	
Standard 1	0.050	-----	0.0096	
Standard 2	0.100	-----	0.0216	
Standard 3	0.200	-----	0.0457	
Standard 4	0.500	-----	0.1108	
Standard 5	0.800	-----	0.1704	
Standard 6	1.000	-----	0.2220	
Standard 7	2.000	-----	0.4440	



Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates
Sample Blank	-----	5.65	-0.0011	-0.0011 -0.0012 -0.0011
Sample 1	0.211	0.88	0.0458	0.0452 0.0455 0.0455
Sample 2	0.022	HIGH	0.0038	0.0040 0.0049 0.0026
Sample 3	0.061	5.66	0.0125	0.0117 0.0130 0.0129
Sample 4	0.042	1.16	0.0081	0.0042 0.0080 0.0082
Sample 5	0.039	10.66	0.0076	0.0035 0.0071 0.0071
Sample 6	0.093	7.97	0.0195	0.0035 0.0188 0.0213
Sample 7	0.026	11.25	0.0048	0.0043 0.0048 0.0042
Sample 8	0.022	16.92	0.0039	0.0046 0.0038 0.0033
Sample 9	-0.000	HIGH	-0.0011	-0.0010 -0.0017 -0.0008
Sample 10	0.000	HIGH	-0.0011	-0.0015 -0.0007 -0.0011
Sample 11	0.007	HIGH	0.0004	-0.0008 0.0004 0.0017

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates
Sample 12	0.040	10.29	0.0078	0.0034 0.0082 0.0069
Sample 13	0.294	2.55	0.0641	0.0038 0.0625 0.0640
Sample 14	0.017	HIGH	0.0027	0.0015 0.0035 0.0032
Sample 15	0.031	HIGH	0.0058	0.0037 0.0060 0.0027
Sample 16	0.007	HIGH	0.0004	0.0003 0.0004 0.0006
Sample 17	0.024	15.34	0.0041	0.0036 0.0034 0.0043
Sample 18	0.012	HIGH	0.0016	0.0027 0.0003 0.0018
Sample 19	0.490	2.88	0.1076	0.1053 0.1063 0.1111
Sample 20	0.527	1.17	0.1159	0.1073 0.1146 0.1159

Results File

D:\GBC AAS\2026\Mahasiswa\16042026 Cd1.res

Analysis

Filename

C:\Program Files\GBC Avant\Ver 2.02\Analysis1.anl

Element

Cd,

Date

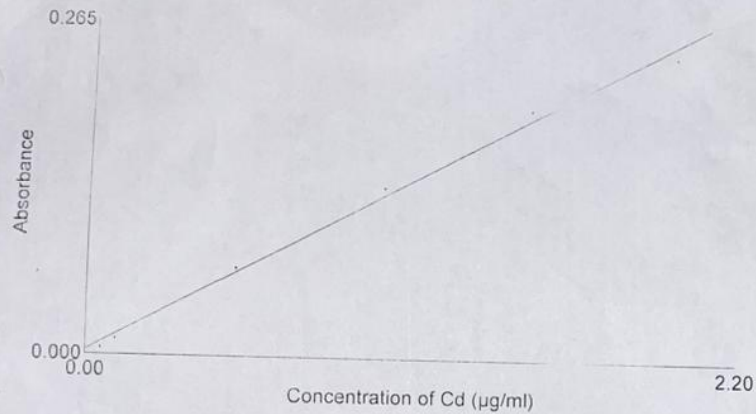
Tue Feb 12 05:11:28 2002

Full Calibration

Calibration Mode

Linear Least Squares Max Error : 0.0757 R² : 0.9953 R : 0.9976
Conc = -0.0233 + 8.0697 * Abs

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates
Table Blank	-----	-----	0.0000	
Standard 1	0.050	-----	0.0049	
Standard 2	0.100	-----	0.0118	
Standard 4	0.500	-----	0.0682	
Standard 6	1.000	-----	0.1328	
Standard 7	1.500	-----	0.1965	
Standard 6	2.000	-----	0.2414	



Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates
Sample Blank	-----	HIGH	0.0010	0.0014 0.0005 0.0011
1	0.100	5.56	0.0153	0.0159 0.0157 0.0143
2	0.065	3.37	0.0109	0.0110 0.0113 0.0105
3	0.068	2.83	0.0114	0.0110 0.0117 0.0114
4	0.070	3.18	0.0116	0.0113 0.0120 0.0114
5	1.268	1.07	0.1600	0.1613 0.1617 0.1601
6	0.117	6.57	0.0174	0.0177 0.0167 0.0167
7	0.132	1.64	0.0193	0.0193 0.0190 0.0196
8	0.177	5.73	0.0249	0.0256 0.0258 0.0232
S9	0.470	9.32	0.0617	0.0617 0.0605 0.0680
S10	0.448	2.03	0.0587	0.0581 0.0601 0.0580
S11	0.605	1.81	0.0796	0.0795 0.0782 0.0810
S12	0.437	2.14	0.0574	0.0565 0.0568 0.0588
S13	1.196	0.81	0.1577	0.1583 0.1581 0.1588
S14	1.288	2.03	0.1700	0.1673 0.1686 0.1739
S15	1.030	2.72	0.1358	0.1397 0.1353 0.1324
S16	1.011	1.86	0.1332	0.1324 0.1360 0.1312
S17	1.181	7.45	0.1557	0.1526 0.1597 0.1648
S18	1.024	1.40	0.1349	0.1342 0.1346 0.1370
S19	1.231	1.69	0.1623	0.1602 0.1638 0.1641
S20	1.299	1.37	0.1714	0.1718 0.1689 0.1735
S21	1.129	2.82	0.1489	0.1481 0.1512 0.1515
S22	0.980	0.68	0.1291	0.1301 0.1289 0.1284
S23	1.141	0.22	0.1505	0.1502 0.1505 0.1508
S24	1.084	1.37	0.1429	0.1437 0.1407 0.1444

Lampiran B

Surat Administrasi

1. Sertifikat Pengujian SEM dan EDX



No. Dok : Form-37.P/Sert. Uji Rev. 0
Tgl. Terbit : 2 Juni 2026

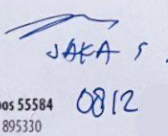
Nomor : 05680526B/LTUII/VI/2026
Number

SERTIFIKAT PENGUJIAN *Certificate of Testing*

<u>Dibuat untuk</u> <i>Certified to</i>	: Ikhwaniul Habib Al Habsy
<u>Jenis>Nama Sampel</u> <i>Type/Name of sample</i>	: Padat (S1 (Non-Aktivasi)); Padat (S2 (Aktivasi))
<u>Asal Sampel</u> <i>Origin of sample</i>	: Universitas Islam Indonesia
<u>Jumlah Sampel</u> <i>Amount of sample</i>	: 1; 1
<u>Kode Sampel</u> <i>Kode Sampel</i>	: 05680526/PD/LTUII/1; 05680526/PD/LTUII/2
<u>Parameter</u> <i>Parameters</i>	: Morfologi+EDX; Morfologi+EDX
<u>Tanggal Pengambilan Sampel</u> <i>Sample taken on</i>	: 2 Juni 2026
<u>Tanggal Penerimaan Sampel</u> <i>Sample received on</i>	: 18 Mei 2026
<u>Tanggal Pengujian Sampel</u> <i>Sample tested on</i>	: 29 Mei 2026



2. Surat Permohonan Izin Pengambilan Sampel Lindi TPA

	FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN Akreditasi Institusi "A"	PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN PROGRAM MAGISTER
Yogyakarta, 20 April 2026		
No	: 009/Ka.Prodi.TL.S2/10/MTL/IV/2026	
Hal	: Permohonan Penelitian Tesis	
Lamp	:	
Kepada Yth. Kepala Dinas Lingkungan Hidup Kota Yogyakarta di Tempat		
<i>Assalamu' alaikum wr. wb.</i>		
Sehubungan dengan penyusunan Laporan Tesis di Program Studi Teknik Lingkungan Program Magister, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, bersama ini kami mohon Bapak/Ibu untuk dapat memberikan izin Penelitian untuk Tesis kepada mahasiswa kami :		
Nama	: Ikhwaniul Habib Al Habsy	
Program Studi	: Magister Teknik Lingkungan	
Judul Tesis	: Bio-Membran Berbasis Serat Bambu Sebagai Adsorben Alami Untuk Menurunkan Logam Berat Kadmium (Cd^{2+}) Pada Lindi Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Piyungan	
Kebutuhan Sampel	: Air Lindi TPA Piyungan	
No. Telp	: 0822-8070-5508	
Demikian permohonan ini kami sampaikan. Atas perhatian dan kerjasamanya kami ucapkan terima kasih.		
<i>Wassalamu' alaikum wr. wb.</i>		
		 Ketua Prodi Magister Dr. Ir. Andik Yulianto, S.T., M.T., IPM
Gedung Moh. Natsir Lantai 2 Kaliurang Km.14,5 Yogyakarta, Kodepos 55584 Telp. (0274) 896440 ext.: 3210; Fax. (0274) 895330 Email: environment@uii.ac.id www.environment.uii.ac.id		

ES | INNOVATION | PERFECTION environment.uii.ac.id

Lampiran C

Riwayat Hidup Penulis

Ikhwanul Habib Al Habsy lahir di Bukittinggi, Sumatera Barat, pada tanggal 06 Juni 2001. Penulis menempuh pendidikan Sarjana pada Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, pada tahun 2019 dan menyelesaikan studi pada tahun 2023 dengan memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.). Pada tahun 2024, penulis melanjutkan pendidikan pada Program Magister Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Selama menempuh pendidikan tinggi, penulis menaruh minat pada bidang teknik lingkungan, khususnya pengolahan limbah, teknologi adsorpsi, pengendalian pencemaran lingkungan, serta pengelolaan kualitas lingkungan. Berbagai kegiatan akademik dan penelitian yang dilakukan selama masa studi menjadi bagian dari upaya pengembangan kompetensi keilmuan dan profesional di bidang teknik lingkungan.

Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) pada Program Magister Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.