

## PEMANFAATAN LIMBAH PELEPAH PISANG SEBAGAI MEMBRAN SELULOSA RAMAH LINGKUNGAN UNTUK ADSORPSI Pb (II): STUDI OPTIMASI

Rohmatun Nafi'ah<sup>1\*</sup>, Muslikah<sup>2</sup>, Endra Pujiastuti<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Institut Teknologi Kesehatan Cendekia Utama Kudus, Jawa Tengah, Indonesia

Email: [nafistikescenut@gmail.com](mailto:nafistikescenut@gmail.com)

### ABSTRAK

Limbah pelepah pisang memiliki kandungan selulosa yang tinggi dan berpotensi dimanfaatkan sebagai adsorben ramah lingkungan untuk pengolahan limbah logam berat. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi pH dan waktu kontak terhadap kapasitas adsorpsi ion Pb(II) menggunakan membran selulosa pelepah pisang termodifikasi polietilen glikol (PEG) 8%. Selulosa diekstraksi dari pelepah pisang (*Musa paradisiaca*) melalui perlakuan alkali dan proses pemutihan, kemudian disintesis menjadi membran selulosa asetat menggunakan metode inversi fasa dengan penambahan PEG 8%. Karakterisasi membran dilakukan menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), sedangkan analisis konsentrasi Pb(II) dilakukan menggunakan Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). Uji adsorpsi dilakukan pada variasi pH 4, 5, dan 8 serta variasi waktu kontak 5, 10, dan 15 menit. Hasil FTIR menunjukkan adanya gugus fungsi khas selulosa, yaitu O–H, C–O, dan C–O–C, serta mengindikasikan keberhasilan modifikasi PEG pada membran. Hasil adsorpsi menunjukkan bahwa kondisi optimum diperoleh pada pH 8 dengan kapasitas adsorpsi sebesar 4,992 mg/g, sedangkan waktu kontak optimum diperoleh pada 15 menit dengan kapasitas adsorpsi sebesar 4,890 mg/g. Peningkatan kapasitas adsorpsi pada kondisi basa dipengaruhi oleh berkurangnya kompetisi ion H<sup>+</sup> terhadap ion Pb(II) dalam berikatan dengan gugus aktif adsorben. Berdasarkan hasil penelitian, membran selulosa pelepah pisang termodifikasi PEG berpotensi digunakan sebagai adsorben alternatif yang ramah lingkungan dan berbiaya rendah untuk pengolahan limbah logam berat Pb(II).

**Kata Kunci:** Adsorpsi, Membran selulosa, Pelepah pisang, Pb(II), Logam berat

### ABSTRACT

*Banana sheath waste contains a high cellulose content and has potential to be utilized as an environmentally friendly adsorbent for heavy metal wastewater treatment. This study aimed to investigate the effect of pH variation and contact time on the adsorption capacity of Pb(II) ions using polyethylene glycol (PEG) 8%-modified banana sheath cellulose membrane. Cellulose was extracted from banana sheath (*Musa paradisiaca*) through alkaline treatment and bleaching processes, followed by the synthesis of cellulose acetate membrane using the phase inversion method with the addition of 8% PEG. Membrane characterization was carried out using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), while Pb(II) concentration analysis was performed using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). Adsorption experiments were conducted at pH variations of 4, 5, and 8 and contact times of 5, 10, and 15 min. FTIR analysis confirmed the presence of characteristic cellulose functional groups, including O–H, C–O, and C–O–C, indicating the successful incorporation of PEG into the membrane matrix. The adsorption results showed that the optimum condition was achieved at pH 8 with an adsorption capacity of 4.992 mg/g, while the optimum contact time was obtained at 15 min with an adsorption capacity of 4.890 mg/g. The increased adsorption capacity under alkaline conditions was attributed to the reduced competition between H<sup>+</sup> ions and Pb(II) ions for binding to the active sites of*

*the adsorbent. Based on these findings, PEG-modified banana sheath cellulose membrane demonstrates promising potential as an environmentally friendly and low-cost alternative adsorbent for Pb(II) heavy metal removal.*

**Keywords:** *Adsorption, Cellulose membrane, Banana sheath, Pb(II), Heavy metal*

## LATAR BELAKANG

Pencemaran logam berat, khususnya timbal (Pb(II)), merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang semakin meningkat akibat aktivitas industri seperti baterai, pelapisan logam, cat, dan pengolahan bahan kimia. Keberadaan ion Pb(II) di lingkungan perairan menjadi perhatian serius karena bersifat toksik, bioakumulatif, dan dapat menyebabkan berbagai gangguan kesehatan, seperti kerusakan ginjal, anemia, gangguan sistem saraf, serta gangguan perkembangan pada manusia (Idress *et al.*, 2021). Oleh karena itu, diperlukan teknologi pengolahan limbah yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk menurunkan konsentrasi ion Pb(II) sebelum limbah dibuang ke lingkungan.

Salah satu metode yang banyak dikembangkan untuk menghilangkan ion logam berat dari limbah cair adalah adsorpsi. Metode ini memiliki beberapa keunggulan, antara lain proses yang sederhana, biaya operasional yang relatif rendah, efisiensi yang tinggi, serta tidak menghasilkan produk samping berbahaya dibandingkan metode pengolahan konvensional lainnya (Nafi'ah & Rosyidah, 2021). Efektivitas proses adsorpsi dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya pH larutan dan waktu kontak. pH memengaruhi spesiasi ion logam dan muatan permukaan adsorben, sedangkan waktu kontak menentukan tercapainya kesetimbangan adsorpsi antara adsorben dan adsorbat (Chowdhury *et al.*, 2022; Arumughan *et al.*, 2021).

Dalam beberapa tahun terakhir, biomassa lignoselulosa banyak dimanfaatkan sebagai adsorben karena ketersediaannya melimpah, dapat diperbarui, biodegradable, dan ramah lingkungan (Abdelhamid & Mathew, 2021). Salah satu biomassa yang potensial adalah pelepah pisang. Limbah pertanian ini mengandung  $\alpha$ -selulosa sekitar 83,3% dengan kandungan lignin yang relatif rendah, yaitu 2,97% (Wati *et al.*, 2023). Kandungan selulosa yang tinggi menjadikan pelepah pisang berpotensi dikembangkan sebagai bahan baku adsorben berbasis membran. Selain memiliki sifat mekanik yang baik dan mudah dimodifikasi, selulosa juga memiliki gugus hidroksil (-OH) yang dapat berinteraksi dengan ion logam berat melalui mekanisme adsorpsi (Hamidon *et al.*, 2022).

Berbagai penelitian telah melaporkan pemanfaatan material berbasis selulosa untuk adsorpsi logam berat. Membran selulosa termodifikasi Na<sub>2</sub>EDTA dari limbah kulit jagung dilaporkan mampu meningkatkan adsorpsi ion Pb(II) melalui penambahan gugus pengompleks logam (Nafi'ah & Fahmi, 2021). Penelitian lain menunjukkan bahwa membran selulosa berbasis bagase tebu yang dimodifikasi Na<sub>2</sub>EDTA juga memiliki kemampuan adsorpsi yang baik terhadap ion logam berat (Nafi'ah & Primadevi, 2020). Di sisi lain, penelitian mengenai pemanfaatan pelepah pisang umumnya masih difokuskan pada pembuatan membran filtrasi dan karakterisasi sifat fisiknya (Wati *et al.*, 2023), sehingga informasi mengenai aplikasinya sebagai adsorben ion Pb(II) masih terbatas.

Salah satu strategi yang dapat dilakukan untuk meningkatkan performa membran selulosa adalah modifikasi menggunakan polyethylene glycol (PEG). PEG bersifat hidrofilik dan berfungsi sebagai agen pembentuk pori (*pore-forming agent*) yang dapat meningkatkan porositas, luas permukaan efektif, dan jumlah situs aktif adsorpsi pada membran. Selain itu, keberadaan gugus eter (-C-O-C-) pada PEG dapat meningkatkan afinitas membran terhadap ion logam berat. Mekanisme adsorpsi ion Pb(II) pada membran selulosa-PEG diperkirakan terjadi melalui interaksi elektrostatis dan pembentukan ikatan koordinasi antara ion Pb(II) dengan gugus hidroksil (-OH) pada selulosa maupun gugus eter pada PEG. Pada kondisi pH yang lebih tinggi, sebagian gugus hidroksil mengalami deprotonasi sehingga meningkatkan jumlah situs bermuatan negatif yang mampu mengikat ion Pb(II).

Meskipun berbagai penelitian telah mengembangkan adsorben berbasis selulosa, kajian mengenai pemanfaatan membran selulosa pelepah pisang termodifikasi PEG sebagai adsorben ion Pb(II), khususnya terkait pengaruh variasi pH dan waktu kontak terhadap kapasitas adsorpsi, masih sangat terbatas. Dengan demikian, terdapat *research gap* berupa minimnya informasi mengenai optimasi kondisi adsorpsi ion Pb(II) menggunakan membran selulosa pelepah pisang yang dimodifikasi PEG.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan membran selulosa berbasis limbah pelepah pisang (*Musa paradisiaca*) termodifikasi PEG sebagai adsorben ramah lingkungan untuk adsorpsi ion Pb(II). Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada pemanfaatan limbah pelepah pisang sebagai sumber selulosa untuk sintesis membran termodifikasi PEG serta evaluasi pengaruh pH dan waktu kontak terhadap kapasitas adsorpsi ion Pb(II). Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan adsorben biomassa yang berkelanjutan, ekonomis, dan berpotensi diaplikasikan pada pengolahan limbah logam berat (Syeda *et al.*, 2022; Mohanrasu *et al.*, 2025).

## **METODE PENELITIAN**

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelepah pisang kepok (*Musa paradisiaca*) yang diperoleh dari Desa Tengger Kulon, Kabupaten Tuban, Indonesia. Bahan kimia yang digunakan meliputi natrium hidroksida (NaOH), natrium hipoklorit (NaOCl), asam asetat glasial, asam asetat anhidrida, asam sulfat ( $H_2SO_4$ ), asam nitrat ( $HNO_3$ ), aseton, polietilen glikol (PEG), serta timbal nitrat ( $Pb(NO_3)_2$ ). Seluruh bahan kimia yang digunakan berkualitas *pro analysis* (p.a).

Peralatan yang digunakan meliputi sistem refluks, oven, hot plate stirrer, magnetic stirrer, neraca analitik, ayakan 44 mesh, viskometer Ostwald, desikator, serta peralatan gelas standar laboratorium. Karakterisasi dilakukan menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR, PerkinElmer) dan Atomic Absorption Spectroscopy (AAS, PerkinElmer).

### **Preparasi dan Ekstraksi Selulosa**

Pelepah pisang dibersihkan, dipotong kecil, dikeringkan, dan dihaluskan hingga lolos ayakan 44 mesh. Sebanyak 10 g serbuk kering direaksikan dengan 250 mL larutan NaOH 4% (b/v) menggunakan metode refluks pada suhu  $70^\circ C$  selama 2 jam untuk menghilangkan lignin dan hemiselulosa awal. Residu kemudian dicuci hingga pH netral.

Proses delignifikasi dilanjutkan dengan perlakuan menggunakan 250 mL NaOCl 1,7% (v/v) pada suhu  $70^\circ C$  selama 4 jam. Sampel kembali dicuci hingga netral, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu  $70^\circ C$  selama 4 jam. Selanjutnya, sampel digerus hingga diperoleh serbuk selulosa dan disimpan dalam desikator hingga digunakan.

### **Sintesis Selulosa Asetat**

Selulosa hasil ekstraksi direaksikan dengan 100 mL asam asetat glasial dan diaduk selama 60 menit pada suhu  $38^\circ C$ . Selanjutnya ditambahkan 2 mL  $H_2SO_4$  sebagai katalis dan diaduk selama 45 menit. Proses asetilasi dilakukan dengan penambahan 100 mL asam asetat anhidrida dan diaduk selama 45 menit pada suhu  $38^\circ C$ .

Campuran kemudian dihidrolisis dengan penambahan 10 mL akuades dan 20 mL asam asetat glasial, diikuti pengadukan pada suhu  $50^\circ C$  selama 30 menit. Produk dicuci hingga bebas bau asam, disaring, dan dikeringkan dalam oven pada suhu  $50^\circ C$  selama 2 jam. Selulosa asetat yang diperoleh kemudian dikarakterisasi menggunakan FTIR.

## **Pembuatan Membran Selulosa Termodifikasi PEG**

Membran dibuat menggunakan metode inversi fasa melalui teknik pencelupan. Sebanyak 10 g selulosa asetat dilarutkan dalam 45 mL aseton dan diaduk hingga homogen. Selanjutnya, PEG ditambahkan sebanyak 8% (b/b) terhadap berat polimer sebagai agen pembentuk pori (*pore-forming agent*).

Larutan kemudian dituangkan pada plat kaca (25 × 30 cm) dan diratakan hingga membentuk lapisan tipis. Proses pengeringan dilakukan pada suhu ruang hingga terbentuk membran kering. Membran yang diperoleh selanjutnya digunakan dalam uji adsorpsi.

## **Preparasi Larutan Pb (II)**

### **Larutan Induk dan Larutan Standar**

Larutan induk Pb (II) 1000 mg/L disiapkan dengan melarutkan 0,1599 g  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  dalam  $\text{HNO}_3$  1% dan diencerkan hingga volume 1000 mL. Larutan kerja 100 mg/L diperoleh melalui pengenceran bertingkat.

### **Kurva Kalibrasi**

Larutan standar Pb (II) dengan konsentrasi 2, 4, 6, 8, dan 10 mg/L disiapkan dari larutan kerja. Absorbansi masing-masing larutan diukur menggunakan AAS untuk memperoleh kurva kalibrasi.

## **Uji Adsorpsi Pb (II)**

### **Penentuan pH Optimum**

Sebanyak 0,5 g membran selulosa-PEG dimasukkan ke dalam erlenmeyer yang berisi 25 mL larutan Pb (II) 100 mg/L. pH larutan diatur pada variasi 4, 5, dan 8 menggunakan  $\text{HNO}_3$  atau NaOH.

Campuran diaduk menggunakan magnetic stirrer pada kecepatan 150 rpm selama 60 menit pada suhu 25°C. Setelah itu, larutan dibiarkan selama 15 menit dan disaring menggunakan kertas saring Whatman No. 42. Filtrat dianalisis menggunakan AAS.

### **Penentuan Waktu Kontak Optimum**

Sebanyak 0,5 g membran ditambahkan ke dalam 25 mL larutan Pb (II) 100 mg/L pada pH optimum. Campuran diaduk pada kecepatan 150 rpm dengan variasi waktu kontak 5, 10, dan 15 menit pada suhu 25°C. Setelah proses adsorpsi, larutan disaring dan filtrat dianalisis menggunakan AAS untuk menentukan konsentrasi akhir Pb (II).

## **Analisis Kapasitas Adsorpsi**

Kapasitas adsorpsi dihitung menggunakan persamaan berikut:

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

### **Keterangan:**

$q_e$  = kapasitas adsorpsi (mg/g)

$C_0$  = konsentrasi awal (mg/L)

$C_e$  = konsentrasi akhir (mg/L)

$V$  = volume larutan (L)

$W$  = massa adsorben (g)

## **Analisis Data**

Data hasil karakterisasi FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada membran sebelum dan sesudah adsorpsi. Data AAS digunakan untuk menentukan konsentrasi Pb (II) dalam larutan. Seluruh data dianalisis secara deskriptif kuantitatif dan disajikan dalam

bentuk tabel dan grafik. Parameter yang dianalisis meliputi kapasitas adsorpsi, pengaruh pH, dan waktu kontak terhadap efisiensi adsorpsi.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Ekstraksi Selulosa dari Pelepeh Pisang**

Proses ekstraksi selulosa dari pelepeh pisang dilakukan melalui perlakuan alkali menggunakan larutan NaOH 4% (b/v) dengan metode refluks pada suhu 70 °C selama 2 jam. Perlakuan ini bertujuan untuk menghilangkan komponen non-selulosa, terutama lignin dan hemiselulosa, yang terikat dalam matriks lignoselulosa.

Selama proses refluks, terjadi perubahan warna pada sistem reaksi, di mana filtrat berwarna kuning kecoklatan dan residu berwarna coklat. Warna filtrat tersebut mengindikasikan terlarutnya senyawa lignin dan ekstraktif lainnya ke dalam larutan alkali. Lignin yang terdegradasi dalam kondisi basa akan membentuk senyawa fenolik terlarut, sehingga memberikan warna khas pada filtrat.

Residu hasil perlakuan alkali kemudian dicuci hingga mencapai pH netral untuk menghilangkan sisa larutan NaOH. Tahap selanjutnya adalah proses pemutihan menggunakan larutan NaOCl 1,7% (v/v) pada suhu 70°C, yang bertujuan untuk mengoksidasi dan menghilangkan sisa lignin. Setelah proses pemutihan, terjadi perubahan warna residu menjadi putih, yang menunjukkan peningkatan kemurnian selulosa akibat berkurangnya kandungan lignin dan hemiselulosa.

Residu yang telah diputihkan kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 70°C selama 4 jam hingga diperoleh selulosa kering. Perubahan warna dari coklat menjadi putih merupakan indikator visual keberhasilan proses delignifikasi dan pemurnian selulosa. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa perlakuan alkali diikuti proses bleaching efektif dalam meningkatkan kandungan selulosa pada biomassa lignoselulosa.

Untuk mengkonfirmasi keberadaan gugus fungsi khas selulosa, sampel selulosa yang diperoleh selanjutnya dikarakterisasi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Analisis FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus hidroksil (-OH), ikatan C-H, serta gugus C-O-C yang merupakan ciri khas struktur selulosa. Selain itu, penurunan intensitas pita serapan yang berkaitan dengan lignin (seperti gugus aromatik C=C) menunjukkan keberhasilan proses delignifikasi.

### **Pembuatan Membran Selulosa Termodifikasi PEG dan Karakterisasi FTIR**

Membran selulosa termodifikasi disintesis melalui metode inversi fasa dengan melarutkan selulosa dalam pelarut aseton, diikuti penambahan polietilen glikol (PEG) sebesar 8% (b/b) sebagai agen pembentuk pori (*pore-forming agent*). Proses pengadukan menggunakan magnetic stirrer bertujuan untuk memperoleh larutan homogen sehingga distribusi PEG dalam matriks polimer menjadi merata. Larutan kemudian dicetak dan dikeringkan hingga terbentuk membran padat.

Penambahan PEG diketahui berperan penting dalam meningkatkan porositas membran melalui mekanisme pemisahan fasa selama proses penguapan pelarut. PEG yang bersifat hidrofilik akan menciptakan rongga dalam struktur membran, sehingga berpotensi meningkatkan luas permukaan dan jumlah situs aktif yang berkontribusi terhadap proses adsorpsi logam.

Karakterisasi struktur kimia membran dilakukan menggunakan FTIR untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi sebelum dan setelah modifikasi PEG. Perbandingan

spektrum FTIR antara selulosa pelepah pisang dan membran selulosa-PEG 8% disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Spektrum FTIR pada selulosa dan membran selulosa-PEG 8%**

Bilangan Gelombang (cm <sup>-1</sup> )		Gugus Fungsi
Selulosa	Membran Selulosa-PEG 8%	
3430,90	3431,66	O–H (hidroksil)
–	2907,92	C–H alkana
1625,40	1626,39	C=O
1318,51	1318,26	C–O (eter)
1061,00	1108,11	C–O–C (glikosidik)

Spektrum FTIR pada Tabel 1 menunjukkan bahwa baik selulosa maupun membran selulosa-PEG memiliki pita serapan khas pada daerah sekitar 3430 cm<sup>-1</sup> yang mengindikasikan keberadaan gugus hidroksil (–OH). Gugus ini merupakan karakteristik utama selulosa dan berperan penting dalam proses adsorpsi melalui interaksi hidrogen dan ikatan koordinasi dengan ion logam Pb(II).

Munculnya pita baru pada bilangan gelombang 2907,92 cm<sup>-1</sup> pada membran selulosa-PEG mengindikasikan adanya gugus C–H alifatik yang berasal dari PEG. Hal ini menunjukkan bahwa PEG telah berhasil terinkorporasi ke dalam matriks selulosa. Selain itu, terjadi sedikit pergeseran bilangan gelombang pada beberapa gugus fungsi, seperti pada pita C–O–C dari 1061,00 cm<sup>-1</sup> menjadi 1108,11 cm<sup>-1</sup>. Pergeseran ini mengindikasikan adanya interaksi antara rantai selulosa dan PEG, yang kemungkinan disebabkan oleh pembentukan ikatan hidrogen antar molekul.

Pita serapan pada daerah sekitar 1625 cm<sup>-1</sup> yang berkaitan dengan gugus karbonil (C=O) tetap muncul pada kedua sampel, yang dapat dikaitkan dengan keberadaan gugus asetil atau sisa lignin dalam jumlah kecil. Sementara itu, pita pada daerah 780–660 cm<sup>-1</sup> menunjukkan keberadaan struktur aromatik, yang kemungkinan berasal dari residu lignin yang belum sepenuhnya tereliminasi selama proses ekstraksi.

Secara keseluruhan, hasil analisis FTIR menunjukkan bahwa tidak terjadi perubahan signifikan pada struktur dasar selulosa, namun terdapat indikasi kuat keberhasilan modifikasi dengan PEG. Modifikasi ini diharapkan dapat meningkatkan sifat hidrofilisitas dan porositas membran, sehingga berpotensi meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap ion Pb(II).

### **Kurva Kalibrasi Pb(II)**

Hasil kurva kalibrasi menunjukkan bahwa terdapat hubungan linier antara konsentrasi Pb(II) dan absorbansi, yang sesuai dengan prinsip hukum Lambert–Beer. Nilai koefisien determinasi (R<sup>2</sup>) sebesar 0,939 menunjukkan bahwa 93,9% variasi absorbansi dapat dijelaskan oleh perubahan konsentrasi Pb(II). Hal ini mengindikasikan bahwa metode analisis memiliki tingkat linearitas yang cukup baik, meskipun belum mencapai kategori sangat kuat (R<sup>2</sup> ≥ 0,99) yang umumnya diharapkan pada analisis instrumen presisi tinggi seperti AAS.

Nilai kemiringan (*slope*) sebesar 0,006 menunjukkan sensitivitas metode terhadap perubahan konsentrasi Pb(II), di mana peningkatan konsentrasi sebesar 1 mg/L menghasilkan kenaikan absorbansi sebesar 0,006. Namun, terdapat deviasi pada titik konsentrasi tinggi (10 mg/L) yang menunjukkan peningkatan absorbansi yang relatif lebih besar dibandingkan tren linier. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti ketidakstabilan atomisasi, gangguan matriks, atau kesalahan instrumental.

### Kinerja Adsorpsi Pb(II) Berdasarkan Analisis AAS

Analisis konsentrasi Pb(II) sebelum dan sesudah proses adsorpsi dilakukan menggunakan Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). Data hasil pengukuran digunakan untuk menghitung kapasitas adsorpsi membran selulosa termodifikasi PEG 8%.

### Pengaruh pH terhadap Kapasitas Adsorpsi

Data hasil adsorpsi Pb(II) pada variasi pH disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengaruh pH terhadap adsorpsi Pb(II)

pH	Konsentrasi Awal (mg/L)	Absorbansi	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
4	100	0,0284	4,733	4,9776
5	100	0,0309	5,150	4,9751
8	100	0,0132	2,200	4,9920



Gambar 1. Pengaruh pH terhadap kapasitas adsorpsi

Berdasarkan data pada Gambar 1, kapasitas adsorpsi meningkat dengan kenaikan pH dan mencapai nilai optimum pada pH 8. Meskipun perbedaan kapasitas tidak terlalu signifikan, tren ini menunjukkan bahwa kondisi pH mempengaruhi interaksi antara ion Pb(II) dan gugus aktif pada adsorben.

Pada pH rendah (pH 4–5), kapasitas adsorpsi relatif lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh tingginya konsentrasi ion  $H^+$  dalam larutan yang berkompetisi dengan ion Pb(II) untuk berikatan dengan gugus hidroksil (-OH) pada permukaan adsorben. Akibatnya, jumlah situs aktif yang tersedia untuk mengikat Pb(II) menjadi terbatas.

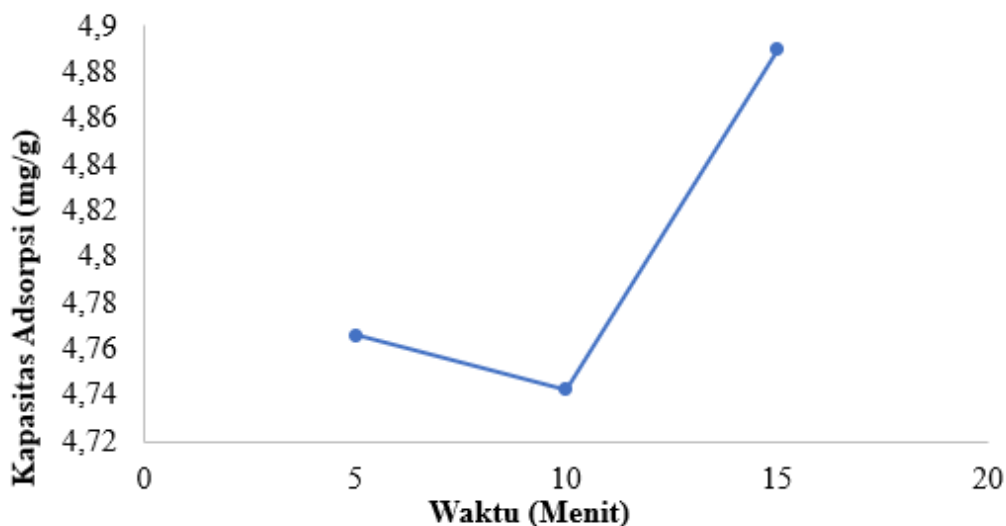
Sebaliknya, pada pH yang lebih tinggi (pH 8), jumlah ion  $H^+$  menurun sehingga kompetisi berkurang dan gugus fungsi adsorben cenderung bermuatan negatif. Kondisi ini meningkatkan interaksi elektrostatis antara adsorben dan ion Pb(II), sehingga kapasitas adsorpsi meningkat. Hasil ini sejalan dengan teori adsorpsi logam berat yang menyatakan bahwa pH merupakan parameter kunci dalam menentukan efisiensi adsorpsi melalui pengaruhnya terhadap spesiasi logam dan muatan permukaan adsorben.

### Pengaruh Waktu Kontak terhadap Kapasitas Adsorpsi

Data hasil pengaruh waktu kontak terhadap adsorpsi Pb(II) disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengaruh waktu kontak terhadap adsorpsi Pb(II)

Waktu (menit)	Konsentrasi Awal (mg/L)	Absorbansi	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
5	100	0,0231	3,850	4,7633
10	100	0,0173	2,883	4,7425
15	100	0,0216	3,600	4,8900



Gambar 2. Pengaruh pH terhadap kapasitas adsorpsi

Hasil penelitian pada Gambar 2 menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi cenderung meningkat dengan bertambahnya waktu kontak dan mencapai kondisi optimum pada 15 menit. Pada waktu kontak yang lebih singkat (5–10 menit), interaksi antara ion Pb(II) dan gugus aktif adsorben belum berlangsung secara maksimal, sehingga jumlah ion yang teradsorpsi masih terbatas.

Peningkatan kapasitas adsorpsi pada waktu kontak 15 menit menunjukkan bahwa sistem telah mendekati kondisi kesetimbangan, di mana sebagian besar situs aktif telah berinteraksi dengan ion Pb(II). Namun, fluktuasi nilai kapasitas pada interval waktu menunjukkan bahwa proses adsorpsi tidak sepenuhnya linier, yang kemungkinan dipengaruhi oleh distribusi pori membran, difusi ion ke dalam matriks, serta heterogenitas permukaan adsorben.

Fenomena ini menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi tidak hanya dikendalikan oleh interaksi permukaan, tetapi juga oleh proses difusi intra-partikel. Oleh karena itu, analisis kinetika lebih lanjut diperlukan untuk menentukan model adsorpsi yang paling sesuai.

#### Keterkaitan Struktur Membran dan Kinerja Adsorpsi

Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan adanya gugus hidroksil (-OH), C–O, dan C–O–C pada membran selulosa termodifikasi PEG yang berperan sebagai situs aktif dalam proses adsorpsi ion Pb(II). Penambahan PEG ditandai dengan munculnya pita serapan C–H alifatik serta pergeseran bilangan gelombang pada beberapa gugus fungsi, yang mengindikasikan adanya interaksi antara PEG dan rantai selulosa melalui pembentukan ikatan hidrogen.

Keberadaan gugus hidroksil (-OH) pada selulosa memungkinkan terjadinya interaksi antara pasangan elektron bebas atom oksigen dengan ion Pb(II) melalui mekanisme kompleksasi atau pembentukan ikatan koordinasi. Selain itu, gugus eter (-C–O–C-) yang berasal dari PEG turut meningkatkan jumlah situs yang dapat berinteraksi dengan ion logam.

Pada kondisi pH yang lebih tinggi, sebagian gugus hidroksil mengalami deprotonasi sehingga menghasilkan muatan negatif pada permukaan membran. Kondisi ini meningkatkan gaya tarik elektrostatik terhadap ion Pb(II), sehingga proses adsorpsi berlangsung lebih efektif.

PEG juga berperan sebagai agen pembentuk pori (pore-forming agent) yang meningkatkan hidrofilitas dan porositas membran. Peningkatan porositas menyebabkan luas permukaan efektif membran menjadi lebih besar dan mempercepat difusi ion Pb(II) menuju situs aktif adsorpsi. Kombinasi antara peningkatan jumlah situs aktif dan kemudahan difusi ion logam tersebut berkontribusi terhadap kapasitas adsorpsi membran selulosa-PEG yang relatif tinggi terhadap ion Pb(II).

## **SIMPULAN DAN SARAN**

### **Simpulan**

Membran selulosa pelepah pisang termodifikasi PEG 8% berhasil disintesis dan berpotensi digunakan sebagai adsorben ramah lingkungan untuk penjerapan ion Pb(II). Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan adanya gugus fungsi khas selulosa serta keberhasilan modifikasi PEG pada membran. Kondisi adsorpsi optimum diperoleh pada pH 8 dengan kapasitas adsorpsi sebesar 4,992 mg/g dan waktu kontak optimum pada 15 menit dengan kapasitas adsorpsi sebesar 4,890 mg/g. Peningkatan kapasitas adsorpsi pada kondisi basa dipengaruhi oleh berkurangnya kompetisi ion H<sup>+</sup> terhadap ion Pb(II) dalam berikatan dengan gugus aktif adsorben.

### **Saran**

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji kinetika dan isoterm adsorpsi guna mengetahui mekanisme adsorpsi secara lebih mendalam, serta menambahkan karakterisasi morfologi dan struktur membran seperti SEM dan XRD. Selain itu, perlu dilakukan optimasi komposisi PEG dan pengujian regenerasi adsorben agar membran selulosa pelepah pisang dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai material adsorben yang efektif dan aplikatif dalam pengolahan limbah logam berat.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Abdelhamid, H. N., & Mathew, A. P. (2021). Cellulose-based materials for water remediation: adsorption, catalysis, and antifouling. *Frontiers in Chemical Engineering*, 3, 790314.
- Arumughan, V., Nypelö, T., Hasani, M., & Larsson, A. (2021). Fundamental aspects of the non-covalent modification of cellulose via polymer adsorption. *Advances in colloid and interface science*, 298, 102529.
- Chowdhury, I. R., Chowdhury, S., Mazumder, M. A. J., & Al-Ahmed, A. (2022). Removal of lead ions (Pb<sup>2+</sup>) from water and wastewater: a review on the low-cost adsorbents. *Applied Water Science*, 12(8), 185.
- Hamidon, T. S., Adnan, R., Haafiz, M. M., & Hussin, M. H. (2022). Cellulose-based beads for the adsorptive removal of wastewater effluents: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(3), 1965-2017.
- Idress, H., Zaidi, S. Z. J., Sabir, A., Shafiq, M., Khan, R. U., Harito, C., & Walsh, F. C. (2021). Cellulose acetate based Complexation-NF membranes for the removal of Pb (II) from waste water. *Scientific Reports*, 11(1), 1806.
- Mohanrasu, K., Manivannan, A. C., Rengarajan, H. J. R., Kandaiah, R., Ravindran, A., Panneerselvan, L., & Sathish, C. I. (2025). Eco-friendly biopolymers and composites: a sustainable development of adsorbents for the removal of pollutants from wastewater. *npj Materials Sustainability*, 3(1), 13.

- Nafi'ah, R., & Primadevi, S. (2020). Sintesis membran selulosa termodifikasi Na<sub>2</sub>EDTA dari bagase tebu untuk adsorpsi logam Pb. *Jurnal Keperawatan dan Kesehatan Masyarakat Cendekia Utama*, 9(3), 272-281.
- Nafi'ah, R., & Fahmi, H. (2021). Kapasitas Adsorpsi Membran Selulosa Batang Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*) Termodifikasi Na<sub>2</sub>-EDTA Dengan Variasi Waktu Dan Konsentrasi Logam Cr (VI). *Cendekia Journal of Pharmacy*, 5(1), 16-27.
- Nafi'ah, R., & Rosyidah, S. (2021). Synthesis of Na-CMC modified cellulose membrane from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) rods against Cr (VI) metal adsorption. *JKPK (Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia)*, 6(3), 352-361.
- Persano, F., Malitesta, C., & Mazzotta, E. (2024). Cellulose-based hydrogels for wastewater treatment: a focus on metal ions removal. *Polymers*, 16(9), 1292.
- Syeda, H. I., & Yap, P. S. (2022). A review on three-dimensional cellulose-based aerogels for the removal of heavy metals from water. *Science of the Total Environment*, 807, 150606.
- Wati, R. P., Yuliati, S., & Zaman, M. (2023). Pengolahan Limbah Sablon Menggunakan Membran Selulosa Asetat Berbasis Pelepah Pisang Secara Mikrofiltrasi. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(4).