



## Analisis Neraca Massa Penyisihan Ion Timbal ( $Pb^{2+}$ ) oleh Bioadsorben Daun Rami pada Sistem Adsorpsi Batch

Rania Nurlita Sari<sup>1\*</sup>, Raden Kokoh Haryo Putro<sup>2</sup>, Yerry Kahaditu Firmansyah<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Indonesia

\*Korespondensi penulis: [22034010099@student.upnjatim.ac.id](mailto:22034010099@student.upnjatim.ac.id)

**Abstract.** Lead ( $Pb^{2+}$ ) contamination in wastewater is a major environmental concern due to its toxicity, persistence, and ability to accumulate in living organisms. Adsorption using biomass-based materials has been developed as an alternative treatment method because it is efficient, economical, and environmentally friendly. This study aimed to analyze the effect of bioadsorbent dosage and contact time on  $Pb^{2+}$  removal efficiency and evaluate  $Pb^{2+}$  mass distribution using mass balance analysis in a batch adsorption system. Ramie leaf (*Boehmeria nivea*) was utilized as a bioadsorbent due to its lignocellulosic content, which provides active sites for metal ion adsorption. The research was conducted experimentally through bioadsorbent preparation, chemical activation, and batch adsorption using artificial  $Pb^{2+}$  solutions with variations in bioadsorbent dosage and contact time.  $Pb^{2+}$  concentrations before and after adsorption were analyzed using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). The obtained data were used to determine removal efficiency and  $Pb^{2+}$  distribution between the liquid phase and bioadsorbent. The results showed that ramie leaf bioadsorbent effectively reduced  $Pb^{2+}$  concentration, with the optimum condition obtained at 4 g/L bioadsorbent dosage and 90 minutes contact time, achieving 98.46% removal efficiency. Mass balance analysis indicated that  $Pb^{2+}$  ions were successfully transferred from the solution phase onto the bioadsorbent surface. These findings demonstrate that ramie leaf bioadsorbent has potential as a sustainable alternative material for heavy metal removal in wastewater treatment.

**Keywords:** Adsorption; Batch System; Lead Ion; Mass Balance; Ramie Leaf Bioadsorbent.

**Abstrak.** Pencemaran air oleh ion timbal ( $Pb^{2+}$ ) merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang perlu diperhatikan karena memiliki sifat toksik, persisten, dan dapat terakumulasi dalam organisme hidup. Metode adsorpsi menggunakan material berbasis biomassa telah dikembangkan sebagai alternatif pengolahan karena memiliki proses yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh dosis bioadsorben dan waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan  $Pb^{2+}$  serta mengevaluasi distribusi massa  $Pb^{2+}$  menggunakan analisis neraca massa pada sistem adsorpsi batch. Daun rami (*Boehmeria nivea*) digunakan sebagai bioadsorben karena memiliki kandungan lignoselulosa yang menyediakan sisi aktif dalam proses pengikatan ion logam. Penelitian dilakukan secara eksperimental melalui tahapan persiapan bioadsorben, aktivasi kimia, serta proses adsorpsi batch menggunakan larutan artifisial  $Pb^{2+}$  dengan variasi dosis bioadsorben dan waktu kontak. Konsentrasi  $Pb^{2+}$  sebelum dan sesudah proses adsorpsi dianalisis menggunakan Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). Data yang diperoleh digunakan untuk menentukan efisiensi penyisihan serta distribusi  $Pb^{2+}$  antara fase cair dan bioadsorben. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bioadsorben daun rami mampu menurunkan konsentrasi  $Pb^{2+}$  secara efektif dengan kondisi optimum pada dosis bioadsorben 4 g/L dan waktu kontak 90 menit yang menghasilkan efisiensi penyisihan sebesar 98,46%. Analisis neraca massa menunjukkan bahwa ion  $Pb^{2+}$  berhasil berpindah dari fase larutan menuju permukaan bioadsorben. Hasil ini menunjukkan bahwa bioadsorben daun rami berpotensi menjadi material alternatif yang berkelanjutan dalam pengolahan air limbah mengandung logam berat.

**Kata kunci:** Adsorpsi; Bioadsorben Daun Rami; Ion Timbal; Neraca Massa; Sistem Batch.

### 1. LATAR BELAKANG

Pencemaran air oleh logam berat, khususnya ion timbal ( $Pb^{2+}$ ), merupakan permasalahan lingkungan yang serius karena bersifat toksik, persisten, dan dapat terakumulasi dalam rantai makanan. Salah satu sektor industri yang berpotensi menghasilkan limbah mengandung  $Pb^{2+}$  adalah industri percetakan akibat penggunaan tinta, pigmen, dan bahan kimia pendukung. Berdasarkan penelitian Nurandani & Syafrudin (2016), konsentrasi Pb pada limbah cair

industri percetakan dapat mencapai 20,64 mg/L sehingga diperlukan proses pengolahan sebelum dilepaskan ke lingkungan.

Metode adsorpsi menjadi salah satu teknologi pengolahan logam berat yang banyak dikembangkan karena memiliki proses sederhana, efisien, dan dapat menggunakan material alternatif berbasis biomassa yang lebih ramah lingkungan dibandingkan beberapa metode konvensional (Singh Rajput et al., 2023). Salah satu biomassa yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bioadsorben adalah daun rami (*Boehmeria nivea*). Daun rami memiliki kandungan lignoselulosa dengan gugus fungsi seperti hidroksil (-OH), karboksil (-COOH), karbonil (C=O), dan eter (C-O-C) yang berperan sebagai sisi aktif dalam pengikatan ion logam (Kaur et al., 2022). Namun, pemanfaatan daun rami sebagai bioadsorben masih relatif terbatas karena penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada aplikasi serat rami sebagai material komposit dan tekstil (Muslimin Ilham et al., 2019).

Efektivitas proses adsorpsi dipengaruhi oleh kondisi operasi seperti dosis bioadsorben dan waktu kontak. Selain itu, pendekatan neraca massa diperlukan untuk mengevaluasi distribusi ion Pb<sup>2+</sup> antara fase cair dan fase padat sehingga dapat meningkatkan validitas hasil adsorpsi (Da Costa et al., 2023). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi dosis bioadsorben dan waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan Pb<sup>2+</sup> serta penerapan neraca massa pada sistem adsorpsi batch menggunakan bioadsorben daun rami.

## **2. KAJIAN TEORITIS**

Metode adsorpsi menggunakan material berbasis biomassa telah banyak dikembangkan sebagai alternatif dalam pengolahan air tercemar logam berat karena ketersediaannya yang melimpah, biaya yang relatif rendah, serta adanya gugus fungsi aktif yang berperan dalam proses pengikatan ion logam. Penelitian yang dilakukan oleh Kaur et al. (2022) menunjukkan bahwa biomassa lignoselulosa memiliki potensi sebagai bioadsorben karena mengandung gugus fungsi seperti hidroksil (-OH), karboksil (-COOH), dan karbonil (C=O) yang dapat berinteraksi dengan ion logam melalui proses adsorpsi. Keberadaan gugus aktif tersebut memungkinkan terjadinya pengikatan ion logam pada permukaan biomassa sehingga dapat menurunkan konsentrasi logam berat dalam larutan.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membuktikan efektivitas biomassa dalam penyisihan Pb(II). Raji et al. (2023) melaporkan bahwa proses adsorpsi ion logam berat oleh biomassa dipengaruhi oleh karakteristik permukaan adsorben serta kondisi operasi seperti dosis adsorben dan waktu kontak. Peningkatan dosis adsorben dapat meningkatkan efisiensi penyisihan karena bertambahnya jumlah situs aktif yang tersedia, sedangkan peningkatan

waktu kontak memberikan kesempatan lebih besar bagi ion logam untuk berpindah dan berikatan pada permukaan adsorben hingga mencapai kondisi kesetimbangan. Namun, setelah kondisi optimum tercapai, peningkatan dosis maupun waktu kontak tidak selalu memberikan peningkatan penyisihan yang signifikan karena keterbatasan jumlah ion logam dan ketersediaan situs aktif.

Pengembangan bioadsorben dari berbagai jenis biomassa menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam penyisihan Pb(II). Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada penentuan efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi, sedangkan evaluasi terhadap distribusi massa ion logam setelah proses adsorpsi masih terbatas. Padahal, analisis neraca massa diperlukan untuk mengetahui perpindahan ion logam dari fase larutan menuju fase adsorben sehingga dapat memberikan gambaran lebih lengkap mengenai keberhasilan proses adsorpsi.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan daun rami (*Boehmeria nivea*) teraktivasi NaOH sebagai bioadsorben untuk penyisihan Pb(II). Penelitian ini tidak hanya mengevaluasi pengaruh dosis adsorben dan waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan, tetapi juga menerapkan pendekatan neraca massa pada sistem adsorpsi batch untuk mengetahui distribusi Pb(II) pada fase filtrat dan bioadsorben setelah proses adsorpsi.

### 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental menggunakan sistem adsorpsi batch untuk menganalisis kemampuan bioadsorben daun rami (*Boehmeria nivea*) dalam menyisihkan ion  $Pb^{2+}$ . Tahapan penelitian meliputi preparasi bioadsorben, pembuatan larutan artifisial  $Pb^{2+}$ , proses adsorpsi dengan variasi dosis bioadsorben dan waktu kontak, pengujian konsentrasi  $Pb^{2+}$ , serta analisis neraca massa.

Daun rami dikeringkan, dihaluskan, dan dilakukan proses aktivasi kimia menggunakan larutan NaOH untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi. Bioadsorben hasil aktivasi kemudian dikontakkan dengan larutan  $Pb^{2+}$  artifisial pada sistem batch menggunakan variasi dosis bioadsorben sebesar 2, 4, dan 6 g/L serta variasi waktu kontak 60, 90, dan 120 menit. Proses adsorpsi dilakukan menggunakan shaker dengan kondisi operasi yang dijaga tetap.

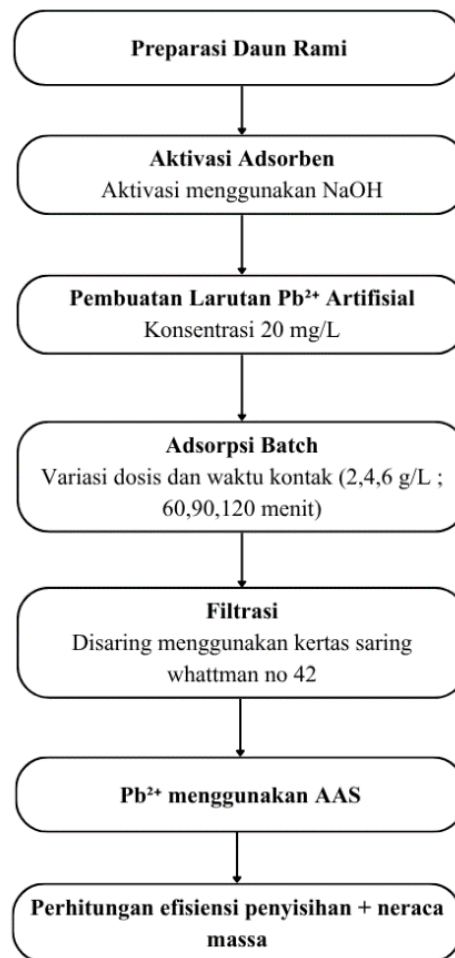
Setelah proses adsorpsi selesai, larutan dipisahkan dari bioadsorben melalui proses filtrasi. Konsentrasi  $Pb^{2+}$  sebelum dan sesudah adsorpsi dianalisis menggunakan Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). Data konsentrasi  $Pb^{2+}$  yang diperoleh digunakan untuk menghitung efisiensi penyisihan menggunakan persamaan:

$$\text{Removal (\%)} = ((C_0 - C_e) / C_0) \times 100\%$$

Analisis neraca massa dilakukan berdasarkan prinsip kekekalan massa untuk mengetahui distribusi ion  $Pb^{2+}$  antara fase cair dan fase padat pada sistem adsorpsi batch melalui hubungan:

$$V(C_0 - C_e) = mq$$

dengan  $C_0$  merupakan konsentrasi awal  $Pb^{2+}$ ,  $C_e$  merupakan konsentrasi akhir setelah adsorpsi,  $V$  merupakan volume larutan,  $m$  merupakan massa bioadsorben, dan  $q$  merupakan massa  $Pb^{2+}$  yang teradsorpsi per satuan massa bioadsorben. Diagram alir tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Diagram Alir Penelitian Adsorpsi  $Pb^{2+}$  Menggunakan Bioadsorben Daun Rami pada Sistem Batch.

(Sumber : Hasil Penelitian, 2026).

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan bioadsorben daun rami (*Boehmeria nivea*) dalam menyisihkan ion timbal ( $Pb^{2+}$ ) menggunakan sistem adsorpsi batch. Analisis hasil penelitian difokuskan pada pengaruh variasi dosis bioadsorben dan waktu kontak

terhadap efisiensi penyisihan  $Pb^{2+}$  serta penerapan prinsip neraca massa untuk mengetahui distribusi massa  $Pb^{2+}$  selama proses adsorpsi.

### Pengaruh Dosis Bioadsorben dan Waktu Kontak terhadap Penyisihan $Pb^{2+}$

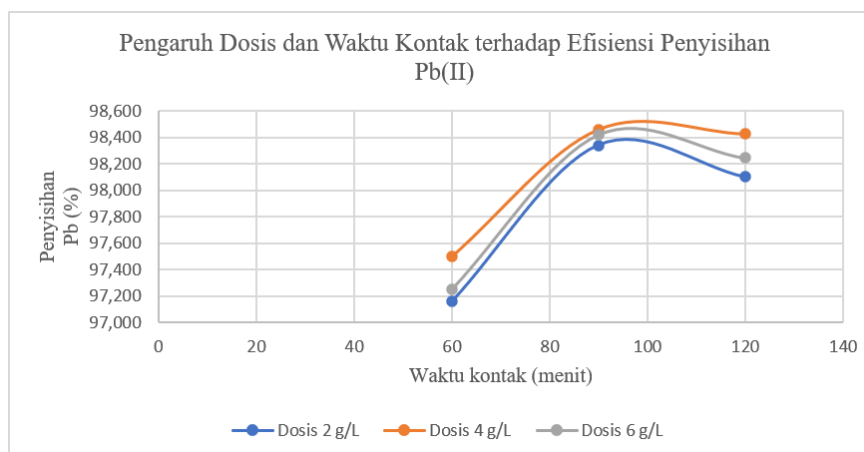
Pengaruh variasi dosis bioadsorben dan waktu kontak dianalisis berdasarkan perubahan konsentrasi ion  $Pb^{2+}$  sebelum dan setelah proses adsorpsi. Penurunan konsentrasi  $Pb^{2+}$  digunakan untuk menentukan efisiensi penyisihan pada masing-masing kondisi operasi. Hasil pengaruh dosis bioadsorben dan waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan  $Pb^{2+}$  ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil Adsorpsi Pb(II) Menggunakan Bioadsorben Daun Rami Teraktivasi NaOH.

Waktu Kontak (menit)	$C_0$ (mg/L)	$m$ awal (g)	$C_e$ (mg/L)	% removal
60	20	0,3	0,568	97,160
60	20	0,6	0,38	98,100
60	20	0,9	0,318	98,410
90	20	0,3	0,541	97,295
90	20	0,6	0,308	98,460
90	20	0,9	0,314	98,430
120	20	0,3	0,49	97,550
120	20	0,6	0,352	98,240
120	20	0,9	0,351	98,245

(Sumber : Data Hasil Penelitian, 2026).

Berdasarkan Tabel 1, terjadi perubahan konsentrasi Pb setelah proses adsorpsi pada setiap variasi perlakuan. Perbedaan nilai efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi menunjukkan bahwa variasi dosis adsorben dan waktu kontak memberikan pengaruh terhadap kemampuan bioadsorben daun rami dalam mengadsorpsi ion Pb(II). Hubungan antara variasi dosis adsorben dan waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan Pb(II) ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Pengaruh Dosis Adsorben dan Waktu Kontak terhadap Efisiensi Penyisihan Pb(II).

(Sumber : Hasil Penelitian, 2026).

Berdasarkan Gambar 2, variasi dosis adsorben dan waktu kontak memberikan pengaruh terhadap efisiensi penyisihan Pb(II) menggunakan bioadsorben daun rami teraktivasi NaOH. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan Pb(II) mengalami peningkatan seiring bertambahnya waktu kontak dari 60 menit hingga 90 menit pada seluruh variasi dosis adsorben. Peningkatan tersebut terjadi karena semakin lama waktu kontak, maka semakin besar kesempatan ion Pb(II) untuk berdifusi dari larutan menuju permukaan bioadsorben dan berinteraksi dengan situs aktif yang tersedia. Pada tahap awal adsorpsi, permukaan bioadsorben masih memiliki banyak situs aktif kosong sehingga proses pengikatan ion Pb(II) berlangsung lebih cepat. Hal tersebut sejalan dengan penelitian Rasheed et al. (2025), yang menyatakan bahwa peningkatan waktu kontak dapat meningkatkan penyisihan Pb(II) karena memberikan waktu yang lebih lama bagi ion logam untuk berdifusi menuju permukaan adsorben dan berinteraksi dengan situs aktif hingga mencapai kondisi kesetimbangan.

Efisiensi penyisihan Pb(II) tertinggi diperoleh pada dosis adsorben 4 g/L dengan waktu kontak 90 menit yaitu sebesar 98,46%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa dosis 4 g/L merupakan dosis optimum dalam proses adsorpsi Pb(II) menggunakan bioadsorben daun rami teraktivasi NaOH. Peningkatan dosis dari 2 g/L menjadi 4 g/L menyebabkan peningkatan efisiensi penyisihan karena jumlah adsorben yang lebih besar menyediakan luas permukaan dan jumlah situs aktif yang lebih banyak. Bertambahnya situs aktif tersebut meningkatkan kemungkinan terjadinya interaksi antara ion Pb(II) dengan gugus fungsi pada permukaan bioadsorben seperti hidroksil (-OH) dan karboksil (-COOH). Hasil penelitian lain juga dilaporkan oleh Bassareh et al. (2023), bahwa peningkatan dosis adsorben dapat meningkatkan efisiensi penyisihan Pb(II) karena bertambahnya luas permukaan dan jumlah situs aktif yang tersedia untuk proses pengikatan ion logam.

Namun, peningkatan dosis adsorben menjadi 6 g/L tidak menghasilkan efisiensi penyisihan Pb(II) yang lebih tinggi dibandingkan dosis 4 g/L. Hal tersebut menunjukkan bahwa penambahan jumlah adsorben tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi adsorpsi setelah mencapai kondisi optimum. Jumlah adsorben yang terlalu tinggi dapat menyebabkan terjadinya penumpukan atau aglomerasi antarpartikel adsorben sehingga sebagian situs aktif tertutup dan luas permukaan efektif yang dapat berinteraksi dengan ion Pb(II) menjadi berkurang. Selain itu, karena konsentrasi awal Pb dalam larutan tetap, jumlah ion Pb(II) yang tersedia menjadi tidak sebanding dengan banyaknya situs aktif pada dosis adsorben yang lebih tinggi sehingga sebagian situs aktif tidak termanfaatkan secara maksimal. Hasil ini sejalan dengan penelitian Azanfire et al. (2020), yang menunjukkan bahwa peningkatan dosis adsorben dapat meningkatkan efisiensi penyisihan Pb(II) hingga mencapai

kondisi optimum. Namun, penambahan dosis setelah kondisi optimum tidak memberikan peningkatan yang signifikan karena dapat terjadi aglomerasi partikel adsorben dan kejenuhan permukaan yang menyebabkan sebagian situs aktif tidak bekerja secara maksimal.

Pada waktu kontak 120 menit, efisiensi penyisihan Pb(II) menunjukkan kondisi yang relatif stabil atau mengalami penurunan dibandingkan waktu kontak 90 menit. Kondisi ini dapat terjadi karena proses adsorpsi telah mendekati keadaan setimbang, yaitu sebagian besar situs aktif bioadsorben telah ditempati oleh ion Pb(II) sehingga penambahan waktu kontak tidak lagi memberikan peningkatan penyisihan secara signifikan. Setelah melewati kondisi optimum, kemungkinan terjadinya pelepasan kembali sebagian kecil ion Pb(II) dari permukaan adsorben (desorpsi) juga dapat menyebabkan penurunan efisiensi adsorpsi. Fenomena tersebut sesuai dengan penelitian Rasheed et al. (2025), yang menyatakan bahwa setelah waktu kontak optimum tercapai, peningkatan waktu adsorpsi tidak lagi memberikan peningkatan penyisihan yang signifikan karena adsorben telah mencapai kondisi kesetimbangan. Berdasarkan hasil tersebut, kondisi optimum adsorpsi Pb(II) menggunakan bioadsorben daun rami teraktivasi NaOH diperoleh pada dosis 4 g/L dengan waktu kontak 90 menit.

#### **Analisis Neraca Massa Penyisihan Pb<sup>2+</sup> pada Sistem Adsorpsi Batch**

Analisis neraca massa dilakukan untuk mengetahui distribusi ion Pb<sup>2+</sup> selama proses adsorpsi berlangsung. Perhitungan dilakukan berdasarkan konsentrasi awal Pb<sup>2+</sup>, sisa Pb<sup>2+</sup> dalam larutan, serta jumlah Pb<sup>2+</sup> yang berpindah menuju permukaan bioadsorben. Hasil perhitungan neraca massa ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Neraca Massa Ion Pb<sup>2+</sup> pada Sistem Adsorpsi Batch.

Waktu (menit)	Dosis (g)	Pb awal (mg)	Volume (L)	Ce hasil digesti (mg/L)	Pb filtrat (mg)	Pb adsorben (mg)	Total Pb terukur (mg)	Pb hilang (mg)	Recovery (%)
60	0,3	3	0,15	16,22	0,085	2,433	2,518	0,482	83,93
60	0,6	3	0,15	16,16	0,057	2,424	2,481	0,519	82,70
60	0,9	3	0,15	16,6	0,048	2,49	2,538	0,462	84,60
90	0,3	3	0,15	16,8	0,081	2,52	2,601	0,399	86,70
90	0,6	3	0,15	17,67	0,046	2,6505	2,6965	0,3035	89,88
90	0,9	3	0,15	16,8	0,047	2,52	2,567	0,433	85,57
120	0,3	3	0,15	18,58	0,074	2,787	2,861	0,139	95,37
120	0,6	3	0,15	18,08	0,053	2,712	2,765	0,235	92,17
120	0,9	3	0,15	17,03	0,053	2,5545	2,6075	0,3925	86,92

(Sumber : Hasil Penelitian, 2026).

Berdasarkan Tabel 2, massa Pb awal sebesar 3 mg mengalami distribusi setelah proses adsorpsi menjadi Pb yang tersisa pada filtrat dan Pb yang tertahan pada bioadsorben. Massa Pb pada filtrat menunjukkan nilai yang rendah yaitu berkisar antara 0,046–0,085 mg, sedangkan massa Pb yang diperoleh dari hasil digesti bioadsorben berada pada rentang 2,424–2,787 mg.

Rendahnya kandungan Pb pada filtrat menunjukkan bahwa sebagian besar ion Pb(II) telah mengalami perpindahan dari fase larutan menuju permukaan bioadsorben. Menurut Raji et al. (2023), proses adsorpsi logam berat terjadi melalui perpindahan ion logam dari larutan menuju permukaan adsorben melalui beberapa mekanisme seperti interaksi elektrostatik, pertukaran ion, serta pembentukan kompleks antara ion logam dengan gugus fungsi pada permukaan adsorben.

Hal tersebut juga diperkuat oleh hasil digesti bioadsorben yang menunjukkan keberadaan Pb dalam jumlah lebih besar pada fase padat. Kandungan Pb pada bioadsorben setelah adsorpsi membuktikan bahwa penurunan konsentrasi Pb pada filtrat bukan disebabkan oleh hilangnya Pb dari sistem, melainkan akibat perpindahan dan pengikatan ion Pb(II) pada bioadsorben. Menurut Torres (2020), biosorpsi merupakan proses penghilangan kontaminan melalui pengikatan senyawa pencemar oleh material biologis sehingga ion logam dapat terkonsentrasi pada biomassa setelah proses adsorpsi berlangsung.

Pengikatan Pb(II) pada bioadsorben dapat terjadi karena adanya situs aktif pada permukaan biomassa. Tasić et al. (2024) menjelaskan bahwa proses biosorpsi Pb(II) terjadi melalui interaksi antara ion Pb(II) dengan gugus fungsi yang terdapat pada permukaan biomassa, seperti gugus hidroksil dan karbonil yang berperan sebagai sisi aktif pengikatan logam. Oleh karena itu, keberadaan Pb pada hasil digesti bioadsorben menunjukkan bahwa gugus aktif daun rami berperan dalam proses pengikatan ion Pb(II). Berdasarkan hasil perhitungan, total Pb yang berhasil diperoleh kembali dari fase filtrat dan bioadsorben berada pada rentang 2,481–2,861 mg dari total Pb awal sebesar 3 mg. Nilai tersebut menghasilkan recovery neraca massa sebesar 82,70–95,37% yang menunjukkan bahwa sebagian besar Pb dalam sistem berhasil teridentifikasi kembali setelah proses adsorpsi.

Adanya selisih massa Pb sebesar 0,139–0,519 mg menunjukkan terdapat sebagian kecil Pb yang tidak terdeteksi kembali. Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh kehilangan selama proses preparasi, seperti pemisahan filtrat, pemindahan sampel, proses digesti bioadsorben, maupun keterbatasan recovery selama analisis instrumen. Menurut Lata et al. (2014), proses pemulihan kembali logam dari adsorben dipengaruhi oleh tahapan pemisahan dan perlakuan terhadap adsorben sehingga kehilangan sebagian kecil logam dapat terjadi selama proses analisis.

Secara keseluruhan, hasil neraca massa tersebut juga didukung oleh pengujian bak kontrol yang dilakukan tanpa penambahan bioadsorben. Berdasarkan hasil pengujian, konsentrasi Pb(II) pada bak kontrol dengan variasi waktu kontak 60, 90, dan 120 menit masing-masing sebesar 19,1 mg/L; 19,7 mg/L; dan 19,8 mg/L, dimana nilai tersebut relatif mendekati

konsentrasi awal Pb(II) yang digunakan yaitu 20 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi Pb(II) dalam larutan relatif stabil dan tidak mengalami penurunan yang signifikan tanpa adanya bioadsorben. Sementara itu, pada sistem adsorpsi dengan penambahan bioadsorben daun rami teraktivasi NaOH, terjadi penurunan konsentrasi Pb(II) pada fase filtrat yang diikuti dengan terdeteksinya Pb(II) pada fase padat bioadsorben setelah proses digesti. Berdasarkan hasil neraca massa, total Pb(II) yang terukur pada bioadsorben lebih besar dibandingkan Pb(II) yang tersisa dalam filtrat, sehingga menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi Pb(II) terutama disebabkan oleh perpindahan massa ion Pb(II) dari larutan menuju permukaan bioadsorben melalui proses adsorpsi

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, variasi dosis bioadsorben dan waktu kontak berpengaruh terhadap efisiensi penyisihan ion  $Pb^{2+}$  pada sistem adsorpsi batch. Kondisi optimum diperoleh pada dosis bioadsorben sebesar 4 g/L dengan waktu kontak 90 menit yang menghasilkan efisiensi penyisihan  $Pb^{2+}$  sebesar 98,46%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa bioadsorben daun rami (*Boehmeria nivea*) memiliki kemampuan yang efektif dalam menurunkan konsentrasi ion  $Pb^{2+}$  dari larutan.

Analisis neraca massa menunjukkan bahwa penurunan massa  $Pb^{2+}$  pada fase cair sejalan dengan peningkatan massa  $Pb^{2+}$  yang teradsorpsi pada bioadsorben. Hal tersebut menunjukkan terjadinya perpindahan massa ion  $Pb^{2+}$  dari fase cair menuju fase padat selama proses adsorpsi, sehingga pendekatan neraca massa dapat digunakan untuk mengevaluasi distribusi ion  $Pb^{2+}$  pada sistem adsorpsi batch. Berdasarkan kondisi optimum yang diperoleh, penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada perancangan dan pengembangan reaktor adsorpsi dengan mempertimbangkan dosis bioadsorben dan waktu kontak optimum sebagai dasar penerapan sistem pengolahan limbah yang lebih aplikatif.

## DAFTAR REFERENSI

- AlAqad, K. M., Abdelnaby, M. M., Tanimu, A., Abdulazeez, I., & Elsharif, A. M. (2025). Adsorbent materials for water treatment: A review of current trends and future challenges. *Environmental Pollution and Management*, 2, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.12.003>
- Azanfire, B., Bulgariu, D., Nemeş, L., & Bulgariu, L. (2020). Optimization of experimental parameters for retention of Pb(II) ions from aqueous solution on clay adsorbent. *Technium*, 2, 38–47.

- Bassareh, H., Karamzadeh, M., & Movahedirad, S. (2023). Synthesis and characterization of cost-effective and high-efficiency biochar for the adsorption of  $Pb^{2+}$  from wastewater. *Scientific Reports*, *13*, 15608.
- Da Costa, M., Manulangga, O. G. L. P., & Martins, M. D. S. (2023). Pemodelan matematis isoterm dan kinetika adsorpsi ion Cr(VI) pada limbah elektroplating menggunakan adsorben tempurung kelapa. *Leibniz: Jurnal Matematika*, *3*(1), 60–68.
- Kaur, J., Sengupta, P., & Mukhopadhyay, S. (2022). Critical review of bioadsorption on modified cellulose and removal of divalent heavy metals (Cd, Pb, and Cu). *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *61*(5), 1921–1954. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c04583>
- Lata, S., Singh, P. K., & Samadder, S. R. (2015). Regeneration of adsorbents and recovery of heavy metals: A review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *12*, 1461–1478. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0714-9>
- Wardaningrum, L. (2023). *Penambahan asam akrilat pada adsorben rami terhadap kemampuan adsorpsi ion logam* (Skripsi). Program Studi Kimia.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Muslimin Ilham, M., Istiqlaliyah, H., & Polimer, M. (2019). Pemanfaatan serat rami (*Boehmeria nivea*) sebagai bahan komposit bermatrik polimer.
- Nurandani, N., & Syafrudin. (2016). Penyisihan konsentrasi timbal (Pb) menggunakan adsorben abu endapan batu bara (Studi kasus: Air limbah industri percetakan Semarang). *Jurnal Teknik Lingkungan*, *5*(1), 1–10.
- Raji, Z., Karim, A., Karam, A., & Khalloufi, S. (2023). Adsorption of heavy metals: Mechanisms, kinetics, and applications of various adsorbents in wastewater remediation—A review. *Waste*, *1*(3), 775–805. <https://doi.org/10.3390/waste1030046>
- Rasheed, A. A., et al. (2025). Effect of adsorbent dosage on the kinetics and isotherms of Pb(II) removal from aqueous solutions using corn husk adsorbent. *Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment*, *21*(3), 702–716.
- Singh Rajput, R., Singh, A., & Mishra, M. K. (2023). *A comprehensive review of water treatment methods for heavy metal ion removal from wastewater*.
- Tasić, Ž., et al. (2024). Sustainable processes of biosorption of Pb(II) ions from synthetic wastewater using mullein leaves as a low-cost biosorbent. *Sustainability*, *16*(14), 5982. <https://doi.org/10.3390/su16145982>
- Thomas, W. J., & Crittenden, B. (1998). *Adsorption technology and design*. Butterworth-Heinemann.
- Torres, E. (2020). Biosorption: A review of the latest advances. *Processes*, *8*(12), 1584.