



Pengaruh pH dan Konsentrasi Pb^{2+} terhadap Kapasitas Adsorpsi Bioadsorben Daun Rami dalam Air Limbah Artifisial

Rosyida Salsabil Aqilla^{1*}, Raden Kokoh Haryo Putro²

¹⁻²Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Indonesia

*Korespondensi penulis: 22034010097@student.upnjatim.ac.id¹

Abstract. Lead (Pb^{2+}) is a hazardous heavy metal commonly found in industrial wastewater and poses serious risks to human health and the environment due to its toxic and non-biodegradable nature. Therefore, an effective and environmentally friendly treatment method is required to reduce Pb^{2+} concentration in wastewater. This study aimed to evaluate the effect of pH and initial Pb^{2+} concentration on the adsorption capacity of ramie leaf (*Boehmeria nivea*) bioadsorbent activated with NaOH. The adsorption process was conducted using a batch system with pH variations of 4, 5, and 7 and initial Pb^{2+} concentrations of 20, 25, and 30 mg/L. The residual Pb^{2+} concentration was analyzed using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS), and the adsorption performance was evaluated based on removal efficiency and adsorption capacity (Q_e). The results showed that pH and initial Pb^{2+} concentration significantly affected the adsorption performance. The optimum adsorption condition was obtained at pH 5, with a maximum removal efficiency of 99.20% and a total adsorption capacity of 18.56 mg/g. The increase in pH from 4 to 5 enhanced adsorption performance due to reduced competition between H^+ and Pb^{2+} ions for active sites on the adsorbent surface. Increasing the initial Pb^{2+} concentration tended to increase adsorption capacity, although removal efficiency remained relatively stable due to the limited number of active adsorption sites. The Relative Standard Deviation (RSD) values ranged from 1.56% to 3.37%, indicating good precision and repeatability of the experimental data. These findings demonstrate that NaOH-activated ramie leaves have considerable potential as an effective, low-cost, and environmentally friendly bioadsorbent for Pb^{2+} removal from wastewater.

Keywords: Adsorption Capacity; Bioadsorbent; Lead (Pb^{2+}); pH; Ramie Leaves.

Abstrak. Ion timbal (Pb^{2+}) termasuk salah satu kontaminan logam berat yang sering berasal dari aktivitas industri dan dapat memberikan risiko terhadap kualitas lingkungan maupun kesehatan manusia. Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan teknologi pengolahan yang efektif dan berbasis lingkungan untuk mengurangi konsentrasi Pb^{2+} dalam air limbah. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh pH dan konsentrasi awal Pb^{2+} terhadap kemampuan adsorpsi bioadsorben daun rami (*Boehmeria nivea*) yang telah diaktivasi menggunakan NaOH. Proses adsorpsi dilakukan secara batch dengan variasi pH 4, 5, dan 7 serta konsentrasi awal Pb^{2+} sebesar 20, 25, dan 30 mg/L. Konsentrasi Pb^{2+} sebelum dan sesudah adsorpsi dianalisis menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS), kemudian dihitung efisiensi penyisihan (% removal) dan kemampuan adsorpsi (Q_e). Hasil penelitian memperlihatkan bahwa pH dan konsentrasi awal Pb^{2+} memberikan pengaruh terhadap kinerja adsorpsi bioadsorben daun rami. Kondisi optimum diperoleh pada pH 5 dengan efisiensi penyisihan tertinggi sebesar 99,20% dan kemampuan adsorpsi total sebesar 18,56 mg/g. Peningkatan pH dari 4 menjadi 5 menaikkan kemampuan adsorpsi karena berkurangnya kompetisi ion H^+ dengan ion Pb^{2+} pada situs aktif adsorben. Sementara itu, peningkatan konsentrasi awal Pb^{2+} cenderung menaikkan kemampuan adsorpsi akibat bertambahnya jumlah ion kontaminan logam yang berinteraksi dengan area permukaan adsorben. Nilai Relative Standard Deviation (RSD) yang diperoleh berkisar antara 1,56–3,37%, memperlihatkan bahwa hasil pengukuran memiliki presisi dan keterulangan yang baik. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa daun rami teraktivasi NaOH berpotensi dimanfaatkan sebagai bioadsorben alternatif yang efektif, ekonomis, dan berbasis lingkungan untuk menyisihkan ion Pb^{2+} dari air limbah artifisial.

Kata kunci: Bioadsorben; Daun Rami; Kapasitas Adsorpsi; pH; timbal (Pb^{2+}).

1. LATAR BELAKANG

Ion timbal (Pb^{2+}) termasuk salah satu kontaminan logam berat yang sering berasal dari aktivitas industri, seperti industri baterai, kabel, cat, penyepuhan logam, dan pestisida. Timbal bersifat toksik, sulit terdegradasi, serta dapat terakumulasi dalam lingkungan dan rantai

makanan sehingga berisiko terhadap kesehatan manusia dan ekosistem. Meskipun kadar Pb dalam air limbah industri dibatasi sebesar 0,1–1 mg/L berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014, beberapa limbah industri masih mengandung Pb dalam konsentrasi tinggi, seperti limbah percetakan di Semarang yang dilaporkan mencapai 20–25 mg/L (Lestari et al., 2020). Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan teknologi pengolahan yang efektif untuk mengurangi kadar Pb hingga memenuhi baku mutu lingkungan.

Adsorpsi menjadi salah satu alternatif pengolahan kontaminan logam berat karena memiliki proses yang mudah diterapkan, efisiensi tinggi, dan kebutuhan biaya yang relatif rendah (Raji et al., 2023). Daun rami merupakan salah satu biomassa yang memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai material adsorben (*Boehmeria nivea*), yang mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin dengan gugus fungsi aktif seperti hidroksil, karboksil, dan karbonil yang mampu mengikat ion kontaminan logam (Kaur et al., 2022; Wulandari et al., 2024). Di Indonesia, daun rami masih belum dimanfaatkan secara optimal dan umumnya menjadi limbah biomassa. Padahal, daun rami memiliki karakteristik yang mendukung proses adsorpsi, seperti luas permukaan yang cukup besar dan struktur mesopori yang memudahkan interaksi dengan ion kontaminan logam.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa serat rami mampu menyerap ion Pb²⁺ dengan efisiensi hingga 90,86%. (Zhao et al., 2024). Namun, efektivitas adsorpsi dipengaruhi oleh beberapa faktor, terutama pH larutan dan konsentrasi awal logam (El-Sharkawy et al., 2024). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh kedua parameter tersebut terhadap kemampuan adsorpsi daun rami dalam menyisihkan ion Pb²⁺ dari limbah artifisial. Kebaruan penelitian ini terletak pada pemanfaatan limbah daun rami sebagai bioadsorben sekaligus evaluasi pengaruh pH dan konsentrasi awal Pb²⁺ terhadap kapasitas adsorpsinya, sehingga diharapkan dapat memberikan alternatif pengolahan limbah logam berat yang murah, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

2. KAJIAN TEORITIS

Adsorpsi ion Pb(II) dengan karbon aktif tempurung kelapa diuji menggunakan variasi konsentrasi awal larutan Pb (II) (10, 15, 20, dan 25 ppm). Hasilnya menunjukkan peningkatan kapasitas adsorpsi seiring bertambahnya konsentrasi awal, yang kemudian dianalisis melalui model isoterm untuk menentukan hubungan kesetimbangan antara adsorbat dan adsorben. (Hatiya et al., 2022).

Kapasitas penyerapan meningkat dari kondisi asam ke pH menengah dan mencapai optimum di sekitar pH 5, kemudian cenderung menurun atau stabil pada pH yang lebih tinggi.

Analisis FTIR mengindikasikan keterlibatan gugus karboksilat ($-\text{COO}^-$) serta $-\text{OH}/-\text{NH}$. Pada uji SEM menunjukkan perubahan morfologi permukaan setelah kontak dengan Pb(II) yang merefleksikan terbentuknya ikatan pada situs aktif. (El-Sharkawy et al., 2024)

Kemampuan adsorben dalam menyerap adsorbat dinyatakan sebagai kapasitas adsorpsi (Q_e), yaitu jumlah adsorbat yang terikat pada setiap satuan massa adsorben pada kondisi kesetimbangan. Nilai Q_e digunakan sebagai indikator utama untuk mengevaluasi efektivitas adsorben dalam menyisihkan kontaminan dari larutan. Semakin tinggi nilai kapasitas adsorpsi yang diperoleh, semakin baik kemampuan adsorben dalam menghilangkan logam berat. Oleh karena itu, evaluasi pengaruh pH dan konsentrasi awal Pb^{2+} terhadap kapasitas adsorpsi menjadi penting untuk menentukan kondisi optimum penggunaan bioadsorben daun rami dalam pengolahan limbah yang mengandung logam berat timbal. (Thomas et al., 2020)

3. METODE PENELITIAN

Pengujian kemampuan adsorpsi daun rami dilakukan dengan sistem batch dalam skala laboratorium. Penelitian ini menggunakan larutan Pb dan alat berupa *shaker* untuk melakukan kontak antara larutan Pb dengan adsorben. Pengujian daya serap adsorben terhadap logam timbal (Pb) akan dilakukan dengan menggunakan alat berupa AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*) dengan variasi uji meliputi variasi pH dan konsentrasi logam timbal (Pb). Variasi pH yang digunakan adalah 4,5, dan 7. Sedangkan variasi konsentrasi ion Pb^{2+} yang digunakan adalah 20 mg/L, 25 mg/L, dan 30 mg/L dengan volume 150 mL. Serta bioadsorben daun rami yang telah diaktivasi dengan NaOH.

Penelitian ini dilakukan untuk mengamati perubahan konsentrasi Pb^{2+} sebelum dan setelah proses adsorpsi sebagai dasar dalam mengevaluasi kemampuan bioadsorben daun rami dalam mengurangi kandungan logam berat Pb di dalam larutan. Data yang diperoleh dari hasil pengujian selanjutnya digunakan untuk menghitung efisiensi penyisihan (% removal), dan kapasitas adsorpsi (q_e). Rumus untuk % penyisihan logam Pb adalah :

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

Dengan :

C_0 : Konsentrasi Awal (mg/L)

C_e : Konsentrasi Akhir (mg/L)

Kapasitas adsorpsi merupakan parameter yang menunjukkan jumlah adsorbat yang dapat terikat pada setiap satuan massa adsorben dan dinyatakan dalam satuan mg/g. Nilai kapasitas adsorpsi digunakan sebagai indikator utama untuk mengevaluasi efektivitas adsorben dalam

menyisihkan kontaminan dari larutan, dimana semakin tinggi nilai kapasitas adsorpsi maka semakin besar kemampuan adsorben dalam mengikat adsorbat pada permukaannya. (Thomas et al., 2020). Rumus kapasitas adsorpsi:

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

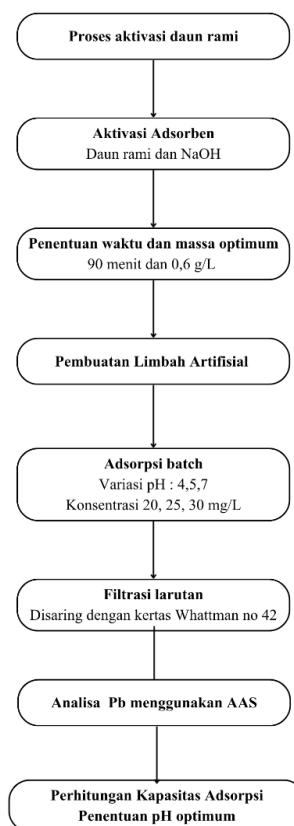
Dengan :

C_0 : Konsentrasi Awal (mg/L)

C_e : Konsentrasi Akhir (mg/L)

V : Volume (mL)

m : massa adsorben



Gambar 1. Skema Penelitian Adsorpsi Batch.

Sumber : (Hasil Penelitian, 2026).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

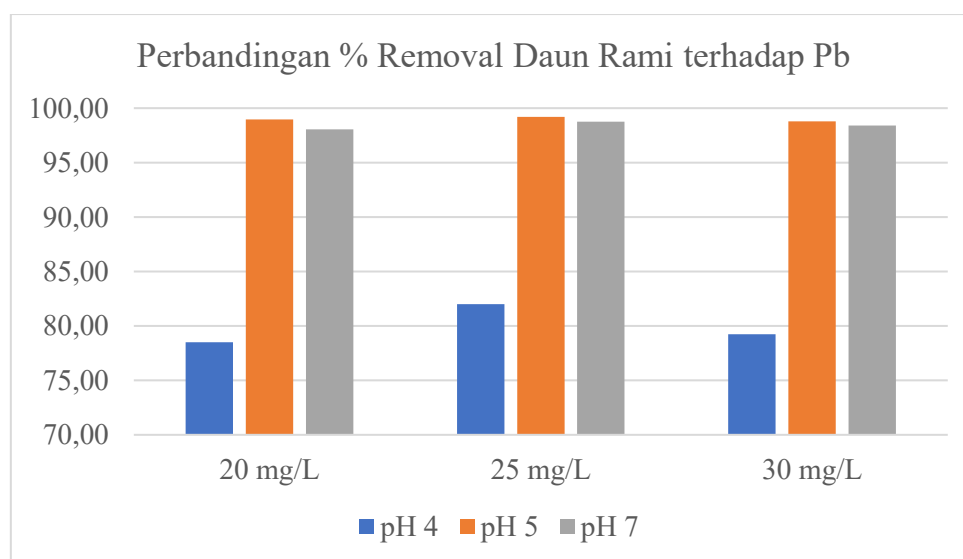
Penelitian ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan bioadsorben daun rami dalam menyisihkan Pb. Percobaan pada variasi pH larutan akan menggunakan data hasil percobaan variasi massa, data optimum yang didapat dari variasi massa didapat sebesar 0,6 gram aktivasi. Pada percobaan ini, waktu kontak optimum yaitu waktu pengadukan selama 90 menit.

Pengaruh pH dan Konsentrasi Awal Pb²⁺ terhadap % Penyisihan Adsorpsi

Tabel 1. Pengaruh pH dan Konsentrasi Awal Pb²⁺ terhadap % Penyisihan Adsorpsi.

pH	Konsentrasi Awal Pb	P1 (mg/L)	P2 (mg/L)	$\sum C_e$	SD	RSD (%)	$\sum\%$ removal
4	20	4.215	4.387	4.301	0.122	2.83	78.50
4	25	4.422	4.578	4.5	0.110	2.45	82.00
4	30	6.104	6.356	6.23	0.178	2.86	79.23
5	20	0.205	0.215	0.21	0.007	3.37	98.95
5	25	0.195	0.203	0.199	0.006	2.84	99.20
5	30	0.358	0.366	0.362	0.006	1.56	98.79
7	20	0.381	0.397	0.389	0.011	2.91	98.06
7	25	0.308	0.315	0.3115	0.005	1.59	98.75
7	30	0.468	0.487	0.4775	0.013	2.81	98.41

Pada tabel 1 menunjukkan bahwa pH dan konsentrasi awal Pb(II) sangat memengaruhi kinerja adsorpsi daun rami sebagai biosorben. Secara umum, nilai % removal tertinggi diperoleh pada kondisi pH 5 dan pH 7 dengan efisiensi mencapai sekitar 98–99%, sedangkan pada pH 4 nilai removal jauh lebih rendah (sekitar 78–82%). Fenomena ini menunjukkan bahwa kondisi pH sangat menentukan interaksi antara ion logam Pb²⁺ dengan permukaan adsorben. Pada pH rendah (asam), konsentrasi ion H⁺ yang tinggi menyebabkan kompetisi antara H⁺ dan Pb²⁺ untuk berikatan dengan gugus aktif pada permukaan adsorben seperti -OH dan -COOH, sehingga jumlah Pb²⁺ yang teradsorpsi menjadi lebih kecil. Sebaliknya, pada pH yang lebih netral, gugus fungsi pada adsorben lebih terdeprotonasi sehingga lebih banyak situs aktif yang tersedia untuk mengikat ion Pb²⁺ melalui mekanisme pertukaran ion dan kompleksasi permukaan. (Firman & Mawardi, 2024)



Gambar 2. Diagram Perbandingan % Removal Daun Rami terhadap Pb.

Sumber : (Hasil Penelitian, 2026).

Fenomena peningkatan adsorpsi pada pH asam mendekati netral ini sejalan dengan berbagai penelitian terbaru. Studi oleh (Sari et al., 2022) menunjukkan bahwa adsorpsi Pb(II) oleh biomassa rumput gajah meningkat signifikan pada pH sekitar netral karena meningkatnya ketersediaan gugus aktif yang bermuatan negatif sehingga mampu menarik ion Pb^{2+} lebih efektif. Selain itu, penelitian (Alorabi et al., 2020) juga menyatakan bioadsorben berbasis biomassa menunjukkan kapasitas adsorpsi optimal pada pH 5–7 karena kondisi ini meminimalkan kompetisi proton dan memaksimalkan interaksi elektrostatis antara logam berat dan permukaan adsorben .

Selain parameter adsorpsi, kualitas data percobaan juga dapat dievaluasi melalui nilai SD dan RSD. Nilai SD yang diperoleh berada pada rentang 0,005–0,178, sedangkan nilai RSD berkisar antara 1,56–3,37%. Seluruh nilai RSD berada di bawah 5%, yang menunjukkan bahwa hasil pengukuran duplo memiliki tingkat presisi yang baik dan dapat diterima untuk analisis laboratorium. Nilai RSD yang rendah menunjukkan bahwa variasi antar pengulangan relatif kecil sehingga metode yang digunakan memiliki tingkat keterulangan (*repeatability*) yang baik. Nilai RSD di bawah 5% umumnya menunjukkan bahwa hasil analisis memiliki presisi yang baik dan dapat digunakan untuk interpretasi ilmiah.

Selain pH, variasi konsentrasi awal Pb(II) juga memengaruhi nilai kapasitas adsorpsi. Pada data terlihat bahwa ketika konsentrasi meningkat dari 20 hingga 30 mg/L, nilai kapasitas adsorpsi (q_e) cenderung meningkat, namun persentase removal relatif menurun atau stagnan pada beberapa kondisi pH. Hal ini terjadi karena pada konsentrasi awal yang lebih tinggi, jumlah ion Pb^{2+} dalam larutan meningkat sehingga peluang tumbukan dengan situs aktif adsorben juga meningkat. Namun, pada kondisi tertentu, situs aktif adsorben dapat mencapai titik jenuh (*saturation point*), sehingga tambahan ion Pb^{2+} tidak lagi dapat terikat secara efektif. (Riyana et al., 2022)

Fenomena ini juga sesuai dengan teori adsorpsi monolayer di mana adsorpsi terjadi pada permukaan aktif terbatas hingga mencapai kondisi jenuh. Studi oleh (Tee et al., 2022) menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi awal logam akan meningkatkan kapasitas adsorpsi (mg/g), tetapi efisiensi % removal dapat menurun karena keterbatasan jumlah situs aktif pada adsorben . Hal ini mengindikasikan bahwa pada sistem adsorpsi, terdapat keseimbangan antara jumlah adsorbat dalam larutan dan kapasitas maksimum adsorben.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa kondisi optimum adsorpsi Pb(II) oleh daun rami terjadi pada pH mendekati netral dengan efisiensi sangat tinggi (≈ 98 –99%). Hal ini menunjukkan bahwa aktivasi permukaan biosorben sangat efektif dalam menyediakan gugus fungsi aktif seperti hidroksil dan karboksil yang berperan penting dalam

mekanisme adsorpsi melalui interaksi elektrostatis, kompleksasi, dan pertukaran ion. Temuan ini sejalan dengan berbagai studi terbaru yang menyatakan bahwa biosorben berbasis biomassa tanaman memiliki potensi tinggi sebagai alternatif pengolahan limbah logam berat yang ramah lingkungan dan berbiaya rendah.

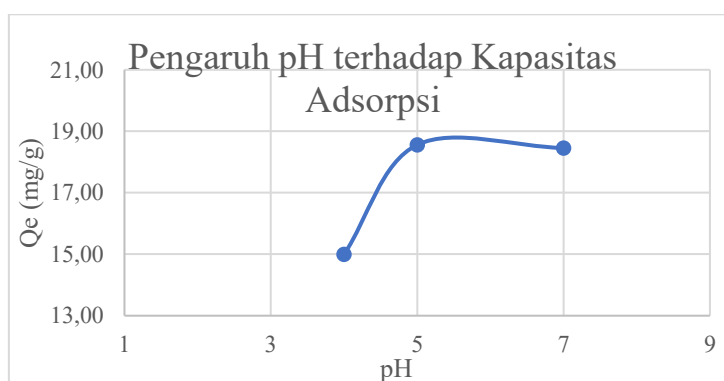
Pengaruh pH terhadap Kapasitas Adsorpsi Bioadsorben Daun Rami

Tabel 2. Pengaruh pH dan Konsentrasi Awal Pb^{2+} terhadap Kapasitas Adsorpsi.

pH	Q_e	ΣQ_e (mg/g)
4	3.92	14.99
	5.13	
	5.94	
5	4.95	18.56
	6.20	
	7.41	
7	4.90	18.46
	6.17	
	7.38	

Sumber : (Hasil Penelitian, 2026).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi pH memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kapasitas adsorpsi ion Pb^{2+} oleh bioadsorben daun rami teraktivasi NaOH. Berdasarkan data, nilai kapasitas adsorpsi total (ΣQ_e) meningkat dari 14,99 mg/g pada pH 4 menjadi 18,56 mg/g pada pH 5, kemudian cenderung stabil namun sedikit menurun pada pH 7. Pola ini menunjukkan bahwa pH 5 merupakan kondisi optimum adsorpsi, di mana kemampuan adsorben dalam mengikat ion logam berada pada titik tertinggi. Fenomena ini sesuai dengan karakter umum adsorpsi logam berat oleh biomassa, yaitu adanya ketergantungan kuat terhadap kondisi keasaman larutan yang memengaruhi interaksi antara permukaan adsorben dan ion logam terlarut (Zou et al., 2018)



Gambar 3. Grafik Pengaruh pH terhadap Kapasitas Adsorpsi.

Sumber : (Hasil Penelitian, 2026).

Peningkatan kapasitas adsorpsi dari pH 4 ke pH 5 dapat dijelaskan melalui mekanisme kompetisi ion H^+ dan Pb^{2+} pada permukaan adsorben. Pada kondisi asam (pH rendah),

permukaan adsorben mengalami protonasi, sehingga gugus aktif seperti –OH dan –COOH lebih banyak bermuatan positif. Kondisi ini menyebabkan terjadinya tolakan elektrostatis terhadap ion Pb²⁺ dan menurunkan jumlah situs aktif yang tersedia untuk adsorpsi. Selain itu, tingginya konsentrasi H⁺ menyebabkan kompetisi ketat dengan Pb²⁺ dalam berikatan dengan situs aktif. Hal ini telah dilaporkan dalam berbagai studi bahwa efisiensi adsorpsi logam berat pada pH rendah cenderung rendah akibat dominasi ion hidrogen pada permukaan adsorben

Pada pH 5, terjadi kondisi optimum di mana gugus fungsional pada permukaan bioadsorben mulai mengalami deprotonasi sehingga membentuk muatan negatif yang lebih banyak. Kondisi ini meningkatkan gaya tarik elektrostatis antara permukaan adsorben dan ion Pb²⁺, sehingga proses adsorpsi berlangsung lebih efektif. Selain itu, pada pH ini, Pb²⁺ masih berada dalam bentuk ion bebas yang stabil sehingga mudah berinteraksi dengan situs aktif adsorben. Pada penelitian lain menunjukkan bahwa rentang pH 4–6 merupakan kondisi paling efektif dalam adsorpsi Pb²⁺ oleh berbagai adsorben berbasis biomassa karena keseimbangan optimal antara spesiasi logam dan muatan permukaan adsorben.

Namun, pada pH yang lebih tinggi (pH 7), terjadi penurunan kapasitas adsorpsi yang disebabkan oleh perubahan spesiasi ion Pb²⁺ dalam larutan. Pada kondisi ini, sebagian Pb²⁺ mulai mengalami hidrolisis membentuk Pb(OH)⁺ atau bahkan Pb(OH)₂ yang dapat mengendap, sehingga mekanisme yang terjadi bukan hanya adsorpsi tetapi juga presipitasi kimia. Selain itu, kejenuhan situs aktif pada permukaan adsorben juga dapat berkontribusi terhadap penurunan nilai Q_e. Fenomena ini konsisten dengan penelitian (Sarwar et al., 2017) yang menyatakan bahwa pada pH netral hingga basa, logam berat cenderung mengalami pengendapan sehingga menurunkan kontribusi adsorpsi murni pada proses penghilangan logam.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, bioadsorben daun rami teraktivasi NaOH terbukti memiliki kemampuan yang baik dalam menyisihkan ion Pb²⁺ dari air limbah artifisial. Variasi pH dan konsentrasi awal Pb²⁺ memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi penyisihan maupun kapasitas adsorpsi. Kondisi adsorpsi optimum diperoleh pada pH 5 dengan kapasitas adsorpsi total sebesar 18,56 mg/g dan efisiensi penyisihan mencapai 99,20%. Peningkatan pH dari 4 menjadi 5 menyebabkan meningkatnya kemampuan adsorpsi karena berkurangnya kompetisi ion H⁺ dan meningkatnya jumlah gugus aktif bermuatan negatif pada permukaan adsorben yang dapat mengikat ion Pb²⁺. Namun, pada pH 7 terjadi sedikit penurunan kapasitas adsorpsi yang diduga disebabkan oleh proses hidrolisis dan pembentukan endapan Pb(OH)₂ yang mengurangi kontribusi adsorpsi murni. Selain itu, peningkatan konsentrasi awal Pb²⁺ dari

20 mg/L menjadi 30 mg/L cenderung meningkatkan kapasitas adsorpsi karena semakin banyak ion logam yang tersedia untuk berinteraksi dengan situs aktif adsorben, meskipun persentase penyisihan relatif stabil akibat keterbatasan jumlah situs adsorpsi yang tersedia. Nilai standar deviasi (SD) dan Relative Standard Deviation (RSD) yang diperoleh berada pada rentang 0,005–0,178 dan 1,56–3,37%, menunjukkan bahwa hasil pengujian duplo memiliki tingkat presisi dan keterulangan yang baik. Secara keseluruhan, daun rami teraktivasi NaOH berpotensi digunakan sebagai bioadsorben alternatif yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan dalam pengolahan limbah yang mengandung logam berat timbal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada semua pihak yang telah memberikan masukan dan saran saat penulisan jurnal ini.

DAFTAR REFERENSI

- Alorabi, A. Q., Alharthi, F. A., Azizi, M., Al-Zaqri, N., El-Marghany, A., & Abdelshafeek, K. A. (2020). Removal of lead(Ii) from synthetic wastewater by *lavandula pubescens* decne biosorbent: Insight into composition–adsorption relationship. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(21), 1–16. <https://doi.org/10.3390/app10217450>
- El-Sharkawy, R. M., Khairy, M., Abbas, M. H. H., Zaki, M. E. A., & El-Hadary, A. E. (2024). Innovative optimization for enhancing Pb²⁺ biosorption from aqueous solutions using *Bacillus subtilis*. *Frontiers in Microbiology*, *15*(August), 1–19. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1384639>
- Firman, F., & Mawardi, M. (2024). Pengaruh pH dan Konsentrasi Larutan terhadap Penyerapan Zat Warna Methylene blue Pada Tanah Napa dengan Metode Batch. *Journal of Natural Sciences*, *5*(3), 203–212. <https://doi.org/10.34007/jonas.v5i3.695>
- Hatiya, N. A., Reshad, A. S., & Negie, Z. W. (2022). Chemical Modification of Neem (*Azadirachta indica*) Biomass as Bioadsorbent for Removal of Pb²⁺ Ion from Aqueous Waste Water. *Adsorption Science and Technology*, *2022*. <https://doi.org/10.1155/2022/7813513>
- 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 and Engineering Chemistry Research*, *61*(5), 1921–1954. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c04583>
- Lestari, I., Mahraja, M., Farid, F., Gusti, D. R., & Permana, E. (2020). PENYERAPAN ION Pb(II) MENGGUNAKAN ADSORBEN DARI LIMBAH PADAT LUMPUR AKTIF PENGOLAHAN AIR MINUM. *Chemistry Progress*, *13*(2). <https://doi.org/10.35799/cp.13.2.2020.31391>
- 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>

- Riyana, S. D., Koesnarpadi, S., Yekti, I., & Sari, L. (2022). *Optimasi pH Dan Waktu Kontak Optimum Adsorben Fe_3O_4 -AH Terhadap Ion Logam Pb^{2+}* . 3–5.
- Sari, F., Fitriyano, G., Syamsudin, Redjeki, A. S., & Hadikusuma, H. (2022). Pengaruh pH dan Waktu Terhadap Adsorpsi Logam Timbal (Pb) dengan Arang Aktif dari Gambas (*Luffa acutangula*) atau Oyong Kering. *Jurnal Konversi*, 11(1), 31–38.
- Sarwar, N., Mohsin, M., Bhatti, A. A., Ahmmad, S. W., & Husaain, A. (2017). Development of water and energy efficient environment friendly easy care finishing by foam coating on stretch denim fabric. *Journal of Cleaner Production*, 154, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.171>
- Tee, W. T., Loh, N. Y. L., Hiew, B. Y. Z., Hanson, S., Thangalazhy-Gopakumar, S., Gan, S., & Lee, L. Y. (2022). Effective remediation of lead(II) wastewater by *Parkia speciosa* pod biosorption: Box-Behnken design optimisation and adsorption performance evaluation. *Biochemical Engineering Journal*, 187(June). <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108629>
- Thomas, E., Borchard, N., Sarmiento, C., Atkinson, R., & Ladd, B. (2020). Key factors determining biochar sorption capacity for metal contaminants: a literature synthesis. *Biochar*, 2(2), 151–163. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00053-3>
- Wulandari, A. P., Nafisa, Z. K., Herlina, T., Maharani, R., Darmawan, G., Parikesit, A. A., & Zainul, R. (2024). Metabolite profiling of potential bioactive fractions from ethanol extract of *Boehmeria nivea* flowers by GC–MS/MS analysis. *Phytomedicine Plus*, 4(2). <https://doi.org/10.1016/j.phyplu.2024.100557>
- Zhao, Y., Zheng, Y., Chu, C. kai, Liang, T., Tian, Y. yang, Chen, L. feng, Li, B., Gao, J., & Chen, T. (2024). High adsorption capacity of Pb^{2+} by iminodiacetic acid functionalized ramie via radiation grafting. *Journal of Saudi Chemical Society*, 28(2), 101818. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2024.101818>
- Zou, Y., Lin, M., Xiong, W., Wang, M., Zhang, J., Wang, M., & Sun, Y. (2018). Metagenomic insights into the effect of oxytetracycline on microbial structures, functions and functional genes in sediment denitrification. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 161(May), 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.05.045>