

RESEARCH ARTICLE

Biosorption of Lead (Pb) Metal using Immobilized *Pseudomonas putida*: Kinetic Analysis and Langmuir-Freundlich Adsorption Isotherm

(Biosorpsi Logam Timbal (Pb) menggunakan *Pseudomonas putida* Terimobilisasi: Analisis Kinetika dan Isoterm Adsorpsi Langmuir-Freundlich)

Khairunnisa*, Rahmahtriananda Faradilla, Ahmad Moh. Nur

Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman Jalan Sambaliung, Samarinda Kalimantan Timur, Indonesia

ABSTRACT

Heavy metal Pb(II) contamination in industrial wastewater requires effective and environmentally friendly remediation technologies. This research aims to evaluate biosorbent performance for Pb(II) removal through kinetic and adsorption isotherm analysis. Biosorption studies were conducted with variations in contact time and initial concentration to determine optimal conditions and adsorption mechanisms. The results showed that the biosorbent exhibited a maximum adsorption capacity of 48 mg/g at 100 mg/L concentration, with equilibrium time achieved at 120 minutes, followed by fluctuations before reaching dynamic equilibrium. Kinetic data followed the pseudo-second-order model ($R^2 = 0.9861$) with a rate constant $k_2 = 0.3495 \text{ g/mg}\cdot\text{min}$, indicating a chemisorption mechanism. The adsorption isotherm fitted the Langmuir model ($R^2 = 0.9491$), demonstrating monolayer adsorption on a homogeneous surface. At low concentrations (0-75 mg/L), the adsorption increase proceeded linearly, whereas at high concentrations (100-200 mg/L), active site saturation occurred. The developed biosorbent demonstrates promising application potential for sustainable and cost-effective industrial wastewater treatment technology for heavy metal Pb(II) removal.

Pencemaran logam berat Pb(II) dalam air limbah industri memerlukan teknologi remediasi yang efektif dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengkaji kinerja biosorben untuk removal Pb(II) melalui analisis kinetika dan isoterm adsorpsi. Studi biosorpsi dilakukan dengan variasi waktu kontak dan konsentrasi awal untuk menentukan kondisi optimal dan mekanisme adsorpsi. Hasil penelitian menunjukkan biosorben memiliki kapasitas adsorpsi maksimum 48 mg/g pada konsentrasi 100mg/l dan waktu kesetimbangan tercapai pada menit ke 120, kemudian mengalami fluktuasi sebelum mencapai kesetimbangan dinamis. Data kinetika mengikuti model pseudo second order ($R^2 = 0,9861$) dengan konstanta laju $k_2 = 0,3495 \text{ g/mg}\cdot\text{min}$, mengindikasikan mekanisme chemisorption. Isoterm adsorpsi sesuai dengan model Langmuir ($R^2 = 0,9491$) yang menunjukkan adsorpsi monolayer pada permukaan homogen. Pada konsentrasi rendah (0-75 mg/L), peningkatan penyerapan berlangsung linier, sedangkan pada konsentrasi tinggi (100-200 mg/L) terjadi kejenuhan situs aktif. Biosorben yang dikembangkan menunjukkan potensi aplikasi yang menjanjikan untuk teknologi pengolahan air limbah industri yang berkelanjutan dan cost-effective dalam removal logam berat Pb(II).

Keywords: *Pseudomonas putida*, Biosorption, Adsorption kinetics, Isotherms, Immobilization, Heavy metals.

*Corresponding author:
Khairunnisa
E-mail: khairunnisa@ft.unmul.ac.id

PENDAHULUAN

Pencemaran logam berat telah menjadi salah satu tantangan lingkungan yang paling serius di era industrialisasi modern ini. Aktivitas industri dan antropogenik melepaskan logam berat dari sumber daya alam, mengubahnya menjadi elemen beracun yang dapat menyebabkan kerusakan parah pada ketahanan ekosistem dan kesehatan manusia. Logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), merkuri

(Hg), kromium (Cr), tembaga (Cu), dan seng (Zn) bersifat sangat toksik bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah karena sifat bioakumulatifnya yang persisten dalam lingkungan. Logam timbal (Pb) termasuk dalam salah satu logam yang termasuk dalam bahan berbahaya dan beracun (B3). Keberadaan timbal dengan kadar yang tinggi dalam limbah cair dapat menyebabkan pencemaran terhadap lingkungan. Adanya timbal dalam limbah cair menandakan telah terjadi pencemaran dari limbah industri, karena

senyawa timbal murni tidak pernah terdapat di alam. Apabila senyawa timbal terdapat dalam jumlah besar, maka dapat menimbulkan keracunan akut pada pernafasan, mata, sistem peredaran darah dan reproduksi (Peraturan (UE) No. 1907/2006). Adapun beberapa metode sederhana untuk pengolahan limbah telah dikembangkan, termasuk adsorpsi, pertukaran ion, pemisahan membran, dan pengendapan kimia [1]. Adsorpsi merupakan teknik yang paling banyak digunakan untuk menghilangkan logam berat karena fitur-fitur menariknya termasuk desain yang fleksibel, operasi, dan efektivitas biaya. Adsorpsi telah memperoleh pengakuan signifikan sebagai metode yang hemat biaya untuk penghilangan kontaminan. Metode ini menawarkan beberapa keunggulan, termasuk efisiensi penghilangan tinggi, biaya rendah, dan operasi yang lebih sederhana. Adsorpsi telah memperoleh pengakuan signifikan sebagai metode yang hemat biaya untuk penghilangan kontaminan [2]. Salah satu strategi dalam penerapan metode adsorpsi adalah penggunaan biosorben berbasis mikroorganisme, yang terbukti mampu meningkatkan efisiensi penyerapan logam berat dari lingkungan. *Pseudomonas putida* merupakan salah satu bakteri gram negatif yang memiliki potensi tinggi sebagai biosorben karena kemampuannya dalam mengakumulasi logam berat melalui dinding sel dan metabolisme intraseluler [3]. Bakteri ini juga memiliki keunggulan dalam hal toleransi terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem dan kemampuan tumbuh yang cepat [4]. Namun, penggunaan sel bakteri bebas dalam proses biosorpsi memiliki beberapa kelemahan, antara lain kesulitan dalam pemisahan biomassa dari larutan, stabilitas sel yang rendah, dan kemungkinan terjadinya pertumbuhan yang tidak terkontrol [5]. Untuk mengatasi masalah tersebut, teknik imobilisasi sel menggunakan matriks polimer seperti natrium alginat telah dikembangkan. Alginat merupakan polimer alami yang biokompatibel, tidak beracun, dan memiliki kemampuan membentuk gel yang stabil dalam kondisi operasi yang bervariasi. Imobilisasi sel dalam matriks alginat dapat meningkatkan stabilitas mekanik sel, memudahkan proses pemisahan dan pemulihan biomassa, memungkinkan penggunaan berulang biosorbent serta resistensi terhadap senyawa toksik [6]. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas *Pseudomonas putida* yang diimobilisasi menggunakan natrium alginat dalam proses biosorpsi logam berat. Parameter yang akan dipelajari meliputi

kondisi optimum proses biosorpsi, kapasitas adsorpsi, kinetika adsorpsi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi biosorpsi yang efektif dan aplikatif untuk pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat.

METODE PENELITIAN

Bahan dan Alat

Penelitian ini menggunakan *Pseudomonas putida*. Bahan kimia yang digunakan meliputi $Pb(NO_3)_2$ (Merck KGaA), natrium alginat (Brataco), $CaCl_2$ (Brataco), *Nutrien Broth* (Brataco), Agar NaOH (Merck) HCl (Merck), HNO_3 dan akuades. Peralatan yang digunakan meliputi cawan petri, jarum ose, pipet tetes, pipet ukur (iwaki), labu ukur (iwaki), gelas kimia (iwaki), Erlenmeyer (iwaki), oven, *hot plate stirrer*, Spektrofotometer Serapan Atom (AAS) (*PerkinElmer Analyst 400*), pH meter, inkubator shaker, autoklaf dan sentrifus.

Pembuatan Larutan Sintetis Pb(II)

Larutan stok Pb(II) 1000 mg/L dibuat dengan melarutkan 1,5985 g $Pb(NO_3)_2$ dalam akuades hingga volume 1000 mL. Penambahan 1 mL HNO_3 pekat dilakukan untuk mencegah hidrolisis dan presipitasi ion logam. Perhitungan massa $Pb(NO_3)_2$ didasarkan pada rumus stoikiometri dengan mempertimbangkan berat molekul $Pb(NO_3)_2$.

Imobilisasi *Pseudomonas putida* dalam Matriks Alginat

Larutan natrium alginat 2% (w/v) dibuat dengan melarutkan 2 g alginat dalam 100 mL akuades steril menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu kamar selama 2 jam hingga larut sempurna. Kemudian mensterilisasi larutan dengan autoklaf pada 121°C selama 15 menit dan didinginkan hingga suhu kamar sebelum digunakan. Larutan $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 0,1 M (1,47 g dalam 100 mL akuades steril) disiapkan dan disterilisasi dengan cara yang sama. Proses imobilisasi dilakukan dengan mencampurkan suspensi sel *P. putida* (10^8 CFU/mL) dengan larutan alginat steril dengan perbandingan 1:1 (v/v). Campuran dihomogenkan secara perlahan untuk menghindari kerusakan sel, kemudian ditetaskan menggunakan jarum suntik berdiameter 1,2 mm ke dalam larutan $CaCl_2$ 0,1 M dari ketinggian 10 cm. *Bead* yang terbentuk dibiarkan dalam

larutan CaCl_2 selama 30 menit untuk pengerasan, kemudian dicuci tiga kali dengan akuades. Selanjutnya dikeringkan dalam oven pada suhu 80°C selama 2 jam, kemudian dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan 80 mesh.

Biosorpsi Logam Pb(II)

Penelitian biosorpsi dilakukan secara *batch* pada pH 6 dengan waktu kontak (5, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 180, 240 menit) pada konsentrasi larutan 25 mg/L, dan konsentrasi awal larutan Pb(II) (25-200 mg/L). Larutan yang digunakan sebanyak 150 mL dan adsorben yang digunakan sebanyak 0.15g, filtratnya dianalisis menggunakan AAS. Selanjutnya perhitungan kapasitas penyerapan berdasarkan rumus berikut :

$$\frac{C_0 - C_t}{M} V \quad (1)$$

C_0 adalah konsentrasi awal larutan (mg/L), sedangkan C_t merupakan konsentrasi larutan pada waktu t menit (mg/L). V menunjukkan volume larutan (L) dan M adalah massa adsorben (g). [7]

Kinetik Adsorpsi

Kinetika adsorpsi merupakan salah satu kajian penting yang sering dilakukan untuk menilai karakteristik adsorben, khususnya dalam upaya rehabilitasi lingkungan. Berbagai model kinetika adsorpsi telah dikembangkan guna memprediksi laju penyerapan adsorbat oleh adsorben tertentu yaitu model kinetika *pseudo first order Lagergren* [8] yaitu :

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{k}{2.303}\right)t \quad (2)$$

q_e adalah kapasitas adsorpsi pada saat kesetimbangan, q_t adalah kapasitas adsorpsi pada waktu t , dan k adalah konstanta laju order pertama pseudo. Plot dari $\log (q_e - q_t)$ vs. waktu (t) akan memberikan garis lurus dan koefisien determinasi R^2 dapat ditentukan.

Model kinetika *pseudo second order* McKay & Ho [9] sebagai berikut :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3)$$

k_2 adalah laju adsorpsi awal yang setara dengan konstanta laju order kedua pseudo dikalikan dengan q_e^2 dan q_e adalah jumlah adsorbat teradsorpsi

pada waktu t . Plot t/q_t vs. t akan menghasilkan garis lurus dan koefisien determinasi R^2 dapat ditentukan.

Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi merupakan salah satu parameter fundamental yang sangat penting untuk memahami mekanisme interaksi antara adsorbat dan adsorben dalam proses pemurnian air limbah. Terdapat berbagai model isoterm adsorpsi yang telah dikembangkan oleh para peneliti untuk menjelaskan fenomena kesetimbangan adsorpsi pada kondisi temperatur konstan. Beberapa model isoterm yang paling umum digunakan dalam studi adsorpsi meliputi:

Model isoterm adsorpsi pada adsorben berdasarkan pada persamaan *Langmuir* dan *Freundlich*. Berikut persamaan umum adsorpsi *Langmuir* [10] :

$$Q = \frac{b \cdot K \cdot C_e}{1 + K \cdot C_e} \quad (4)$$

Persamaan diatas dapat diturunkan secara linier menjadi :

$$\frac{C_e}{Q} = \frac{1}{Kb} + \frac{1}{b} C_e \quad (5)$$

Keterangan :

C_e = Konsentrasi kesetimbangan adsorbat dalam larutan setelah adsorpsi (mg/L)

Q = Jumlah adsorbat teradsorpsi per bobot adsorben (mg/g)

K = Konstanta kesetimbangan adsorpsi (L/mg)

b = Kapasitas adsorpsi maksimum dari adsorben (mg/g)

Persamaan *isotherm* adsorpsi *Freundlich* [11] dirumuskan dengan :

$$Q = k \times C_e^{1/2} \quad (6)$$

Persamaan diatas dapat diubah ke dalam bentuk linier yaitu :

$$\log Q = \log k + 1/n \log C_e \quad (7)$$

Keterangan :

C_e = Konsentrasi kesetimbangan adsorbat dalam larutan setelah adsorpsi (mg/L)

k = Konstanta adsorpsi Freundlich

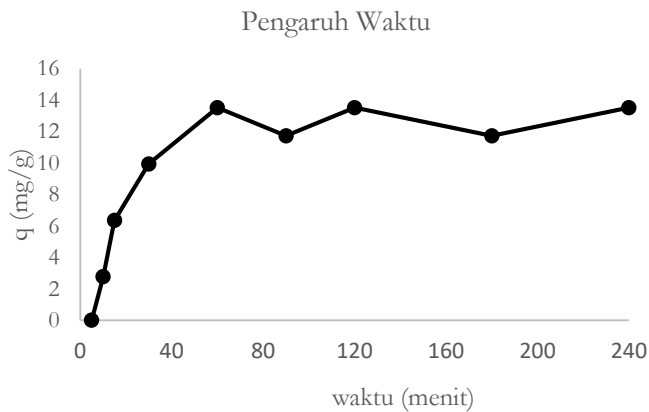
n = Konstanta empiris

Q = Jumlah adsorbat teradsorpsi per massa adsorben (mg/g).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Adsorpsi Pb(II)

Pengaruh waktu biosorpsi terhadap konsentrasi Pb(II) dapat dilihat pada Gambar 1.

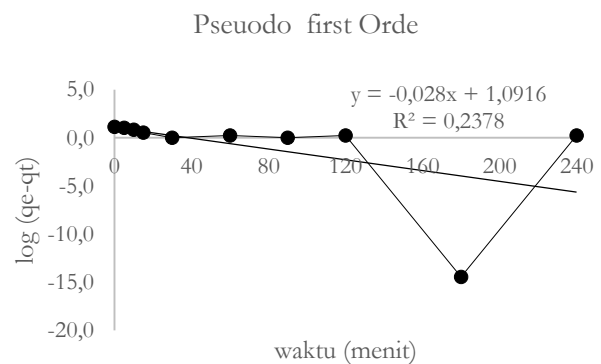


Gambar 1. Pengaruh variasi waktu kontak terhadap adsorpsi logam

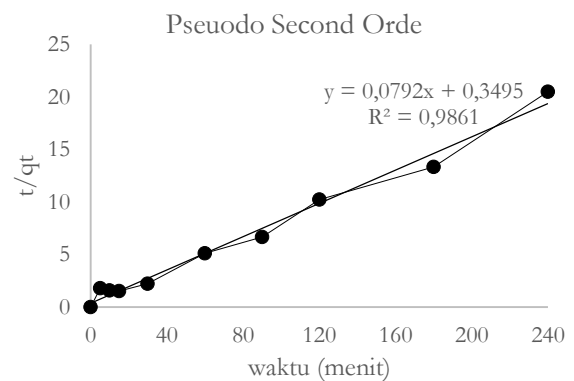
Penetapan waktu adsorpsi untuk mengidentifikasi interval waktu yang diperlukan guna mencapai kondisi kesetimbangan yang optimal. Pada Gambar 1 menunjukkan terjadi peningkatan kapasitas adsorpsi yang sangat cepat dari 0 hingga mencapai puncak pertama sekitar 13,512 mg/g pada menit ke-30. Fenomena ini menunjukkan adsorpsi awal yang sangat cepat karena tersedianya banyak situs aktif pada permukaan adsorben [12]. Tahap ini merupakan bagian dari *bulk diffusion* yang biasanya berlangsung cepat, di mana molekul adsorbat diangkut dari *bulk* larutan ke *film* cair pada permukaan adsorben [13]. Setelah mencapai puncak pertama, grafik menunjukkan pola fluktuasi yang menarik dengan penurunan kapasitas menjadi sekitar 12 mg/g pada menit ke-60, kemudian naik kembali ke sekitar 13,512 mg/g pada menit ke-120. Pola fluktuasi ini dapat dijelaskan oleh terjadinya desorpsi parsial dimana melepas logam berat dari adsorben, hanya sebagian yang berhasil dilepas sebagian tetap terikat Logam berat dapat berinteraksi dengan adsorben melalui interaksi lemah Semakin kuat ikatannya, makin sulit logam tersebut lepas [14]. Selanjutnya dari waktu 120-240 menit terjadi fluktuasi nilai 12-13 mg/g, mengindikasikan tercapainya kondisi kesetimbangan dinamis. Kondisi ini menunjukkan tercapainya kesetimbangan [15].

Kinetika Reaksi

Ketika adsorpsi digunakan untuk *removal* ion logam, maka sangat penting untuk menentukan proses kinetika. Kinetika adsorpsi menggambarkan laju serapan zat terlarut pada permukaan adsorben dan memberikan informasi tentang laju reaksi dan mekanisme penyerapan. Model kinetika didasarkan pada kuantitas pada substansi yang teradsorpsi sebagai fungsi waktu. Pada penelitian ini untuk menentukan laju reaksi pada proses adsorpsi ini menggunakan model kinetika *pseudo first order* dan model kinetika *pseudo second order*. Dari data pengaruh waktu, dibuat grafik linier berdasarkan pada persamaan (2) dan persamaan (3). Berdasarkan Gambar 2 dan 3 hasil yang diperoleh mengikuti persamaan reaksi *pseudo second order*, karena persamaan tersebut mempunyai nilai koefisien korelasi (R^2) 0,9861. Hal ini menunjukkan bahwa laju adsorpsi bergantung pada jumlah situs aktif yang tersedia pada adsorben[16]. Nilai yang diperoleh dari eksperimen dengan persamaan model matematika. Konstanta (k_2) 0,3495 g/mg.min dan nilai q_e yang diperoleh 12,1212 mg/g tidak jauh berbeda dengan q berdasarkan eksperimen yaitu 13,512 mg/g.



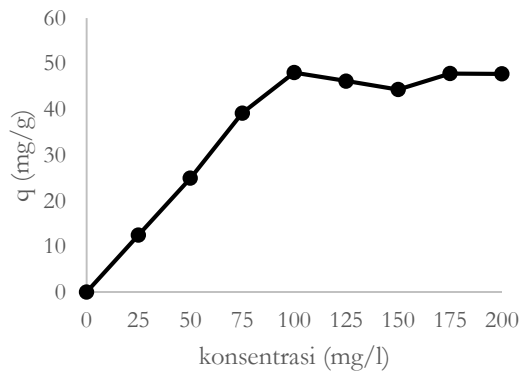
Gambar 2. Model kinetika *pseudo first order*



Gambar 3. Model kinetika *pseudo second order*

Pengaruh Konsentrasi Awal

Penentuan pengaruh konsentrasi awal dilakukan untuk mengetahui seberapa besar konsentrasi yang dapat diserap oleh biosorben. Variasi konsentrasi awal yang digunakan dalam proses adsorpsi berpengaruh terhadap kapasitas adsorpsi yang ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan gambar tersebut yang pengaruh konsentrasi terhadap penyerapan menunjukkan pola yang karakteristik untuk proses adsorpsi. Pada konsentrasi rendah (0-75 mg/l), terjadi peningkatan penyerapan yang signifikan dan hampir linier dari 0 hingga 40 mg/g, yang menunjukkan bahwa pada tahap ini masih banyak situs aktif yang tersedia pada permukaan adsorben. Hal ini sesuai dengan prinsip dasar adsorpsi dimana laju adsorpsi awal bergantung pada ketersediaan situs aktif dan konsentrasi adsorbat dalam larutan [17]. Seiring dengan peningkatan konsentrasi pada rentang 75-100 mg/l, laju peningkatan penyerapan mulai melambat dan mencapai nilai maksimum sekitar 48 mg/g, menandakan mulai terjadinya kejenuhan pada situs aktif adsorben. Pada konsentrasi yang lebih tinggi (100-200 mg/l), penyerapan mencapai kesetimbangan dengan nilai yang relatif konstan antara 45-48 mg/g, menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi maksimum telah tercapai dan terjadi kesetimbangan antara laju adsorpsi dan desorpsi.



Gambar 4. Pengaruh Konsentrasi Awal Terhadap Kapasitas Adsorpsi Pb(II)

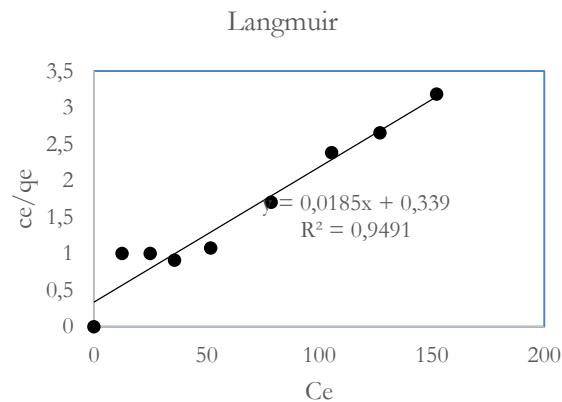
Isoterm Adsorpsi Langmuir dan Freundlich

Tabel 1. Konstanta Langmuir untuk penyerapan pada ion logam Pb²⁺ pada biosorben imobilisasi *P.putida*

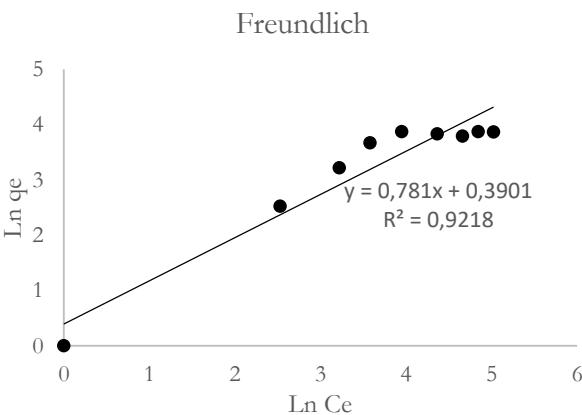
Ion logam	slope	intercept	Qmax(mg/g)	K _L	R _L	R ²
Pb ²⁺	0,0185	0,339	48	0,0545	0,0840-0,4232	0,9491

untuk menentukan model kesetimbangan menggunakan isoterm adsorpsi dengan pendekatan model *Langmuir* berdasarkan persamaan (5) dan *Freundlich* berdasarkan persamaan (7) untuk menganalisis proses penyerapan logam.

Model *Langmuir* mengasumsikan adsorpsi monolayer pada situs aktif yang homogen, sedangkan model *Freundlich* menggambarkan adsorpsi multilayer pada permukaan yang heterogen. Analisis komparatif kedua model ini akan memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai mekanisme adsorpsi dan efektivitas pada bioadsorben dalam removal Pb(II) larutan. Berdasarkan perhitungan model kesetimbangan *Langmuir* dan *Freundlich* yang dapat dilihat pada Gambar 5 dan 6.



Gambar 5. Model Isoterm Langmuir



Gambar 6. Model Kesetimbangan Freundlich

Tabel 2. Konstanta *Freundlich* untuk penyerapan pada ion logam Pb^{2+} pada biosorben imobilisasi *P.putida*

Ion Logam	slope	intercept	K_F	n	R^2
Pb^{2+}	0,781	0,3901	2,1836	2,5634	0,9218

Berdasarkan hasil perhitungan yang di sajikan pada Tabel 1 dan 2, maka hasil terbaik biosorpsi diperoleh menggunakan model *Langmuir* berdasarkan nilai koefisien korelasi (R^2) yaitu 0,9491 lebih besar dibandingkan model *Freundlich* yaitu 0,9128. Hal ini menunjukkan bahwa adanya korelasi yang baik antara data eksperimen dengan persamaan model matematika model *Langmuir*. Model ini menjelaskan adsorpsi monolayer pada permukaan homogen dengan asumsi bahwa semua situs aktif memiliki energi adsorpsi yang sama dan tidak ada interaksi antara molekul yang teradsorpsi. Model *Langmuir* dapat digunakan untuk menentukan kapasitas adsorpsi maksimum dan konstanta adsorpsi, yang penting untuk memahami mekanisme dan efisiensi proses adsorpsi [18].

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan diperoleh kapasitas adsorpsi maksimum 48 mg/g, kemudian untuk karakteristik yang diperlukan untuk mengindikasikan isoterm *Langmuir* dinyatakan dalam bentuk R_L (kesetimbangan parameter). Dari nilai perhitungan R_L dapat menentukan sifat dari proses adsorpsi, jika $R_L > 1$ maka sifat dari proses tersebut *unfavorable*, jika $R_L = 1$ maka prosesnya *linier*, dan jika $0 < R_L < 1$ maka prosesnya *favorable* [19]. Dari hasil yang diperoleh, memiliki nilai R_L lebih 0 dan kurang dari 1, hal ini mengkonfirmasi bahwa proses adsorpsi berlangsung secara *favorabel* dalam kondisi eksperimental yang digunakan. Penelitian yang dilakukan Penelitian yang dilakukan Chowdhury. (2011) [20] juga menunjukkan bahwa pola serupa sering ditemukan dalam proses adsorpsi berbagai polutan menggunakan biomassa, dimana peningkatan konsentrasi awal akan meningkatkan *driving force* untuk transfer massa hingga mencapai titik jenuh adsorben.

KESIMPULAN

Biosorben yang dikembangkan menunjukkan kinerja yang efektif untuk removal $Pb(II)$ dengan kapasitas adsorpsi maksimum 48 mg/g pada konsentrasi 100 mg/l dan waktu kesetimbangan menit ke 120. Proses biosorpsi mengikuti model kinetika *pseudo second order* ($R^2 = 0,9861$) yang mengindikasikan mekanisme *chemisorption*, serta isoterm *Langmuir* ($R^2 =$

0,9491) yang menunjukkan adsorpsi *monolayer* pada permukaan homogen. Meskipun terjadi fluktuasi kapasitas adsorpsi pada fase awal yang mengindikasikan desorpsi parsial, biosorben tetap mencapai kondisi kesetimbangan dinamis yang stabil. Temuan ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknologi biosorpsi yang ramah lingkungan dan *cost-effective* untuk aplikasi remediasi logam berat dalam pengolahan air limbah industri. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan parameter operasi dan mengeksplorasi pengaruh kondisi lingkungan terhadap kinerja biosorpsi guna meningkatkan efisiensi dan aplikabilitas skala komersial.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Peng and J. Guo, "Removal of chromium from wastewater by membrane filtration, chemical precipitation, ion exchange, adsorption electrocoagulation, electrochemical reduction, electrodialysis, electrodeionization, photocatalysis and nanotechnology: a review," Nov. 01, 2020, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s10311-020-01058-x.
- [2] Y. Wang *et al.*, "Research status, trends, and mechanisms of biochar adsorption for wastewater treatment: a scientometric review," *Springer Environmetal Sciences Europe*, Dec. 01, 2024, *Springer*. doi: 10.1186/s12302-024-00859-z.
- [3] A., H. M. A. , A. M. K. , & I. W. S. Ahmady, "Biosorption of copper (II) from aqueous solutions by non-living biomass of *Pseudomonas putida*,".
- [4] T. Krell *et al.*, "Responses of *Pseudomonas putida* to toxic aromatic carbon sources," *Journal of Biological Chemistry*", vol. 16, no. 1-2, pp. 25-32, 2012
- [5] M. Bilal, T. Rasheed, J. E. Sosa-Hernández, A. Raza, F. Nabeel, and H. M. N. Iqbal, "Biosorption: An interplay between marine algae and potentially toxic elements A review," Feb. 01, 2018, *MDPI AG*. doi: 10.3390/md16020065.
- [6] A. Ahmad, A. H. Bhat, and Azizul Buang, "Biosorption of transition metals by freely suspended and Ca-alginate immobilised with *Chlorella vulgaris*: Kinetic and equilibrium modeling," *J Clean Prod.*, vol. 171, pp. 1361-1375, 2018.

- [7] A. Setiawan, D. A. Rahmawati, N. A. Novitrie, and D. Dermawan, "Efektivitas biosorpsi logam berat Ni(II) menggunakan *saccharomyces cerevisiae* terimobilisasi pada natrium alginat," *METANA*, vol. 20, no. 2, pp. 69-78, Dec. 2024, doi: 10.14710/metana.v20i2.59250.
- [8] R. B. Holle, A. D. Wuntu, and M. S. Sangi, "Kinetika adsorpsi gas benzena pada karbon aktif tempurung kelapa," *Jurnal Mipa Unsrat Online*, vol. 2, no. 2, pp. 100-104, 2013.
- [9] E. D. Revellame, D. L. Fortela, W. Sharp, R. Hernandez, and M. E. Zappi, "Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review," *Clean Eng Technol*, vol. 1, p. 100032, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.clet.2020.100032.
- [10] H. Chung, W. Kim, J. Park, J. Cho, T. Jeong, and P. Park, "Application of Langmuir and Freundlich isotherms to predict adsorbate removal efficiency or required amount of adsorbent," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, pp. 241-246, 2015.
- [11] P. U. Amaechi, C. E. Elenwo, and S. O. N. Dimkpa, "Langmuir and Freundlich isotherm models' description of p. adsorption capacity of wetland and upland soil in rivers state," *Global Journal of Agricultural Research*, vol. 12, no. 3, pp. 14-29, Mar. 2024, doi: 10.37745/gjar.2013/vol12n31429.
- [12] M. Biyikoğlu, "Innovative approaches in wastewater treatment: kinetic and isotherm investigation of dye adsorption on sulfur-modified PET fibers," *Research on Chemical Intermediates*, vol. 51, no. 6, pp. 3281-3299, Jun. 2025, doi: 10.1007/s11164-025-05599-0.
- [13] Q. Hu, S. Ma, Z. He, H. Liu, and X. Pei, "A revisit on intraparticle diffusion models with analytical solutions: Underlying assumption, application scope and solving method," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 60, p. 105241, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.jwpe.2024.105241.
- [14] K. Leung, L. J. Criscenti, A. W. Knight, A. G. Ilgen, T. A. Ho, and J. A. Greathouse, "Concerted Metal Cation Desorption and Proton Transfer on Deprotonated Silica Surfaces," *J Phys Chem Lett*, vol. 9, no. 18, pp. 5379-5385, Sep. 2018, doi: 10.1021/acs.jpcclett.8b02173.
- [15] Y. Yustinah, H. Hudzaifah, M. Aprilia, and Syamsudin, "Kesetimbangan adsorpsi logam berat (Pb) dengan adsorben tanah diatomit secara batch," *Jurnal Konversi*, vol. 9, no. 1, pp. 17-28, 2020.
- [16] H. P. Rifa' and M. A. Zulfikar, "Kinetic adsorption study of Cd(II) metal ions using glutaraldehyde-crosslinked thiosemicarbazide-modified poly (vinyl alcohol)," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 10042-10047, 2024.
- [17] D. S. Handayani, D. Siswanta, and Mustofa, "Adsorpsi ion logam Pb(II), Cd(II) dan Cr(III) oleh poli s allil-kalts [4] arena tetraester," *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, vol. 19, no. 3, pp. 218-225, 2012.
- [18] 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, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.ccej.2009.09.013.
- [19] A. N. Ebelegi, N. Ayawei, and D. Wankasi, "Interpretation of adsorption thermodynamics and kinetics," *Open J Phys Chem*, vol. 10, no. 03, pp. 166-182, 2020, doi: 10.4236/ojpc.2020.103010.
- [20] Chowdhury, "Equilibrium kinetics and isotherm studies of Cu (II) Adsorption from Waste water onto alkali activated oil palm ash," *Am J Appl Sci*, vol. 8, no. 3, pp. 230-237, Mar. 2011, doi: 10.3844/ajassp.2011.230.237.