



STUDI *ISOTHERM* ADSORPSI CU(II) DALAM LARUTAN MENGUNAKAN ZEOLIT TERAKTIVASI

Moh. Azhar Afandy^a, Fikrah Dian Indrawati Sawali^{a,*}

^aProgram Studi Teknik Kimia Mineral, Politeknik Industri Logam Morowali

Jl. Trans Sulawesi Labota, Bahodopi, Morowali, Sulawesi Tengah, 94974

*E-mail: fikrah@pilm.ac.id

Masuk Tanggal :13 Maret, revisi tanggal: 17 Mei, diterima untuk diterbitkan tanggal :30 Juni 2024

Abstrak

Proses penghilangan logam berat khususnya Cu(II) menjadi salah satu solusi dari permasalahan pencemaran lingkungan yang terjadi akibat dari kegiatan industri. Adsorpsi menjadi salah satu metode yang efisien dan efektif dalam mengatasi permasalahan tersebut karena mudah untuk dioperasikan dan tidak memerlukan biaya yang tinggi. Penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan zeolit alam sebagai adsorben dengan proses aktivasi secara fisika dengan suhu 105 °C selama 4 Jam untuk tahap pengeringan dan tahap kalsinasi menggunakan tanur dengan suhu 550 °C selama 2 Jam. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mempelajari mekanisme adsorpsi yang terjadi antara molekul Cu(II) dengan adsorben zeolit berdasarkan parameter dari beberapa model isotherm antara lain: Langmuir, Freundlich, Temkin, Jovanovic, dan Harkin-Jura. Hasil menunjukkan bahwa model isotherm Langmuir cocok untuk mendeskripsikan proses adsorpsi yang terjadi dengan nilai koefisien korelasi (R^2) = 0,9542, q_{max} = 1,0375 mg.g⁻¹, K_L = 0,5463 L.mg⁻¹, dan R_L = 0,3210-0,9959. Berdasarkan model isotherm Langmuir, dapat disimpulkan bahwa proses adsorpsi Cu(II) oleh zeolit terjadi secara monolayer pada permukaan adsorben yang homogen.

Kata Kunci: Isotherm, Adsorpsi, Zeolit, Cu(II)

Abstract

Eliminating heavy metals, particularly Cu (II), is an approach for solving environmental pollution caused by industrial activity. Adsorption is a cost-effective and efficient solution due to its simplicity in operation and low cost requirements. The study utilized natural zeolite as an adsorbent through a physical activation procedure. This research aims to investigate the adsorption mechanism between Cu(II) molecules and zeolite adsorbents using several isotherm models such as Langmuir, Freundlich, Temkin, Jovanovic, and Harkin-Jura. The Langmuir isotherm model is the best appropriate to represent the adsorption process based on the obtained results: correlation coefficient (R^2) = 0.9542, q_{max} = 1.0375 mg.g⁻¹, K_L = 0.5463 L.mg⁻¹, and R_L = 0.3210-0.9959. The Cu(II) adsorption process by zeolite follows the Langmuir isotherm model, indicating that it occurs in a monolayer on a homogeneous adsorbent surface.

Keywords: Isotherm, Adsorption, Zeolite, Cu(II)

1. PENDAHULUAN

Aktivitas industri yang intens beberapa waktu ini mengakibatkan kontaminasi air limbah dengan beberapa logam berat seperti besi, seng, krom, nikel dan tembaga [1], [2]. Penggunaan logam berat yang ekstensif dalam industri mengakibatkan kemungkinan sejumlah besar logam berat ini dapat masuk ke dalam lingkungan

perairan [2]. Bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah, sebagian besar logam berat berpotensi menjadi racun dan pencemarannya merupakan ancaman besar bagi ekosistem perairan [3]. Selain itu, pencemaran logam berat oleh aktivitas industri dapat menyebabkan masalah serius bagi kesehatan manusia, karena cenderung terakumulasi secara biologis dalam jaringan lemak [4] dan tidak dapat terurai, serta bersifat karsinogenik [5].

Penghilangan kontaminan dari perairan dapat dilakukan secara kimia, biologi dan fisika [4]. Beberapa proses pengolahan air yang mengandung logam berat seperti koagulasi [6], presipitasi [7], pertukaran ion, pemisahan membran, reverse osmosis [1], [8], bioremediasi [9]–[11], koagulasi – flokulasi [12] dan adsorpsi [4]. Namun, beberapa metode ini sangat terbatas untuk menghilangkan ion tembaga (Cu(II)) dari limbah cair karena pengoperasiannya yang rumit, menghasilkan residu limbah (hasil samping), biaya tinggi dan konsumsi energi yang besar [13].

Metode adsorpsi merupakan salah satu metode terbaik yang dapat digunakan dalam penurunan kadar logam berat di dalam air limbah termasuk Cu(II). Hal ini dikarenakan metode ini tidak membutuhkan biaya yang besar [2], pengoperasian tergolong mudah, tidak membutuhkan kondisi operasi tambahan untuk menghilangkan sludge, waktu operasional singkat dan dapat diterapkan untuk berbagai aplikasi [5]. Pengembangan jenis adsorben yang baik akan meningkatkan performa adsorpsi, stabilitas dan kapasitas regenerasi yang menjadi faktor penting dalam teknologi adsorpsi [14]. Oleh karena itu pemilihan jenis adsorben juga menjadi faktor pendukung keberhasilan penerapan metode ini [15].

Pengembangan adsorben sejatinya sudah dilakukan sejak lama, adapun jenis adsorben yang sering digunakan adalah zeolit. Bahan ini sangat potensial sebagai adsorben alami yang memiliki efisiensi tinggi dengan harga yang murah serta efektif untuk pengolahan air [16]. Finish et al., (2023) melakukan investigasi terhadap proses adsorpsi dari 6 (Enam) kation logam berat berbeda yaitu Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , dan Zn^{2+} oleh 3 (Tiga) zeolit yang berbeda antara lain Zeolit alam (Clinoptilolite) dan Zeolit sintesis (13X dan 4 A). Hasil menunjukkan bahwa zeolit sintesis memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan zeolit alam dengan Pb^{2+} dan Cr^{3+} memiliki afinitas tertinggi. Begitu pula dengan pendekatan studi isoterm adsorpsi menunjukkan hasil yang maksimum untuk zeolit sintesis [3]. Seperti yang dilakukan oleh Sholikah L (2023) dalam menurunkan kadar Cr dan Pb pada limbah cair laboratorium menggunakan Zeolit alam dari Kabupaten Malang teraktivasi secara fisika terbukti dapat menurunkan 97,43 % kadar Pb dan 97,56 % kadar Cr dengan waktu kontak 30 menit. Adsorpsi logam Pb dan Cr digambarkan dengan menggunakan persamaan Langmuir, yang menunjukkan pembentukan monolayer pada permukaan adsorben yang homogen selama proses adsorpsi berlangsung [18].

Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi pencemaran limbah cair yang diakibatkan oleh aktivitas industri melalui pendekatan studi isotherm pada penghilangan kadar Cu(II) dengan menggunakan zeolit teraktivasi secara fisika.

Pendekatan studi isotherm dalam penghilangan Cu(II) pada limbah juga memberikan pemahaman terhadap mekanisme adsorpsi zeolit terhadap logam, mengoptimalkan parameter proses seperti konsentrasi, suhu dan waktu kontak untuk mencapai efisiensi penghilangan logam yang lebih tinggi, serta menghasilkan data eksperimental yang terukur [15]. Model isotherm ini dapat memberikan informasi berpotensi dalam mengurangi biaya operasional, meningkatkan fleksibilitas dan memberikan informasi terkait mekanisme adsorpsi, evaluasi kinerja adsorben, optimasi proses yang dapat digunakan dalam desain dan skala proses industri yang lebih besar [4], [19], [20].

2. PROSEDUR PERCOBAAN

2.1 Preparasi Adsorben Zeolit Teraktivasi

Zeolit alam yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari supplier lokal. Proses aktivasi dilakukan secara fisika dengan beberapa tahapan. Zeolit tersebut terlebih dahulu dilakukan pengecilan ukuran menggunakan mortar dan alu hingga ukuran 60 mesh. Selanjutnya dilakukan pengeringan di dalam oven pada suhu $105^{\circ}C$ selama 4 jam untuk proses pengeringan. Kemudian, zeolit yang telah melewati proses pengeringan dimasukkan ke dalam tanur untuk proses kalsinasi pada suhu $550^{\circ}C$ selama 2 jam dan selanjutnya siap digunakan sebagai adsorben.

2.2 Tahapan Adsorpsi Cu(II)

Tahapan Adsorpsi dijalankan secara *batch* dengan menggunakan adsorben zeolit yang ditambahkan ke dalam 50 mL sampel yang mengandung Cu (II) ($10-120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) di dalam erlenmeyer 100 mL selama 6 Jam agar mencapai kesetimbangan. Sampel air limbah yang mengandung Cu(II) diperoleh dengan cara melarutkan sejumlah padatan $CuCl_2\cdot 5H_2O$ ke dalam aquades. Jumlah adsorben yang digunakan pada penelitian ini yakni masing-masing 1 gram dan dilakukan pada suhu ruangan. Proses selanjutnya dilakukan pemisahan residu dan filtrat. Filtrat yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan Spektrofotometer UV-Vis (*ICEN IN-B046*) sesuai dengan prosedur yang telah dilakukan sebelumnya oleh Sirotiak dkk [21]. Konsentrasi Cu(II) pada filtrat diperoleh berdasarkan persamaan (1):

$$\% \text{ Cu(II) teradsorpsi} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

C_0 merupakan nilai konsentrasi Cu(II) awal (mg.L^{-1}), C_e merupakan nilai konsentrasi Cu(II) pada saat kesetimbangan (mg.L^{-1}). selain itu, dalam penelitian ini dilakukan perhitungan nilai kapasitas adsorpsi (q_e) menggunakan persamaan (2):

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (2)$$

Nilai V merupakan volume sampel yang mengandung Cu(II) (L), dan nilai m merupakan massa adsorben zeolit yang digunakan (g).

2.3 Studi Isotherm

Model *isotherm* adsorpsi linear dua parameter antara lain: Langmuir, Freundlich, Temkin, Jovanovic dan Harkin-Jura digunakan pada penelitian ini untuk mengevaluasi parameter-parameter *isotherm* yang mempengaruhi proses adsorpsi Cu(II) oleh zeolit teraktivasi. Aplikasi dari model *isotherm* dapat digunakan untuk menggambarkan interaksi antara molekul Cu(II) yang bertindak sebagai adsorbat dengan adsorben zeolit. Parameter yang diperoleh dari beberapa jenis model *isotherm* adsorpsi linear dapat memberikan informasi penting mengenai dari mekanisme adsorpsi, sifat permukaan dan afinitas dari suatu adsorben yang digunakan. Adapun persamaan dari model *isotherm* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Model *isotherm* adsorpsi linear

Model Isotherm	Persamaan
Langmuir	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{k_L q_{\max}} + \frac{C_e}{q_{\max}}$
Freundlich	$\ln q_e = \ln k_F + \frac{1}{n} \ln C_e$
Temkin	$q_e = B_T \ln K_T + B_T \ln C_e$
Jovanovic	$\ln q_e = \ln q_{\max} - K_J C_e$
Harkin-Jura	$\frac{1}{q_e^2} = \frac{B_{HJ}}{A_{HJ}} - \left(\frac{1}{A_{HJ}} \right) \log C_e$

Dimana nilai q_{\max} adalah kapasitas adsorpsi maksimal (mg.L^{-1}), K_L merupakan konstanta Langmuir ($L.\text{mg}^{-1}$), K_f dan n merupakan nilai dari konstanta Freundlich ($L.g^{-1}$), B_T ($KJ.\text{mol}^{-1}$) dan K_T ($L.\text{mg}^{-1}$) merupakan nilai konstanta Temkin, K_J merupakan nilai konstanta Jovanovic ($L.\text{mg}^{-1}$), Nilai A_{HJ} ($g^2.\text{mg}^{-2}$) dan B_{HJ} ($g^2.L.\text{mg}^{-3}$) merupakan nilai konstanta Harkin-Jura.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Isotherm Adsorpsi digunakan untuk menggambarkan bagaimana molekul adsorbat Cu(II) dapat terdistribusi pada fasa solid dan fasa liquid ketika mencapai kesetimbangan. Analisis menggunakan model *isotherm* adsorpsi bertujuan untuk mencari model yang paling sesuai untuk menjelaskan mekanisme adsorpsi dari Cu(II) menggunakan zeolit sebagai adsorben. Untuk mengoptimasi proses adsorpsi yang dilakukan, maka digunakan beberapa jenis model *isotherm* yang dapat dilihat pada Tabel 1. Penelitian ini menggunakan model *isotherm* dua parameter untuk menentukan kapasitas adsorpsi maksimum zeolit yang digunakan sebagai adsorben Cu(II) dan konstanta yang sesuai. Kecocokan model yang diajukan ditentukan oleh nilai koefisien korelasi (R^2) dengan model yang dianggap paling cocok jika nilai R^2 mendekati 1.

Model *isotherm* Langmuir mengasumsikan bahwa proses adsorpsi yang terjadi pada permukaan yang homogen dan membentuk lapisan monolayer yang disebabkan oleh adsorbat pada permukaan adsorben yang kemudian menjenuhkan pori-pori dari adsorben dan mencegah proses transmigrasi adsorbat[22]. Parameter dari model *isotherm* Langmuir dapat ditentukan dengan cara plotting nilai $1/C_e$ vs $1/q_e$ yang dapat dilihat pada Gambar 1. Berdasarkan data yang diperoleh pada Tabel 2, nilai q_{\max} yang diperoleh pada penelitian ini yakni $1,0375 \text{ mg.g}^{-1}$, nilai $K_L = 0,5463 \text{ L.mg}^{-1}$ dengan nilai $R_2 = 0,9542$. Selain itu, parameter yang sangat penting dalam model *isotherm* Langmuir adalah nilai *Separation Factor* (R_L). Nilai $R_L < 1$ menunjukkan bahwa proses adsorpsi yang terjadi bersifat kuat, jika $R_L > 1$ menunjukkan bahwa proses adsorpsi yang terjadi bersifat lemah, $R_L = 0$ menunjukkan bahwa proses adsorpsi yang terjadi bersifat *irreversible*, dan jika $0 < R_L < 1$ menunjukkan bahwa proses adsorpsi berjalan dengan baik[23]. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan nilai R_L yang diperoleh yakni $0,3210-0,9959$ yang mengindikasikan bahwa proses adsorpsi yang terjadi berjalan dengan baik dan bersifat kuat. Nilai R^2 yang lebih besar dari $0,7$ menunjukkan bahwa proses adsorpsi berdasarkan model *isotherm* Langmuir terjadi secara monolayer.

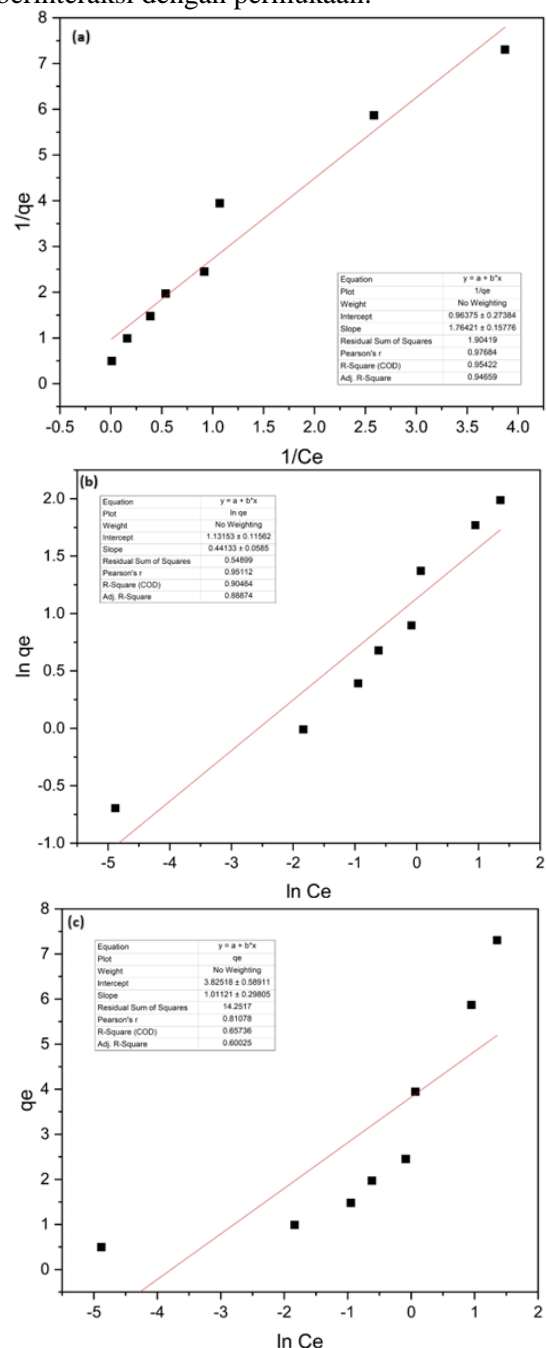
Model *isotherm* Freundlich mengasumsikan bahwa proses adsorpsi yang terjadi pada permukaan yang heterogen dan memiliki tingkat energi adsorpsi yang bervariasi[24]. Selain itu, model *isotherm* Freundlich menjelaskan jenis adsorpsi yang dapat mengakomodasi lebih dari satu lapisan molekul adsorbat yang terbentuk tetapi memiliki ikatan yang cenderung lebih lemah yang memungkinkan untuk sebagian adsorbat

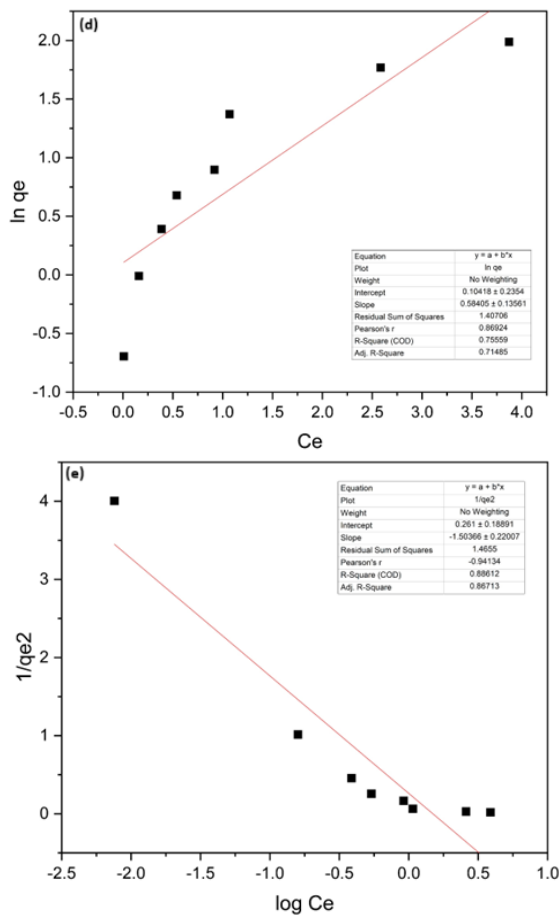
tidak bersentuhan secara langsung dengan permukaan adsorben [25]. Parameter model *isotherm* Freundlich dapat ditentukan dengan cara plotting nilai $\ln C_e$ vs $\ln q_e$ yang dapat dilihat pada Gambar 1. Berdasarkan data yang diperoleh pada Tabel 2, nilai K_F yang diperoleh pada penelitian ini adalah $1,5547 \text{ L.g}^{-1}$, serta nilai $R^2 = 0,9046$. Nilai n pada model *isotherm* Freundlich menjelaskan tentang derajat linearitas dari molekul adsorbat dengan proses adsorpsi yang terjadi. Nilai $n = 1$ menunjukkan terjadinya proses adsorpsi secara linear, terjadi proses adsorpsi secara kimia ketika nilai $n < 1$, dan terjadi proses adsorpsi secara fisika ketika nilai $n > 1$ serta nilai $1/n < 1$ menunjukkan model *isotherm* Freundlich normal sedangkan $1/n > 1$ menunjukkan proses adsorpsi terjadi secara kooperatif[26]. Berdasarkan hasil yang diperoleh pada penelitian ini yang dapat dilihat pada Tabel 2 menunjukkan bahwa proses adsorpsi Cu (II) oleh adsorben zeolit terjadi secara fisika dan menunjukkan model *isotherm* Freundlich yang berjalan secara normal dengan nilai $1/n = 0,4413$, dan $n = 2,2660$. Nilai R^2 yang lebih besar dari 0,7 pada model *isotherm* Freundlich menunjukkan bahwa proses adsorpsi Cu(II) terjadi secara multilayer.

Model *isotherm* Temkin menggambarkan interaksi antara adsorben dengan adsorbat. dengan mengabaikan nilai konsentrasi yang sangat rendah maupun besar, model *isotherm* Temkin mengasumsikan bahwa panas adsorpsi (fungsi suhu) dari semua molekul dalam lapisan akan berkurang secara linier daripada logaritmik dengan cakupan[27]. Parameter model *isotherm* Temkin dapat dihitung berdasarkan plotting $\ln C_e$ vs q_e yang dapat dilihat pada Gambar 1. Berdasarkan data yang diperoleh pada Tabel 2 nilai K_T yang diperoleh yakni $4,7646 \text{ L.g}^{-1}$, $B_T = 2,4501 \text{ KJ.mol}^{-1}$ dan nilai $R^2 = 0,6574$. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa proses adsorpsi terjadi disebabkan oleh interaksi fisika antara molekul Cu(II) yang berfungsi sebagai adsorbat yang dapat dikonfirmasi berdasarkan nilai $B_T < 8 \text{ KJ.mol}^{-1}$. Nilai K_T yang diperoleh menunjukkan adanya energi pengikatan maksimum yang dimana ketika nilai K_T cenderung tinggi maka akan menggambarkan proses interaksi antara molekul Cu(II) dengan permukaan adsorben zeolit. Ketika nilai K_T yang diperoleh kecil, maka afinitas antara molekul penyerap pada permukaan adsorben zeolit terhadap Cu(II).

Model *isotherm* Jovanovic didasarkan pada asumsi yang dikemukakan dalam model *isotherm* Langmuir, dengan mengabaikan proses terjadinya kontak secara mekanis antara adsorben dengan adsorbat [28]. Parameter model *isotherm* Jovanovic dapat dihitung dengan cara plotting

nilai C_e vs $\ln q_e$ yang dapat dilihat pada Gambar 1. Berdasarkan data yang diperoleh pada penelitian ini yang dapat dilihat pada Tabel 2, nilai K_J yang diperoleh yakni $0,5841 \text{ L.g}^{-1}$, $q_{max} = 1,1098 \text{ mg.g}^{-1}$ dan nilai $R^2 = 0,7556$. Nilai K_J pada model *isotherm* Jovanovic dapat menjelaskan proses kinetika yang terjadi pada permukaan adsorben. Nilai tersebut dapat mempengaruhi laju reaksi adsorpsi yang menggambarkan seberapa cepat molekul adsorbat dalam hal ini Cu(II) berinteraksi dengan permukaan.





Gambar 1. Model isotherm (a) Langmuir, (b) Freundlich, (c) Temkin, (d) Jovanovic, dan (e) Harkin-Jura

adsorben zeolit. Nilai q_{max} mengindikasikan bahwa seberapa banyak molekul Cu(II) teradsorpsi oleh adsorben zeolit. Nilai R^2 pada *isotherm* Jovanovic yang lebih besar dari 0,7 mengindikasikan bahwa proses adsorpsi Cu(II) oleh adsorben zeolit terjadi secara monolayer.

Tabel 2. Parameter *Isotherm* adsorpsi

Parameter <i>Isotherm</i>	Nilai
Langmuir:	
q_{max} (mg.g ⁻¹)	1,0375
K_L (L.mg ⁻¹)	0,5463
R_L	0,3210-0,9959
R^2	0,9542
Freundlich:	
K_F (L.g ⁻¹)	1,5547
$1/n$	0,4413
n	2,2660
R^2	0,9046
Temkin:	
K_T (L.g ⁻¹)	4,7646
B_T (KJ.mol ⁻¹)	2,4501
R^2	0,6574
Jovanovic:	
K_J (L.mg ⁻¹)	0,5841
q_{max} (mg.g ⁻¹)	1,1098
R^2	0,7556
Harkin-Jura:	
A_{HJ} (g ² .mg ⁻²)	0,1736
B_{HJ} (g ² .L.mg ⁻³)	0,6650
R^2	0,8861

Model *isotherm* Harkin-Jura didasarkan pada asumsi bahwa proses adsorpsi terjadi secara multilayer pada permukaan adsorben yang heterogen [28]. Parameter model *isotherm* Harkin-Jura dapat ditentukan dengan cara plotting nilai $\log C_e$ vs $1/q_e^2$ yang dapat dilihat pada Gambar 1. Berdasarkan data yang diperoleh pada Tabel 2, diperoleh nilai $A_{HJ} = 0,1736 \text{ g}^2.\text{mg}^{-2}$, $B_{HJ} = 0,6650 \text{ g}^2.\text{L}.\text{mg}^{-3}$, dan nilai $R^2 = 0,8861$. Nilai A_{HJ} dapat menggambarkan kapasitas adsorpsi maksimum pada permukaan adsorben zeolit yang dapat menentukan seberapa besar jumlah molekul Cu(II) dapat teradsorpsi. Ketika nilai A_{HJ} cenderung kecil maka akan semakin kecil kapasitas adsorpsi dan begitupun sebaliknya apabila nilai A_{HJ} semakin besar maka kapasitas adsorpsi dari adsorben akan semakin besar. Sedangkan nilai B_{HJ} sangat berkaitan erat dengan kecenderungan dari permukaan adsorben zeolit untuk berinteraksi dengan molekul Cu(II), dan dapat digunakan sebagai parameter untuk menentukan apakah proses adsorpsi yang berlangsung bersifat lebih kuat pada tingkat konsentrasi yang rendah atau tingkat konsentrasi yang tinggi [4], [15], [28].

Berdasarkan data yang diperoleh pada Tabel 2, model *isotherm* yang paling cocok untuk menjelaskan proses adsorpsi Cu(II) oleh adsorben zeolit yakni model *isotherm* Langmuir dengan nilai koefisien korelasi (R^2) yang paling mendekati 1. Hasil tersebut dapat diasumsikan bahwa proses adsorpsi Cu(II) terjadi secara monolayer dan terbentuk pada permukaan adsorben yang homogen. Selain itu, nilai kapasitas adsorpsi untuk proses penghilangan molekul Cu(II) dari beberapa jenis adsorben lainnya yang ditemukan pada beberapa literatur dapat dilihat pada Tabel 3. Berdasarkan data yang diperoleh, penggunaan adsorben zeolit pada penelitian ini dapat dijadikan suatu acuan dengan nilai kapasitas adsorpsi yang sebanding dengan beberapa penelitian terdahulu. Namun perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan memodifikasi penggunaan adsorben zeolit untuk mendapatkan nilai kapasitas adsorpsi yang lebih besar.

Tabel 3. Kapasitas adsorpsi dan model *isotherm* pada proses adsorpsi Cu(II) dari beberapa adsorben

Adsorben	q_e (mg.g ⁻¹)	Model <i>isotherm</i>	Referensi
<i>Diatomaceus ceramik</i>	121,80	Langmuir	[29]
Geopolimer	58,48	Langmuir	[30]
Karbon aktif dari kulit jengkol	104,17	Freundlich	[31]
Karbon aktif dari ampas kopi	0,41	Langmuir	[32]

Adsorben	qe (mg.g ⁻¹)	Model isotherm	Referensi
Karbon aktif dari cangkang buah palem	4,66	Freundlich	[33]
Zeolit Teraktivasi	1,04	Langmuir	Studi ini

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian yang diperoleh mengindikasikan bahwa proses adsorpsi Cu(II) oleh adsorben zeolit terjadi secara monolayer dan terjadi pada permukaan yang homogenous sesuai dengan model isotherm Langmuir. Model isotherm Langmuir memiliki nilai kecocokan model yang paling sesuai dengan nilai koefisien korelasi (R^2) = 0,9542 serta parameter-parameter isotherm lainnya seperti: $q_{max} = 1,0375 \text{ mg.g}^{-1}$, $K_L = 0,5463 \text{ L.mg}^{-1}$, dan nilai $R_L = 0,3210-0,9959$ yang menandakan bahwa proses adsorpsi Cu(II) bersifat kuat dan berjalan dengan baik. Urutan kecocokan model isotherm pada proses adsorpsi Cu(II) oleh adsorben zeolit dalam penelitian ini berturut-turut yakni: Langmuir, Freundlich, Harkin-Jura, Jovanovic, dan Temkin. Metode adsorpsi menjadi pilihan terbaik dalam menghilangkan logam berat di dalam limbah cair industri, keunggulan dari metode ini yaitu memiliki nilai efisiensi yang tinggi dengan biaya operasi rendah, serta proses yang lebih sederhana. Penggunaan adsorben termodifikasi dapat meningkatkan kemampuan penghilangan logam berat yang lebih spesifik dengan nilai kapasitas adsorpsi tinggi dan dapat diaplikasikan dalam segala kondisi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] O. Abdelwahab and W. M. Thabet, "Natural zeolites and zeolite composites for heavy metal removal from contaminated water and their applications in aquaculture Systems: A review," *Egyptian Journal of Aquatic Research*, vol. 49, no. 4. National Institute of Oceanography and Fisheries, pp. 431–443, Dec. 01, 2023. doi: 10.1016/j.ejar.2023.11.004.

[2] S. Malamis and E. Katsou, "A review on zinc and nickel adsorption on natural and modified zeolite, bentonite and vermiculite: Examination of process parameters, kinetics and isotherms," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 252–253. pp. 428–461, May 05, 2013. doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.03.024.

[3] W. El hotaby, A. M. Bakr, H. S. Ibrahim, N. S. Ammar, H. A. Hani, and A. A. Mostafa, "Eco-friendly zeolite/alginate microspheres for Ni ions removal from aqueous solution: Kinetic and isotherm study," *J Mol Struct*, vol. 1241, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.molstruc.2021.130605.

[4] Z. Mahdi and A. El Hanandeh, "Insight into copper and nickel adsorption from aqueous solutions onto carbon-coated-sand: Isotherms, kinetics, mechanisms, and cost analysis," *Cleaner Chemical Engineering*, vol. 3, p. 100045, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.clce.2022.100045.

[5] L. Velarde, M. S. Nabavi, E. Escalera, M. L. Antti, and F. Akhtar, "Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review," *Chemosphere*, vol. 328. Elsevier Ltd, Jul. 01, 2023. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138508.

[6] N. M. Daud, S. R. S. Abdullah, H. A. Hasan, A. R. Othman, and N. 'Izzati Ismail, "Coagulation-flocculation treatment for batik effluent as a baseline study for the upcoming application of green coagulants/flocculants towards sustainable batik industry," *Heliyon*, vol. 9, no. 6, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17284.

[7] D. C. Ong, M. D. G. de Luna, S. M. B. Pingul-Ong, and C. C. Kan, "Manganese and iron recovery from groundwater treatment sludge by reductive acid leaching and hydroxide precipitation," *J Environ Manage*, vol. 223, no. January, pp. 723–730, 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.06.052.

[8] Y. Tadayon, M. E. Bahrololoom, and S. Javadpour, "An experimental study of sunflower seed husk and zeolite as adsorbents of Ni(II) ion from industrial wastewater," *Water Resour Ind*, vol. 30, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.wri.2023.100214.

[9] C. C. Azubuike, C. B. Chikere, and G. C. Okpokwasili, "Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects," *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 32, no. 11. Springer Netherlands, Nov. 01, 2016. doi: 10.1007/s11274-016-2137-x.

[10] S. Maity, P. Bajirao Patil, S. SenSharma, and A. Sarkar, "Bioremediation of heavy metals from the aqueous environment using *Artocarpus heterophyllus* (jackfruit) seed as a novel biosorbent," *Chemosphere*,

- vol. 307, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136115.
- [11] H. Haeril, F. D. I. Sawali, and M. A. Afandy, "Phytoremediation of Cr(VI) from Aqueous Solution by *Pistia stratiotes* L.: Efficiency and Kinetic Models," *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*, vol. 8, no. 1, pp. 25–35, Apr. 2024, doi: 10.33795/jtkl.v8i1.3803.
- [12] A. B. Pangeran, Moh. A. Afandy, and F. D. I. Sawali, "Efficiency of FeSO₄·7H₂O as a Coagulant on Chromium Hexavalent Removal Using Coagulation-Flocculation Process: Optimization Using Response Surface Methodology," *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*, vol. 7, no. 2, pp. 123–133, Oct. 2023, doi: 10.33795/jtkl.v7i2.3560.
- [13] J. Lu and F. Zhang, "Novel Fe–Mn oxide/zeolite composite material for rapid removal of toxic copper ions from aqueous solutions," *J Clean Prod*, vol. 397, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136496.
- [14] M. Kavand, P. Eslami, and L. Razeh, "The adsorption of cadmium and lead ions from the synthesis wastewater with the activated carbon: Optimization of the single and binary systems," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 34, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101151.
- [15] D. Chukwu Onu, A. Kamoru Babayemi, T. Chinedu Egbosiuba, B. Onyinye Okafor, I. Jacinta Ani, S. Mustapha, J. Oladejo Tijani, W. Chukwuemeke Ulakpa, P. Eguono Ovuoraye, and A. Saka Abdulkareem, "Isotherm, kinetics, thermodynamics, recyclability and mechanism of ultrasonic assisted adsorption of methylene blue and lead (II) ions using green synthesized nickel oxide nanoparticles," *Environ Nanotechnol Monit Manag*, vol. 20, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.enmm.2023.100818.
- [16] L. Roshanfekar Rad and M. Anbia, "Zeolite-based composites for the adsorption of toxic matters from water: A review," *J Environ Chem Eng*, vol. 9, no. 5, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.106088.
- [17] N. Finish, P. Ramos, E. J. C. Borjovich, O. Zeiri, Y. Amar, and M. Gottlieb, "Zeolite performance in removal of multicomponent heavy metal contamination from wastewater," *J Hazard Mater*, vol. 457, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131784.
- [18] L. P. Sholikah, S. Sumari, and Y. D. Yunisari, "Modification and Application Study of Activated Natural Zeolite for the Treatment of Liquid Waste from Chemical Laboratory," *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, vol. 26, no. 9, pp. 332–343, Dec. 2023, doi: 10.14710/jksa.26.9.332-343.
- [19] J. Serafin and B. Dziejarski, "Application of isotherms models and error functions in activated carbon CO₂ sorption processes," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 354, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.micromeso.2023.112513.
- [20] A. R. P. Hidayat, D. O. Sulistiono, I. K. Murwani, B. F. Endrawati, H. Fansuri, L. L. Zulfa, and R. Ediaty, "Linear and nonlinear isotherm, kinetic and thermodynamic behavior of methyl orange adsorption using modulated Al₂O₃@UiO-66 via acetic acid," *J Environ Chem Eng*, vol. 9, no. 6, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.106675.
- [21] M. Sirotiak, B. Alica, and L. Blinová, "Uv-Vis Spectrophotometric Determinations of Selected Elements in Modelled Aqueous Solutions," *Journal of Environmental Protection, Safety, Education and Management*, vol. 2, no. 3, pp. 75–87, 2014.
- [22] P. Senthil Kumar, S. Ramalingam, C. Senthamarai, M. Niranjanaa, P. Vijayalakshmi, and S. Sivanesan, "Adsorption of dye from aqueous solution by cashew nut shell: Studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions," *Desalination*, vol. 261, no. 1–2, pp. 52–60, 2010, doi: 10.1016/j.desal.2010.05.032.
- [23] R. Ragadhita and A. B. D. Nandiyanto, "How to calculate adsorption isotherms of particles using two-parameter monolayer adsorption models and equations," *Indonesian Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 205–234, 2021, doi: 10.17509/ijost.v6i1.32354.
- [24] M. Vigdorowitsch, A. Pchelintsev, L. Tsygankova, and E. Tanygina, "Freundlich isotherm: An adsorption model complete framework," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 17, pp. 1–7, 2021, doi: 10.3390/app11178078.
- [25] Moh. A. Afandy and F. D. I. Sawali, "Adsorption of Chromium Hexavalent in Aqueous Solutions Using Acid-Activated Wood Charcoal: Isotherm and Kinetics Study," *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*, vol. 8, no. 1, pp. 1–14, 2024.
- [26] A. L. Cazzetta, A. M. M. Vargas, E. M. Nogami, M. H. Kunita, M. R. Guilherme, A. C. Martins, T. L. Silva, J. C. G. Moraes,

- and V. C. Almeida, “NaOH-activated carbon of high surface area produced from coconut shell: Kinetics and equilibrium studies from the methylene blue adsorption,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 174, no. 1, pp. 117–125, 2011, doi: 10.1016/j.cej.2011.08.058.
- [27] A. O. Dada, A. P. Olalekan, A. M. Olatunya, and O. Dada, “Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of Zn 2+ Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk,” *IOSR Journal of Applied Chemistry*, vol. 3, no. 1, pp. 38–45, 2012, doi: 10.9790/5736-0313845.
- [28] N. Ayawei, A. N. Ebelegi, and D. Wankasi, “Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms,” *Journal of Chemistry*, vol. 2017. Hindawi Limited, 2017. doi: 10.1155/2017/3039817.
- [29] E. Ajenifuja, J. A. Ajao, and E. O. B. Ajayi, “Adsorption isotherm studies of Cu (II) and Co (II) in high concentration aqueous solutions on photocatalytically modified diatomaceous ceramic adsorbents,” *Appl Water Sci*, vol. 7, no. 7, pp. 3793–3801, 2017, doi: 10.1007/s13201-017-0527-3.
- [30] M. Šuránek, Z. Melichová, M. M. Mirković, M. Ivanović, V. B. Pavlović, L. Kljajević, and S. Nenadović, “The Study of Cu(II) Adsorption onto Synthetically Modified Geopolymers,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 4, 2023, doi: 10.3390/su15042869.
- [31] A. Muslim, Ellysa, and S. D. Said, “Cu(II) ion adsorption using activated carbon prepared from pithecellobium jiringa (Jengkol) shells with ultrasonic assistance: isotherm, kinetic and thermodynamic studies,” *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 49, no. 4, pp. 472–490, 2017, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.4.4.
- [32] S. Y. Prabawati, P. D. Widiakongko, and M. A. Taqwim, “Activated Charcoal from Coffee Dregs Waste as an Alternative Biosorbent of Cu(II) and Ag(I),” *Indonesian Journal of Chemistry*, vol. 23, no. 4, pp. 1120–1128, 2023, doi: 10.22146/ijc.83269.
- [33] R. Yulia, H. Husin, M. Zaki, Jakfar, Sulastri, and Ahmadi, “Study of adsorption isotherms on removal of Cu (II) solution using activated carbon of sugar palm fruit shell (*Arenga pinnata*),” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, vol. 1290, no. 1, pp. 1–9. doi: 10.1088/1755-1315/1290/1/012008.