

Model Isotherm Multi Parameter pada Proses Adsorpsi Cr (VI) Menggunakan Arang Kayu Teraktivasi Asam

Moh. Azhar Afandy*, Fikrah Dian Indrawati Sawali

Program Studi Teknik Kimia Mineral, Politeknik Industri Logam Morowali, Jalan Trans Sulawesi Labota, Bahodopi, Morowali, Sulawesi Tengah, 94974

*Email: azhar@pilm.ac.id

(Received: 13 Maret 2025; Accepted: 30 Juli 2025; Published: 5 Agustus 2025)

ABSTRAK

Arang kayu dapat dimanfaatkan sebagai adsorben karena memiliki luas permukaan spesifik yang besar, struktur pori yang baik, dan kemampuan adsorpsi yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa arang kayu teraktivasi asam dalam proses penghilangan Cr (VI) menggunakan model isotherm tiga parameter. HCl digunakan sebagai aktivator kimia pada proses adsorpsi yang dilakukan secara batch dengan variasi konsentrasi awal Cr (VI) (10-200 mg/L) dan massa adsorben 2,5 g. Beberapa model isotherm tiga parameter yang digunakan antara lain Model isotherm Sips, Toth, Redlich-Peterson dan Koble-Corrigan. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa proses adsorpsi Cr (VI) yang dievaluasi menggunakan model isotherm multi parameter, cenderung memiliki kecocokan yang baik ketika dideskripsikan menggunakan model isotherm Toth dengan nilai koefisien determinasi (R^2) = 0,9984, *sum square error* (SSE) = $2,15 \times 10^{-8}$, dan nilai *chi-square* (χ^2) = $1,84 \times 10^{-8}$. Nilai parameter yang diperoleh berdasarkan model isotherm Toth berturut-turut yakni $q_m = 1,1687$ mg/g, $K_T = 0,0701$ L/mg, dan nilai $t = 3,7642$.

Kata kunci: Adsorpsi; Arang kayu; Logam berat; Isotherm

ABSTRACT

Wood charcoal serves as an adsorbent due to its extensive specific surface area, superior pore structure, and enhanced adsorption capacity. This study aims to investigate the effectiveness of acid-activated wood charcoal for the removal of Cr (VI) via a three-parameter isotherm model. Hydrochloric acid (HCl) served as a chemical activator in the batch adsorption procedure, which involved varying starting concentrations of Cr (VI) from up to 200 mg/L, with an adsorbent mass of 2.5 g. A number of three-parameter isotherm models utilized involve the Sips, Toth, Redlich-Peterson, and Koble-Corrigan models. The results suggest that the Cr (VI) adsorption process, assessed by a multi-parameter isotherm model, aligns well with the Toth isotherm model with determination coefficient (R^2) = 0,9984, *sum square error* (SSE) = $2,15 \times 10^{-8}$, and *chi-square* (χ^2) = $1,84 \times 10^{-8}$. The parameter values derived from this model are $q_m = 1.1687$ mg/g, $K_T = 0.0701$ L/mg, and $t = 3.7642$.

Keywords: Adsorption; Wood Charcoal; Heavy metal; Isotherm

PENDAHULUAN

Pencemaran Cr (VI) dan dampaknya terhadap lingkungan hidup telah menjadi masalah yang serius di seluruh dunia. Kontaminasi Cr (VI) yang sangat tinggi di lingkungan dapat membahayakan kesehatan manusia dan ekosistem (Panda *et al.*, 2017). Cr (VI) memiliki sifat toksik, karsinogenik, dan mutagenik, sehingga pengembangan metode yang efektif dan ramah lingkungan untuk menghilangkan Cr (VI) dari air limbah sangat diperlukan (Zhao *et al.*, 2021; Liang *et al.*, 2014). Hal tersebut menjadi sangat penting mengingat dampak yang ditimbulkan terhadap kelangsungan kehidupan makhluk hidup

disekitarnya. Beberapa metode telah digunakan dalam proses penghilangan konsentrasi Cr (VI) di lingkungan antara lain koagulasi-flokulasi (Pangeran *et al.*, 2023), fitoremediasi (Haeril *et al.*, 2024), teknologi membran (Mnif *et al.*, 2017), presipitasi kimia (Ramli *et al.*, 2023), serta penukar ion (Kerur *et al.*, 2021) dan adsorpsi (Setyawan *et al.*, 2024). Metode adsorpsi menjadi salah satu metode yang paling sering digunakan karena memiliki beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan metode-metode yang lain karena dapat mengadsorpsi Cr (VI) dalam bentuk anion maupun kation, memiliki efisiensi yang lebih baik jika

dibandingkan dengan metode presipitasi, efisien dalam menghilangkan kontaminan Cr (VI) maupun Cr (III), produksi *sludge* yang minim serta adsorben yang dapat digunakan kembali (Aigbe and Osibote, 2020; Islam *et al.*, 2023).

Salah satu jenis adsorben yang sering digunakan dalam proses penghilangan kontaminan Cr (VI) adalah arang kayu. arang kayu dapat dimanfaatkan sebagai adsorben karena memiliki luas permukaan spesifik yang besar, struktur pori yang baik, dan kemampuan adsorpsi yang tinggi (Liang *et al.*, 2014). Beberapa penelitian sebelumnya yang telah dilakukan sebelumnya oleh (Raut *et al.*, 2025; Kumkum and Kumar, 2024; Yulia *et al.*, 2024) menunjukkan bahwa arang kayu dapat digunakan sebagai adsorben karena menunjukkan kapasitas adsorpsi yang cukup tinggi, dan lebih ekonomis jika dibandingkan dengan beberapa jenis adsorben yang lain. Perlakuan aktivasi dengan asam dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi arang kayu terhadap Cr (VI). Proses aktivasi dengan asam dapat meningkatkan jumlah gugus fungsional serta luas permukaan spesifik adsorben (Verayana *et al.*, 2018). gugus fungsional oksigen seperti karbonil (C=O), hidroksil (-OH), dan karboksil (-COOH) dapat terbentuk pada permukaan arang kayu ketika diaktivasi menggunakan asam seperti HCl (Ferrer *et al.*, 2021).

Model isotherm menjadi salah satu parameter yang dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas arang kayu teraktivasi asam dalam proses adsorpsi Cr (VI). Isotherm adsorpsi menggambarkan hubungan kesetimbangan antara adsorbat yang terikat pada permukaan adsorben dan adsorbat yang tersisa dalam larutan pada temperatur konstan (Cervera-Gabalda and Gómez-Polo, 2022). Beberapa model isotherm yang paling umum digunakan antara lain Langmuir, Freundlich, Temkin, dan Dubinin-Raduskevich (Ohale *et al.*, 2020; Varank *et al.*, 2012). Model isotherm yang digunakan dapat disesuaikan dengan parameter yang akan dicari mulai dari 1 hingga 5 parameter (Ayawei *et al.*, 2017).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa arang kayu teraktivasi asam dalam proses penghilangan Cr (VI) menggunakan model isotherm tiga parameter. Model isotherm tiga parameter sering dianggap lebih fleksibel dibandingkan model dua parameter seperti Langmuir, Freundlich dan Temkin karena dapat memberikan deskripsi yang lebih akurat terhadap data eksperimen. Pada penelitian kami sebelumnya (Afandy and Sawali, 2024), analisis adsorpsi dilakukan menggunakan model isotherm dua parameter seperti Langmuir, Freundlich dan Temkin dalam bentuk linearisasi. Meskipun pendekatan linear memberikan kemudahan dalam perhitungan parameter, metode ini memiliki keterbatasan dalam akurasi, terutama pada sistem adsorpsi dengan permukaan adsorben yang heterogen dan berpotensi menghasilkan

distorsi parameter akibat transformasi logaritmik. Sehingga, dalam penelitian ini digunakan model isotherm tiga parameter berbasis pendekatan non-linear yang lebih fleksibel dalam menggambarkan sistem permukaan adsorben yang heterogen guna memperoleh deskripsi yang lebih representatif terhadap perilaku adsorpsi Cr (VI) oleh arang kayu teraktivasi asam. Model isotherm yang digunakan pada penelitian ini yakni model isotherm Sips, Toth, Redlich–Peterson, dan Koble–Corrigan. Studi ini dipisahkan dari penelitian sebelumnya yang menggunakan model isotherm dua parameter berbasis linearisasi, karena pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini memiliki tingkat kompleksitas dan tujuan analisis yang berbeda. Jika penelitian sebelumnya berfokus pada eksplorasi awal menggunakan metode konvensional, maka penelitian saat ini diarahkan untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam terhadap mekanisme adsorpsi melalui model isotherm tiga parameter berbasis non-linear yang lebih akurat dalam merepresentasikan sistem heterogen. Pemisahan ini penting untuk menjaga kejelasan metodologi dan fokus analisis pada masing-masing studi. Kecocokan model isotherm dapat ditentukan dengan metode analisis non-linear dengan mempertimbangkan nilai koefisien determinasi (R^2), *Sum Square Error* (SEE), dan *chi-square* (χ^2) sehingga diperoleh deskripsi adsorpsi Cr (VI) yang lebih akurat.

METODOLOGI PENELITIAN

Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi erlenmeyer, labu takar, gelas ukur, batang pengaduk, corong, pipet volume, pipet tetes, botol sampel, mixer magnetik, mortar dan alu, oven, neraca analitik, pH meter, dan spektrofotometri UV-Vis. Bahan yang digunakan termasuk arang kayu, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, HCl, difenil karbazida, H_2SO_4 , H_3PO_4 , dan kertas saring. Setiap bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini dibeli dari pemasok lokal sesuai dengan spesifikasi pro analisis dengan kemurnian 99%

Preparasi Adsorben Arang kayu Teraktivasi Asam

Proses preparasi arang kayu teraktivasi asam pada penelitian ini mengadopsi metode yang telah kami lakukan pada penelitian sebelumnya (Afandy and Sawali, 2024). Pertama-tama, arang kayu terlebih dahulu dilakukan proses pengecilan ukuran hingga ukuran ± 60 mesh. Setelah itu, dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 2 jam guna mengurangi kadar air. Kemudian, sebanyak 250 g arang kayu direndam dalam 500 mL larutan HCl 0,1 M selama 3 jam untuk proses aktivasi secara kimia. Setelah aktivasi selesai, material disaring dan dibilas dengan aquades hingga filtrat yang dihasilkan

memiliki pH netral (pH 7). Residu yang diperoleh selanjutnya dikeringkan kembali dalam oven pada suhu 110°C selama 2 jam yang kemudian digunakan sebagai adsorben.

Proses adsorpsi

Untuk mengevaluasi proses adsorpsi menggunakan model isotherm multi parameter, dilakukan percobaan adsorpsi secara batch dengan variasi konsentrasi awal Cr (VI) (10-200 mg/L). mula-mula disiapkan 2,5 gr adsorben yang kemudian di masukkan ke dalam Erlenmeyer. Selanjutnya kedalam masing-masing Erlenmeyer ditambahkan 50 mL Cr (VI) sebagai adsorbat. Proses adsorpsi dijalankan dengan kecepatan agitasi (200 rpm) selama ± 6 jam yang dianggap sebagai waktu untuk mencapai kesetimbangan. Filtrat hasil adsorpsi kemudian di analisis menggunakan Spektrofotometri Visible menggunakan prosedur sesuai (SNI 6989.71:2009).

Pemodelan isotherm

Model isotherm multi parameter yang digunakan pada penelitian ini yakni menggunakan model isotherm tiga parameter yakni menggunakan model isotherm Sips (persamaan 1), Toth (persamaan 2), Redlich–Peterson (persamaan 3) dan Koble-Corrigan (persamaan 4).

$$q_e = \frac{AC_e^n}{1 + BC_e^n} \quad (1)$$

$$q_e = \frac{q_m K_T C_e}{(1 + (K_T C_e)^t)^{\frac{1}{t}}} \quad (2)$$

$$q_e = \frac{K_R C_e}{1 + a_R C_e^g} \quad (3)$$

$$q_e = \frac{AC_e^n}{1 + BC_e^n} \quad (4)$$

Model isotherm Multi parameter dapat dievaluasi menggunakan beberapa error analisis untuk mengetahui hubungan antara model dan data eksperimen. Koefisien determinasi (R^2), *Sum Square Error* (SSE), dan *chi square* (x^2) (Persamaan 5-7). Model isotherm multi parameter dianalisis menggunakan software Origin 2019b. Pada penelitian ini dipilih metode analisis non-linear. Metode non-linear memiliki keunggulan yang lebih baik dibandingkan dengan metode analisis secara linear dikarenakan metode non-linear memiliki tingkat keakuratan yang lebih tinggi karena dapat mengurangi distorsi akibat transformasi linear, mengurangi bias, serta lebih representatif secara statistik (Shafiq *et al.*, 2021; Serafin and Dziejarski, 2023; M. Hamzaoui, B. Bestani, 2018).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (qe_{pred.} - \overline{qe_{exp.}})^2}{\sum_{i=1}^n (qe_{pred.} - \overline{qe_{exp.}})^2 + \sum_{i=1}^n (qe_{pred.} - qe_{exp.})^2} \quad (5)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (qe_{exp.} - qe_{pred.})^2 \quad (6)$$

$$x^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(qe_{exp.} - qe_{pred.})^2}{qe_{pred.}} \quad (7)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian sebelumnya, karakteristik adsorpsi ion Cr (VI) pada arang kayu teraktivasi dianalisis menggunakan model isotherm dua parameter, yaitu Langmuir, Freundlich dan Temkin dalam bentuk linearisasi. Meskipun pendekatan linear ini cukup umum digunakan karena kesederhanaannya, terdapat beberapa keterbatasan yang mempengaruhi keakuratan interpretasi, di antaranya adalah potensi distorsi nilai parameter akibat transformasi matematis, serta ketidakmampuannya menggambarkan sistem adsorpsi dengan permukaan yang tidak homogen secara memadai. Selain itu, model dua parameter tidak sepenuhnya mampu menangkap kompleksitas interaksi yang terjadi pada permukaan adsorben yang telah dimodifikasi secara kimia melalui aktivasi asam.

Berdasarkan evaluasi tersebut, pada penelitian ini digunakan pendekatan yang lebih lanjut, yaitu pemodelan isotherm tiga parameter dalam bentuk non-linear, yang secara matematis dan fisik mampu menggambarkan proses adsorpsi secara lebih akurat. Model non-linear tidak mengalami distorsi regresi seperti model linear, sehingga parameter yang dihasilkan lebih representatif terhadap fenomena sebenarnya. Selain itu, model tiga parameter seperti Toth, Sips, Redlich-Peterson, dan Koble-Corrigan mampu mengakomodasi heterogenitas permukaan serta variasi energi adsorpsi yang umum ditemukan pada adsorben. Pemilihan pendekatan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih dalam terkait mekanisme adsorpsi Cr (VI) serta memungkinkan estimasi kapasitas adsorpsi yang lebih realistis pada berbagai rentang konsentrasi awal.

Model Isotherm Sips.

Model isotherm Sips diasumsikan berdasarkan gabungan dari karakteristik model Langmuir pada konsentrasi rendah dengan model Freundlich pada konsentrasi tinggi (Brdar *et al.*, 2012). Hasil plotting dari model isotherm Sips dapat dilihat pada Gambar 1. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai kapasitas adsorpsi maksimum (q_m) berdasarkan model isotherm Sips yakni 1,2758 mg/g, nilai konstanta kesetimbangan

sips 0,5933 L/mg, dan nilai n yang merupakan eksponen heterogenitas 3,2463 yang dapat dilihat pada Tabel 1. Karakteristik dari model isotherm Sips dapat dianalisis berdasarkan nilai n , dimana ketika $n=1$ maka akan menunjukkan bahwa model ini menjadi model Langmuir dimana proses adsorpsi terjadi secara homogen dan terjadi secara *monolayer*. Jika $n < 1$, menunjukkan bahwa proses adsorpsi terjadi dengan heterogenitas yang tinggi. Jika $n > 1$, maka model isotherm Sips akan mendekati model Langmuir dan menunjukkan dominasi dari proses adsorpsi secara kimia. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa menurut model isotherm Sips, adsorpsi Cr (VI) oleh arang kayu teraktivasi asam terjadi didominasi oleh proses adsorpsi secara kimia dan mendekati dengan model Langmuir.

Model Isotherm Toth.

Model isotherm Toth merupakan model isotherm yang dimodifikasi dari model Langmuir untuk memprediksi terjadinya adsorpsi pada konsentrasi tinggi (Serafin and Dziejarski, 2023). Model isotherm Toth cenderung akan lebih cocok ketika kesetimbangan adsorpsi yang terjadi tidak sepenuhnya mengikuti model isotherm Langmuir. Model isotherm Toth memiliki parameter yang serupa dengan model isotherm Sips dimana nilai q_m , K_t , dan t menunjukkan masing-masing kapasitas adsorpsi maksimum, konstanta kesetimbangan Toth, serta eksponen heterogenitas. Nilai parameter yang diperoleh berdasarkan model isotherm Toth berturut-turut yakni $q_m = 1,1687$ mg/g, $K_T = 0,0701$ L/mg, dan nilai $t = 3,7642$ yang dapat dilihat pada Tabel 1. Nilai tersebut menunjukkan bahwa proses adsorpsi Cr (VI) berdasarkan model isotherm Toth memiliki kecenderungan yang hampir sama dengan model isotherm Sips dimana tahapan adsorpsi Cr (VI) oleh arang kayu teraktivasi asam terjadi didominasi oleh proses adsorpsi secara kimia dan mendekati dengan model Langmuir.

Model Isotherm Redlich-Peterson

Model Isotherm Redlich-Peterson mengasumsikan terjadinya proses adsorpsi dengan mengkombinasikan model isotherm Langmuir dan Freundlich, tetapi menjadi lebih fleksibel karena dapat menggabungkan proses adsorpsi secara *monolayer* atau *multilayer* (Chu *et al.*, 2024). Plotting dari model isotherm Redlich-Peterson ditunjukkan oleh Gambar 1. Parameter dari model isotherm Redlich-peterson yakni K_R (konstanta Redlich-Peterson), a_R (konstanta energi adsorpsi) dan nilai eksponen (g). nilai $g = 1$ menunjukkan kecocokan dengan model Langmuir, sedangkan jika $g < 1$ mengindikasikan bahwa model memiliki kecocokan dengan model Freundlich yang menunjukkan proses adsorpsi terjadi secara heterogen. Parameter yang diperoleh berdasarkan model isotherm Redlich-Peterson yakni $K_R = 0,1138$

L/g, $a_R = 0,0315$ L/mg, dan $g = 1,2203$. Nilai g yang diperoleh menunjukkan nilai > 1 . Nilai g merupakan parameter yang berperan untuk menyesuaikan kecocokan model dengan Langmuir atau Freundlich. Nilai $g > 1$ menunjukkan bahwa model isotherm Redlich-Peterson tidak cocok digunakan dalam mengevaluasi proses adsorpsi Cr (VI) oleh arang kayu teraktivasi asam. Saat $g > 1$, nilai q_e dapat meningkat dengan sangat cepat seiring kenaikan konsentrasi C_e yang dimana nilai tersebut akan bertentangan dengan sistem adsorpsi nyata dimana q_e akan mencapai kesetimbangan pada konsentrasi C_e yang tinggi.

Tabel 1 Parameter model isotherm multi parameter

Model isotherm	Parameter
Sips	
q_m (mg/g)	1,2758
K_c (L/mg)	0,5933
n	3,2463
R^2	0,9711
SSE	0,0115
x^2	0,0090
Toth	
q_m (mg/g)	1,1687
K_T (L/mg)	0,0701
t	3,7642
R^2	0,9984
SSE	$2,15 \times 10^{-8}$
x^2	$1,84 \times 10^{-8}$
Redlich–Peterson	
K_R (L/g)	0,1138
a_R (L/mg)	0,0315
g	1,2203
R^2	0,9904
SSE	5,9738
x^2	1,6536
Koble-Corrigan	
A (mg/g)	0,0412
B (L/mg)	0,0343
n	1,7322
R^2	0,9867
SSE	1,2709
x^2	30,8477

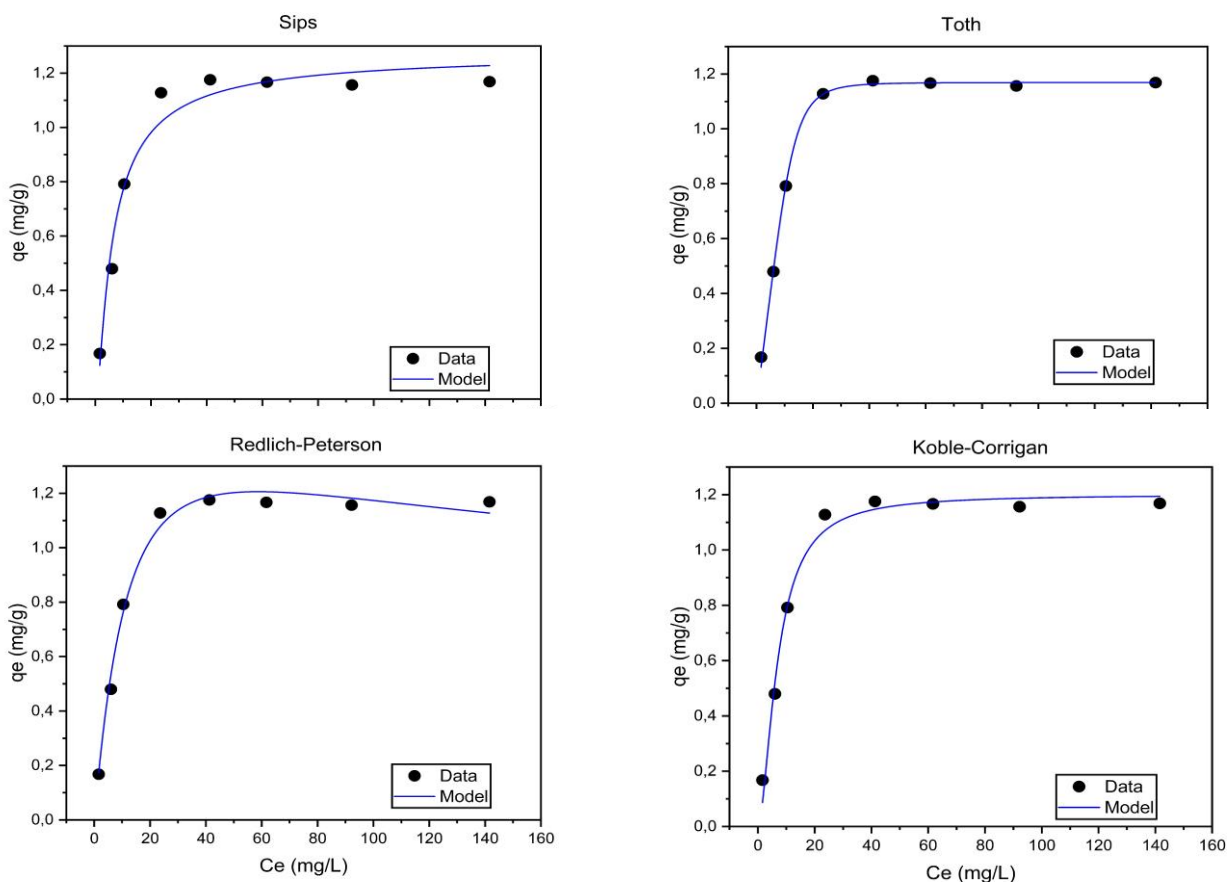
Model Isotherm Koble-Corrigan

Model isotherm Koble-Corrigan merupakan kombinasi dari model isotherm Langmuir dan Freundlich (Khorshidi and Azadmehr, 2016). Model ini cenderung mirip dengan model isotherm Sips, tetapi memiliki bentuk yang lebih fleksibel pada berbagai sistem adsorpsi. Plotting dari model isotherm Koble-Corrigan dapat dilihat pada Gambar 1. Berdasarkan hasil yang diperoleh dan disajikan pada Tabel 1, beberapa parameter yang dapat diperoleh antara lain nilai kapasitas adsorpsi (A), konstanta kesetimbangan (B) dan nilai eksponen homogenitas (n) dengan nilai berturut-turut yakni $A = 0,0412$ mg/g, $B = 0,0343$

L/mg dan nilai $n = 1,7322$. Nilai n pada model isotherm Koble-Corrigan memberikan gambaran terhadap proses adsorpsi yang terjadi dimana ketika nilai $n = 1$, maka model Koble-Corrigan sejalan dengan model Langmuir. Sedangkan ketika nilai $n > 1$, maka proses adsorpsi yang terjadi secara multilayer sesuai dengan model Freundlich. Sehingga dapat disimpulkan bahwa menurut model Isotherm Koble-Corrigan, adsorpsi Cr (VI) terjadi secara multilayer pada permukaan adsorben yang heterogen.

Keempat model isotherm multiparameter tersebut dapat dibandingkan dengan meninjau nilai R^2 , SSE dan x^2 . Kecocokan model yang paling baik dapat diamati berdasarkan nilai R^2 yang mendekati 1 atau memperoleh nilai SSE dan x^2 paling kecil yang menunjukkan tingkat kesalahan yang minimum. Berdasarkan data yang diperoleh pada Tabel 2, dapat disimpulkan bahwa model isotherm tiga parameter yang paling cocok untuk mendeskripsikan proses adsorpsi Cr (VI) oleh arang kayu teraktivasi asam yakni model isotherm Toth dengan nilai koefisien determinasi (R^2) = 0,9984, *sum square error* (SSE) = $2,15 \times 10^{-8}$, dan nilai *chi-square* (x^2) = $1,84 \times 10^{-8}$. Berdasarkan hal tersebut maka dapat dikatakan bahwa proses adsorpsi Cr (VI)

dapat terjadi dikarenakan adanya dominasi oleh proses adsorpsi secara kimia dan mendekati dengan model Langmuir. Hasil tersebut juga dapat menjadi pendukung terhadap penelitian kami sebelumnya yang menyatakan bahwa proses adsorpsi Cr (VI) oleh arang kayu teraktivasi asam lebih cocok dengan model isotherm Langmuir (Afandy and Sawali, 2024). Model isotherm Toth juga dapat menjelaskan mekanisme adsorpsi melalui heterogenitas permukaan adsorben, serta perilaku adsorpsi pada konsentrasi C_e yang rendah maupun konsentrasi C_e yang tinggi. Pada konsentrasi C_e yang rendah, model isotherm Toth akan cenderung memiliki kemiripan dengan model Langmuir. Ketika jumlah situs adsorpsi masih besar, maka akan mengakibatkan adsorpsi Cr (VI) akan semakin meningkat secara linear dengan nilai C_e . Sedangkan pada konsentrasi C_e yang lebih tinggi, model isotherm Toth akan lebih kuat dibandingkan dengan model isotherm Langmuir. Hal tersebut dapat dilihat berdasarkan nilai $t > 1$ pada penelitian ini yang menunjukkan bahwa interaksi antara molekul Cr (VI) yang meningkatkan proses adsorpsi. Parameter lain yang mempengaruhi proses adsorpsi Cr (VI) oleh arang kayu teraktivasi asam berdasarkan model isotherm Toth yakni nilai K_T . nilai K_T yang diperoleh berdasarkan penelitian ini yakni 0,0701



Gambar 1 Model isotherm multi parameter non-linear

Hasil tersebut dapat dikatakan tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan nilai konstanta Langmuir pada penelitian kami sebelumnya yakni 0,0783 (Afandy and Sawali, 2024). Hal tersebut semakin mempertegas bahwa kedua model ini sangat berkaitan satu sama lain. Nilai K_T yang cenderung kecil dapat menunjukkan bahwa Cr (VI) yang berfungsi sebagai adsorbat tidak terlalu tertarik pada permukaan adsorben, sehingga diperlukan konsentrasi Cr (VI) yang lebih tinggi untuk mencapai jumlah adsorpsi yang signifikan.

Jika dibandingkan dengan model dua parameter linear pada studi sebelumnya, model tiga parameter yang digunakan dalam penelitian ini menunjukkan kesesuaian yang jauh lebih baik terhadap data eksperimental. Model Toth, khususnya, mampu menangkap heterogenitas energi adsorpsi dan memberikan parameter dengan kesesuaian statistik terbaik ($R^2 = 0,9984$). Hal ini menegaskan bahwa model non-linear memberikan pendekatan yang lebih akurat dalam mendeskripsikan proses adsorpsi Cr (VI) oleh arang kayu teraktivasi.

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi Cr (VI) yang dievaluasi menggunakan model isotherm multi parameter, cenderung memiliki kecocokan yang baik ketika dideskripsikan menggunakan model isotherm Toth dengan nilai Nilai parameter yang diperoleh berdasarkan model isotherm Toth berturut-turut yakni $q_m = 1,1687$ mg/g, $K_T = 0,0701$ L/mg, dan nilai $t = 3,7642$. Penelitian ini juga semakin memperjelas hasil penelitian yang sebelumnya telah dilakukan berdasarkan parameter yang telah diperoleh. Sehingga, penelitian ini diharapkan mampu dijadikan sebagai acuan kedepan dalam penerapan proses adsorpsi dengan skala yang lebih besar.

NOMENKLATUR

q_m	=	Kapasitas adsorpsi maksimum (mg/g)
K_C	=	Konstanta kesetimbangan Sips (L/mg)
n	=	Nilai eksponen Sips dan Koble-Corrigan
K_T	=	Konstanta kesetimbangan Toth (L/mg)
t	=	Nilai eksponen Toth
K_R	=	Konstanta kesetimbangan Redlich-Peterson (L/g)
a_R	=	Konstanta energi adsorpsi (L/mg)
g	=	Nilai eksponen Redlich-Peterson
A	=	Kapasitas adsorpsi maksimum Koble-Corrigan (mg/g)
B	=	Konstanta kesetimbangan Koble-Corrigan (L/mg)

DAFTAR PUSTAKA

- Afandy, M.A. and Sawali, F.D.I., 2024. Adsorption of Chromium Hexavalent in Aqueous Solutions Using Acid-Activated Wood Charcoal: Isotherm and Kinetics Study. *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*, 8(1), pp.1–14.
- Aigbe, U.O. and Osibote, O.A., 2020. A review of hexavalent chromium removal from aqueous solutions by sorption technique using nanomaterials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), p.104503.
- Ayawei, N., Ebelegi, A.N. and Wankasi, D., 2017. Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms. *Journal of Chemistry*, 2017.
- Brdar, M., Šćiban, M., Takači, A. and Došenović, T., 2012. Comparison of two and three parameters adsorption isotherm for Cr (VI) onto Kraft lignin. *Chemical Engineering Journal*, 183, pp.108–111.
- Cervera-Gabalda, L. and Gómez-Polo, C., 2022. Magnetic Fe/Fe₃C@C Nanoadsorbents for Efficient Cr (VI) Removal. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(23).
- Chu, K.H., Hashim, M.A., Santos, Y.T. da C., Debord, J., Harel, M. and Bollinger, J.-C., 2024. The Redlich–Peterson isotherm for aqueous phase adsorption: Pitfalls in data analysis and interpretation. *Chemical Engineering Science*, 285, p.119573.
- Ferrer, M.R.R., Kang, J.K., Choi, J.W., Lee, C.G. and Park, S.J., 2021. Surface modification of activated carbon via hcl or nh₄ oh treatment to enhance the removal of Cr (VI) from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*, 220, pp.221–231.
- Haeril, H., Sawali, F.D.I. and Afandy, M.A., 2024. Phytoremediation of Cr (VI) from Aqueous Solution by Pistia stratiotes L.: Efficiency and Kinetic Models. *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*, 8(1), pp.25–35.
- Islam, M.M., Mohana, A.A., Rahman, M.A., Rahman, M., Naidu, R. and Rahman, M.M., 2023. A Comprehensive Review of the Current Progress of Chromium Removal Methods from Aqueous Solution. *Toxics*, 11(3), pp.1–43.
- Kerur, S.S., Bandekar, S., Hanagadakar, M.S., Nandi, S.S., Ratnamala, G.M. and Hegde, P.G., 2021. Removal of hexavalent Chromium-Industry treated water and Wastewater: A review. *Materials Today: Proceedings*, 42, pp.1112–1121.
- Khorshidi, N. and Azadmehr, A.R., 2016. Characterisation and adsorption properties of oxalate-loaded hematite composite for Cd(II) and Pb(II) adsorption: Equilibrium models, thermodynamic and kinetic studies. *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, 51(13), pp.2122–2137.
- Kumkum, P. and Kumar, S., 2024. A Review on

- Biochar as an Adsorbent for Pb(II) Removal from Water. *Biomass (Switzerland)*, 4(2), pp.243–272.
- Liang, S., Guo, X., Lautner, S. and Saake, B., 2014. Removal of Hexavalent Chromium by Different Modified Spruce Bark Adsorbents. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 34(4), pp.273–290.
- M. Hamzaoui, , B. Bestani, N.B., 2018. The use of linear and nonlinear methods for adsorption isotherm optimization of basic green 4-dye onto sawdust-based activated carbon. *Journal of Material and Environmental Sciences*, 9(4), pp.1110–1118.
- Mnif, A., Bejaoui, I., Mouelhi, M. and Hamrouni, B., 2017. Hexavalent Chromium Removal from Model Water and Car Shock Absorber Factory Effluent by Nanofiltration and Reverse Osmosis Membrane. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2017(1), p.7415708.
- Ohale, P.E., Onu, C.E., Ohale, N.J. and Oba, S.N., 2020. Adsorptive kinetics, isotherm and thermodynamic analysis of fishpond effluent coagulation using chitin derived coagulant from waste Brachyura shell. *Chemical Engineering Journal Advances*, 4(July), p.100036.
- Panda, H., Tiadi, N., Mohanty, M. and Mohanty, C.R., 2017. Studies on adsorption behavior of an industrial waste for removal of chromium from aqueous solution. *South African Journal of Chemical Engineering*, 23, pp.132–138.
- Pangeran, A.B., Afandy, M.A. and Sawali, F.D.I., 2023. 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*, 7(2), pp.123–133.
- Ramli, N.N., Kurniawan, S.B., Ighalo, J.O., Mohd Said, N.S., Marsidi, N., Buhari, J., Ramli Shah, R.A., Zulkifli, M., Alias, J., Daud, N.M., Ahmad, J., Othman, A.R., Sheikh Abdullah, S.R. and Abu Hasan, H., 2023. A review of the treatment technologies for hexavalent chromium contaminated water. *BioMetals*, 36(6), pp.1189–1219.
- Raut, P.N., Dolas, A.S., Chougule, S.M., Darade, M.M., Murali, G., Waware, S.Y. and Kurhade, A.S., 2025. Green Adsorbents for Heavy Metal Removal: A Study on Zinc Ion Uptake by *Tinospora cordifolia* Biocarbon. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 73(1), pp.21–25.
- Serafin, J. and Dziejarski, B., 2023. Application of isotherms models and error functions in activated carbon CO₂ sorption processes. *Microporous and Mesoporous Materials*, 354(March).
- Setyawan, F., Sawali, F.D.I., Afandy, M.A. and Mustikaningrum, M., 2024. Cr (VI) Removal from Aqueous Solution by Coagulation – Adsorption Integrated System. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 13(1).
- Shafiq, M., Alazba, A.A. and Amin, M.T., 2021. Kinetic and isotherm studies of ni²⁺ and pb²⁺ adsorption from synthetic wastewater using eucalyptus camdulensis—derived biochar. *Sustainability (Switzerland)*, 13(7).
- Varank, G., Demir, A., Yetilmezsoy, K., Top, S., Sekman, E. and Bilgili, M.S., 2012. Removal of 4-nitrophenol from aqueous solution by natural low-cost adsorbents. *Indian Journal of Chemical Technology*, 19(1), pp.7–25.
- Verayana, Paputungan, M. and Iyabu, H., 2018. Effect of HCl and H₃PO₄ activators on the characteristics (pore morphology) of activated coconut shell charcoal and adsorption tests on lead (Pb) metal. *Jurnal Entropi*, 13(1), pp.67–75.
- Yulia, E., Purwasasmita, B.S., Nugraha, Ekawati, E. and Nugraha, A.B., 2024. Fabrication of Adsorbent using Nano-Sized Lignocellulosic Biochar Coated on *Luffa aegyptiaca* Sponge to Remove Heavy Metal Chromium VI. *Sains Malaysiana*, 53(1), pp.189–200.
- Zhao, J., Boada, R., Cibin, G. and Palet, C., 2021. Enhancement of selective adsorption of Cr species via modification of pine biomass. *Science of The Total Environment*, 756, p.143816.