

Analisis Efektivitas Adsorpsi Kromium Limbah Cair Laboratorium Menggunakan Zeolit, Silika dan *Clay Ceramics*

Muhammad Fairuz Akmal, Raden Kokoh Haryo Putro*

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: radenkokoh.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 18 Februari 2026

Disetujui: 24 Februari 2026

Abstract

Laboratories are significant sources of hazardous and toxic (B3) liquid waste, typically comprising chemical residues such as chromium. Hexavalent Chromium (Cr(VI)) heavy metal pollution poses a serious environmental threat due to its toxic and carcinogenic nature. This study aims to analyze the adsorption effectiveness of Cr(VI) using three natural-based adsorbents: Zeolite, Silica, and Clay Ceramics, activated with hydrochloric acid (HCl). The adsorption process was conducted using a batch method at pH 5 with variations in contact time. The results indicated that Zeolite exhibited the highest removal performance with an efficiency of 56.28%, followed by Silica (54.98%) and Clay Ceramics (53.03%) at an optimum contact time of 75 minutes. Kinetic analysis revealed that the adsorption rate for all three adsorbents followed the Pseudo-Second Order (PSO) model, indicating that the reaction rate was controlled by the availability of active sites on the surface. However, the calculation of Gibbs free energy values yielded -16.18 kJ/mol for Zeolite, -16.16 kJ/mol for Silica, and -15.85 kJ/mol for Clay Ceramics. These findings were confirmed by minor wavenumber shifts in the FTIR spectra (from 1084 to 1052 cm^{-1} for Zeolite). This leads to the conclusion that the adsorption mechanism is dominated by physisorption through electrostatic interactions and ion exchange between the protonated adsorbent surface and chromate anions, without the formation of permanent covalent bonds.

Keywords: *natural adsorbent, adsorption of cr(vi), hcl activation, physisorption, laboratory liquid waste*

Abstrak

Salah satu unit atau kegiatan yang menjadi penghasil limbah cair B3 adalah laboratorium dimana umumnya terdiri dari sisa-sisa bahan kimia, salah satunya adalah kromium. Pencemaran logam berat Kromium Heksavalen (Cr(VI)) merupakan masalah lingkungan serius karena sifatnya yang toksik dan karsinogenik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas adsorpsi Cr(VI) menggunakan tiga jenis adsorben berbasis bahan alam, yaitu Zeolit, Silika, dan *Clay Ceramics* yang diaktivasi menggunakan asam klorida (HCl). Proses adsorpsi dilakukan dengan metode batch pada kondisi pH 5 dengan variasi waktu kontak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Zeolit memiliki performa penyisihan tertinggi dengan efisiensi sebesar (56,28%), diikuti oleh Silika (54,98%) dan *Clay Ceramics* (53,03%) pada waktu kontak optimum 75 menit. Analisis kinetika menunjukkan bahwa laju adsorpsi pada ketiga adsorben mengikuti model *Pseudo-Second Order* (PSO), yang mengindikasikan bahwa laju reaksi dikontrol oleh ketersediaan situs aktif pada permukaan. Namun, hasil perhitungan nilai energi bebas Gibbs menunjukkan hasil sebesar (-16,18 kJ/mol) untuk zeolit, (-16,16 kJ/mol) untuk silika, dan (-15,85 kJ/mol) untuk *Clay Ceramics*, yang dikonfirmasi oleh pergeseran minor bilangan gelombang pada spektra FTIR (1084 ke 1052 cm^{-1} pada Zeolit). Hal ini menyimpulkan bahwa mekanisme adsorpsi yang terjadi didominasi oleh fisisorpsi melalui interaksi elektrostatis dan pertukaran ion antara permukaan adsorben terprotonasi dengan anion kromat, tanpa pembentukan ikatan kovalen permanen.

Kata Kunci: *adsorben alam, adsorpsi cr(vi), aktivasi hcl, fisisorpsi, limbah cair laboratorium*

1. Pendahuluan

Laboratorium menjadi salah satu unit kegiatan yang menghasilkan limbah cair B3 yang umumnya terdiri dari sisi-sisa penggunaan bahan kimia yang telah digunakan, salah satunya adalah kromium [1]. Kromium umumnya ditemukan di lingkungan dalam bentuk trivalen (Cr(III)) dan heksavalen (Cr(VI)) [2]. Kromium heksavalen (Cr(VI)) merupakan salah satu polutan logam berat yang berbahaya karena dapat menyebabkan alergi kulit, nekrosis hati dan ginjal serta penyakit kanker pada manusia [3]. Untuk mereduksi kandungan kromium heksavalen (Cr(VI)), metode adsorpsi dipilih karena biaya prosesnya yang lebih ekonomis, namun memiliki efektivitas yang baik dalam menurunkan kandungan logam berat [4]. Dengan menggunakan metode adsorpsi, ion-ion kromium akan terikat ke sebuah rongga atau pori-pori suatu padatan

yang kemudian akan membentuk lapisan tipis. Adapun padatan berongga atau berpori tersebut disebut sebagai adsorben.

Adsorben yang digunakan pada penelitian ini adalah zeolit, silika, dan *clay ceramics* yang diperoleh dari *e-commerce*. Ketiga jenis adsorben tersebut dipilih karena ketiganya mudah diperoleh, harganya ekonomis, dan mudah dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan. Selain itu, zeolit, silika, dan *clay ceramics* menjadi beberapa bahan yang diketahui memiliki kemampuan dalam menyerap kandungan Cr(VI) [5]. Informasi tersebut selaras dengan beberapa penelitian yang telah dilakukan. Sayekti et al. dalam penelitiannya membuktikan bahwa adsorpsi pada zeolit alam teraktivasi mampu menyerap kandungan kromium dengan kapasitas adsorpsi tertinggi 82,95 mg/g [6]. Penelitian Adelagun et al. menunjukkan bahwa penggunaan silika dapat meremoval kromium dengan kapasitas adsorpsi tertinggi 67,45 mg/g [7]. Adapun terkait *clay ceramics*, Ashour et al. dalam penelitiannya menunjukkan hasil bahwa adsorben lempung termodifikasi tersebut mampu menyerap kromium dengan kapasitas adsorpsi sebesar 14,3 mg/g dan efisiensi removal sebesar 66% [8].

Namun, dari berbagai literatur yang ada, banyak diantaranya hanya menguji satu jenis adsorben secara terpisah dan dengan parameter yang berbeda-beda. Hal ini menyebabkan sulitnya menentukan adsorben yang paling efektif karena ketiga jenis adsorben tidak dapat dilakukan perbandingan secara langsung. Oleh karena itu, penelitian ini akan dilakukan untuk menganalisis dan membandingkan performa ketiga jenis adsorben dalam menghilangkan kandungan kromium (Cr) dari limbah cair laboratorium.

2. Metode Penelitian

Preparasi Adsorben

Adsorben zeolit, silika, dan *clay ceramics* yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari salah satu platform *e-commerce* yang ada di Indonesia. *Clay ceramics* yang peneliti peroleh berbentuk *porous ceramic ring* sehingga perlu dihancurkan manual menggunakan mortar dan alu hingga berbentuk serbuk. Adapun zeolit dan silika yang diperoleh sudah dalam bentuk serbuk. Setelah itu, ketiga jenis adsorben disaring menggunakan ayakan mesh 200 untuk memperoleh partikel yang seragam. Kemudian, ketiga jenis adsorben dicuci menggunakan aquades untuk menghilangkan kotoran fisik dan debu yang menempel, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 5 jam. Adsorben yang telah dikeringkan kemudian diaktivasi dengan perendaman dan pengadukan menggunakan HCl 2M selama 3 jam pada suhu ruang. Setelah 3 jam, adsorben dibilas menggunakan aquades hingga pH netral, dan dikeringkan di dalam oven pada suhu 105°C selama 5 jam. Setelah dikeringkan, adsorben disimpan di botol kedap udara yang bersih sebelum digunakan pada penelitian utama.

Penelitian Utama

Proses adsorpsi yang dilakukan pada penelitian ini dilakukan dengan metode *batch* pada waktu kontak yang divariasikan serta pH dan dosis adsorben yang dibuat konstan. Adapun dosis adsorben yang digunakan yaitu 0,5 gram untuk tiap 250 mL limbah cair. Sebelum menambahkan adsorben, peneliti melakukan *conditioning* pH limbah cair laboratorium yang semula sangat asam di pH 0,3 menjadi pH 5 menggunakan bantuan 1M NaOH. Untuk memastikan pengadukan yang merata pada proses adsorpsi, semua eksperimen yang dilakukan menggunakan *mechanical shaker* dengan kecepatan pengadukan konstan di 250 rpm. Setelah diperoleh nilai konsentrasi kromium sebelum dan sesudah adsorpsi, dilakukan perhitungan kapasitas adsorpsi dan persentase removal pada waktu kontak tertentu menggunakan rumusan berikut ini [9].

Rumus efisiensi penurunan polutan (%);

$$\%Removal = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

Rumus kapasitas adsorpsi (mg/g);

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

dimana C_0 adalah nilai konsentrasi awal, C_e adalah konsentrasi setelah adsorpsi, q adalah kapasitas adsorpsi logam berat dalam mg/g, m adalah massa adsorben dalam gram, dan V adalah volume limbah cair yang digunakan dalam penelitian.

Kinetika Adsorpsi

Pengaruh waktu kontak terhadap laju penjerapan ion Cr(VI) dari limbah cair diteliti menggunakan studi kinetika. Data hasil proses adsorpsi digunakan untuk analisis kinetika menggunakan model *pseudo first order* dan *pseudo second order*. Model kinetika *pseudo first order* didasarkan pada kapasitas adsorpsi yang dimiliki adsorben yang menunjukkan bahwa tidak adanya interaksi antar ion-ion. Adapun persamaannya direpresentasikan sebagai berikut [10].

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (3)$$

dimana q_e dan q_t adalah nilai (mg/g) polutan yang teradsorpsi pada adsorben pada kondisi kesetimbangan dengan waktu t , dan k_1 adalah konstanta kinetika *pseudo first order* (min^{-1}). Dengan menerapkan batasan kondisi $t=0$ menjadi $t=t$ dan $q_t=0$ menjadi $q_t=q_e$, persamaan integrasi tersebut berubah bentuk menjadi berikut ini:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2,303} \quad (4)$$

Dengan melakukan plot data $\log(q_e - q_t)$ versus t akan memberikan garis lurus untuk kinetika adsorpsi *pseudo first order* yang memungkinkan untuk perhitungan konstanta laju k_1 dan q_e dari *slope* dan *intercept* dari plot yang dilakukan.

Model kinetika *pseudo second order* didasarkan pada asumsi bahwa rongga yang terisi adsorbat sebanding dengan kuadrat jumlah rongga yang belum diisi adsorbat. Adapun persamaannya direpresentasikan sebagai berikut [10].

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (5)$$

dimana q_e dan q_t adalah nilai (mg/g) polutan yang teradsorpsi pada adsorben pada kondisi kesetimbangan dengan waktu t , dan k_2 adalah konstanta kinetika *pseudo second order* (g/mg min).

Dengan menerapkan batasan kondisi $t=0$ menjadi $t=t$ dan $q_t=0$ menjadi $q_t=q_e$, persamaan integrasi tersebut berubah bentuk menjadi berikut ini:

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (6)$$

Adapun bentuk persamaan linier dari persamaan (2.4) adalah sebagai berikut:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{(q_e)t} \quad (7)$$

Nilai dari k_2 dan q_e pada model kinetika *pseudo second order* dapat ditentukan dari *intercept* dan *slope* dari plot t/q_t versus t .

Analisis Gugus Fungsi

Gugus fungsi dari ketiga jenis adsorben dianalisis menggunakan bantuan instrument FTIR (*Fourier Transform Infra-red Spektrofotometri*). Analisis gugus fungsi dilakukan untuk mengidentifikasi ada atau tidak adanya perubahan gugus fungsi ketiga jenis adsorben pada kondisi sebelum dan setelah adsorpsi berdasarkan penyerapan gelombang infra merah. Pada penelitian ini, hasil analisis gugus fungsi akan digunakan untuk membantu menentukan mekanisme dari proses adsorpsi yang berlangsung berdasarkan ada atau tidak adanya gugus fungsi baru yang terbentuk.

Energi Bebas Gibbs

Karena pada penelitian ini tidak dilakukan variasi suhu adsorpsi yang terkontrol, maka peneliti melakukan pengukuran suhu saat sebelum dan setelah proses adsorpsi untuk digunakan dalam perhitungan energi bebas Gibbs. Sehingga dalam penelitian ini, analisis termodinamika terbatas pada perhitungan energi bebas Gibbs tanpa menghitung nilai perubahan entalpi dan perubahan entropi menggunakan persamaan Van't Hoff. Adapun nilai energi bebas Gibbs dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini [11].

$$\Delta G^\circ = -R T \ln K_c \quad (8)$$

$$K_c = \frac{q_e}{C_e} \times 1000 \quad (9)$$

dimana K_c adalah konstanta saat kondisi kesetimbangan dan T adalah temperatur adsorpsi (Kelvin), R adalah konstanta gas universal ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), q_e adalah kapasitas adsorpsi saat kesetimbangan (mg/L), dan C_e adalah konsentrasi polutan yang tersisa saat kondisi kesetimbangan.

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis Awal Kandungan Cr(VI) Limbah Cair Laboratorium

Analisis awal terhadap limbah cair laboratorium bertujuan untuk mengetahui seberapa besar kandungan Cr(VI) yang berpotensi mencemari lingkungan. Adapun ruang lingkup penelitian ini berfokus pada penjerapan kandungan Cr(VI) tanpa tambahan parameter lainnya. Adapun nilai Cr(VI) awal diukur untuk tiap kali *running* penelitian berdasarkan variasi waktu kontak. Berikut adalah nilai Cr(VI) tiap-tiap *running* pada limbah cair laboratorium setelah proses *conditioning* pH.

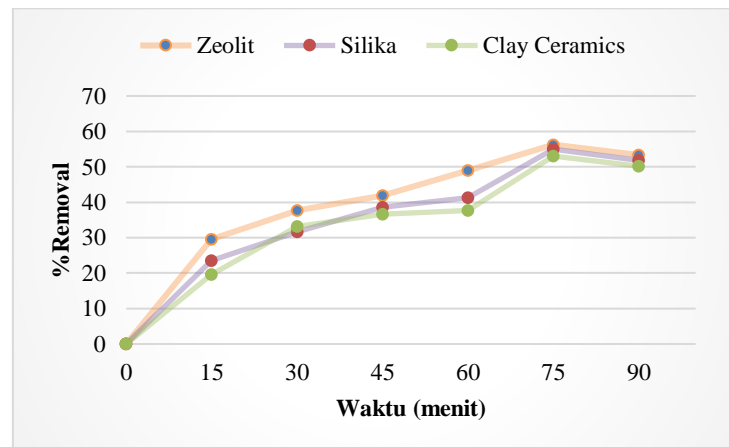
Tabel 1. Hasil Uji Konsentrasi Awal Cr(VI) Limbah Cair

Running	Waktu Kontak (menit)	Nilai Cr(VI) (mg/L)
1	15	48,8
2	30	46,7
3	45	46,7
4	60	46,2
5	75	46,2
6	90	48,6

Sumber : Peneliti 2026

Efektivitas Adsorpsi

Hasil *plotting* data %removal dan waktu kontak berdasarkan data penelitian disajikan pada gambar berikut ini :



Gambar 1. Pengaruh Waktu Kontak Terhadap % Removal Cr(VI)

Persentase *removal* ion Cr(VI) dan kapasitas adsorpsi zeolit, silika, dan *clay ceramics* dilakukan pada variasi waktu kontak 15, 30, 45, 60, 75, dan 90 menit menggunakan dosis, pH, dan kecepatan pengadukan yang konstan pada suhu ruangan. Hasil dari pengujian dapat dilihat berdasarkan **Gambar 1** yang menunjukkan persentase *removal* ion Cr(VI) meningkat seiring dengan peningkatan waktu kontak hingga 75 menit, namun menjadi sedikit menurun pada menit-menit selanjutnya. Efisiensi *removal* tertinggi serta kapasitas adsorpsi tertinggi teramati pada menit 75 untuk ketiga jenis adsorben. Oleh karena itu, 75 menit dipilih sebagai waktu kesetimbangan. Karena saat awal proses, adsorpsi berlangsung cukup cepat akibat banyaknya situs aktif yang tersedia, tetapi proses melambat seiring berjalannya waktu karena situs aktif telah terisi oleh ion logam. Adapun dengan kondisi dan perlakuan yang sama, efisiensi penyisihan Cr(VI) tertinggi terjadi ketika menggunakan adsorben zeolit dengan nilai sebesar 56,28%, diikuti oleh silika dengan nilai efisiensi sebesar 54,98%, dan terakhir adalah *clay ceramics* dengan nilai efisiensi sebesar 5,03%.

Kinetika Adsorpsi

Analisis kinetika adsorpsi dilakukan dalam penelitian ini dengan tujuan untuk mengetahui laju adsorpsi yang terjadi berdasarkan kecocokan pola kurva q_t vs t . Model dengan nilai koefisien determinasi (R^2) tertinggi akan dianggap sebagai model kinetika yang paling sesuai. Adapun model kinetika adsorpsi yang digunakan yaitu *pseudo first order model* dan *pseudo second order model*.

Tabel 2. Hasil Plot Model Kinetika Tiap Jenis Adsorben

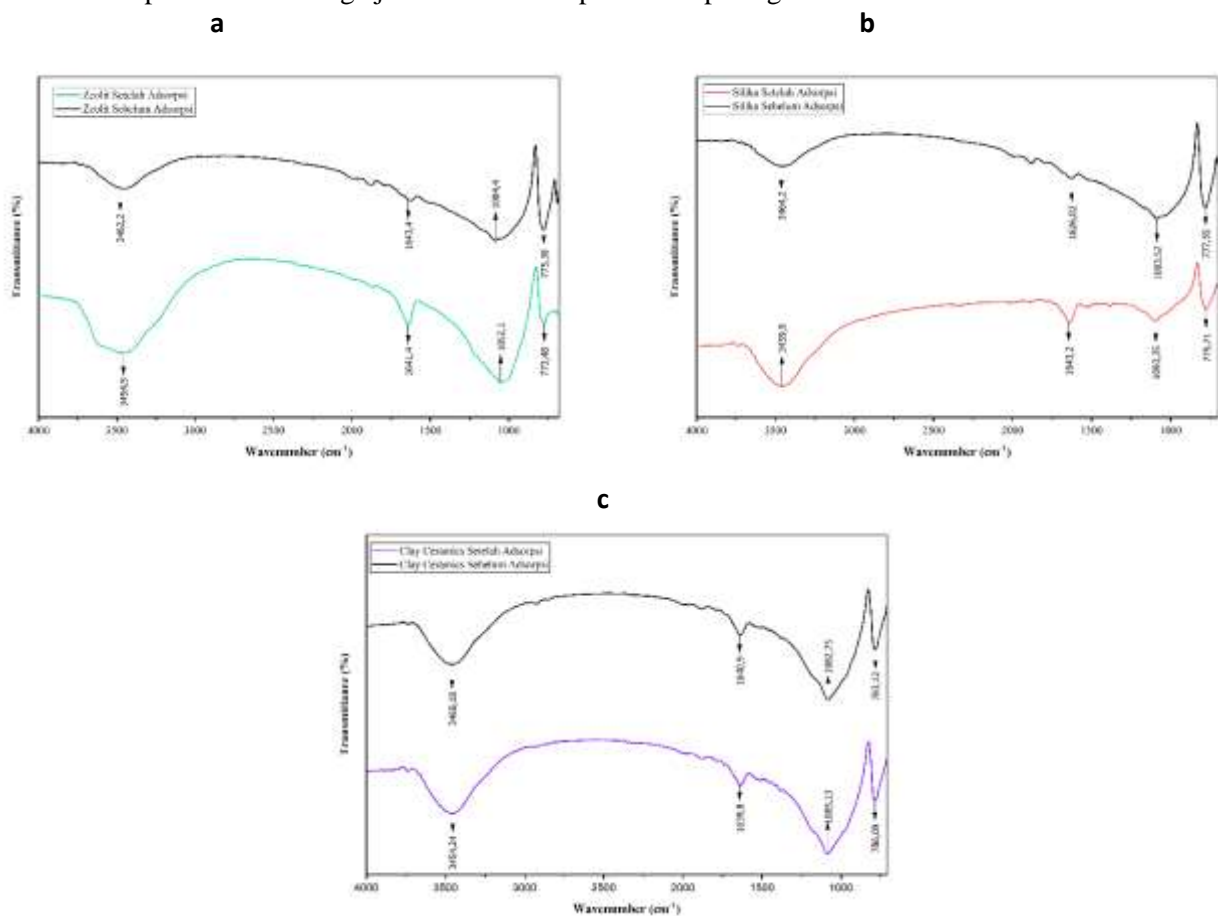
Jenis Adsorben	Pseudo First Order Model			Pseudo Second Order Model			qe Exp
	qe PFO	K1	R ²	qe PSO	K2	R ²	
Zeolit	11,28	0,0311	0,96	13,81	0,0046	0,98	13,00
Silika	11,07	0,0228	0,95	12,53	0,0043	0,99	12,70
Clay Ceramics	10,53	0,0212	0,90	11,80	0,0045	0,97	12,25

Sumber: Peneliti 2026

Berdasarkan Tabel 2 dapat diketahui bahwa Zeolit, Silika dan Clay Ceramics memiliki kecocokan terhadap model kinetika *pseudo second order* yang ditandai dengan nilai R^2 paling mendekati 1 yakni untuk zeolit sebesar 0,98, silika sebesar 0,99, dan untuk clay ceramics sebesar 0,97. Kecocokan dengan model *pseudo second order* pada penelitian ini tidak mengindikasikan kemisorpsi melainkan menggambarkan bahwa pengisian situs aktif (pori-pori adsorben) dikontrol oleh difusi intrapartikel [12]. Adapun nilai laju adsorpsi pada model untuk Zeolit sebesar 0,0046 g/mg.min untuk silika sebesar 0,0043 g/mg.min dan Clay Ceramics sebesar 0,0045 g/mg.min.

Analisis Gugus Fungsi

Analisis gugus fungsi bertujuan untuk mengidentifikasi ada atau tidak adanya perubahan gugus fungsi ketiga jenis adsorben pada kondisi sebelum dan setelah adsorpsi berdasarkan penyerapan gelombang infra merah. Spektra FTIR ketiga jenis adsorben dapat dilihat pada grafik berikut ini.



Gambar 2. Spektra FTIR a Zeolit, b Silika, c Clay ceramics, Sebelum dan Sesudah Adsorpsi

Jika diamati berdasarkan grafik spektra FTIR diatas, dapat diketahui bahwa puncak-puncak dari spektra FTIR ketiga jenis adsorben memiliki pola yang serupa. Namun, spektra FTIR sebelum dan sesudah proses adsorpsi untuk tiap jenis adsorben mengalami pergeseran bilangan gelombang yang relatif kecil. Untuk adsorben zeolit, pita serapan gugus – OH yang semula muncul di 3462,2 cm^{-1} bergeser menjadi 3454,5 cm^{-1} setelah adsorpsi, sedangkan pita lentur H – O – H air terikat bergeser dari 1643,4 cm^{-1} menjadi 1641,4 cm^{-1} . Pita serapan kerangka Si – O – Si / Al – O – Si juga mengalami sedikit pergeseran dari 1084,4 cm^{-1} menjadi 1052,1 cm^{-1} . Pola serupa juga teramati pada adsorben Silika dan *Clay Ceramics*, dimana pita – OH, H – O – H, dan Si – O / Si – O – Al hanya mengalami pergeseran kecil tanpa munculnya pita serapan baru yang signifikan. Pergeseran bilangan gelombang yang relatif kecil dan tidak terbentuknya gugus fungsi baru mengindikasikan bahwa adanya interaksi adsorpsi (elektrostatik dan H - bonding) antara ion Cr(VI) dengan permukaan adsorben.

Energi Bebas Gibbs

Perhitungan (ΔG^0) bertujuan untuk mengetahui apakah proses adsorpsi menggunakan zeolit, silika, dan *Clay Ceramics* dapat berlangsung secara spontan pada kondisi penelitian yang ditetapkan. Adapun nilai perhitungan energi Gibbs pada penelitian ini diperoleh dari pengukuran suhu sebelum dan setelah proses adsorpsi tanpa variasi suhu terkontrol, sehingga hasil perhitungannya hanya dapat digunakan sebagai penentu spontanitas proses adsorpsi dan data pendukung dari spektra FTIR, bukan sebagai bukti tunggal penentu mekanisme adsorpsi yang terjadi. Berikut adalah hasil perhitungan energi bebas Gibbs.

Tabel 3. Perhitungan Energi Bebas Gibbs

Jenis Adsorben	T (K)	Kc	ΔG^0 kJ/mol.K
Zeolit	301,0	643,56	-16,18
Silika	301,0	637,93	-16,16
Clay Ceramics	301,0	564,52	-15,85

Sumber : Peneliti 2026

Berdasarkan **Tabel 3**, dapat diketahui bahwa proses adsorpsi Cr(VI) menggunakan *Zeolit*, *Silika* dan *Clay Ceramics* pada suhu ruangan (25°C - 35°C) memiliki nilai (ΔG^0) sebesar -16,18 KJ/mol.K untuk zeolit, -16,16 KJ/mol.K untuk silika, dan -15,85 KJ/mol.K untuk. Nilai negatif dari hasil perhitungan (ΔG^0) mengindikasikan bahwa proses adsorpsi Cr(VI) menggunakan ketiga jenis adsorben tersebut merupakan proses yang spontan dan dapat terjadi tanpa memerlukan tambahan energi dari luar.

Mekanisme Adsorpsi

Berdasarkan perlakuan ketiga jenis adsorben yang sama, analisis gugus fungsi, dan perhitungan energi bebas Gibbs, dapat disimpulkan bahwa mekanika adsorpsi Cr(VI) menggunakan adsorben Zeolit, Silika, dan *Clay Ceramics* yang teraktivasi oleh HCl dalam penelitian ini adalah fisisorpsi yang didominasi oleh interaksi elektrostatik. Hal ini selaras dengan hasil efisiensi removal yang moderat, yakni sekitar 50 - 60%. Meskipun data kinetika terbaik dijelaskan oleh model *pseudo-second order* (PSO), tidak serta merta ditafsirkan sebagai bukti pasti terjadinya *chemisorption* (kemisorpsi) karena PSO seringkali berfungsi sebagai model empiris yang hanya menggambarkan bentuk kurva laju dan keterisian situs aktif termasuk untuk sistem yang jelas bersifat fisisorpsi atau dikontrol difusi [13], [14], [15].

4. Kesimpulan

Dengan kondisi dan perlakuan yang sama, efisiensi penyisihan Cr(VI) tertinggi terjadi ketika menggunakan adsorben zeolit dengan nilai sebesar 56,28% diikuti oleh silika dengan nilai efisiensi sebesar 54,98% dan terakhir adalah *clay ceramics* dengan nilai efisiensi sebesar 53,03%. Meskipun ketiga jenis adsorben memiliki kecocokan dengan model kinetika PSO, mekanisme adsorpsinya adalah fisisorpsi yang didominasi oleh interaksi elektrostatik. Karena berdasarkan spektra FTIR, energi Gibbs dan % removal yang moderat (antara 50-60%) menunjukkan mekanisme adsorpsi cenderung dominan terjadi secara fisika (*fisiosorpsion*)

5. Daftar Pustaka

- [1] T. Indrawati, N. I. D. Ningsih, and P. Sumarwanto, “Penyisihan Krom Dalam Limbah Cair Laboratorium Dengan Metode Adsorpsi dan Fitoremediasi,” *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*, vol. 5, no. 2, pp. 83–90, 2023, doi: 10.14710/jplp.5.2.83-90.

- [2] Tarigan, Basril Simbarta, Rukiah Rukiah, and Atiek Rostika Noviyanti. "Composition of Polyaluminum Chloride with Hydroxyapatite and Its Application for Separation of Hexavalent Chromium Ions." *Indonesian Journal of Industrial Research* 30.1 (2021): 26-34.
- [3] R. S. Murti and S. Sugihartono, "Bahaya Kromium Hexavalen (Cr VI) Pada Kulit Dan Produk Kulit Samak Krom Serta Upaya Pencegahannya," *Jurnal Riset Teknologi Industri*, vol. 14, no. 2, p. 241, 2020, doi: 10.26578/jrti.v14i2.6536.
- [4] I. Desianna, C. A. Putri, I. Yulianti, and Sujarwata, "Selulosa Kulit Jagung sebagai Adsorben Logam Cromium (Cr) pada Limbah Cair Batik," *Unnes Physics Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 19–24, 2017.
- [5] A. Nighojkar, V. K. Sangal, F. Dixit, and B. Kandasubramanian, "Sustainable conversion of saturated adsorbents (SAs) from wastewater into value-added products: future prospects and challenges with toxic per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS)," Nov. 01, 2022, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s11356-022-23166-7.
- [6] Emelda, Lisanti, Suhardini Martiana Putri, and Simpardin Ginting. "Pemanfaatan zeolit alam teraktivasi untuk adsorpsi logam Krom (Cr3+)." *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan* 9.4 (2013): 166-172.
- [7] Adelagun, R. O. A., et al. "Biosorptive removal of hexavalent chromium by rice husk ash and silica from aqueous solution." *Chem. Mate. Res* 13 (2021): 11-18.
- [8] E. A. Ashour and M. A. Tony, "Eco-friendly removal of hexavalent chromium from aqueous solution using natural clay mineral: activation and modification effects," *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 12, Dec. 2020, doi: 10.1007/s42452-020-03873-x.
- [9] Y. H. Fseha *et al.*, "Application of natural earth-based materials as adsorbents for the treatment of chromium (VI)-contaminated tannery wastewater: Box-Behnken and fixed-bed column optimization," *Sustainable Chemistry for the Environment*, vol. 7, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.scenv.2024.100127.
- [10] T. S. Badessa, E. Wakuma, and A. M. Yimer, "Bio-sorption for effective removal of chromium(VI) from wastewater using Moringa stenopetala seed powder (MSSP) and banana peel powder (BPP)," *BMC Chem.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1186/s13065-020-00724-z.
- [11] Milonjić, Slobodan K. "A consideration of the correct calculation of thermodynamic parameters of adsorption." *Journal of the Serbian chemical society* 72.12 (2007): 1363-1367.
- [12] J. P. Simonin, "On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics," *Chemical Engineering Journal*, vol. 300, pp. 254–263, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.cej.2016.04.079.
- [13] B. Li, M. Zhao, Y. Qi, Q. Wang, N. Jiang, and W. Luo, "Adsorption of Cr(VI) onto a low-cost ceramsite: Preparation, kinetics, and thermodynamics," *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, vol. 18, no. 5, pp. 1594–1606, Sep. 2021, doi: 10.1111/ijac.13723.
- [14] E. Z. Alharissa, Y. Efhiliana, R. Roto, M. Mudasir, and E. T. Wahyuni, "Efficient removal of Cr(VI) contaminant using recoverable silica from volcanic ash as natural adsorbent: Synthesis and activity in the mechanism and kinetic adsorption," *Heliyon*, vol. 10, no. 2, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e23273.
- [15] Y. A. B. Neolaka *et al.*, "Efficiency of activated natural zeolite-based magnetic composite (ANZ-Fe₃O₄) as a novel adsorbent for removal of Cr(VI) from wastewater," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 18, pp. 2896–2909, May 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.03.153.