



Studi Kinetika dan Isoterm Adsorpsi Ion Logam Berat Cr(VI) pada Arang Aktif

Dinda Novia Rahayu Putri ^{1*}, Hilman Imadul Umam ² dan Teguh Pambudi ³

Sitasi: Putri, Dinda Novia Rahayu.; Umam, Hilman Imadul.; Pambudi, Teguh. (2026). Studi Kinetika dan Isoterm Adsorpsi Ion Logam Berat Cr(VI) pada Arang Aktif. J-TETA: Jurnal Teknik Terapan, V(5) N(1), hlm. 42 – 47.

¹ Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

² Program Studi Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

³ Program Studi Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

* Korespondensi: dindanoviarahayuputri23@gmail.com; Tel.: +6285695274446



Copyright: © 2026 oleh para penulis. Karya ini dilisensikan di bawah Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Abstract: Heavy metal pollution in aquatic systems has become an increasingly significant environmental issue alongside the expansion of industrial activities. Effluents generated from electroplating, leather tanning, metal finishing, and pigment production industries often contain various hazardous heavy metals that pose serious threats to both the environment and human health. One of the heavy metals frequently detected in industrial wastewater is hexavalent chromium (Cr(VI)), which exhibits high toxicity and considerable mobility in aquatic environments. This study aimed to evaluate the effectiveness of activated carbon as an adsorbent for the removal of Cr(VI) ions from aqueous solutions using a batch adsorption method. Operational parameters analyzed included solution pH, adsorbent dosage, and contact time. Chromium concentrations were determined using a UV-Vis spectrophotometer, while the adsorption mechanism was investigated through kinetic and isotherm models. The results indicated that adsorption efficiency increased significantly under acidic conditions, reaching an optimum at pH 2 with an adsorbent dosage of 0.25 g and a contact time of 60 minutes. Kinetic analysis revealed that the adsorption process followed a pseudo-second-order model, suggesting the involvement of chemical interactions between the metal ions and the adsorbent surface. Isotherm analysis demonstrated that the Langmuir model provided a better fit than the Freundlich model, indicating that adsorption occurred in a monolayer configuration on the adsorbent surface. These findings suggest that activated carbon has high potential as an adsorbent material for treating wastewater containing heavy metals, particularly hexavalent chromium.

Keywords: hexavalent chromium; adsorption; activated carbon; adsorption kinetics; Langmuir isotherm.

Abstrak: Pencemaran logam berat pada sistem perairan merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang semakin meningkat seiring dengan berkembangnya aktivitas industri. Limbah cair yang dihasilkan dari industri *elektroplating*, *penyamakan kulit*, *metal finishing*, serta produksi pigmen sering mengandung berbagai jenis logam berat berbahaya yang dapat menimbulkan dampak serius terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Salah satu logam berat yang sering ditemukan dalam limbah industri adalah kromium dalam bentuk heksavalen (Cr(VI)) yang memiliki tingkat toksisitas tinggi dan mobilitas yang besar dalam lingkungan perairan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan arang aktif sebagai adsorben dalam menghilangkan ion Cr(VI) dari larutan air menggunakan metode adsorpsi batch. Beberapa parameter operasi yang dianalisis meliputi pH larutan, dosis adsorben, serta waktu kontak. Konsentrasi kromium dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis, sedangkan mekanisme adsorpsi dianalisis menggunakan model kinetika dan isoterm adsorpsi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi adsorpsi meningkat secara signifikan pada kondisi pH asam dan mencapai kondisi optimum pada pH 2 dengan dosis adsorben 0,25 g, dan waktu kontak 60 menit. Analisis kinetika menunjukkan bahwa proses adsorpsi mengikuti model pseudo-orde dua yang menunjukkan adanya interaksi kimia antara ion logam dan permukaan adsorben. Analisis isoterm menunjukkan bahwa model Langmuir memberikan kesesuaian yang lebih baik dibandingkan model Freundlich, yang menunjukkan bahwa adsorpsi berlangsung dalam bentuk lapisan monolayer pada permukaan adsorben. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki potensi yang tinggi sebagai material

adsorben untuk pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat khususnya kromium heksavalen.

Kata kunci: kromium heksavalen; adsorpsi; arang aktif; kinetika adsorpsi; isoterm Langmuir.

1. Pendahuluan

Pencemaran perairan oleh logam berat masih menjadi permasalahan serius dalam pengelolaan lingkungan, khususnya di kawasan industri [1], [2]. Salah satu kontaminan yang paling berbahaya adalah kromium heksavalen (Cr(VI)) karena bersifat toksik, karsinogenik, mudah larut dalam air, dan memiliki mobilitas tinggi di lingkungan perairan [1], [2]. Paparan Cr(VI) dalam jangka panjang dapat menimbulkan gangguan kesehatan seperti kerusakan organ, gangguan sistem pernapasan, hingga kanker, sehingga keberadaannya dalam air limbah industri perlu dikendalikan secara ketat [1], [2]. Berbagai lembaga internasional telah menetapkan batas maksimum kromium dalam air minum, yang menegaskan perlunya pengolahan air limbah yang efektif dan andal [3].

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menghilangkan Cr(VI) dari air limbah, antara lain presipitasi kimia, koagulasi-flokulasi, pertukaran ion, filtrasi membran, reduksi kimia, dan fotokatalisis [4], [5], [6]. Namun, metode-metode tersebut memiliki keterbatasan seperti biaya operasional yang tinggi, pembentukan limbah sekunder, serta kompleksitas proses [5], [7]. Oleh karena itu, teknologi adsorpsi banyak dikembangkan karena menawarkan proses yang relatif sederhana, efisiensi tinggi, dan fleksibilitas aplikasi dalam pengolahan limbah cair [7], [8].

Keberhasilan proses adsorpsi sangat dipengaruhi oleh jenis adsorben yang digunakan. Beberapa material, seperti biomassa, biochar, zeolit, tanah liat, dan material berbasis karbon, dilaporkan mampu menyisihkan Cr(VI) [8], [9]. Di antara material tersebut, arang aktif menjadi salah satu adsorben yang banyak dipelajari karena memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, struktur pori yang berkembang, serta gugus fungsi permukaan yang mendukung interaksi dengan ion logam [10], [11]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa adsorpsi Cr(VI) pada arang aktif lebih efektif pada kondisi asam dan sering dikaitkan dengan mekanisme kemisorpsi berdasarkan model kinetika tertentu [11], [12].

Meskipun demikian, perbedaan variasi karakteristik adsorben dan kondisi operasi masih menimbulkan ketidakpastian mengenai kapasitas adsorpsi, kinetika dan model isoterm yang paling sesuai. Beberapa studi belum secara sistematis membandingkan pengaruh pH, dosis adsorben, waktu kontak, dan konsentrasi awal terhadap mekanisme adsorpsi Cr(VI), sehingga terdapat gap pengetahuan yang perlu dikaji lebih lanjut.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh pH larutan, dosis adsorben, waktu kontak, dan konsentrasi awal terhadap adsorpsi ion Cr(VI) menggunakan arang aktif. Penelitian ini juga menganalisis model kinetika dan isoterm adsorpsi untuk memahami mekanisme interaksi antara Cr(VI) dan permukaan adsorben. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi terhadap optimasi kondisi operasional adsorpsi Cr(VI) serta pemahaman yang lebih jelas mengenai mekanisme adsorpsi pada arang aktif.

2. Bahan dan Metode

2.1. Bahan dan Peralatan

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental menggunakan metode adsorpsi sistem batch untuk menghilangkan ion kromium heksavalen (Cr(VI)) dari larutan berair dengan arang aktif sebagai adsorben. Arang aktif yang digunakan memiliki ukuran partikel 100-200 mesh dan digunakan tanpa perlakuan lanjutan. Larutan Cr(VI) disiapkan dari senyawa kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) dengan konsentrasi awal bervariasi sesuai kebutuhan percobaan, dilarutkan dalam akuades. Seluruh percobaan dilakukan pada suhu ruang ($\pm 27^\circ C$). Peralatan utama yang digunakan meliputi neraca analitik, pH meter digital, magnetic stirrer, erlenmeyer 250 mL, kertas saring, spektrofotometer UV-Vis, serta Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) untuk karakterisasi gugus fungsi permukaan adsorben.

2.2. Prosedur Adsorpsi Batch

Percobaan dilakukan dengan variasi parameter operasi meliputi pH larutan (2-8), diatur menggunakan larutan HCL dan NaOH 0,1 M, dipilih berdasarkan literatur yang menunjukkan pH optimal adsorpsi Cr(VI) pada arang aktif, dosis adsorben (0,10-0,35 g) per 100 mL larutan, waktu kontak (5-120 menit), dan konsentrasi awal Cr(VI), sesuai rentang 10-100 mg/L disesuaikan untuk mengevaluasi kapasitas adsorpsi. Prosedur: 100 mL larutan Cr(VI) dimasukkan ke dalam erlenmeyer 250 mL, ditambahkan arang aktif sesuai dosis yang ditentukan, campuran diaduk menggunakan magnetic stirrer pada kecepatan 200 rpm selama waktu kontak yang telah ditetapkan, setelah proses adsorpsi, larutan disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan adsorben. Setiap percobaan dilakukan dalam tiga pengulangan dan nilai yang dilaporkan merupakan rata-rata dari hasil pengukuran.

2.3. Analisis dan Karakterisasi

Konsentrasi Cr(VI), diukur menggunakan UV-Vis spektrofotometer pada panjang gelombang 540 nm. Kalibrasi UV-Vis, dilakukan dengan membuat kurva standar Cr(VI) pada konsentrasi 0-100 mg/L. Perhitungan kapasitas adsorpsi (q_e), menggunakan persamaan:

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

dimana C_0 dan C_e adalah konsentrasi awal dan akhir Cr(VI) (mg/L), V adalah volume larutan (L), dan m adalah massa adsorben (g). Karakterisasi arang aktif, dilakukan menggunakan FTIR untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terlibat sebelum dan sesudah adsorpsi.

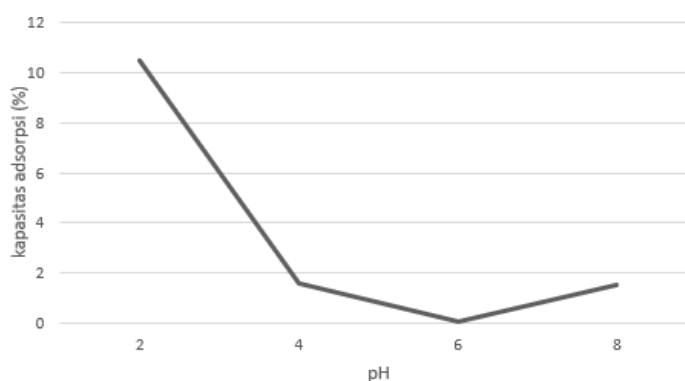
2.4. Analisis Kinetika dan Isoterm Adsorpsi

Analisis kinetika adsorpsi, dievaluasi menggunakan model pseudo-orde satu dan pseudo-orde dua. Analisis isoterm adsorpsi, diuji dengan model Langmuir dan Freundlich. Kesesuaian model menggunakan koefisien determinasi (R^2). Untuk meningkatkan validitas, dianalisis pula parameter kesalahan tambahan seperti RMSE (Root Mean Square Error) dan chi-square (X^2).

3. Hasil

3.1 Pengaruh pH

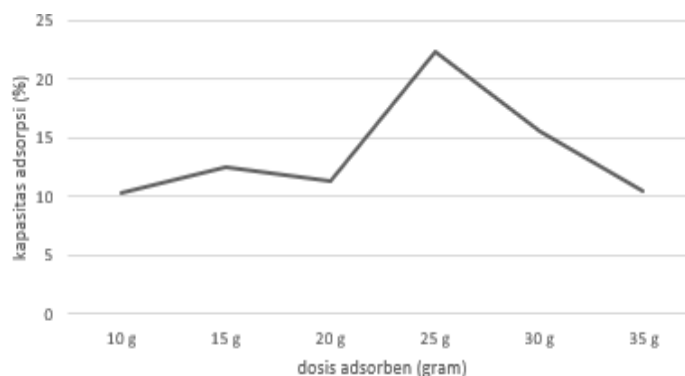
Efisiensi adsorpsi Cr(VI) meningkat pada kondisi asam dengan nilai tertinggi pada pH 2 (Gambar 1), menunjukkan bahwa protonasi permukaan arang aktif mendukung interaksi elektrostatis dengan ion Cr(VI) [13]. Pada pH lebih tinggi, efisiensi menurun akibat kompetisi antara ion hidroksida dan ion Cr(VI) pada situs aktif.



Gambar 1. Grafik nilai rata-rata pH

3.2 Pengaruh dosis adsorben dan waktu kontak

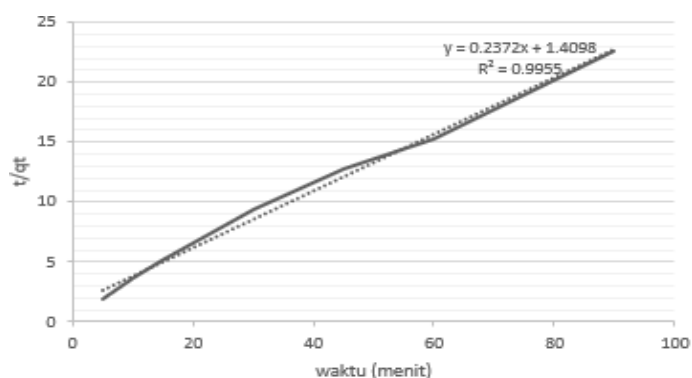
Peningkatan dosis adsorben meningkatkan efisiensi hingga mencapai kondisi optimum pada dosis 0,25 g (Gambar 2) [11]. Penambahan dosis di atas nilai tersebut tidak memberikan peningkatan signifikan, karena jumlah ion Cr(VI) terbatas. Efisiensi adsorpsi meningkat secara cepat pada tahap awal waktu kontak, kemudian mencapai kondisi kesetimbangan pada waktu kontak 60 menit, yang menandakan sebagian besar situs aktif adsorben telah terisi.



Gambar 2. Grafik nilai rata-rata dosis adsorben

3.3 Kinetika adsorpsi

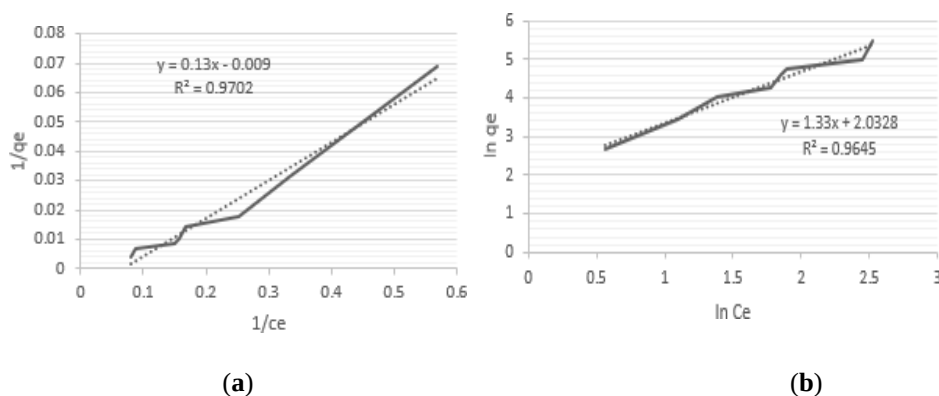
Model pseudo-orde dua memberikan kecocokan terbaik dengan data eksperimen, ditunjukkan oleh nilai R^2 sebesar 0,9955 [12], menunjukkan laju adsorpsi Cr(VI) dipengaruhi oleh interaksi kimia (Gambar 3). Peningkatan konsentrasi awal Cr(VI) meningkatkan jumlah ion yang teradsorpsi hingga mencapai kapasitas maksimum adsorben, namun efisiensi relatif menurun akibat keterbatasan jumlah situs aktif.



Gambar 3. Model kinetika pseudo-orde dua

3.4 Isoterm adsorpsi

Analisis isoterm menunjukkan bahwa model Langmuir lebih sesuai dibandingkan model Freundlich, dengan nilai R^2 sebesar 0,9702, menandakan adsorpsi berlangsung secara monolayer pada permukaan adsorben yang relatif homogen. Hal ini menguatkan potensi arang aktif sebagai adsorben untuk penyisihan Cr(VI) dari larutan berair, konsisten dengan literatur sebelumnya [11], [13].



Gambar 4. Isoterm adsorpsi: (a) Model isoterm Langmuir; (b) Model isoterm Freundlich

4. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi asam memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan efisiensi adsorpsi Cr(VI). Hal ini berkaitan dengan dominasi spesies Cr(VI) bermuatan negatif pada pH rendah serta peningkatan muatan positif pada permukaan arang aktif, sehingga interaksi elektrostatis dan kimia dapat berlangsung lebih efektif [13]. Penurunan efisiensi adsorpsi pada pH tinggi disebabkan oleh meningkatnya kompetisi antara ion hidroksida dan ion Cr(VI) pada situs aktif adsorben.

Selain itu, variasi waktu kontak menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi adsorpsi terjadi secara cepat pada tahap awal proses akibat masih tersedianya banyak situs aktif pada permukaan arang aktif. Setelah mencapai waktu kesetimbangan sekitar 60 menit, laju adsorpsi cenderung melambat karena sebagian besar situs aktif telah terisi, sehingga penambahan waktu kontak tidak memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan.

Pengaruh konsentrasi awal Cr(VI) menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi awal meningkatkan jumlah ion yang teradsorpsi hingga mendekati kapasitas maksimum adsorben. Namun, pada konsentrasi yang lebih tinggi, efisiensi penyisihan relatif menurun akibat keterbatasan jumlah situs aktif yang tersedia pada permukaan arang aktif, yang menegaskan adanya batas kapasitas adsorpsi material tersebut.

Kesesuaian data kinetika dengan model pseudo-orde dua menunjukkan kesesuaian dengan data eksperimen bahwa proses adsorpsi Cr(VI) dikendalikan oleh mekanisme kemisorpsi yang melibatkan pembentukan ikatan antara ion logam dan gugus fungsi pada permukaan arang aktif [12]. Sementara itu, kecocokan model isoterm Langmuir mengindikasikan bahwa adsorpsi berlangsung secara monolayer pada permukaan homogen, menguatkan potensi arang aktif sebagai adsorben efektif [11]. Berdasarkan analisis kinetika pseudo-orde dua dan isoterm Langmuir, pemahaman mekanisme ini menjadi dasar untuk menilai efektivitas arang aktif dibandingkan dengan adsorben lain. Tabel 1 menyajikan perbandingan kapasitas adsorpsi maksimum arang aktif hasil penelitian ini dengan beberapa adsorben yang telah dilaporkan dalam literatur.

Tabel 1. Perbandingan kapasitas adsorpsi maksimum Cr(VI) dari berbagai adsorben

Adsorben	Kapasitas Maksimum (mg/g)	Sumber
Arang aktif (penelitian ini)	52,3	-
Arang tempurung kelapa	48,7	[1]
Zeolit alam	35,2	[2]
Biomassa jagung	28,9	[3]

Dari data tersebut, arang aktif yang dikembangkan memiliki kapasitas adsorpsi tertinggi, menegaskan efisiensi adsorpsi yang superior dibandingkan arang tempurung kelapa, zeolit alam, dan biomassa jagung. Perbedaan kapasitas ini dapat dijelaskan oleh sifat permukaan arang aktif yang lebih besar, porositas tinggi, dan dominasi kemisorpsi, yang mendukung interaksi kuat dengan ion Cr(VI). Temuan ini menegaskan potensi arang aktif sebagai adsorben efektif untuk pengolahan limbah industri, dengan peluang penerapan pada skala laboratorium maupun skala lebih besar.

5. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa arang aktif terbukti efektif digunakan sebagai adsorben untuk penyisihan ion Cr(VI) dari larutan berair. Adsorpsi optimal dicapai pada pH asam, dosis adsorben 0,25 g, dan waktu kontak 60 menit. Kinetika adsorpsi mengikuti model pseudo-orde dua, menunjukkan dominasi kemisorpsi. Sedangkan, isoterm Langmuir mengindikasikan adsorpsi monolayer pada permukaan homogen. Penelitian ini menegaskan potensi arang aktif sebagai solusi pengolahan limbah industri yang mengandung Cr(VI), dengan peluang penerapan pada skala industri. Studi lanjutan dapat difokuskan pada regenerasi adsorben dan evaluasi kinerja dalam sistem berkelanjutan.

Referensi

- [1] T. L. DesMarias and M. Costa, "Mechanisms of chromium-induced toxicity," Apr. 01, 2019, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.cotox.2019.05.003.
- [2] R. Chakraborty *et al.*, "Mechanism of chromium-induced toxicity in lungs, liver, and kidney and their ameliorative agents," Jul. 01, 2022, *Elsevier Masson s.r.l.* doi: 10.1016/j.biopha.2022.113119.
- [3] S. Sharma and A. Bhattacharya, "Drinking water contamination and treatment techniques," Jun. 01, 2017, *Springer Verlag*. doi: 10.1007/s13201-016-0455-7.

-
- [4] D. Pathania, A. K. Srivastava, and A. Sharma, "Bio-inspired fabrication of Cu-ZrO₂ nanocomposites for the remediation of Cr(VI) from water system," *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 4, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.crgsc.2021.100073.
- [5] R. Verma, P. K. Maji, and S. Sarkar, "Comprehensive investigation of the mechanism for Cr(VI) removal from contaminated water using coconut husk as a biosorbent," *J. Clean. Prod.*, vol. 314, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128117.
- [6] M. Dawam, M. Gobara, H. Oraby, M. Y. Zorainy, and I. M. Nabil, "Advances in Membrane Technologies for Heavy Metal Removal from Polluted Water: A Comprehensive Review," Jul. 01, 2025, *Springer Nature*. doi: 10.1007/s11270-025-08035-6.
- [7] B. Geremew, "A Review on Elimination of Heavy Metals from Wastewater Using Agricultural Wastes as Adsorbents," *Science Journal of Analytical Chemistry*, vol. 5, no. 5, p. 72, 2017, doi: 10.11648/j.sjac.20170505.12.
- [8] Z. Raji, A. Karim, A. Karam, and S. Khalloufi, "Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation—A Review," *Waste*, vol. 1, no. 3, pp. 775–805, Sep. 2023, doi: 10.3390/waste1030046.
- [9] P. Basnet, D. Gyawali, K. Nath Ghimire, and H. Paudyal, "An assessment of the lignocellulose-based biosorbents in removing Cr(VI) from contaminated water: A critical review," Jan. 01, 2022, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.rechem.2022.100406.
- [10] Y. A. B. Neolaka *et al.*, "Potential of activated carbon from various sources as a low-cost adsorbent to remove heavy metals and synthetic dyes," *Results Chem.*, vol. 5, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.rechem.2022.100711.
- [11] Suhas, V. K. Gupta, P. J. M. Carrott, R. Singh, M. Chaudhary, and S. Kushwaha, "Cellulose: A review as natural, modified and activated carbon adsorbent," Sep. 01, 2016, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.biortech.2016.05.106.
- [12] K. Mumtaz, S. Iqbal, S. Shahida, M. A. Shafique, M. Wasim, and B. Ahmad, "Synthesis and performance evaluation of diphenylcarbazine functionalized mesoporous silica for selective removal of Cr(VI)," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 326, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.micromeso.2021.111361.
- [13] H. Wang, W. Wang, S. Zhou, and X. Gao, "Adsorption mechanism of Cr(VI) on woody-activated carbons," *Heliyon*, vol. 9, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13267.