

Sintesis dan Evaluasi Adsorpsi *Batch* Cr(VI) menggunakan Karbon Aktif Jerami Padi Teraktivasi Asam Sulfat

Daning Kinanti Utama^{1*}, Dwi Indah Lestari², Vitro Rahmat³, Ra'ida
Raudhatussyar'rifah⁴, Dipta Ardiya Diningrum¹

¹ Program Studi Teknik Kimia, Universitas Nahdlatul Ulama Pasuruan

² Program Studi Teknologi Kimia Industri, Politeknik Negeri Sriwijaya

³ Jurusan Teknik Kimia, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

⁴ Program Studi Teknik Kimia, Universitas Jambi

* Correspondence author: daning@unupasuruan.ac.id; Tel:-

Received: 21 January 2026; Accepted: 11 April 2026; Published: 29 April 2026

Abstract

Rice straw is an abundant agricultural residue with significant potential as a precursor for activated carbon in heavy metal wastewater treatment. This study aimed to synthesize and evaluate the performance of sulfuric acid (H₂SO₄)–activated rice straw carbon for the removal of hexavalent chromium (Cr(VI)) from synthetic aqueous solutions. The adsorbent was prepared through carbonization at 500 °C followed by chemical activation using 2 M H₂SO₄ with an impregnation ratio of 1:10 (w/v). Batch adsorption experiments were conducted by varying solution pH (5–9), contact time (0–120 min), and particle size (60–100 mesh) to determine optimum operating conditions. Optimum adsorption was achieved at pH 7, particle size 100 mesh, and contact time of 60 minutes. Equilibrium data were better described by the Langmuir isotherm model ($R^2 = 0.8923$), yielding a maximum adsorption capacity (q_m) of 5.42 mg/g and a Langmuir constant (K_L) of 2.40 L/mg, indicating predominantly monolayer adsorption with relatively strong adsorbent–adsorbate affinity. These findings demonstrate that sulfuric acid–activated rice straw carbon is a promising low-cost and sustainable adsorbent for Cr(VI)-contaminated wastewater treatment.

Keywords: rice straw; activated carbon; Cr(VI); adsorption; sulfuric acid activation

Abstrak

Jerami padi merupakan residu pertanian yang melimpah dan berpotensi dikembangkan sebagai prekursor karbon aktif untuk pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengevaluasi kinerja karbon aktif jerami padi teraktivasi asam sulfat (H₂SO₄) dalam menyisihkan kromium heksavalen (Cr(VI)) dari larutan sintetik. Karbon aktif disintesis melalui karbonisasi pada suhu 500 °C selama 2 jam dan aktivasi kimia menggunakan H₂SO₄ 2 M dengan rasio impregnasi 1:10 (b/v). Pengujian adsorpsi dilakukan secara batch dengan variasi pH (5–9), ukuran partikel (60–100 mesh), dan waktu kontak (0–120 menit) untuk menentukan kondisi optimum. Kondisi optimum diperoleh pada pH 7, ukuran partikel 100 mesh, dan waktu kontak 60 menit. Data kesetimbangan lebih sesuai dengan model isotherm Langmuir ($R^2 = 0,8923$) dengan kapasitas adsorpsi maksimum (q_m) sebesar 5,42 mg/g dan konstanta Langmuir (K_L) sebesar 2,40 L/mg, yang mengindikasikan mekanisme adsorpsi monolapis dengan afinitas interaksi yang cukup kuat. Hasil ini menunjukkan bahwa karbon

aktif jerami padi teraktivasi H_2SO_4 berpotensi sebagai adsorben alternatif yang ekonomis dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah cair yang mengandung Cr(VI).

Kata kunci: jerami padi; karbon aktif; Cr(VI); adsorpsi; aktivasi H_2SO_4

1. Pendahuluan

Peningkatan aktivitas industri berkontribusi terhadap meningkatnya pencemaran lingkungan, khususnya akibat pembuangan air limbah yang mengandung logam berat (1). Kromium heksavalen (Cr(VI)) merupakan salah satu kontaminan berbahaya yang umum dijumpai dalam limbah industri elektroplating, penyamakan kulit, dan pelapisan logam (2,3). Cr(VI) bersifat toksik, karsinogenik, dan mudah larut dalam air, sehingga berpotensi mencemari badan air dan terakumulasi dalam rantai makanan (4–6). Oleh karena itu, pengembangan metode pengolahan yang efektif dan ekonomis untuk menyisihkan Cr(VI) menjadi kebutuhan mendesak (7–9). Keberadaan Cr(VI) dalam konsentrasi rendah sekalipun dapat menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan apabila terakumulasi dalam jangka panjang (10,11).

Berbagai metode telah diterapkan untuk menangani limbah yang terkontaminasi Cr(VI), seperti presipitasi kimia, pertukaran ion, filtrasi membran, dan reduksi kimia (12–14). Namun demikian, metode tersebut umumnya memerlukan biaya operasional tinggi, penggunaan bahan kimia dalam jumlah besar, serta menghasilkan lumpur residu yang memerlukan pengelolaan lanjutan (13,15). Adsorpsi menggunakan karbon aktif menjadi alternatif yang menarik karena sederhana, fleksibel, dan efektif dalam menyisihkan berbagai jenis polutan logam berat (16).

Dalam beberapa tahun terakhir, karbon aktif berbasis biomassa semakin banyak dikembangkan sebagai adsorben ramah lingkungan dan berbiaya rendah (17). Berbagai limbah pertanian seperti tempurung kelapa, sekam padi, tongkol jagung, dan limbah kayu telah dilaporkan memiliki kapasitas adsorpsi Cr(VI) yang bervariasi tergantung pada metode aktivasi dan kondisi operasi (18,19). Aktivasi kimia menggunakan agen seperti KOH, $ZnCl_2$, dan H_3PO_4 diketahui mampu meningkatkan luas permukaan dan jumlah gugus fungsi aktif pada karbon (20–22). Namun demikian, kajian mengenai pemanfaatan jerami padi yang diaktivasi menggunakan asam sulfat (H_2SO_4) untuk adsorpsi Cr(VI) masih relatif terbatas, khususnya dalam konteks evaluasi parameter operasi secara sistematis dan analisis isoterm kesetimbangan.

Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih menitikberatkan pada adsorben berbasis biomassa tertentu dengan fokus pada efisiensi penyisihan tanpa analisis komprehensif mengenai pengaruh pH, ukuran partikel, dan waktu kontak secara simultan. Selain itu, belum banyak studi yang secara khusus mengevaluasi mekanisme adsorpsi Cr(VI) pada karbon aktif jerami padi teraktivasi H₂SO₄ melalui pendekatan isoterm Langmuir dan Freundlich untuk memahami karakteristik interaksi adsorben–adsorbat.

Berdasarkan uraian tersebut, terdapat celah penelitian (research gap) terkait pengembangan karbon aktif berbasis jerami padi yang diaktivasi menggunakan H₂SO₄ serta evaluasi kinerja adsorpsinya terhadap Cr(VI) melalui pendekatan sistem batch yang terkontrol dan analisis isoterm kesetimbangan. Penelitian ini menawarkan kebaruan (novelty) berupa sintesis karbon aktif jerami padi teraktivasi H₂SO₄ yang dikaji melalui variasi pH, ukuran partikel, dan waktu kontak, serta dianalisis menggunakan model isoterm untuk mengidentifikasi mekanisme adsorpsi yang dominan.

Dengan demikian, tujuan penelitian ini adalah untuk mensintesis dan mengkarakterisasi karbon aktif jerami padi teraktivasi H₂SO₄ serta mengevaluasi kinerja adsorpsi Cr(VI) secara batch guna menentukan kondisi operasi optimum dan model isoterm yang paling sesuai.

2. Metode

2.1 Bahan dan Peralatan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini mencakup jerami padi sebagai bahan baku adsorben, asam sulfat (H₂SO₄) sebagai aktivator kimia, kalium dikromat (K₂Cr₂O₇) sebagai sumber Cr(VI), serta akuades sebagai pelarut. Seluruh bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini memiliki tingkat kemurnian pro analysis (p.a.).

Peralatan utama yang digunakan meliputi furnace untuk proses karbonisasi, oven pengering, ayakan dengan ukuran 60–100 mesh, neraca analitik, magnetic stirrer, pH meter, spektrofotometer UV–Vis (Shimadzu UV-1800, Jepang) untuk analisis konsentrasi Cr(VI), serta analisis gugus fungsi permukaan adsorben dilakukan menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Pengujian FTIR dilakukan di laboratorium eksternal terakreditasi menggunakan instrumen FTIR standar laboratorium.

2.2 Preparasi dan Karbonisasi Jerami Padi

Jerami padi dicuci menggunakan akuades untuk menghilangkan kotoran dan pengotor lainnya, kemudian dikeringkan hingga mencapai kadar air rendah. Sampel kering digiling hingga berbentuk serbuk homogen. Proses karbonisasi dilakukan menggunakan furnace tipe

muffle dengan laju pemanasan sekitar 10 °C/menit hingga mencapai suhu 500 °C dan dipertahankan selama 2 jam di bawah atmosfer udara (tanpa aliran gas inert) (23). Proses karbonisasi ini bertujuan untuk menghilangkan komponen volatil dan meningkatkan kandungan karbon pada material (24). Setelah karbonisasi, arang jerami padi didinginkan pada suhu ruang dan diayak untuk memperoleh ukuran partikel yang diinginkan.

2.3 Aktivasi Kimia Karbon

Karbon hasil karbonisasi kemudian diaktivasi secara kimia melalui perendaman dalam larutan H₂SO₄ 2 M dengan rasio impregnasi 1:10 (b/v) selama 24 jam pada suhu ruang (25,26). Rasio impregnasi tersebut dipilih untuk memastikan kontak yang memadai antara karbon dan larutan aktivator sehingga proses difusi aktivator ke dalam struktur karbon dapat berlangsung secara optimal (21). Pemilihan konsentrasi H₂SO₄ 2 M didasarkan pada pertimbangan bahwa konsentrasi sedang efektif dalam meningkatkan perkembangan porositas serta pembentukan gugus fungsi aktif pada permukaan karbon tanpa menyebabkan degradasi struktur karbon secara berlebihan, sebagaimana dilaporkan pada penelitian karbon aktif berbasis biomassa sebelumnya (27–29). Setelah proses aktivasi, karbon dicuci menggunakan akuades hingga pH filtrat mendekati netral untuk menghilangkan sisa aktivator. Selanjutnya, karbon aktif dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C hingga mencapai berat konstan sebelum digunakan dalam pengujian adsorpsi.

2.4 Karakterisasi Karbon Aktif

Karbon aktif jerami padi yang dihasilkan dikarakterisasi untuk mengevaluasi kualitas dasar dan sifat permukaan yang relevan dengan proses adsorpsi. Analisis kadar air dan kadar abu dilakukan untuk menilai mutu karbon aktif serta kesesuaiannya dengan standar kualitas karbon aktif berbasis biomassa (30). Parameter tersebut dipilih karena berpengaruh terhadap stabilitas struktur karbon dan efektivitasnya sebagai adsorben.

Identifikasi gugus fungsi permukaan dilakukan menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) untuk mengonfirmasi keberadaan gugus fungsi aktif, seperti –OH, C=O, dan C–O, yang berperan dalam interaksi antara adsorben dan ion Cr(VI) (23). Analisis FTIR dalam penelitian ini digunakan sebagai karakterisasi pendukung guna memahami potensi mekanisme adsorpsi, dan bukan sebagai variabel utama penelitian.

Namun demikian, penelitian ini belum mencakup analisis struktur pori dan luas permukaan spesifik, seperti metode BET atau analisis distribusi ukuran pori. Oleh karena itu, interpretasi mengenai pengaruh karakteristik porositas terhadap kapasitas adsorpsi masih didasarkan pada hasil kinerja adsorpsi dan analisis isoterm yang diperoleh.

2.5 Proses Adsorpsi Cr(VI)

Pengujian adsorpsi Cr(VI) dilakukan secara batch menggunakan larutan Cr(VI) sintetik dengan konsentrasi awal 20 mg/L. Proses adsorpsi dikaji melalui variasi pH larutan (5, 7, dan 9), ukuran partikel adsorben (60, 80, dan 100 mesh), serta waktu kontak dalam rentang 0–120 menit. Selama proses adsorpsi, campuran diaduk secara konstan untuk memastikan interaksi yang homogen antara adsorben dan adsorbat. Setelah waktu kontak tercapai, larutan dipisahkan dari adsorben dan dianalisis untuk menentukan konsentrasi Cr(VI) sisa.

Seluruh percobaan dilakukan dalam tiga kali ulangan (triplicate), dan nilai yang dilaporkan merupakan nilai rata-rata hasil pengukuran. Sebagai kontrol, dilakukan percobaan blanko tanpa penambahan adsorben untuk memastikan tidak terjadi penurunan konsentrasi Cr(VI) akibat faktor lain selain proses adsorpsi. Pengujian pengaruh waktu kontak dilakukan pada pH 5 untuk merepresentasikan kondisi limbah yang lebih kritis (asam), sehingga kinerja adsorben dapat dievaluasi pada kondisi operasi yang lebih menantang.

2.6 Analisis Konsentrasi Cr(VI)

Penentuan konsentrasi Cr(VI) awal dan akhir adsorpsi dilakukan menggunakan spektrofotometer UV–Vis berdasarkan kurva kalibrasi larutan standar Cr(VI) pada panjang gelombang maksimum tertentu. Efisiensi penyisihan Cr(VI) dan kapasitas adsorpsi dihitung berdasarkan perbedaan konsentrasi awal dan akhir larutan.

2.7 Analisis Isoterm Adsorpsi

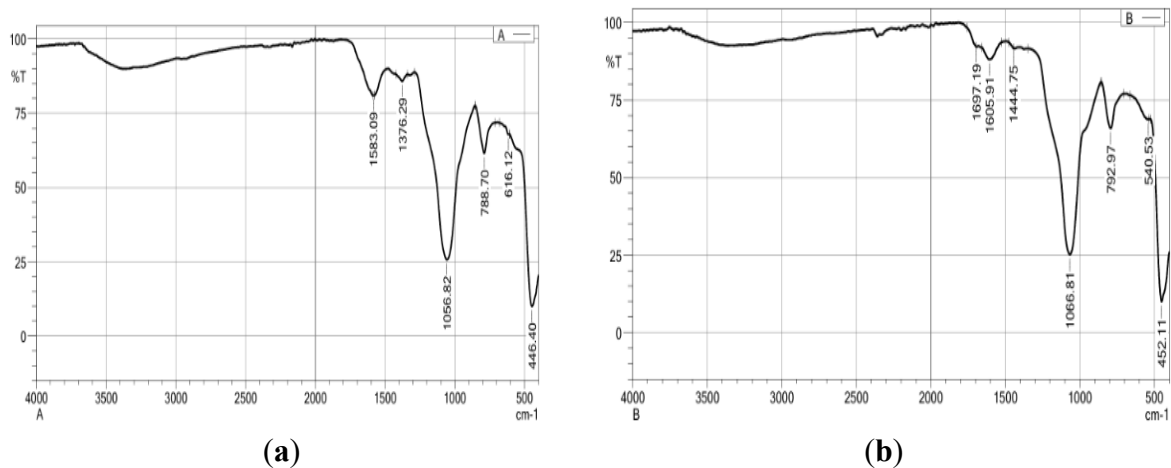
Data kesetimbangan adsorpsi dianalisis menggunakan model isoterm Langmuir dan Freundlich untuk mengevaluasi mekanisme adsorpsi Cr(VI) pada karbon aktif jerami padi. Parameter isoterm ditentukan melalui pendekatan regresi linear berdasarkan bentuk persamaan linear masing-masing model. Kesesuaian model terhadap data eksperimen dievaluasi menggunakan nilai koefisien determinasi (R^2) sebagai parameter statistik untuk menilai tingkat kecocokan model terhadap data kesetimbangan. Model isoterm digunakan untuk menentukan kapasitas adsorpsi maksimum serta menggambarkan karakteristik interaksi antara adsorben dan adsorbat (31,32).

3. Hasil penelitian

3.1 Karakteristik Karbon Aktif Jerami Padi

Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa karbon aktif jerami padi memiliki kadar air sebesar 8,15% dan kadar abu sebesar 9,45%. Berdasarkan standar mutu karbon aktif teknis (misalnya SNI 06-3730-1995), kadar air umumnya disyaratkan maksimum 15% dan kadar abu maksimum sekitar 10%. Dengan demikian, nilai kadar air dan kadar abu yang diperoleh dalam penelitian ini masih berada dalam batas standar yang diperbolehkan. Kadar air yang relatif rendah menunjukkan stabilitas material dan meminimalkan pengaruh kelembapan terhadap kapasitas adsorpsi, sedangkan kadar abu yang masih di bawah batas maksimum mengindikasikan kandungan mineral anorganik yang tidak berlebihan sehingga tidak menghambat kinerja adsorpsi. Nilai tersebut juga sebanding dengan karbon aktif berbasis biomassa lain yang diaktivasi menggunakan agen asam sebagaimana dilaporkan pada penelitian sebelumnya. (33–35)

Hasil analisis FTIR menunjukkan keberadaan gugus fungsi utama pada permukaan karbon aktif, yaitu gugus hidroksil ($-OH$), karbonil ($C=O$), dan ikatan $C-O$. Gugus fungsi ini berperan sebagai situs aktif yang mendukung terjadinya interaksi antara permukaan adsorben dan ion $Cr(VI)$ selama proses adsorpsi. Perubahan intensitas pita serapan setelah aktivasi menunjukkan keberhasilan proses aktivasi kimia menggunakan H_2SO_4 .



Gambar 1. Spektrum FTIR karbon aktif jerami padi: (a) sebelum aktivasi dan (b) setelah aktivasi menggunakan H_2SO_4 .

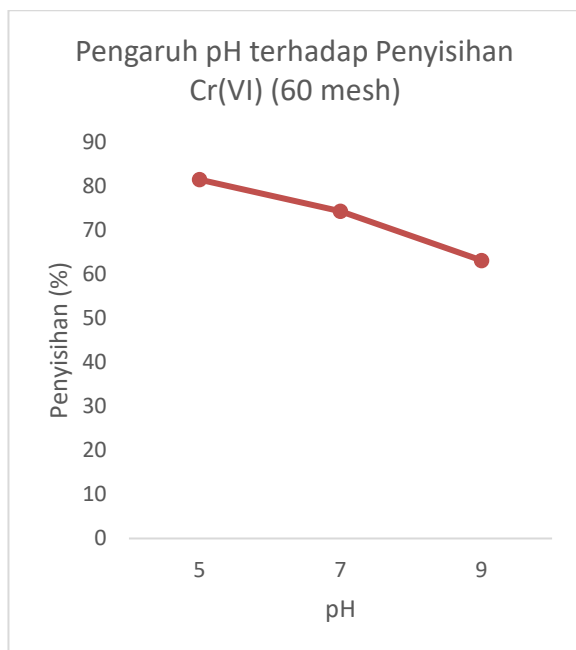
3.2 Pengaruh pH terhadap Adsorpsi Cr(VI)

Hasil percobaan menunjukkan bahwa pH larutan berpengaruh signifikan terhadap efisiensi adsorpsi Cr(VI). Efisiensi adsorpsi meningkat dari pH 5 ke pH 7, kemudian mengalami penurunan pada pH 9, dengan kinerja optimum pada pH 7. Pengaruh pH ini berkaitan erat dengan spesiasi Cr(VI) di dalam larutan serta muatan permukaan adsorben.

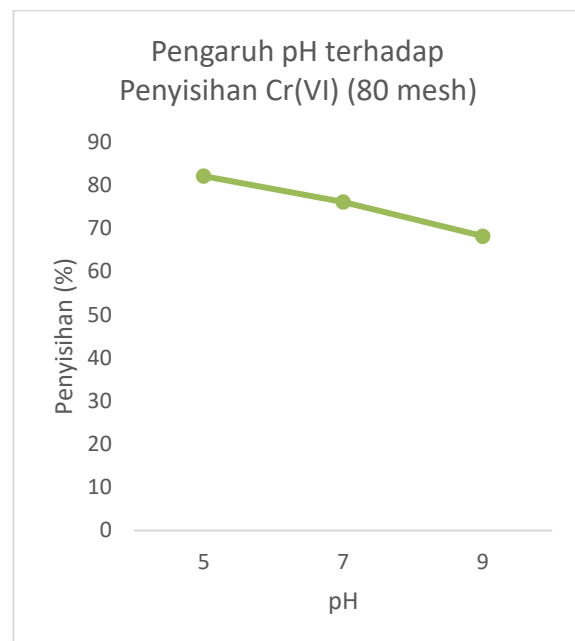
Pada kondisi asam hingga mendekati netral, Cr(VI) umumnya berada dalam bentuk anion monovalen HCrO_4^- dan sebagian sebagai $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$. Seiring peningkatan pH menuju netral dan basa, spesies dominan berubah menjadi CrO_4^{2-} yang bermuatan dua negatif. Pada pH 7, kondisi muatan permukaan karbon aktif dan spesiasi Cr(VI) berada pada keadaan yang lebih mendukung interaksi elektrostatik dan kemungkinan pembentukan ikatan kompleks dengan gugus fungsi aktif seperti $-\text{OH}$ dan $\text{C}=\text{O}$ pada permukaan karbon (36,37).

Pada pH lebih rendah, keberadaan ion H^+ dalam konsentrasi tinggi dapat bersaing dengan spesies Cr(VI) dalam menempati situs aktif adsorben, sehingga menurunkan efisiensi adsorpsi. Sementara itu, pada pH basa (pH 9), dominasi spesies CrO_4^{2-} yang bermuatan lebih tinggi serta kemungkinan peningkatan muatan negatif permukaan karbon menyebabkan gaya tolak elektrostatik yang lebih besar, sehingga efisiensi adsorpsi menurun (38).

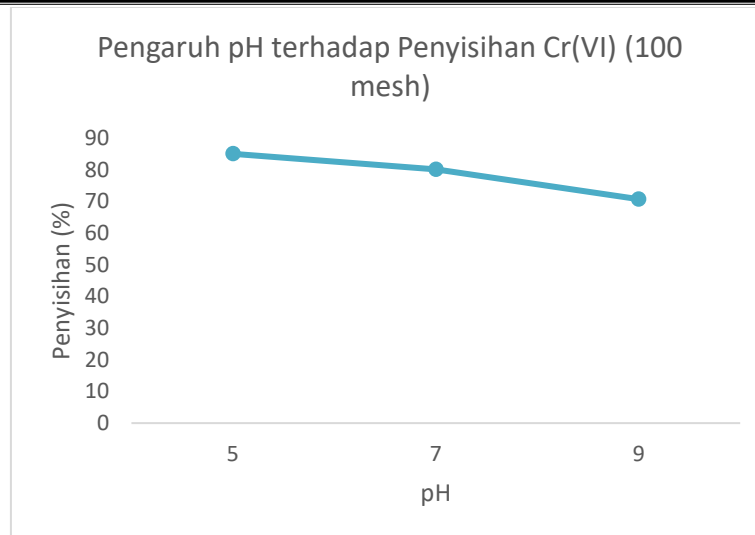
Dengan demikian, perubahan efisiensi adsorpsi terhadap variasi pH tidak hanya dipengaruhi oleh kondisi keasaman larutan, tetapi juga oleh perubahan spesiasi Cr(VI) dan karakteristik muatan permukaan adsorben.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2. Pengaruh pH terhadap persentase adsorpsi Cr(VI) oleh karbon aktif jerami padi pada ukuran partikel (a) 60 mesh, (b) 80 mesh, dan (c) 100 mesh.

3.3 Pengaruh Ukuran Partikel Adsorben

Ukuran partikel adsorben berpengaruh terhadap kemampuan karbon aktif dalam menyisihkan Cr(VI). Efisiensi adsorpsi cenderung meningkat dengan semakin kecilnya ukuran partikel, di mana ukuran 100 mesh menunjukkan kinerja tertinggi dibandingkan 60 dan 80 mesh. Secara teoritis, penurunan ukuran partikel menyebabkan berkurangnya panjang lintasan difusi (diffusion path length) dari permukaan partikel menuju situs aktif di bagian dalam pori, sehingga hambatan difusi internal (intraparticle diffusion resistance) menjadi lebih kecil (39).

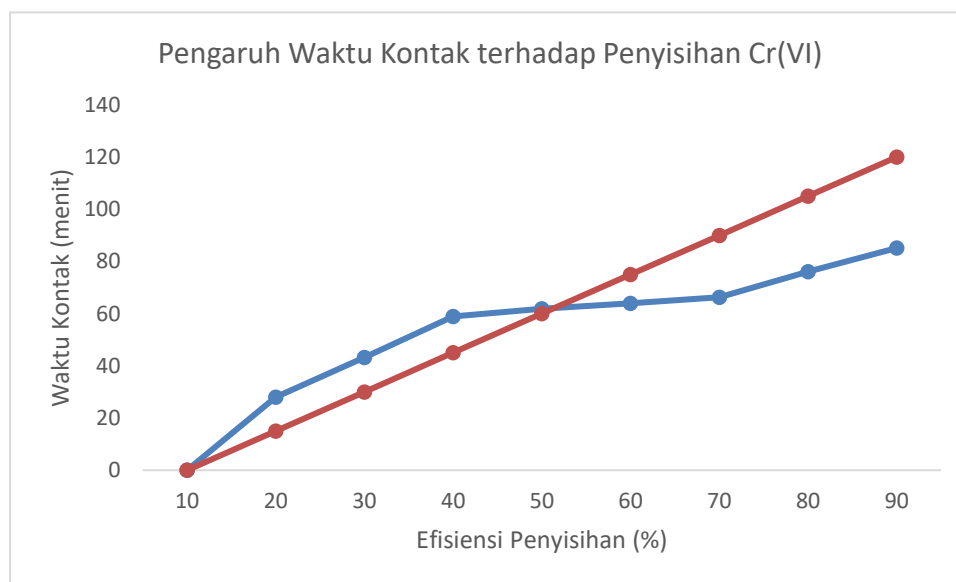
Selain itu, partikel yang lebih kecil memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang lebih besar, sehingga meningkatkan kemungkinan kontak antara adsorben dan adsorbat pada tahap difusi film eksternal (external mass transfer) (40). Dengan berkurangnya hambatan difusi baik pada lapisan batas (film diffusion) maupun di dalam partikel (intraparticle diffusion), laju perpindahan massa Cr(VI) menuju situs aktif menjadi lebih cepat, sehingga efisiensi adsorpsi meningkat (41).

Meskipun penelitian ini belum mencakup analisis kuantitatif luas permukaan spesifik, kecenderungan peningkatan efisiensi pada ukuran partikel yang lebih kecil sejalan dengan teori perpindahan massa dan mekanisme difusi dalam sistem adsorpsi heterogen.

3.4 Pengaruh Waktu Kontak

Pengujian waktu kontak dilakukan pada pH 5 untuk mengevaluasi kinerja adsorben pada kondisi larutan yang lebih asam dibandingkan pH optimum. Efisiensi penyisihan Cr(VI) meningkat seiring bertambahnya waktu kontak dan mencapai kondisi mendekati kesetimbangan pada rentang 60–100 menit. Berdasarkan hasil tersebut, waktu kontak optimum ditetapkan pada 60 menit, karena setelah waktu tersebut peningkatan efisiensi relatif kecil dan sistem cenderung mencapai kondisi stabil.

Peningkatan efisiensi pada tahap awal menunjukkan dominasi proses perpindahan massa eksternal dan ketersediaan situs aktif yang masih tinggi, sedangkan kecenderungan mendatar pada waktu kontak lebih lama mengindikasikan tercapainya kesetimbangan adsorpsi (42,43). Namun demikian, penelitian ini tidak mencakup pemodelan kinetika secara kuantitatif menggunakan model kinetika seperti pseudo-orde satu atau pseudo-orde dua. Oleh karena itu, interpretasi mekanisme laju adsorpsi dalam penelitian ini masih bersifat deskriptif berdasarkan tren perubahan konsentrasi terhadap waktu. Analisis kinetika yang lebih mendalam diperlukan pada penelitian selanjutnya untuk mengidentifikasi mekanisme laju adsorpsi secara lebih komprehensif.

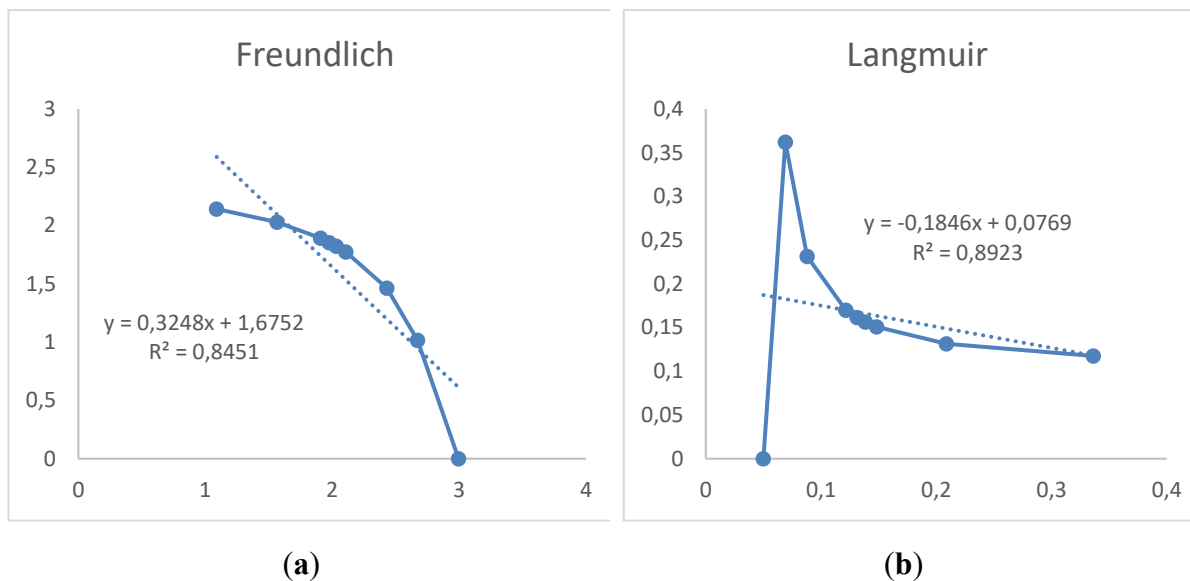


Gambar 3. Pengaruh waktu kontak terhadap persentase penyisihan Cr(VI) menggunakan karbon aktif jerami padi pada pH 5 dan ukuran partikel 100 mesh.

3.5 Isoterm Adsorpsi

Analisis isoterm adsorpsi menunjukkan bahwa data kesetimbangan Cr(VI) lebih sesuai dengan model isoterm Langmuir dibandingkan dengan model Freundlich. Berdasarkan persamaan linear Langmuir, diperoleh kapasitas adsorpsi maksimum (q_m) sebesar 5,42 mg/g dan konstanta Langmuir (K_L) sebesar 2,40 L/mg dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8923. Nilai q_m menunjukkan kemampuan maksimum permukaan karbon aktif dalam mengadsorpsi Cr(VI) pada kondisi monolapis, sedangkan nilai K_L menggambarkan afinitas interaksi antara adsorben dan ion Cr(VI). Nilai K_L yang relatif tinggi mengindikasikan adanya interaksi adsorpsi yang cukup kuat antara permukaan karbon aktif jerami padi dan spesies Cr(VI) di dalam larutan.

Kesesuaian data dengan model Langmuir mengindikasikan bahwa proses adsorpsi cenderung berlangsung secara monolapis pada situs aktif yang relatif homogen. Meskipun demikian, nilai R^2 yang belum mendekati satu secara sempurna menunjukkan bahwa heterogenitas permukaan karbon aktif berbasis biomassa masih dapat mempengaruhi mekanisme adsorpsi yang terjadi.



Gambar 4. Model isoterm adsorpsi Cr(VI) menggunakan karbon aktif jerami padi: (a) isoterm Freundlich dan (b) isoterm Langmuir.

4. Pembahasan

4.1 Karakteristik Karbon Aktif dan Peran Aktivasi H_2SO_4

Nilai kadar air (8,15%) dan kadar abu (9,45%) yang relatif rendah menunjukkan bahwa proses karbonisasi dan aktivasi kimia menggunakan H_2SO_4 berlangsung secara efektif dalam

meningkatkan kualitas karbon aktif jerami padi (33,34). Kadar air yang rendah berkontribusi terhadap stabilitas struktur karbon dan meminimalkan gangguan difusi adsorbat akibat kelembapan, sedangkan kadar abu yang masih dalam batas standar menunjukkan bahwa kandungan mineral anorganik tidak berlebihan sehingga tidak menutupi situs aktif adsorpsi (44,45).

Aktivasi menggunakan H_2SO_4 berperan dalam modifikasi struktur permukaan karbon melalui pembentukan pori serta introduksi gugus fungsi oksigen seperti $-OH$, $C=O$, dan $C-O$, sebagaimana teridentifikasi pada spektrum FTIR (35,46). Gugus fungsi tersebut berkontribusi terhadap peningkatan afinitas adsorben terhadap ion $Cr(VI)$ melalui interaksi elektrostatis maupun kemungkinan pembentukan ikatan kompleks (47–49). Dengan demikian, peningkatan kinerja adsorpsi tidak hanya dipengaruhi oleh struktur fisik karbon, tetapi juga oleh sifat kimia permukaan hasil aktivasi.

4.2 Pengaruh pH terhadap Mekanisme Adsorpsi $Cr(VI)$

pH larutan mempengaruhi baik muatan permukaan adsorben maupun spesiasi $Cr(VI)$ dalam larutan. Pada pH asam hingga netral ringan, $Cr(VI)$ umumnya berada dalam bentuk $HCrO_4^-$ dan sebagian $Cr_2O_7^{2-}$, sedangkan pada kondisi netral hingga basa spesies dominan berubah menjadi CrO_4^{2-} . Perubahan spesiasi ini mempengaruhi interaksi elektrostatis antara adsorbat dan permukaan karbon aktif.

Pada pH 7, kondisi muatan permukaan karbon aktif dan spesies $Cr(VI)$ berada pada keadaan yang paling mendukung terjadinya interaksi adsorptif, sehingga efisiensi penyisihan menjadi maksimum. Pada kondisi asam, konsentrasi ion H^+ yang tinggi dapat bersaing dengan anion $Cr(VI)$ dalam menempati situs aktif. Sementara itu, pada kondisi basa, dominasi spesies CrO_4^{2-} yang bermuatan dua negatif serta kemungkinan peningkatan muatan negatif permukaan karbon dapat meningkatkan gaya tolak elektrostatis, sehingga menurunkan efisiensi adsorpsi (50,51). Dengan demikian, pengaruh pH terhadap adsorpsi tidak hanya bersifat empiris, tetapi berkaitan erat dengan keseimbangan spesiasi dan karakteristik permukaan adsorben.

4.3 Pengaruh Ukuran Partikel dan Waktu Kontak

Ukuran partikel adsorben berpengaruh terhadap proses perpindahan massa dalam sistem adsorpsi. Ukuran partikel 100 mesh menunjukkan efisiensi tertinggi karena ukuran yang lebih kecil mengurangi panjang lintasan difusi internal (intraparticle diffusion) dan memperbesar rasio luas permukaan terhadap volume partikel (52,53). Penurunan hambatan difusi ini memungkinkan ion $Cr(VI)$ mencapai situs aktif dengan lebih cepat dan efisien.

Seiring bertambahnya waktu kontak, efisiensi adsorpsi meningkat hingga mencapai kondisi mendekati kesetimbangan. Pada tahap awal, laju adsorpsi relatif tinggi akibat dominasi difusi film eksternal dan ketersediaan situs aktif yang masih banyak. Ketika waktu kontak bertambah, jumlah situs aktif yang tersedia berkurang sehingga laju adsorpsi menurun dan sistem mencapai kondisi hampir setimbang. Meskipun tren ini konsisten dengan teori kinetika adsorpsi, penelitian ini belum mencakup pemodelan kinetika kuantitatif sehingga mekanisme laju adsorpsi belum dapat ditentukan secara matematis. (54–56).

4.4 Mekanisme Adsorpsi Berdasarkan Isoterm Langmuir

Hasil analisis isoterm menunjukkan bahwa model Langmuir memberikan kecocokan yang lebih baik dibandingkan model Freundlich, dengan kapasitas adsorpsi maksimum (q_m) sebesar 5,42 mg/g dan konstanta Langmuir (K_L) sebesar 2,40 L/mg. Nilai K_L yang relatif tinggi menunjukkan adanya afinitas yang cukup kuat antara permukaan karbon aktif dan ion Cr(VI), yang kemungkinan didukung oleh interaksi elektrostatik serta kontribusi gugus fungsi oksigen hasil aktivasi asam.

Kesesuaian data dengan model Langmuir mengindikasikan bahwa adsorpsi cenderung berlangsung secara monolapis pada situs aktif yang relatif seragam. Namun demikian, nilai koefisien determinasi ($R^2 = 0,8923$) yang belum mendekati satu secara sempurna menunjukkan bahwa permukaan karbon aktif berbasis biomassa masih memiliki heterogenitas energi adsorpsi. Hal ini wajar mengingat struktur karbon aktif dari biomassa umumnya tidak sepenuhnya homogen, sehingga kemungkinan terdapat kombinasi mekanisme adsorpsi fisik dan kimia yang terjadi secara simultan.

4.5 Implikasi dan Arah Penelitian Selanjutnya

Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa karbon aktif berbasis jerami padi teraktivasi H_2SO_4 memiliki potensi sebagai adsorben alternatif yang ekonomis dan ramah lingkungan untuk penyisihan Cr(VI). Namun demikian, karakterisasi struktur pori dan analisis kinetika yang lebih mendalam masih diperlukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme adsorpsi. Penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada evaluasi luas permukaan spesifik, distribusi ukuran pori, studi regenerasi adsorben, serta pengujian pada sistem kontinu atau limbah nyata untuk mendukung aplikasi skala industri.

5. Kesimpulan

Karbon aktif berbasis jerami padi yang diaktivasi menggunakan H_2SO_4 berhasil disintesis dan menunjukkan kemampuan adsorptif yang baik terhadap Cr(VI) dalam sistem batch. Karakteristik mutu dasar yang memenuhi standar serta kecenderungan kesesuaian dengan model Langmuir menunjukkan bahwa material ini memiliki situs aktif yang efektif untuk proses adsorpsi anion logam berat. Secara praktis, hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa jerami padi, sebagai limbah pertanian yang melimpah, berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku adsorben berbiaya rendah untuk pengolahan limbah cair yang mengandung Cr(VI), khususnya pada skala industri kecil hingga menengah atau sistem pengolahan terdesentralisasi. Pemanfaatan biomassa lokal ini juga mendukung prinsip ekonomi sirkular dan pengelolaan limbah berbasis sumber daya terbarukan. Meskipun demikian, penelitian lanjutan masih diperlukan untuk mengevaluasi karakteristik porositas secara kuantitatif, menganalisis kinetika adsorpsi secara lebih mendalam, serta menguji kinerja adsorben pada limbah nyata dan sistem kontinu. Studi mengenai regenerasi dan stabilitas adsorben dalam siklus penggunaan berulang juga penting untuk menilai kelayakan aplikasinya pada skala yang lebih besar.

Daftar Pustaka

1. Adnan M, Xiao B, Ali MU, Xiao P, Zhao P, Wang H, et al. Heavy metals pollution from smelting activities: A threat to soil and groundwater. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Academic Press; 2024. doi:10.1016/j.ecoenv.2024.116189 PubMed PMID: 38461579.
2. Sharma P, Singh SP, Parakh SK, Tong YW. Health hazards of hexavalent chromium (Cr (VI)) and its microbial reduction. *Bioengineered*. Taylor and Francis Ltd.; 2022. p. 4923–38. doi:10.1080/21655979.2022.2037273 PubMed PMID: 35164635.
3. Wise JP, Young JL, Cai J, Cai L. Current understanding of hexavalent chromium [Cr(VI)] neurotoxicity and new perspectives. *Environment International*. Elsevier Ltd; 2022. doi:10.1016/j.envint.2021.106877 PubMed PMID: 34547640.
4. Xie S. Water contamination due to hexavalent chromium and its health impacts: exploring green technology for Cr (VI) remediation. *Green Chemistry Letters and Reviews*. Taylor and Francis Ltd.; 2024. doi:10.1080/17518253.2024.2356614
5. Lingkungan JT, Teknologi F, Yogyakarta V, Dora Jati E, Murti H, Susilo B, et al. Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumihan SATU BUMI Analisis Kadar Logam Berat Kromium (Cr) dalam Air dan Ikan Akibat Pembuangan Limbah Industri Penyamakan Kulit di Sungai Opak, Piyungan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta Universitas Pelita Bangsa 2). Report.

6. Aminatun T, Rakhmawati A, Budiasih KS, Marfuatun M, Rijal BS, Amin AN, et al. Identifikasi Logam Berat Kromium di Tiga Sungai yang Melintasi Kota Yogyakarta dan Potensi Fitoremediasinya. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 2024 Mar 28;22(3):620–31. doi:10.14710/jil.22.3.620-631
7. Prasad S, Yadav KK, Kumar S, Gupta N, Cabral-Pinto MMS, Rezanía S, et al. Chromium contamination and effect on environmental health and its remediation: A sustainable approaches. *Journal of Environmental Management*. Academic Press; 2021. doi:10.1016/j.jenvman.2021.112174 PubMed PMID: 33607566.
8. FactSheet Controlling Hexavalent Chromium Exposures during Electroplating [Internet]. Report. Available from: www.osha.gov.
9. Khater DZ, Amin RS, Fetohi AE, Mahmoud M, El-Khatib KM. Insights on hexavalent chromium(VI) remediation strategies in abiotic and biotic dual chamber microbial fuel cells: electrochemical, physical, and metagenomics characterizations. *Sci Rep*. 2023 Dec 1;13(1). doi:10.1038/s41598-023-47450-9 PubMed PMID: 37978236.
10. Zhigalenok Y, Tazhibayeva A, Kokhmetova S, Starodubtseva A, Kan T, Isbergenova D, et al. Hexavalent chromium at the crossroads of science, environment and public health. *RSC Advances*. Royal Society of Chemistry; 2025. p. 21439–64. doi:10.1039/d5ra03104d
11. Prasad S, Yadav KK, Kumar S, Gupta N, Cabral-Pinto MMS, Rezanía S, et al. Chromium contamination and effect on environmental health and its remediation: A sustainable approaches. *Journal of Environmental Management*. Academic Press; 2021. doi:10.1016/j.jenvman.2021.112174 PubMed PMID: 33607566.
12. Ramli NN, Kurniawan SB, Ighalo JO, Mohd Said NS, Marsidi N, Buhari J, et al. A review of the treatment technologies for hexavalent chromium contaminated water. *BioMetals*. Springer Science and Business Media B.V.; 2023. p. 1189–219. doi:10.1007/s10534-023-00512-x PubMed PMID: 37209220.
13. Kumar M, Choudhary SK. Removal of Hexavalent Chromium From Waste Water-A Review. *NeuroQuantology*. 2021;19(2):266–71. doi:10.48047/nq.2021.19.2.NQ21045
14. Ali A, Alharthi S, Al-Shaalán NH, Naz A, Fan HJS. Efficient Removal of Hexavalent Chromium (Cr(VI)) from Wastewater Using Amide-Modified Biochar. *Molecules*. 2023 Jul 1;28(13). doi:10.3390/molecules28135146
15. Bayuo J. An extensive review on chromium (vi) removal using natural and agricultural wastes materials as alternative biosorbents [Internet]. 2021. doi:10.1007/s40201-021-00641-w/Published
16. More PR, Jambrak AR, Arya SS. Green, environment-friendly and sustainable techniques for extraction of food bioactive compounds and waste valorization. *Trends*

- in Food Science and Technology. Elsevier Ltd; 2022. p. 296–315. doi:10.1016/j.tifs.2022.08.016
17. Devi R, Kumar V, Kumar S, Bulla M, Jatrana A, Rani R, et al. Recent advancement in biomass-derived activated carbon for waste water treatment, energy storage, and gas purification: a review. *Journal of Materials Science*. Springer; 2023. p. 12119–42. doi:10.1007/s10853-023-08773-0
 18. Goodman BA. Utilization of waste straw and husks from rice production: A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. KeAi Communications Co.; 2020. p. 143–62. doi:10.1016/j.jobab.2020.07.001
 19. Kumar Sarangi P, Subudhi S, Bhatia L, Saha K, Mudgil D, Prasad Shadangi K, et al. Utilization of agricultural waste biomass and recycling toward circular bioeconomy. *Environmental Science and Pollution Research*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2023. p. 8526–39. doi:10.1007/s11356-022-20669-1 PubMed PMID: 35554831.
 20. Karapınar HS. Adsorption performance of activated carbon synthesis by ZnCl₂, KOH, H₃PO₄ with different activation temperatures from mixed fruit seeds. *Environmental Technology (United Kingdom)*. 2022;43(9):1417–35. doi:10.1080/09593330.2021.1968507 PubMed PMID: 34429039.
 21. Heidarinejad Z, Dehghani MH, Heidari M, Javedan G, Ali I, Sillanpää M. Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2020. p. 393–415. doi:10.1007/s10311-019-00955-0
 22. Oginni O, Singh K, Oporto G, Dawson-Andoh B, McDonald L, Sabolsky E. Influence of one-step and two-step KOH activation on activated carbon characteristics. *Bioresour Technol Rep*. 2019 Sep 1;7. doi:10.1016/j.biteb.2019.100266
 23. Lamongan UI, Utama DK, Firda Alfiana A, Rizkita N, Lestari DI, Aminah S. Science Education and Application Journal (SEAJ) Program Studi Pendidikan IPA Adsorption of Tofu Liquid Waste Using Rice Husk Activated Carbon. *Science Education and Application Journal [Internet]*. 2025. Report. Available from: <http://jurnalpendidikan.unisla.ac.id/index.php/>
 24. Malini K, Selvakumar D, Kumar NS. Activated carbon from biomass: Preparation, factors improving basicity and surface properties for enhanced CO₂ capture capacity - A review. *Journal of CO₂ Utilization*. Elsevier Ltd; 2023. doi:10.1016/j.jcou.2022.102318
 25. Taher T, Maulana S, Mawaddah N, Munandar A, Rianjanu A, Lesbani A. Low-temperature hydrothermal carbonization of activated carbon microsphere derived from microcrystalline cellulose as carbon dioxide (CO₂) adsorbent. *Materials Today Sustainability*. 2023 Sep 1;23. doi:10.1016/j.mtsust.2023.100464

26. Yashim MM, Razali N, Saadon N, Rahman NA. EFFECT OF ACTIVATION TEMPERATURE ON PROPERTIES OF ACTIVATED CARBON PREPARED FROM OIL PALM KERNEL SHELL (OPKS) [Internet]. Vol. 11. 2016;11(10). Available from: www.arpnjournals.com
27. View of Comparative Efficiency of KOH-Activated Rice Husk Carbon in Adsorbing Pollutants from Laundry and Tofu Wastewater.
28. Demiral İ, Samdan C, Demiral H. Enrichment of the surface functional groups of activated carbon by modification method. *Surfaces and Interfaces*. 2021 Feb 1;22. doi:10.1016/j.surfin.2020.100873
29. Shahcheragh SK, Bagheri Mohagheghi MM, Shirpay A. Effect of physical and chemical activation methods on the structure, optical absorbance, band gap and urbach energy of porous activated carbon. *SN Appl Sci*. 2023 Dec 1;5(12). doi:10.1007/s42452-023-05559-6
30. Spencer W, Senanayake G, Altarawneh M, Ibana D, Nikoloski AN. Review of the effects of coal properties and activation parameters on activated carbon production and quality. *Minerals Engineering*. Elsevier Ltd; 2024. doi:10.1016/j.mineng.2024.108712
31. Ahmed HR, Kayani KF, Ealias AM, Aziz KHH. A Comprehensive Review of Forty Adsorption Isotherm Models: An In-depth Analysis of Ten Statistical Error Measures. *Water Air Soil Pollut*. 2025 Jun 1;236(6). doi:10.1007/s11270-025-07982-4
32. Al-Ghouti MA, Da'ana DA. Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier B.V.; 2020. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.122383 PubMed PMID: 32369889.
33. Karume I, Bbumba S, Tewolde S, Mukasa IZT, Ntale M. Impact of carbonization conditions and adsorbate nature on the performance of activated carbon in water treatment. *BMC Chemistry*. BioMed Central Ltd; 2023. doi:10.1186/s13065-023-01091-1
34. Lewoyehu M. Comprehensive review on synthesis and application of activated carbon from agricultural residues for the remediation of venomous pollutants in wastewater. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Elsevier B.V.; 2021. doi:10.1016/j.jaap.2021.105279
35. Ali R, Aslam Z, Shawabkeh RA, Asghar A, Hussein IA. BET, FTIR, and RAMAN characterizations of activated carbon from waste oil fly ash. *Turk J Chem*. 2020;44(2):279–95. doi:10.3906/KIM-1909-20
36. Tian Y, Yu T, Shen J, Zheng G, Li H, Zhao W. Cr release after Cr(III) and Cr(VI) enrichment from different layers of cast iron corrosion scales in drinking water distribution systems: the impact of pH, temperature, sulfate, and chloride [Internet]. doi:10.1007/s11356-021-15754-w/Published

37. Rasool A, Pertile E, Brožová K, Halfar J, Čabanová K, Malíková P, et al. Mechanistic insights and environmental ramifications of Cr(III) oxidation to Cr(VI) in soil and groundwater systems: bridging geochemical mechanisms and emerging remediation strategies. *Environmental Geochemistry and Health*. Springer; 2026. doi:10.1007/s10653-025-02901-2 PubMed PMID: 41284109.
38. Szabó M, Kalmár J, Ditrói T, Bellér G, Lente G, Simic N, et al. Equilibria and kinetics of chromium(VI) speciation in aqueous solution-a comprehensive study from pH 2 to 11. Report.
39. Vollath D, Fischer FD, Holec D. Surface energy of nanoparticles - influence of particle size and structure. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. Beilstein-Institut Zur Forderung der Chemischen Wissenschaften; 2018. p. 2265–76. doi:10.3762/bjnano.9.211
40. Valverde A, Cabrera-Codony A, Calvo-Schwarzwalder M, Myers TG. Investigating the impact of adsorbent particle size on column adsorption kinetics through a mathematical model. *Int J Heat Mass Transf*. 2024 Jan 1;218. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124724
41. Skvortsov AT, Dagdug L, Berezhkovskii AM, Macgillivray IR, Bezrukov SM. Evaluating diffusion resistance of a constriction in a membrane channel by the method of boundary homogenization. *Phys Rev E*. 2021 Jan 1;103(1). doi:10.1103/PhysRevE.103.012408 PubMed PMID: 33601596.
42. Al-Harby NF, Albahly EF, Mohamed NA. Kinetics, isotherm and thermodynamic studies for efficient adsorption of congo red dye from aqueous solution onto novel cyanoguanidine-modified chitosan adsorbent. *Polymers (Basel)*. 2021 Dec 1;13(24). doi:10.3390/polym13244446
43. Wang J, Guo X. Rethinking of the intraparticle diffusion adsorption kinetics model: Interpretation, solving methods and applications. *Chemosphere*. 2022 Dec 1;309. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.136732 PubMed PMID: 36223824.
44. Yin C, Zhang W, Jiang X, Huang Z. Effects of initial water content on microstructure and mechanical properties of lean clay soil stabilized by compound calcium-based stabilizer. *Materials*. 2018 Oct 10;11(10). doi:10.3390/ma11101933
45. Zeng Y, Wang B, Yue R, Zheng F, Gu W, Wang W, et al. Impact of initial water content on aggregate stability: a perspective based on soil internal forces. *Geoderma*. 2025 Dec 1;464. doi:10.1016/j.geoderma.2025.117640
46. Liu Y, Yin J, Wu R, Zhang H, Zhang R, Huo R, et al. Molecular engineering of pore structure/interfacial functional groups toward hard carbon anode in sodium-ion batteries. *Energy Storage Mater*. 2025 Feb 1;75. doi:10.1016/j.ensm.2025.104008

47. Heidarinejad Z, Dehghani MH, Heidari M, Javedan G, Ali I, Sillanpää M. Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2020. p. 393–415. doi:10.1007/s10311-019-00955-0
48. de Castro-Alves L, Yáñez-Vilar S, González-Gómez MA, Garcia-Acevedo P, Arnosa-Prieto Á, Piñeiro-Redondo Y, et al. Understanding adsorption mechanisms and metal ion selectivity of superparamagnetic beads with mesoporous CMK-3 carbon and commercial activated carbon. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2024 Jun 15;374. doi:10.1016/j.micromeso.2024.113159
49. Pet I, Sanad MN, Farouz M, ElFaham MM, El-Hussein A, El-sadek MSA, et al. Review: Recent Developments in the Implementation of Activated Carbon as Heavy Metal Removal Management. *Water Conservation Science and Engineering*. Springer Nature; 2024. doi:10.1007/s41101-024-00287-3
50. Avola T, Campisi S, Polito L, Arici S, Ferruti L, Gervasini A. Addressing the issue of surface mechanisms and competitive effects in Cr(VI) reductive-adsorption on tin-hydroxyapatite in the presence of co-ions. *Sci Rep*. 2023 Dec 1;13(1). doi:10.1038/s41598-023-44852-7 PubMed PMID: 37919363.
51. Bayuo J. An extensive review on chromium (vi) removal using natural and agricultural wastes materials as alternative biosorbents [Internet]. 2021. doi:10.1007/s40201-021-00641-w/Published
52. Suresh Kumar P, Korving L, Keesman KJ, van Loosdrecht MCM, Witkamp GJ. Effect of pore size distribution and particle size of porous metal oxides on phosphate adsorption capacity and kinetics. *Chemical Engineering Journal*. 2019 Feb 15;358:160–9. doi:10.1016/j.cej.2018.09.202
53. Iwuozor KO, Ighalo JO, Chizitere Emenike E, Adaobi Igwegbe C, Adeniyi AG. Do adsorbent pore size and specific surface area affect the kinetics of methyl orange aqueous phase adsorption? *J Chem Lett*. 2021;2:188–98.
54. Pellenz L, de Oliveira CRS, da Silva Júnior AH, da Silva LJS, da Silva L, Ulson de Souza AA, et al. A comprehensive guide for characterization of adsorbent materials. *Separation and Purification Technology*. Elsevier B.V.; 2023. doi:10.1016/j.seppur.2022.122435
55. Sazali NB, Chan LW, Wong TW. Nano-enabled agglomerates and compact: Design aspects of challenges. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*. Shenyang Pharmaceutical University; 2023. doi:10.1016/j.ajps.2023.100794
56. Castells B, Tascón A, Amez I, Fernandez-Anez N. Influence of Particle Size on the Flammability and Explosibility of Biomass Dusts: Is a New Approach Needed? *Fire Technology*. Springer; 2023. p. 2989–3025. doi:10.1007/s10694-023-01468-7