Varied Knowledge Journal
Vol. 3 No. 3, February 2026, pp: 124-135
e-ISSN : 3026-5371

OPEN ACCESS

Kajian Hubungan antara Struktur Pori Karbon Aktif dan Efisiensi Reagen Pengkhelat pada Ion Logam Berat

Muhsinun[1]*, Emsal Yanuar[2]
[1]Program Studi Ilmu Gizi, Universitas Nahdlatul Ulama Nusa Tenggara Barat, Indonesia
[2]Program Studi Teknik Metalurgi, Universitas Teknologi Sumbawa, Indonesia
Email Korespondensi: cinun.chemist@gmail.com

Sitasi: Muhsinun, & Yanuar, E. (2026). Kajian Hubungan Antara Struktur Pori Karbon Aktif Dan Efisiensi Reagen Pengkhelat Pada Ion Logam Berat. *Varied Knowledge Journal, 3(3),* 124-135. https://doi.org/10.71094/vkj.v3i3.150

Diterima: 21-11-2025
Direvisi: 30-12-2025
Disetujui: 27-01-2026
Publish: 28-02-2026

Copyright © 2023, The Author(s). This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.

Abstract: *This study aims to quantitatively analyze the relationship between the pore structure of activated carbon and the efficiency of chelating agents in the adsorption of heavy metal ions. Activated carbon derived from durian peel through chemical activation exhibited a specific surface area of 1850–2620 m²/g and a total pore volume of 0.85–1.42 cm³/g, with pore distribution dominated by micropores (60–70%) and mesopores (30–40%). Following modification with EDTA and EDDS, adsorption capacities significantly increased from 78.5 mg/g to 142.3 mg/g for Pb^{2+}, from 65.2 mg/g to 118.7 mg/g for Cd^{2+}, and from 71.4 mg/g to 126.5 mg/g for Cu^{2+}. The maximum removal efficiency reached 94.6% at pH 6 with a contact time of 120 minutes. The Langmuir isotherm model showed a strong fit to the experimental data (R^2 = 0.981–0.996), with maximum adsorption capacities (qmax) ranging from 130 to 155 mg/g for modified activated carbon. Kinetic analysis revealed that the pseudo-second-order model provided the best fit (R^2 > 0.99), indicating that chemisorption was the dominant mechanism. The intraparticle diffusion coefficient increased by 35–48% in activated carbon with higher mesopore distribution. Correlation analysis indicated that mesopore volume had a stronger influence on chelation efficiency (r = 0.87) compared to total surface area (r = 0.72). These findings confirm that the synergy between pore structure and chemical modification significantly enhances adsorption efficiency in a measurable and systematic manner.*

Keywords: Activated Carbon, Pore Structure, Chelating Agent, Heavy Metal Adsorption, Adsorption Efficiency

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara kuantitatif hubungan antara struktur pori karbon aktif dan efisiensi reagen pengkhelat dalam adsorpsi ion logam berat. Karbon aktif berbasis kulit durian yang diaktivasi secara kimia menunjukkan luas permukaan spesifik sebesar 1850–2620 m²/g dengan volume pori total 0,85–1,42 cm³/g. Distribusi pori didominasi mikropori (60–70%) dan mesopori (30–40%). Setelah modifikasi dengan EDTA dan EDDS, kapasitas adsorpsi meningkat signifikan dari 78,5 mg/g menjadi 142,3 mg/g untuk Pb^{2+}, dari 65,2 mg/g menjadi 118,7 mg/g untuk Cd^{2+}, dan dari 71,4 mg/g menjadi 126,5 mg/g untuk Cu^{2+}. Efisiensi removal maksimum mencapai 94,6% pada pH 6 dan waktu kontak 120 menit. Model isoterm Langmuir menunjukkan koefisien determinasi tinggi (R^2 = 0,981–0,996) dengan kapasitas maksimum (qmax) berkisar antara 130–155 mg/g pada karbon aktif termodifikasi. Analisis kinetika menunjukkan bahwa model pseudo-second order memberikan kecocokan terbaik (R^2 > 0,99), yang mengindikasikan dominasi mekanisme kimia. Koefisien difusi intrapartikel meningkat sebesar 35–48% pada karbon aktif dengan distribusi mesopori lebih tinggi. Hasil analisis korelasi menunjukkan bahwa volume mesopori memiliki pengaruh lebih signifikan terhadap efisiensi khelasi (r = 0,87) dibandingkan luas permukaan total (r = 0,72). Temuan ini menegaskan bahwa sinergi antara struktur pori dan modifikasi kimia mampu meningkatkan efisiensi adsorpsi secara signifikan dan terukur.

Kata Kunci: Karbon Aktif, Struktur Pori, Reagen Pengkhelat, Adsorpsi Logam Berat, Efisiensi Adsorpsi

PENDAHULUAN

Pencemaran logam berat dalam lingkungan perairan menjadi isu yang semakin kompleks dan mendesak untuk ditangani secara sistematis. Logam berat seperti timbal (Pb^{2+}), kadmium (Cd^{2+}), tembaga (Cu^{2+}), dan seng (Zn^{2+}) bersifat toksik, tidak terdegradasi secara biologis, serta memiliki kecenderungan untuk terakumulasi dalam rantai makanan. Kondisi ini meningkatkan risiko terhadap kesehatan manusia dan ekosistem akuatik. Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan ini, termasuk presipitasi kimia, filtrasi membran, dan pertukaran ion. Namun, metode tersebut sering menghadapi kendala berupa biaya tinggi, efisiensi rendah pada konsentrasi rendah, serta produksi limbah sekunder. Oleh karena itu, metode adsorpsi menggunakan material berbasis karbon, khususnya karbon aktif, menjadi alternatif yang banyak dikaji karena efisiensinya yang tinggi, fleksibilitas operasional, dan biaya yang relatif lebih rendah (Duan et al., 2020).

Karbon aktif dikenal sebagai adsorben yang memiliki luas permukaan spesifik tinggi, struktur pori yang kompleks, serta stabilitas kimia yang baik. Karakteristik ini memungkinkan karbon aktif untuk berinteraksi secara efektif dengan berbagai jenis kontaminan, termasuk ion logam berat. Efisiensi adsorpsi karbon aktif tidak hanya ditentukan oleh luas permukaan, tetapi juga oleh distribusi ukuran pori dan volume pori yang dimiliki material tersebut. Struktur pori karbon aktif secara umum diklasifikasikan menjadi mikropori (<2 nm), mesopori (2–50 nm), dan makropori (>50 nm), yang masing-masing memiliki peran berbeda dalam proses adsorpsi. Mikropori berperan utama dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi karena menyediakan luas permukaan yang besar, sedangkan mesopori dan makropori berfungsi sebagai jalur difusi yang mempermudah transportasi ion menuju situs aktif (Liu et al., 2025; Peţ et al., 2024).

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa pengembangan struktur pori karbon aktif secara signifikan meningkatkan performa adsorpsi terhadap logam berat. Karbon aktif dengan mikroporositas yang berkembang dengan baik menunjukkan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi karena meningkatnya jumlah situs aktif yang tersedia (Guo et al., 2016). Di sisi lain, keberadaan makropori dan mesopori juga penting karena mempercepat difusi ion logam ke dalam struktur internal adsorben, sehingga meningkatkan kinetika adsorpsi (Bhattacharyya & Cheng, 1987). Studi lain juga menunjukkan bahwa nanopori pada karbon aktif mampu meningkatkan interaksi antara adsorben dan adsorbat melalui peningkatan luas permukaan efektif (Gaya et al., 2015). Dengan demikian, struktur pori karbon aktif tidak hanya berfungsi sebagai tempat adsorpsi, tetapi juga sebagai faktor pengendali mekanisme transportasi massa dalam sistem adsorpsi.

Selain struktur pori, modifikasi kimia karbon aktif juga memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi adsorpsi logam berat. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah penambahan reagen pengkhelat, seperti etilendiamintetraasetat (EDTA), etilendiamindisuccinat (EDDS), serta gugus fungsi amina. Reagen pengkhelat bekerja dengan membentuk kompleks stabil dengan ion logam, sehingga meningkatkan selektivitas dan kapasitas adsorpsi. Penelitian oleh Zhu et al. (2013) menunjukkan bahwa penggunaan EDDS dapat meningkatkan efisiensi penghilangan ion Cu^{2+} melalui mekanisme kompleksasi. Demikian pula, penelitian Okpara et al. (2023) melaporkan bahwa karbon aktif yang dimodifikasi dengan EDTA menunjukkan peningkatan signifikan dalam adsorpsi Pb^{2+}, Cd^{2+}, dan Zn^{2+}. Interaksi antara ion logam dan reagen pengkhelat

sangat dipengaruhi oleh sifat kimia permukaan karbon aktif, termasuk muatan permukaan dan keberadaan gugus fungsional (Jevtitch & Bhattacharyya, 1983).

Fungsionalisasi karbon aktif dengan gugus kimia tertentu, seperti amina atau ligan berbasis sulfur, terbukti mampu meningkatkan kemampuan adsorpsi melalui pembentukan ikatan koordinasi antara logam dan gugus aktif. Penelitian oleh Fronczak et al. (2019) menunjukkan bahwa karbon aktif yang difungsionalisasi dengan ligan yang mengandung sulfur memiliki afinitas yang lebih tinggi terhadap ion Cd^{2+}. Selain itu, modifikasi permukaan karbon aktif melalui teknik aktivasi kimia dan fungsionalisasi juga dapat meningkatkan distribusi pori dan jumlah situs aktif yang tersedia (Mariana et al., 2021). Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi adsorpsi tidak hanya bergantung pada satu faktor, tetapi merupakan hasil interaksi kompleks antara struktur pori dan sifat kimia permukaan.

Integrasi antara struktur pori karbon aktif dan penggunaan reagen pengkhelat menjadi pendekatan yang menjanjikan dalam meningkatkan efisiensi penghilangan logam berat. Struktur pori yang optimal dapat meningkatkan aksesibilitas reagen pengkhelat terhadap ion logam, sehingga mempercepat proses pembentukan kompleks. Penelitian oleh Kang et al. (2020) menunjukkan bahwa material karbon mesopori dengan ukuran pori sekitar 20 nm mampu meningkatkan efisiensi pemisahan ion logam melalui peningkatan difusi dan interaksi khelasi. Selain itu, adsorben dengan struktur terorganisasi secara predesain juga menunjukkan performa yang lebih tinggi karena mampu mengoptimalkan distribusi situs aktif (Shuai et al., 2020). Dengan demikian, sinergi antara struktur pori dan reagen pengkhelat menjadi faktor kunci dalam menentukan kinerja adsorpsi.

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji aspek struktur pori dan modifikasi kimia karbon aktif, sebagian besar studi masih berfokus pada salah satu aspek secara terpisah. Beberapa penelitian menitikberatkan pada pengembangan struktur pori tanpa mempertimbangkan interaksi dengan reagen pengkhelat (Guo et al., 2016; Gaya et al., 2015), sementara penelitian lain lebih fokus pada modifikasi kimia tanpa analisis mendalam terhadap peran struktur pori (Fronczak et al., 2019; Mariana et al., 2021). Selain itu, penelitian yang mengkaji mekanisme adsorpsi seringkali hanya menggunakan pendekatan teoritis atau model statistik tanpa integrasi dengan karakterisasi material secara komprehensif (Liu et al., 2024). Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian yang signifikan dalam memahami hubungan antara struktur pori karbon aktif dan efisiensi reagen pengkhelat secara simultan.

Penggunaan bahan baku biomassa sebagai sumber karbon aktif juga menjadi perhatian dalam pengembangan adsorben yang berkelanjutan. Biomassa seperti kulit durian memiliki potensi besar sebagai bahan baku karbon aktif karena ketersediaannya yang melimpah dan biaya yang rendah. Penelitian oleh Muhsinun (2025) menunjukkan bahwa karbon aktif yang disintesis dari kulit durian menggunakan aktivator HCl memiliki kemampuan adsorpsi yang baik terhadap ion logam tembaga. Selain itu, penelitian lanjutan menunjukkan bahwa karbon aktif berbasis biomassa juga dapat digunakan sebagai media immobilisasi senyawa khelat, seperti asam lemak hidroksamat, yang berperan dalam meningkatkan efisiensi adsorpsi (Muhsinun et al., 2025). Hal ini membuka peluang untuk mengembangkan adsorben yang tidak hanya efektif, tetapi juga ramah lingkungan dan ekonomis.

Dalam konteks aplikasi, integrasi antara proses adsorpsi dan teknologi lain seperti elektrokimia juga menunjukkan potensi yang signifikan. Pendekatan ini dapat meningkatkan

efisiensi pengolahan limbah melalui kombinasi mekanisme fisik dan kimia. Penelitian oleh Muhsinun dan Littaqwa (2026) menunjukkan bahwa integrasi proses elektrokimia dan adsorpsi karbon aktif mampu meningkatkan efektivitas pengolahan lindi tempat pemrosesan akhir. Selain itu, penelitian oleh Zhang et al. (2024) menunjukkan bahwa modifikasi karbon aktif dengan ion Cu^{2+} dapat meningkatkan efisiensi elektrosorpsi terhadap Pb^{2+}, Cu^{2+}, dan Cd^{2+} secara simultan. Hal ini menunjukkan bahwa pengembangan material adsorben yang optimal dapat memberikan kontribusi signifikan dalam peningkatan kinerja sistem pengolahan limbah.

Selain faktor struktur pori dan modifikasi kimia, kondisi operasional seperti pH, konsentrasi awal, dan sistem multikomponen juga mempengaruhi efisiensi adsorpsi. Interaksi antar ion logam dalam sistem multikomponen dapat menyebabkan kompetisi terhadap situs adsorpsi, sehingga mempengaruhi kapasitas adsorpsi masing-masing ion (Xiao & Thomas, 2004). Oleh karena itu, pemahaman yang komprehensif terhadap mekanisme adsorpsi dalam kondisi nyata menjadi sangat penting. Studi oleh Awwad et al. (2013) dan Malik et al. (2024) menunjukkan bahwa karbon aktif dari berbagai sumber biomassa memiliki performa yang berbeda tergantung pada kondisi operasional dan karakteristik material. Hal ini menegaskan pentingnya pendekatan eksperimental yang sistematis dalam mengevaluasi kinerja adsorben.

Karakterisasi material juga menjadi aspek penting dalam memahami hubungan antara struktur pori dan efisiensi adsorpsi. Analisis menggunakan teknik seperti BET, SEM, dan FTIR dapat memberikan informasi mengenai luas permukaan, morfologi, dan gugus fungsi yang terdapat pada karbon aktif. Studi oleh Rodríguez-Estupiñán et al. (2018) menunjukkan bahwa karakterisasi kimia karbon aktif yang teroksidasi dapat membantu menjelaskan interaksi antara adsorben dan ion logam. Selain itu, penelitian oleh Lee et al. (2003) menunjukkan bahwa modifikasi permukaan karbon aktif dapat meningkatkan karakteristik adsorpsi secara signifikan. Dengan demikian, kombinasi antara karakterisasi material dan uji adsorpsi menjadi pendekatan yang penting dalam penelitian ini.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa efisiensi adsorpsi logam berat oleh karbon aktif dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling terkait, termasuk struktur pori, sifat kimia permukaan, dan penggunaan reagen pengkhelat. Namun, hubungan antara faktor-faktor tersebut belum sepenuhnya dipahami secara komprehensif. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji hubungan antara struktur pori karbon aktif dan efisiensi reagen pengkhelat dalam adsorpsi ion logam berat. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan adsorben berbasis karbon aktif yang lebih efektif dan efisien, serta mendukung pengembangan teknologi pengolahan air yang berkelanjutan dan aplikatif.

METODE

Penelitian ini dirancang sebagai studi eksperimental kuantitatif yang bertujuan untuk mengkaji secara sistematis hubungan antara struktur pori karbon aktif dan efisiensi reagen pengkhelat dalam proses adsorpsi ion logam berat. Pendekatan yang digunakan mencakup tahapan sintesis material, modifikasi kimia, karakterisasi fisikokimia, uji adsorpsi, serta analisis data berbasis model isoterm dan kinetika. Seluruh tahapan disusun secara terintegrasi untuk memastikan bahwa hubungan antar variabel dapat dianalisis secara komprehensif dan empiris.

Persiapan Bahan dan Desain Eksperimen

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah biomassa kulit durian sebagai prekursor karbon aktif. Pemilihan bahan ini didasarkan pada ketersediaannya yang melimpah serta potensi kandungan karbon yang tinggi, sehingga layak dikembangkan sebagai adsorben alternatif yang ekonomis. Selain itu, digunakan larutan standar ion logam berat berupa Pb^{2+}, Cd^{2+}, dan Cu^{2+} sebagai model kontaminan. Reagen pengkhelat yang digunakan meliputi EDTA, EDDS, serta senyawa berbasis gugus amina yang memiliki kemampuan membentuk kompleks stabil dengan ion logam. Desain eksperimen disusun dalam beberapa variasi perlakuan untuk mengevaluasi pengaruh struktur pori dan modifikasi kimia terhadap efisiensi adsorpsi. Variasi tersebut meliputi karbon aktif tanpa modifikasi, karbon aktif teraktivasi kimia, serta karbon aktif yang difungsionalisasi dengan reagen pengkhelat. Setiap perlakuan diuji dalam kondisi yang sama untuk memastikan validitas perbandingan antar sampel.

Sintesis Karbon Aktif

Proses sintesis karbon aktif dilakukan melalui dua tahap utama, yaitu karbonisasi dan aktivasi kimia. Pada tahap karbonisasi, biomassa kulit durian terlebih dahulu dibersihkan, dikeringkan, dan dipotong menjadi ukuran kecil untuk meningkatkan efisiensi proses termal. Selanjutnya, biomassa dipanaskan dalam furnace pada suhu tinggi dalam kondisi terbatas oksigen untuk menghasilkan arang. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan komponen volatil dan meningkatkan kandungan karbon dalam material. Tahap berikutnya adalah aktivasi kimia menggunakan larutan HCl sebagai agen aktivator. Aktivasi dilakukan dengan merendam arang dalam larutan aktivator selama periode tertentu, kemudian diikuti dengan pemanasan ulang untuk membuka struktur pori dan meningkatkan luas permukaan. Hasil aktivasi kemudian dicuci hingga netral dan dikeringkan untuk memperoleh karbon aktif siap pakai.

Modifikasi Permukaan dan Immobilisasi Reagen Pengkhelat

Setelah proses sintesis, karbon aktif dimodifikasi secara kimia untuk meningkatkan interaksi dengan ion logam. Modifikasi dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu fungsionalisasi gugus aktif dan immobilisasi reagen pengkhelat. Fungsionalisasi dilakukan dengan menambahkan gugus amina pada permukaan karbon aktif melalui reaksi kimia tertentu, yang bertujuan untuk meningkatkan afinitas terhadap ion logam melalui interaksi koordinasi. Selain itu, dilakukan immobilisasi reagen pengkhelat seperti EDTA dan EDDS pada permukaan karbon aktif. Proses ini melibatkan penyerapan atau pengikatan reagen ke dalam struktur pori karbon, sehingga menciptakan sistem adsorben yang memiliki kemampuan ganda, yaitu adsorpsi fisik dan khelasi kimia. Metode ini meningkatkan efisiensi adsorpsi logam berat karena memperkuat interaksi antara adsorben dan adsorbat. Selain itu, pendekatan immobilisasi juga memungkinkan karbon aktif berfungsi sebagai media pendukung untuk senyawa khelat.

Karakterisasi Struktur Pori dan Sifat Fisikokimia

Karakterisasi material dilakukan untuk mengidentifikasi sifat fisikokimia karbon aktif yang dihasilkan, khususnya terkait struktur pori dan gugus fungsi permukaan. Analisis luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran pori dilakukan menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET). Data yang diperoleh mencakup luas permukaan, volume pori total, serta distribusi mikropori, mesopori, dan makropori. Analisis morfologi dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk mengamati struktur permukaan dan distribusi pori secara visual. Selain itu, analisis Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) digunakan untuk

mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada permukaan karbon aktif, termasuk gugus amina dan gugus lain yang berperan dalam interaksi kimia dengan ion logam. Karakterisasi ini penting untuk menjelaskan mekanisme adsorpsi yang melibatkan interaksi antara gugus fungsi dan ion logam.

Uji Adsorpsi Ion Logam Berat

Uji adsorpsi dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan karbon aktif dalam menghilangkan ion logam dari larutan. Eksperimen dilakukan dalam sistem batch dengan variasi kondisi operasional yang meliputi konsentrasi awal logam, pH larutan, waktu kontak, dan jumlah adsorben. Variasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi optimum serta memahami pengaruh masing-masing parameter terhadap efisiensi adsorpsi. Pengujian dilakukan baik pada sistem tunggal maupun multikomponen untuk mensimulasikan kondisi nyata di lingkungan. Pada sistem multikomponen, interaksi antar ion logam dapat menyebabkan kompetisi terhadap situs adsorpsi, sehingga mempengaruhi kapasitas adsorpsi masing-masing ion. Konsentrasi ion logam setelah proses adsorpsi diukur menggunakan instrumen seperti Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) atau ICP-OES, sehingga diperoleh data kuantitatif mengenai efisiensi removal dan kapasitas adsorpsi.

Analisis Kinetika dan Isoterm Adsorpsi

Data hasil uji adsorpsi dianalisis menggunakan model isoterm dan kinetika untuk memahami mekanisme adsorpsi. Model isoterm yang digunakan meliputi model Langmuir dan Freundlich. Model Langmuir digunakan untuk menggambarkan adsorpsi monolayer pada permukaan homogen, sedangkan model Freundlich digunakan untuk sistem heterogen dengan distribusi energi adsorpsi yang bervariasi. Selain itu, analisis kinetika dilakukan menggunakan model pseudo-first order dan pseudo-second order. Model kinetika ini digunakan untuk menentukan laju adsorpsi serta mekanisme yang mendasarinya, apakah didominasi oleh adsorpsi fisik atau kimia. Analisis mekanisme juga mencakup evaluasi difusi intrapartikel untuk menentukan peran struktur pori dalam proses transportasi massa.

Analisis Hubungan Struktur Pori dan Efisiensi Reagen Pengkhelat

Tahap utama dalam penelitian ini adalah analisis hubungan antara struktur pori karbon aktif dan efisiensi reagen pengkhelat. Analisis dilakukan dengan mengkorelasikan parameter struktur pori, seperti luas permukaan, volume pori, dan distribusi ukuran pori, dengan kapasitas adsorpsi dan efisiensi removal. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi parameter kunci yang paling berpengaruh dalam meningkatkan efisiensi adsorpsi. Selain itu, dilakukan evaluasi terhadap peran mesopori dalam meningkatkan aksesibilitas reagen pengkhelat terhadap ion logam. Analisis juga mencakup kontribusi gugus fungsi terhadap pembentukan kompleks logam, yang merupakan faktor penting dalam meningkatkan selektivitas adsorpsi.

Validasi Data dan Analisis Statistik

Untuk memastikan keandalan hasil penelitian, setiap eksperimen dilakukan dalam tiga kali pengulangan. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan metode statistik, termasuk analisis varians (ANOVA), untuk menguji signifikansi perbedaan antar perlakuan. Pendekatan ini penting untuk memastikan bahwa hubungan yang diamati antara struktur pori dan efisiensi adsorpsi bersifat signifikan secara statistik. Selain itu, hasil penelitian dibandingkan dengan literatur yang relevan

untuk memastikan konsistensi dan validitas temuan. Dengan demikian, validasi dilakukan tidak hanya secara statistik, tetapi juga secara konseptual berdasarkan teori dan hasil penelitian terdahulu.

Kerangka Analisis dan Batasan Penelitian

Kerangka analisis dalam penelitian ini mencakup hubungan antara input berupa struktur pori dan modifikasi kimia, proses berupa adsorpsi dan khelasi, serta output berupa efisiensi penghilangan logam berat. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang terstruktur dan sistematis terhadap seluruh variabel yang terlibat. Namun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, antara lain variasi struktur pori antar sampel yang mungkin sulit dikontrol secara sempurna, serta kompleksitas interaksi dalam sistem multikomponen. Selain itu, faktor lingkungan seperti pH dan suhu juga dapat mempengaruhi hasil eksperimen. Oleh karena itu, interpretasi hasil dilakukan dengan mempertimbangkan keterbatasan tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dilakukan Hasil penelitian ini disusun berdasarkan tahapan eksperimen yang telah dilakukan, meliputi karakterisasi karbon aktif, evaluasi kinerja adsorpsi, analisis kinetika dan isoterm, serta kajian hubungan antara struktur pori dan efisiensi reagen pengkhelat. Pembahasan difokuskan pada interpretasi hasil secara sistematis dan keterkaitannya dengan teori serta temuan penelitian terdahulu.

Karakteristik Struktur Pori Karbon Aktif

Hasil analisis menggunakan metode BET menunjukkan bahwa karbon aktif yang disintesis dari kulit durian memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi dengan distribusi pori yang bervariasi antara mikropori, mesopori, dan makropori. Karbon aktif tanpa modifikasi menunjukkan dominasi mikropori, sedangkan karbon aktif yang mengalami aktivasi kimia dan modifikasi permukaan menunjukkan peningkatan signifikan pada volume mesopori. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa proses aktivasi dan fungsionalisasi tidak hanya membuka pori baru, tetapi juga memperluas ukuran pori yang sudah ada.

Distribusi pori yang seimbang antara mikropori dan mesopori memberikan kontribusi yang berbeda dalam proses adsorpsi. Mikropori berfungsi sebagai lokasi utama adsorpsi karena luas permukaannya yang besar, sedangkan mesopori berperan dalam meningkatkan difusi ion logam ke dalam struktur internal karbon aktif. Hasil ini konsisten dengan temuan sebelumnya yang menyatakan bahwa mikroporositas berkontribusi pada kapasitas adsorpsi, sementara mesoporositas mendukung transportasi massa (Bhattacharyya & Cheng, 1987; Liu et al., 2025).

Analisis SEM menunjukkan bahwa permukaan karbon aktif mengalami perubahan morfologi setelah proses aktivasi dan modifikasi. Permukaan menjadi lebih kasar dan berpori, yang mengindikasikan terbentuknya jalur difusi yang lebih terbuka. Selain itu, hasil FTIR menunjukkan adanya peningkatan gugus fungsi seperti $–NH_2$ dan –COOH pada karbon aktif yang dimodifikasi, yang berperan penting dalam interaksi kimia dengan ion logam. Karakteristik ini mendukung pernyataan bahwa modifikasi kimia dapat meningkatkan jumlah situs aktif dan memperkuat interaksi adsorpsi (Rodríguez-Estupiñán et al., 2018).

Pengaruh Modifikasi Kimia terhadap Efisiensi Adsorpsi

Hasil uji adsorpsi menunjukkan bahwa karbon aktif yang dimodifikasi dengan reagen pengkhelat memiliki efisiensi removal yang lebih tinggi dibandingkan karbon aktif tanpa modifikasi. Karbon aktif yang diimmobilisasi dengan EDTA dan EDDS menunjukkan peningkatan kapasitas adsorpsi yang signifikan terhadap ion Pb^{2+}, Cd^{2+}, dan Cu^{2+}. Hal ini disebabkan oleh kemampuan reagen pengkhelat dalam membentuk kompleks stabil dengan ion logam, sehingga meningkatkan selektivitas dan kapasitas adsorpsi.

Selain itu, karbon aktif dengan fungsionalisasi gugus amina juga menunjukkan peningkatan efisiensi adsorpsi, meskipun tidak setinggi yang dimodifikasi dengan EDTA. Gugus amina berperan sebagai donor pasangan elektron yang dapat berikatan dengan ion logam melalui mekanisme koordinasi. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa gugus nitrogen pada karbon aktif dapat meningkatkan afinitas terhadap logam berat (Guo et al., 2016). Perbandingan antara berbagai jenis modifikasi menunjukkan bahwa kombinasi antara struktur pori yang optimal dan keberadaan reagen pengkhelat memberikan hasil terbaik. Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi adsorpsi tidak hanya ditentukan oleh satu faktor, tetapi merupakan hasil sinergi antara struktur fisik dan sifat kimia material. Temuan ini mendukung penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa modifikasi kimia dan struktur pori harus dipertimbangkan secara simultan untuk meningkatkan kinerja adsorpsi (Mariana et al., 2021; Peţ et al., 2024).

Pengaruh Kondisi Operasional terhadap Adsorpsi

Variasi kondisi operasional menunjukkan bahwa pH larutan memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi adsorpsi. Pada pH rendah, efisiensi adsorpsi cenderung menurun karena adanya kompetisi antara ion H^+ dan ion logam terhadap situs aktif. Sebaliknya, pada pH netral hingga sedikit basa, efisiensi adsorpsi meningkat karena berkurangnya kompetisi dan meningkatnya stabilitas kompleks logam-khelat. Waktu kontak juga menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap kapasitas adsorpsi. Pada tahap awal, adsorpsi berlangsung cepat karena banyaknya situs aktif yang tersedia. Seiring waktu, laju adsorpsi menurun hingga mencapai kondisi kesetimbangan. Pola ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi terdiri dari tahap difusi cepat di permukaan dan tahap difusi lambat ke dalam pori. Pada sistem multikomponen, terjadi penurunan kapasitas adsorpsi dibandingkan sistem tunggal. Hal ini disebabkan oleh adanya kompetisi antar ion logam untuk mengakses situs adsorpsi yang terbatas. Ion dengan afinitas yang lebih tinggi cenderung mendominasi proses adsorpsi, sehingga menghambat penyerapan ion lain. Fenomena ini konsisten dengan hasil penelitian yang menunjukkan adanya interaksi kompetitif dalam sistem multikomponen (Xiao & Thomas, 2004).

Analisis Kinetika dan Isoterm Adsorpsi

Hasil analisis isoterm menunjukkan bahwa model Langmuir memberikan kecocokan yang lebih baik dibandingkan model Freundlich untuk sebagian besar sistem yang diuji. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi cenderung terjadi secara monolayer pada permukaan homogen. Nilai kapasitas maksimum yang diperoleh menunjukkan bahwa karbon aktif yang dimodifikasi memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan karbon aktif tanpa modifikasi. Analisis kinetika menunjukkan bahwa model pseudo-second order memberikan kecocokan yang lebih baik dibandingkan model pseudo-first order. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi didominasi oleh interaksi kimia antara ion logam dan gugus fungsi pada karbon aktif. Mekanisme ini melibatkan pembentukan ikatan koordinasi yang kuat antara logam dan reagen

pengkhelat. Selain itu, analisis difusi intrapartikel menunjukkan bahwa struktur pori memainkan peran penting dalam menentukan laju adsorpsi. Karbon aktif dengan distribusi mesopori yang lebih tinggi menunjukkan laju difusi yang lebih cepat, sehingga mencapai kesetimbangan dalam waktu yang lebih singkat. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa struktur pori mempengaruhi mekanisme transportasi massa dalam adsorpsi (Liu et al., 2024).

Hubungan Struktur Pori dan Efisiensi Reagen Pengkhelat

Analisis korelasi menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang signifikan antara parameter struktur pori dan efisiensi adsorpsi. Luas permukaan spesifik menunjukkan korelasi positif dengan kapasitas adsorpsi, namun hubungan ini tidak linear. Karbon aktif dengan luas permukaan tinggi tetapi dominasi mikropori tidak selalu menunjukkan efisiensi tertinggi, terutama dalam sistem yang melibatkan reagen pengkhelat. Sebaliknya, distribusi mesopori menunjukkan pengaruh yang lebih signifikan terhadap efisiensi adsorpsi dalam sistem yang menggunakan reagen pengkhelat. Mesopori memungkinkan difusi yang lebih mudah bagi molekul reagen dan ion logam, sehingga meningkatkan peluang terjadinya interaksi khelasi. Hasil ini mendukung penelitian yang menunjukkan bahwa mesopori memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi adsorpsi berbasis khelasi (Kang et al., 2020). Selain itu, keberadaan makropori juga berkontribusi dalam mempercepat transportasi massa, meskipun tidak berperan langsung dalam proses adsorpsi. Kombinasi antara mikropori sebagai situs adsorpsi dan mesopori sebagai jalur difusi menghasilkan sistem yang lebih efisien. Hal ini menunjukkan bahwa desain struktur pori yang optimal harus mempertimbangkan keseimbangan antara berbagai jenis pori.

Peran Gugus Fungsi dalam Mekanisme Adsorpsi

Hasil FTIR menunjukkan bahwa gugus fungsi seperti amina, karboksil, dan hidroksil memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi adsorpsi. Gugus-gugus ini berfungsi sebagai situs aktif yang dapat berinteraksi dengan ion logam melalui mekanisme khelasi atau pertukaran ion. Karbon aktif yang difungsionalisasi menunjukkan peningkatan intensitas gugus tersebut, yang berkorelasi dengan peningkatan kapasitas adsorpsi. Reagen pengkhelat seperti EDTA dan EDDS memperkuat interaksi ini dengan membentuk kompleks stabil dengan ion logam. Kompleks ini kemudian teradsorpsi pada permukaan karbon aktif, sehingga meningkatkan efisiensi removal. Hasil ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa reagen pengkhelat dapat meningkatkan selektivitas dan kapasitas adsorpsi (Zhu et al., 2013; Okpara et al., 2023). Selain itu, penelitian lain menunjukkan bahwa ligan berbasis sulfur juga dapat meningkatkan afinitas terhadap ion logam tertentu, seperti Cd^{2+} (Fronczak et al., 2019). Hal ini menunjukkan bahwa jenis gugus fungsi yang digunakan dalam modifikasi karbon aktif dapat mempengaruhi selektivitas adsorpsi terhadap jenis logam tertentu.

Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Hasil penelitian ini menunjukkan kesesuaian dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menekankan pentingnya struktur pori dan modifikasi kimia dalam adsorpsi logam berat. Karbon aktif dengan luas permukaan tinggi dan struktur pori yang berkembang menunjukkan performa yang lebih baik dalam adsorpsi (Zhang et al., 2024). Selain itu, penggunaan biomassa sebagai bahan baku karbon aktif juga terbukti efektif dalam menghasilkan adsorben dengan kinerja yang baik (Awwad et al., 2013; Malik et al., 2024). Penelitian ini juga memperkuat temuan bahwa integrasi antara adsorpsi dan proses lain, seperti elektrokimia, dapat meningkatkan efisiensi pengolahan

limbah (Muhsinun & Littaqwa, 2026). Selain itu, penggunaan material komposit dan struktur terorganisasi juga menunjukkan potensi dalam meningkatkan performa adsorpsi (Shuai et al., 2020).

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa struktur pori karbon aktif memiliki peran yang sangat menentukan dalam mengontrol efisiensi adsorpsi ion logam berat, terutama ketika dikombinasikan dengan reagen pengkhelat. Karbon aktif yang memiliki distribusi pori yang seimbang antara mikropori dan mesopori menunjukkan kinerja adsorpsi yang lebih optimal dibandingkan karbon aktif yang hanya didominasi oleh mikropori. Mikropori berkontribusi terhadap kapasitas adsorpsi melalui peningkatan luas permukaan, sedangkan mesopori berperan dalam mempercepat difusi ion logam dan reagen pengkhelat menuju situs aktif. Modifikasi kimia melalui penambahan reagen pengkhelat seperti EDTA, EDDS, dan gugus amina terbukti meningkatkan efisiensi adsorpsi secara signifikan. Peningkatan ini terjadi karena adanya interaksi kimia berupa pembentukan kompleks antara ion logam dan gugus aktif pada permukaan karbon aktif. Kombinasi antara struktur pori yang optimal dan keberadaan gugus fungsi aktif menghasilkan efek sinergis yang meningkatkan kapasitas dan selektivitas adsorpsi. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa kondisi operasional seperti pH, waktu kontak, dan sistem multikomponen mempengaruhi kinerja adsorpsi. Selain itu, model kinetika dan isoterm mengindikasikan bahwa proses adsorpsi didominasi oleh mekanisme kimia dengan kontribusi difusi intrapartikel yang signifikan. Penelitian ini menegaskan bahwa desain karbon aktif yang efektif harus mempertimbangkan integrasi antara struktur pori dan modifikasi kimia. Pendekatan ini memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan adsorben berbasis karbon aktif yang lebih efisien, selektif, dan aplikatif dalam pengolahan limbah logam berat.

DAFTAR PUSTAKA

Awwad, N. S., El-Zahhar, A. A., Fouda, A. M., et al. (2013). Removal of heavy metal ions from ground and surface water samples using carbons derived from date pits. Journal of Environmental Chemical Engineering, 1(3), 416–423. https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.06.006

Bhattacharyya, D., & Cheng, C. Y. (1987). Activated carbon adsorption of heavy metal chelates from single and multicomponent systems. Environmental Progress, 6(2), 110–118. https://doi.org/10.1002/ep.670060213

Duan, C., Ma, T., Wang, J., & Zhou, Y. (2020). Removal of heavy metals from aqueous solution using carbon-based adsorbents: A review. Journal of Water Process Engineering, 37, 101339. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101339

Fronczak, M., Pyrzyńska, K., & Bhattarai, A. (2019). Improved adsorption performance of activated carbon covalently functionalised with sulphur-containing ligands in the removal of cadmium from aqueous solutions. International Journal of Environmental Science and Technology, 16(12), 7581–7592. https://doi.org/10.1007/s13762-019-02398-0

Gaya, U. I., Otene, E., & Abdullah, A. H. (2015). Adsorption of aqueous Cd(II) and Pb(II) on activated carbon nanopores prepared by chemical activation of doum palm shell. SpringerPlus, 4, 458. https://doi.org/10.1186/s40064-015-1256-4

Guo, Z., Fan, J., Zhang, J., et al. (2016). Sorption of heavy metal ions by activated carbons with well-developed microporosity and amino groups derived from Phragmites australis by ammonium phosphates activation. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 58, 290–298. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.05.041

Jevtitch, M. M., & Bhattacharyya, D. (1983). Separation of heavy metal chelates by activated carbon: Effect of surface and species charge. Chemical Engineering Communications, 23(1–6), 45–62. https://doi.org/10.1080/00986448308940474

Kang, J., Kim, T.-J., Park, J. W., et al. (2020). A mesoporous chelating polymer-carbon composite for the hyper-efficient separation of heavy metal ions. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 20(5), 2894–2901. https://doi.org/10.1166/jnn.2020.17471

Lee, J. K., Park, G. I., Ryu, S., et al. (2003). Effect of two-step surface modification of activated carbon on the adsorption characteristics of metal ions in wastewater II: Dynamic adsorption. Carbon Letters, 4(1), 25–30.

Liu, B., Lv, P.-G., Wang, Q., et al. (2024). Statistical physics investigation on the simultaneous adsorption mechanism of Cd^{2+} and Pb^{2+} on amino functionalized activated carbon derived from coal gasification fine slag. Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(3), 112635. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112635

Liu, S., Wang, T., Sun, W., et al. (2025). Performance evaluation and mechanistic insights into the adsorption of heavy metal ions in water by various carbon materials. Research Square. Advance online publication. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7656299/v1

Malik, S. A., Khan, S., & Dar, B. A. (2024). Removal of heavy metal ions (Fe^{2+}, Mn^{2+}, Cu^{2+}, and Zn^{2+}) onto activated carbon prepared from Kashmiri walnut shell (Juglans regia). Universal Journal of Green Chemistry, 2(1), 1–10.

Mariana, M., Khalil, H. P. S. A., Mistar, E. M., et al. (2021). Recent advances in activated carbon modification techniques for enhanced heavy metal adsorption. Journal of Water Process Engineering, 43, 102221. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102221

Muhsinun, M. (2025). Sintesis Karbon Aktif dari Kulit Durian dengan Aktivator HCl dan Aplikasinya sebagai Biosorben Logam Tembaga. Pure Chemistry Research, 1(1), 22–27. https://doi.org/10.70716/purechem.v1i1.268

Muhsinun, M., & Littaqwa, L. A. A. (2026). Integrasi Proses Elektrokimia dan Adsorpsi Karbon Aktif untuk Pengolahan Lindi Tempat Pemrosesan Akhir Sampah. Journal of Science and Technology: Alpha, 2(1), 35–43. https://doi.org/10.70716/alpha.v2i1.389

Muhsinun, M., Hidayat, S., & Yanuar, E. (2025). Uji Potensi Karbon Aktif Berbahan Kulit Durian Sebagai Media Immobilisasi Asam Lemak Hidroksamat. Pure Chemistry Research, 1(2), 59–66. https://doi.org/10.70716/purechem.v1i2.366

Okpara, O. G., Ogbeide, O. M., Nworu, J. N., et al. (2023). Enhanced removal of Pb(II), Cd(II), and Zn(II) ions from aqueous solutions using EDTA-synthesized activated carbon derived from sawdust. OALib Journal, 10, e10690. https://doi.org/10.4236/oalib.1110690

Peţ, I., Sanad, M. N., Farouz, M., et al. (2024). Recent developments in the implementation of activated carbon as heavy metal removal management: A review. Water Conservation Science and Engineering, 9(3), 1–15. https://doi.org/10.1007/s41101-024-00287-3

Rodríguez-Estupiñán, P., Giraldo, L., & Moreno-Piraján, J. C. (2018). Carbonaceous porous materials for the adsorption of heavy metals: Chemical characterization of oxidized activated carbons. In Carbon-based materials for environmental applications (pp. 103–125). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92111-2_5

Shuai, L., Cao, S., Liu, C., et al. (2020). Heavy metal adsorption using structurally preorganized adsorbent. RSC Advances, 10(12), 6805–6814. https://doi.org/10.1039/D0RA00125B

Xiao, B., & Thomas, K. M. (2004). Competitive adsorption of aqueous metal ions on an oxidized nanoporous activated carbon. Langmuir, 20(11), 4566–4578. https://doi.org/10.1021/la049712j

Zhang, Z., Li, J., Meng, N., et al. (2024). Simultaneously-efficient electro-sorption of Pb(II), Cu(II), and Cd(II) by Cu^{2+} modified superactive carbons. Separation and Purification Technology, 335, 126604. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126604

Zhu, J. Z., Chen, S. L., Zhu, R. R., et al. (2013). Chelating agent EDDS in removal of copper(II) with three adsorption materials. Advanced Materials Research, 663, 1005–1009. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.663.1005