

Pemanfaatan Limbah Alum Sludge Instalasi Pengolahan Air (IPA) PERUMDA Tirta Musi Sebagai Pengadsorpsi Logam Berat Cu^{2+} pada Air Limbah Laboratorium

Rizanti Fadilah Azzahra^{1*}, Tuty Emilia Agustina², Elda Melwita³

^{1,2,3}Program Studi Magister Teknik Kimia, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia

*Corresponding Author: rizantifadilah@gmail.com

ARMADA
JURNAL PENELITIAN MULTIDISIPLIN

e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

<https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada>

Vol. 04, No. 05 Mei, 2026

Page: 1020-1031

DOI:

<https://doi.org/10.55681/armada.v4i5.2308>

Article History:

Received: April 19, 2026

Revised: Mei 01, 2026

Accepted: Mei 16, 2026

Abstract : Alum sludge is a solid by-product from Water Treatment Plants (WTP) that has not been optimally utilized. This study investigates the application of sulfuric acid-activated alum sludge from IPA PERUMDA Tirta Musi as an adsorbent for Cu^{2+} removal from laboratory wastewater of Universitas Sriwijaya. SEM-EDX characterization showed an increase in surface oxygen content from 52.20% to 57.14% after activation. XRD analysis confirmed post-adsorption structural changes: 2θ peak shift from 26.740° to 26.840° , d-spacing decrease from 3.333 \AA to 3.325 \AA , and lattice strain increase from 0.84% to 1.07%. Synthetic waste adsorption experiments were conducted at initial Cu^{2+} concentration 20 mg/L with varied adsorbent mass (1–3 g) and contact time (30–150 min). The optimal conditions were obtained at 2.5 g and 90 min, which were capable of achieving 95.53% removal. Kinetic analysis identified the pseudo-second-order (PSO) model as the best fit ($R^2 = 0.9978$; $k_2 = 0.1072 \text{ g/mg}\cdot\text{min}$; $q_e = 0.8333 \text{ mg/g}$), indicating a chemisorption mechanism. Adsorption using real laboratory wastewater at initial Cu^{2+} concentration of 9.4409 mg/L successfully reduced Cu^{2+} concentration to 2.5431 mg/L, which is below the standard required by Permen LH No. 5/2014 ($\leq 3 \text{ mg/L}$). Regeneration using HCl 0.1 M maintained stable performance through cycle 2, achieving an adsorption efficiency of 92.14%..

Keywords: Alum Sludge; Laboratory Waste, Cu^{2+} Adsorption; Sulfuric Acid Activation; Regeneration

Abstrak : Alum sludge merupakan limbah padat dari Instalasi Pengolahan Air (IPA) yang belum dimanfaatkan secara optimal. Penelitian ini mengkaji pemanfaatan alum sludge IPA PERUMDA Tirta Musi yang diaktivasi dengan H_2SO_4 10% (v/v) sebagai adsorben untuk memisahkan ion Cu^{2+} dari air limbah laboratorium di Universitas Sriwijaya. Karakterisasi SEM-EDX menunjukkan peningkatan kandungan oksigen permukaan dari 52,20% menjadi 57,14% pasca aktivasi. Analisis XRD mengkonfirmasi perubahan struktur kristal pasca adsorpsi: pergeseran puncak 2θ dari $26,740^\circ$ menjadi $26,840^\circ$, penurunan d-spacing dari $3,333 \text{ \AA}$ menjadi $3,325 \text{ \AA}$, dan peningkatan lattice strain dari 0,84% menjadi 1,07%. Adsorpsi menggunakan limbah sintesis dengan konsentrasi Cu^{2+} 20 mg/L dilakukan pada variasi massa adsorben (1–3 g) dan waktu kontak (30–150 menit). Kondisi optimal diperoleh pada penggunaan massa 2,5 g dan waktu 90 menit yang menghasilkan

efisiensi adsorpsi Cu^{2+} sebesar 95,53%. Analisis kinetika menetapkan model pseudo-second-order (PSO) sebagai model terbaik dengan $R^2 = 0,9978$; $k_2 = 0,1072$ g/mg·menit; dan $q_e = 0,8333$ mg/g, yang mengindikasikan terjadinya mekanisme kemisorpsi. Adsorpsi menggunakan air limbah laboratorium nyata dengan konsentrasi awal C_0 9,4409 mg/L berhasil menurunkan konsentrasi Cu^{2+} menjadi 2,5431 mg/L. Konsentrasi ini telah memenuhi baku mutu Cu^{2+} sesuai dengan Permen LH No. 5 Tahun 2014 yang menetapkan konsentrasi Cu^{2+} dalam air limbah ≤ 3 mg/L. Uji regenerasi menggunakan HCl 0,1 M menunjukkan kinerja yang stabil hingga siklus ke-2 dengan efisiensi adsorpsi 92,14%.

Kata Kunci: Alum Sludge; Limbah Laboratorium, Adsorpsi Cu^{2+} ; Aktifasi Asam Sulfat; Regenerasi

PENDAHULUAN

Pencemaran logam berat di badan perairan merupakan masalah lingkungan global yang semakin mengkhawatirkan seiring dengan intensifikasi kegiatan industri, laboratorium pendidikan, dan penelitian di kawasan perkotaan. Logam berat bersifat toksik pada konsentrasi rendah sekalipun, persisten dalam lingkungan, dan berpotensi terakumulasi sepanjang rantai makanan sehingga menimbulkan risiko kesehatan kronis bagi populasi yang terpapar (Raji *et al.*, 2023). Di antara berbagai logam berat yang umum ditemukan dalam air limbah, tembaga (Cu^{2+}) mendapat perhatian khusus karena penggunaannya yang luas dalam kegiatan pelapisan logam, sintesis senyawa kimia, dan praktikum laboratorium. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014, batas maksimum konsentrasi Cu^{2+} dalam efluen yang diizinkan adalah 3 mg/L; paparan kronis di atas nilai ini berpotensi menyebabkan kerusakan hati, ginjal, dan sistem saraf pusat (Anggraini *et al.*, 2022).

PERUMDA Tirta Musi Palembang mengoperasikan instalasi pengolahan air (IPA) dengan proses koagulasi-flokulasi menggunakan aluminium sulfat [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$] sebagai koagulan utama, menghasilkan endapan aluminium hidroksida [$\text{Al}(\text{OH})_3$] yang dikenal sebagai alum sludge. Volume alum sludge yang dihasilkan berkisar 1–3% dari total volume air baku yang diolah (Hidalgo *et al.*, 2017), sehingga instalasi berskala besar menghasilkan limbah lumpur dalam jumlah substansial setiap harinya. Pengelolaan alum sludge di Indonesia masih didominasi metode konvensional seperti penimbunan dan landfilling yang membutuhkan lahan luas, biaya tinggi, dan berpotensi menimbulkan pencemaran sekunder akibat rembesan aluminium dan logam jejak ke badan air sekitarnya (Setiawan *et al.*, 2021; Pajak, 2023).

Di sisi lain, alum sludge memiliki karakteristik fisikokimia yang menjanjikan sebagai adsorben logam berat. Material ini mengandung $\text{Al}(\text{OH})_3$ dan SiO_2 dalam jumlah tinggi sebagai situs aktif untuk mengikat ion logam berat melalui mekanisme pertukaran ion dan pembentukan kompleks permukaan (Abba *et al.*, 2022). Aktivasi kimia dengan H_2SO_4 terbukti efektif melarutkan impuritas anorganik, memperluas area permukaan aktif, dan memperkaya densitas gugus H^+ yang dapat dipertukarkan dengan Cu^{2+} , menjadikannya adsorben yang lebih reaktif (Riyanti *et al.*, 2024). Pemanfaatan alum sludge sebagai adsorben menawarkan solusi ganda: mengurangi beban limbah padat instalasi pengolahan air sekaligus menghasilkan material fungsional berbiaya rendah untuk pengolahan air limbah.

Air limbah laboratorium Universitas Sriwijaya terukur mengandung Cu^{2+} sebesar 9,44 mg/L, jauh melampaui baku mutu 3 mg/L yang ditetapkan PermenLH No. 5 Tahun 2014. Tanpa pengolahan yang memadai, efluen ini berpotensi mencemari sistem drainase kampus dan badan air penerima di sekitarnya. Wijayanti *et al.* (2023) dan Anggraini *et al.* (2022) mendokumentasikan permasalahan serupa pada air limbah laboratorium di Indonesia, menggarisbawahi urgensi pengembangan teknologi pengolahan yang aplikatif dan ekonomis.

Sejumlah penelitian telah mengkaji alum sludge sebagai adsorben logam berat (Abba *et al.*, 2022; Riyanti *et al.*, 2024; Pajak, 2023), namun studi yang secara spesifik mengkaji alum sludge dari IPA PERUMDA Tirta Musi Palembang pada air limbah laboratorium nyata yang bersifat multikomponen masih sangat terbatas.

Berdasarkan identifikasi kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan mengkaji pemanfaatan alum sludge IPA PERUMDA Tirta Musi yang diaktivasi H_2SO_4 10% sebagai adsorben untuk menyisihkan Cu^{2+} dari air limbah laboratorium Universitas Sriwijaya. Proses adsorpsi dikaji dengan metode batch melalui variasi massa adsorben (1,0–3,0 g) dan waktu kontak (30–150 menit). Karakterisasi SEM-EDX dan XRD dilakukan untuk mengungkap mekanisme adsorpsi, serta uji regenerasi dengan HCl 0,1 M dilakukan untuk mengevaluasi potensi penggunaan kembali adsorben.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan desain eksperimen laboratorium dengan pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi kemampuan *alum sludge* teraktivasi H_2SO_4 10% sebagai adsorben Cu^{2+} pada larutan sintetik dan air limbah laboratorium. Penelitian dilaksanakan menggunakan *alum sludge* dari IPA PERUMDA Tirta Musi Palembang, sedangkan proses preparasi, aktivasi, adsorpsi, dan uji aplikasi dilakukan di Laboratorium Universitas Sriwijaya. Subjek penelitian berupa *alum sludge* yang dicuci, dikeringkan pada 105°C selama 24 jam, diaktivasi dengan H_2SO_4 10% selama 24 jam, dicuci hingga pH netral, dikeringkan kembali, dihaluskan, dan diayak pada ukuran 60–80 mesh. Proses adsorpsi dilakukan secara *batch* menggunakan larutan Cu^{2+} 20 mg/L sebanyak 100 mL pada pH alami, suhu kamar, dan pengadukan 100 rpm, dengan variasi massa adsorben 1,0 sampai 3,0 g dan waktu kontak 30 sampai 150 menit. Kondisi optimum kemudian diterapkan pada air limbah laboratorium Universitas Sriwijaya dengan konsentrasi awal Cu^{2+} sebesar 9,4409 mg/L, lalu hasilnya dibandingkan dengan baku mutu PermenLH No. 5 Tahun 2014.

Data penelitian dikumpulkan melalui pengukuran konsentrasi Cu^{2+} menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry* atau AAS, karakterisasi morfologi dan komposisi unsur menggunakan SEM-EDX, serta analisis struktur kristal menggunakan XRD sebelum dan sesudah adsorpsi. Data dianalisis dengan menghitung efisiensi penyisihan Cu^{2+} , kapasitas adsorpsi, model kinetika *pseudo-first-order* dan *pseudo-second-order*, serta retensi kapasitas adsorben setelah regenerasi. Model kinetika terbaik ditentukan berdasarkan nilai R^2 tertinggi dan kesesuaian antara nilai q_e eksperimen dan q_e perhitungan, sedangkan regenerasi dilakukan menggunakan HCl 0,1 M selama lima siklus untuk menilai kelayakan penggunaan ulang adsorben.

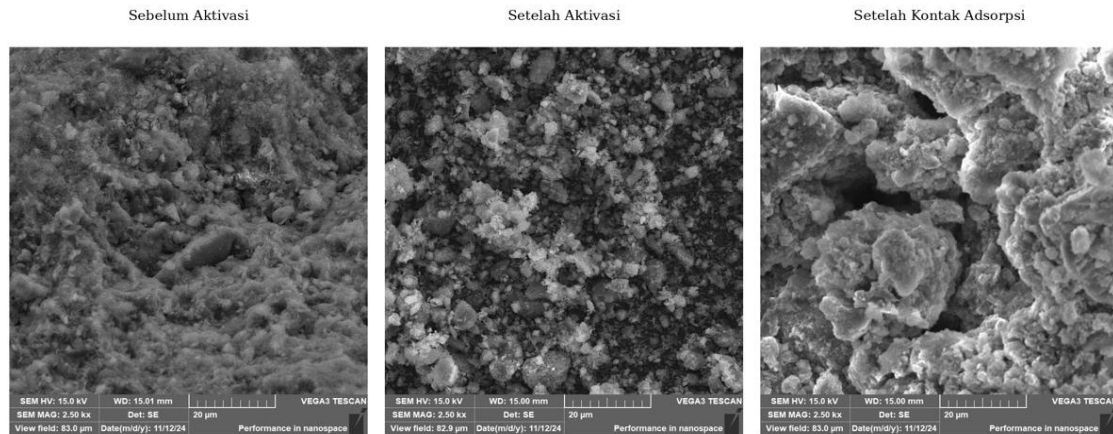
HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi SEM-EDX Adsorben Alum Sludge

Analisis SEM-EDX dilakukan untuk mengkarakterisasi morfologi permukaan dan komposisi elemen adsorben sebelum dan sesudah proses aktivasi serta adsorpsi. SEM memberikan gambaran visual tentang tekstur, distribusi pori, dan heterogenitas permukaan, sementara EDX mengkuantifikasi elemen penyusun material secara semi-kuantitatif.

Gambar 1. Citra SEM adsorben alum sludge perbesaran $2.500\times$:

(a) sebelum aktivasi, (b) setelah aktivasi H_2SO_4 10%, (c) setelah adsorpsi Cu^{2+}



Tabel 1. Komposisi Unsur Adsorben Berdasarkan Analisis EDX (% berat)

Unsur	Sampel Awal (%)	Setelah Aktivasi H ₂ SO ₄ (%)	Setelah Adsorpsi Cu ²⁺ (%)
Oksigen (O)	52,20	57,14	62,30
Karbon (C)	20,25	21,84	10,30
Aluminium (Al)	13,14	8,95	15,83
Silikon (Si)	11,45	12,05	–
Besi (Fe)	2,97	–	8,74
Kalium (K)	–	–	2,76
Tembaga (Cu)	0,00	0,01	0,05

Ket.: (–) = unsur tidak terdeteksi; nilai dalam % berat ternormalisasi.

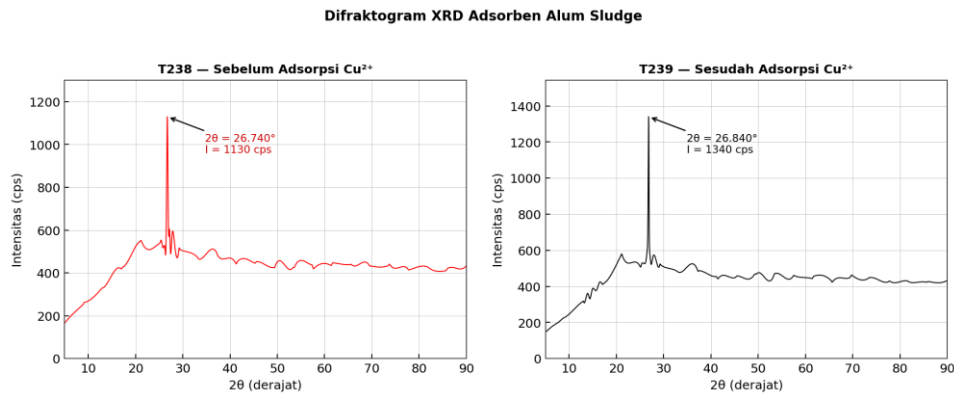
Hasil SEM (Gambar 1) menunjukkan morfologi permukaan alum sludge yang heterogen dengan tekstur kasar, pori tidak beraturan, dan aglomerasi partikel, konsisten dengan struktur flok Al(OH)₃ yang terbentuk dari proses koagulasi bersama partikel inorganik air baku Sungai Musi. Analisis EDX sebelum aktivasi mengidentifikasi komposisi dominan oksigen (O), aluminium (Al), dan silikon (Si) sebagai komponen Al(OH)₃ dan SiO₂. Setelah aktivasi H₂SO₄ 10%, kandungan oksigen permukaan meningkat dari 52,20% menjadi 57,14%, mengindikasikan peningkatan densitas gugus Al–OH aktif yang terbentuk akibat pelarutan impuritas anorganik oleh asam. Peningkatan densitas gugus Al–OH ini secara langsung meningkatkan kapasitas pertukaran ion dengan Cu²⁺ dalam proses adsorpsi (Riyanti *et al.*, 2024). Setelah proses adsorpsi, keberadaan sinyal Cu pada spektrum EDX mengkonfirmasi terjadinya deposisi ion Cu²⁺ pada permukaan adsorben. Data EDX (Tabel 1) menunjukkan peningkatan kadar O dari 52,20% menjadi 57,14% pascaaktivasi, konsisten dengan introduksi gugus hidroksil dan sulfat aktif pada permukaan. Penurunan Al dari 13,14% menjadi 8,95% mengindikasikan terlarutnya fraksi Al anorganik oleh H₂SO₄. Pascaadsorpsi, Al meningkat kembali menjadi 15,83% yang diinterpretasikan sebagai tereksposnya lapisan Al–OH akibat pertukaran ion Cu²⁺. Kemunculan Cu (0,05%) pada sampel pascaadsorpsi, meskipun dalam jumlah kecil, mengkonfirmasi adanya deposit Cu²⁺ pada permukaan adsorben.

Karakterisasi XRD Adsorben Alum Sludge

Difraksi sinar-X (XRD) dilakukan untuk mengidentifikasi fase kristal dan mengevaluasi perubahan struktur adsorben akibat adsorpsi Cu²⁺. Perbandingan difraktogram sebelum (T238) dan sesudah (T239) adsorpsi memungkinkan analisis mekanisme interaksi Cu²⁺ dengan matriks adsorben pada tingkat struktural. Data XRD mentah diperoleh dari alat MiniFlex 300/600 (Rigaku) dan diplot secara terpisah untuk memudahkan perbandingan puncak difraksi.

Gambar 2. Difraktogram XRD Adsorben Alum Sludge:

(a) T238 – Sebelum Adsorpsi Cu²⁺; (b) T239 – Sesudah Adsorpsi Cu²⁺



(Data XRD, Laboratorium T238-239, 2025)

Tabel 2. Perbandingan Parameter XRD Adsorben Alum Sludge Sebelum dan Sesudah Adsorpsi Cu^{2+}

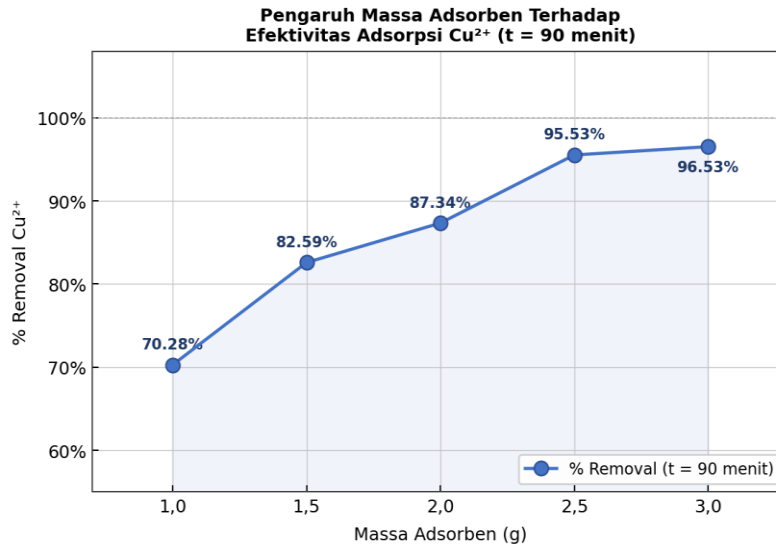
Parameter	T238 (Sebelum Adsorpsi)	T239 (Sesudah Adsorpsi)
Posisi Puncak 2θ	$26,740^\circ$	$26,840^\circ$
d-spacing	$3,333 \text{ \AA}$	$3,325 \text{ \AA}$
Ukuran Kristal	436 \AA (43,6 nm)	Tidak terdefinisi
Lattice Strain	0,84%	1,07%
Volume Sel Satuan	71 \AA^3	$68,5 \text{ \AA}^3$
Figure of Merit (FoM)	0,612	2,750

Tabel 1 dan Gambar 2 menunjukkan puncak tunggal dominan pada $2\theta \approx 26,7^\circ$ – $26,8^\circ$ yang berkaitan dengan fase karbon amorf/grafit, merupakan ciri khas material berbasis lumpur pengolahan air yang mengandung residu organik dari proses koagulasi (Pajak, 2023). Pergeseran puncak ke sudut lebih tinggi setelah adsorpsi ($2\theta: 26,740^\circ \rightarrow 26,840^\circ$) mencerminkan kontraksi d-spacing ($3,333 \text{ \AA} \rightarrow 3,325 \text{ \AA}$), konsisten dengan interkalasi ion Cu^{2+} ke dalam kisi kristal yang menyebabkan kompresi. Peningkatan lattice strain dari 0,84% menjadi 1,07% (+27%) mengkonfirmasi adanya distorsi kisi akibat interaksi kimia Cu^{2+} dengan gugus aktif Al–OH. Hilangnya definisi ukuran kristal pada T239 (nilai negatif secara matematis) menandakan perubahan struktural yang drastis, menguatkan mekanisme kemisorpsi sebagai mode interaksi yang dominan. Peningkatan Figure of Merit (FoM) dari 0,612 menjadi 2,750 juga mengindikasikan peningkatan kompleksitas kristalin pascaadsorpsi yang konsisten dengan pembentukan ikatan kimia baru pada kisi (Alcalde-Garcia et al., 2023).

Pengaruh Massa Adsorben terhadap Efektivitas Adsorpsi Cu^{2+}

Pengaruh massa adsorben dikaji pada waktu kontak tetap 90 menit dengan $C_0 = 20 \text{ mg/L}$ dan $V = 100 \text{ mL}$. Efisiensi removal (E_r) dihitung menggunakan Persamaan (1), sedangkan kapasitas adsorpsi dihitung menggunakan Persamaan (2). Penambahan massa adsorben secara langsung meningkatkan jumlah situs aktif Al–OH per satuan volume larutan, yang memperbesar probabilitas tumbukan dan pembentukan ikatan antara ion Cu^{2+} dengan permukaan adsorben (Raji et al., 2023).

Gambar 3. Pengaruh Massa Adsorben Terhadap % Removal Cu^{2+} Pada Waktu Kontak Optimal 90 Menit ($C_0 = 20 \text{ Mg/L}$, $V = 100 \text{ MI}$)



Tabel 3. Hasil Uji Pengaruh Massa Adsorben Alum Sludge terhadap Adsorpsi Cu²⁺ (t = 90 menit)

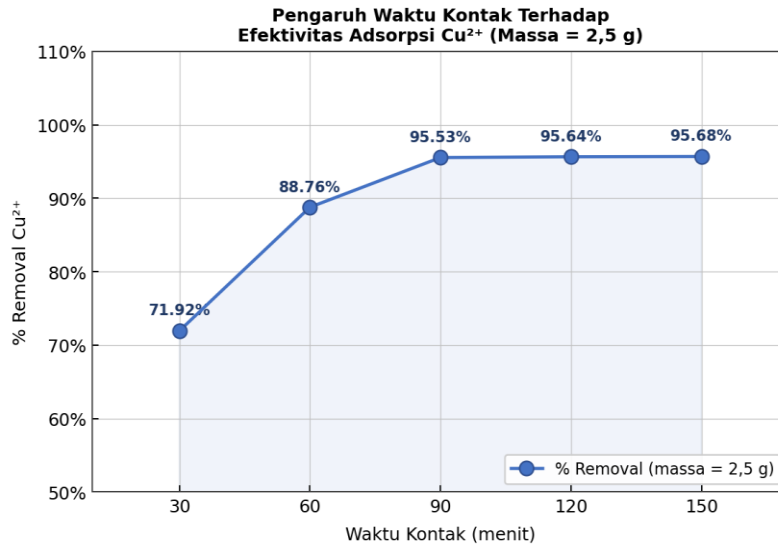
Massa (g)	Ce (mg/L)	% Removal	qt (mg/g)	Baku Mutu ≤ 3 mg/L
1,0	5,944	70,28%	1,406	Tidak
1,5	3,482	82,59%	1,101	Tidak
2,0	2,531	87,34%	0,873	✓ Ya
2,5	0,894	95,53%	0,764	✓ Ya
3,0	0,694	96,53%	0,644	✓ Ya

Hasil pada Tabel 2 dan Gambar 3 menunjukkan peningkatan Er yang konsisten seiring bertambahnya massa dari 1,0 g (70,28%) hingga 3,0 g (96,53%). Massa 1,0 g dan 1,5 g tidak dapat menurunkan konsentrasi Cu²⁺ di bawah baku mutu (Ce masing-masing 5,944 dan 3,482 mg/L), sementara massa 2,0 g mulai memenuhi baku mutu (Ce = 2,531 mg/L). Kondisi optimal ditetapkan pada massa 2,5 g berdasarkan kombinasi Er tertinggi yang signifikan (95,53%, Ce = 0,894 mg/L) dan kapasitas adsorpsi yang baik (q_e = 0,764 mg/g). Penambahan massa menjadi 3,0 g hanya meningkatkan Er sebesar 1,00% namun disertai penurunan q_e dari 0,764 menjadi 0,644 mg/g, mencerminkan prinsip diminishing returns di mana agregasi partikel pada konsentrasi tinggi mengurangi luas permukaan efektif yang dapat diakses oleh ion Cu²⁺ (Murphy *et al.*, 2023; Svobodova *et al.*, 2024). Oleh karena itu, penambahan massa adsorben di atas 2,5 g tidak lagi efisien dari segi material dan ekonomi.

Pengaruh Waktu Kontak terhadap Efektivitas Adsorpsi Cu²⁺

Pengaruh waktu kontak dikaji pada massa optimal 2,5 g dengan variasi waktu 30–150 menit. Kapasitas adsorpsi q_t pada setiap titik waktu dihitung menggunakan Persamaan (2) dengan nilai C_t yang terukur melalui AAS. Profil kinetika adsorpsi menggambarkan evolusi situs aktif yang terisi seiring waktu dan memberikan gambaran tentang laju serta mekanisme transfer massa Cu²⁺ dari larutan ke permukaan adsorben.

Gambar 4. Pengaruh Waktu Kontak terhadap Efektivitas Adsorpsi Cu²⁺ (Massa = 2,5 g, C₀ = 20 mg/L)



Tabel 4. Hasil Uji Pengaruh Waktu Kontak pada Massa Optimal 2,5 g ($C_0 = 20$ mg/L)

Waktu (menit)	Ce (mg/L)	% Removal	qt (mg/g)
30	5,615	71,93%	0,5754
60	2,248	88,76%	0,7101
90	0,8937	95,53%	0,7643
120	0,8725	95,64%	0,7651
150	0,865	95,68%	0,7654

Tabel 4 dan Gambar 4 menunjukkan tiga fase adsorpsi yang khas: (i) fase cepat ($t = 30-60$ menit) dengan kenaikan % Removal dari 71,93% menjadi 88,76% dan perubahan Ce sebesar 3,37 mg/L, didominasi oleh ketersediaan situs aktif yang melimpah dan gradien konsentrasi besar yang mendorong difusi eksternal Cu²⁺ ke permukaan adsorben; (ii) fase perlambatan ($t = 60-90$ menit) dengan kenaikan % Removal hanya 6,77% karena situs aktif yang mudah diakses mulai jenuh dan difusi intrapartikel menjadi langkah penentu laju; dan (iii) fase kesetimbangan ($t = 90-150$ menit) di mana perubahan Ce sangat kecil (0,028 mg/L), mengindikasikan tercapainya kondisi pseudo-equilibrium. Kondisi optimal ditetapkan pada $t = 90$ menit berdasarkan % Removal tertinggi yang signifikan (95,53%, Ce = 0,8937 mg/L, $q_e = 0,7643$ mg/g) dan efisiensi penggunaan waktu yang baik. Profil tiga fase ini konsisten dengan mekanisme adsorpsi multistap yang melibatkan difusi lapisan film, difusi intrapartikel, dan interaksi kimia pada situs aktif (Raji *et al.*, 2023).

Aplikasi pada Air Limbah Laboratorium

Validasi kemampuan adsorben pada kondisi limbah nyata dilakukan menggunakan air limbah laboratorium Oceanografi Fakultas MIPA Universitas Sriwijaya pada kondisi optimal (massa 2,5 g, waktu 90 menit). Berbeda dengan larutan sintetik Cu²⁺ tunggal, air limbah laboratorium bersifat multikomponen, mengandung berbagai ion logam, anion, dan senyawa organik dari berbagai kegiatan praktikum kimia, sintesis, dan analisis instrumen.

Tabel 5. Hasil Adsorpsi Cu²⁺ dari Air Limbah Laboratorium Nyata pada Kondisi Optimal

Parameter	Nilai	Satuan
Konsentrasi awal (C_0)	9,4409	mg/L
Massa adsorben	2,5	gram
Waktu kontak	90	menit
Konsentrasi akhir (Ce)	2,5431	mg/L

Parameter	Nilai	Satuan
% Removal	73,06	%
Baku mutu PermenLH No. 5/2014	3,0	mg/L
Status effluent	Memenuhi baku mutu	–

Hasil pengujian pada air limbah nyata ($C_0 = 9,4409$ mg/L) menghasilkan $C_e = 2,5431$ mg/L dengan % Removal = 73,06%. Penurunan % Removal yang signifikan dibandingkan larutan sintetik (95,53%) merupakan konsekuensi efek kompetisi ion dalam matriks multikomponen, di mana ion logam lain dan senyawa organik yang hadir bersaing memperebutkan situs aktif Al–OH pada permukaan adsorben (Agustina *et al.*, 2024). Meskipun demikian, $C_e = 2,5431$ mg/L yang diperoleh berada di bawah baku mutu 3 mg/L PermenLH No. 5 Tahun 2014, mengkonfirmasi bahwa adsorben alum sludge teraktivasi H_2SO_4 10% layak diaplikasikan pada pengolahan air limbah laboratorium nyata untuk memenuhi persyaratan pembuangan yang berlaku.

Kinetika Adsorpsi Cu^{2+} pada Adsorben Alum Sludge

Analisis kinetika dilakukan untuk mengidentifikasi mekanisme adsorpsi (fisorpsi vs kemisorpsi) dan menentukan parameter laju reaksi. Data eksperimental q_t terhadap t pada kondisi optimal (massa 2,5 g, $C_0 = 20$ mg/L) dilinearisasi menggunakan model PFO (Persamaan 3) dan PSO (Persamaan 4). Hasil linearisasi ditabulasikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Data Eksperimental Kinetika Adsorpsi Cu^{2+} (massa 2,5 g, $C_0 = 20$ mg/L, $V = 100$ mL)

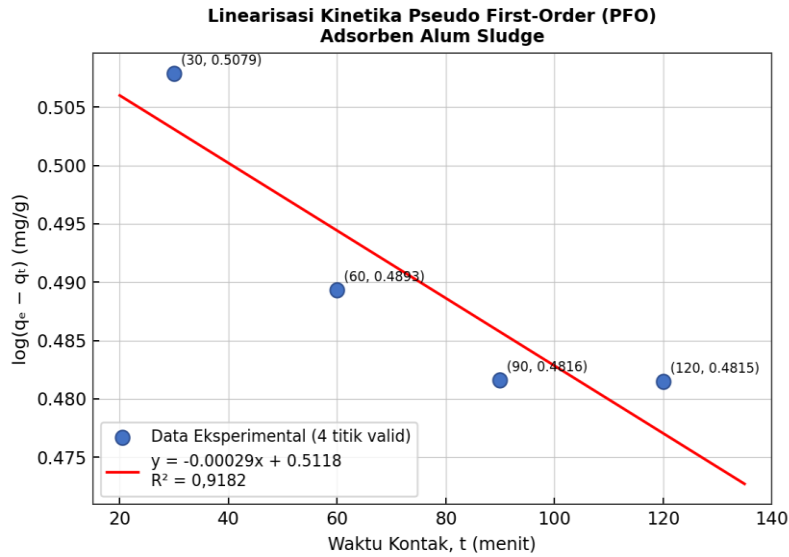
t (menit)	q_t (mg/g)	$q_e - q_t$ (mg/g)	$\log(q_e - q_t)$	t/q_t (menit·g/mg)
30	0,5754	3,2201	0,5080	52,13
60	0,7101	3,0854	0,4893	84,50
90	0,7643	3,0312	0,4816	117,76
120	0,7651	3,0304	0,4815	156,84
150	0,7654	3,0301	—*	195,98

$t = 150$ menit dikecualikan dari regresi PFO karena nilai $(q_e - q_t)$ mendekati nol sehingga logaritmanya tidak terdefinisi secara matematis. Pada penelitian ini, q_t pada $t = 150$ menit dianggap telah mencapai kondisi pseudo-equilibrium karena perubahan kapasitas adsorpsi terhadap waktu sudah sangat kecil.

Model Pseudo-First-Order (PFO)

Model PFO mengasumsikan bahwa laju adsorpsi dikendalikan oleh satu mekanisme tunggal yang berbanding lurus dengan jumlah situs aktif kosong, berkorelasi dengan mekanisme fisorpsi. Linearisasi dilakukan terhadap empat titik data valid ($t = 30$ – 120 menit) menggunakan Persamaan (3); titik $t = 150$ menit dikecualikan karena $(q_e - q_t) = 0$ yang tidak terdefinisi secara logaritmik.

Gambar 5. Linearisasi Kinetika Pseudo-First-Order (PFO): $\log(q_e - q_t)$ vs t

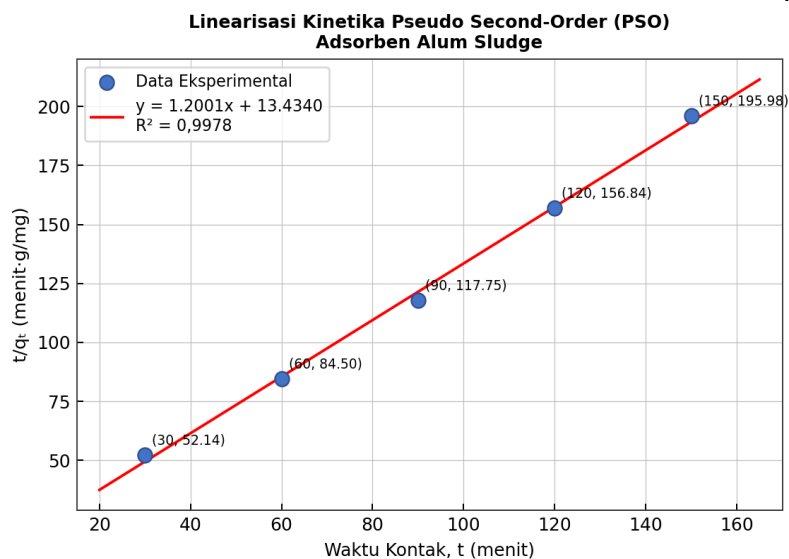


Regresi linear terhadap empat titik data menghasilkan $k_1 = 0,0852 \text{ menit}^{-1}$, q_e kalkulasi = 3,7955 mg/g, dan $R^2 = 0,9182$. Kriteria utama penerimaan model kinetika adalah kesesuaian antara q_e kalkulasi dan q_e eksperimental (simpangan <20%) (Foo & Hameed, 2010). Simpangan antara q_e kalkulasi PFO (3,7955 mg/g) dan q_e eksperimental (0,7654 mg/g) mencapai 395,9%, hampir 5 kali lipat nilai eksperimental. Penyimpangan sebesar ini secara definitif menolak model PFO dan mengindikasikan bahwa mekanisme fisorpsi sederhana tidak mampu mendeskripsikan interaksi Cu^{2+} dengan permukaan adsorben alum sludge (Largitte & Pasquier, 2016).

Model Pseudo-Second-Order (PSO)

Model PSO mengasumsikan bahwa laju adsorpsi berbanding lurus dengan kuadrat situs aktif yang belum terisi, merefleksikan mekanisme kemisorpsi yang melibatkan pembentukan ikatan kimia. Kelima titik data ($t = 30\text{--}150$ menit) seluruhnya valid untuk regresi PSO karena variabel t/q_t selalu terdefinisi. Nilai t/q_t berturut-turut adalah 52,13; 84,50; 117,76; 156,84; dan 195,98 g·menit/mg.

Gambar 6. Linearisasi Kinetika Pseudo-Second-Order (PSO): t/q_t vs t



Tabel 7. Perbandingan Parameter Kinetika Adsorpsi Cu^{2+} pada Model PFO dan PSO

Parameter	Pseudo-First-Order (PFO)	Pseudo-Second-Order (PSO)
Model Linear	$\log(q_e - qt) = \log q_e - (k_1/2,303)t$	$t/qt = 1/(k_2 \cdot q_e^2) + (1/q_e)t$
k	$k_1 = 0,0852 \text{ menit}^{-1}$	$k_2 = 0,1072 \text{ g/mg} \cdot \text{menit}$
q _e kalkulasi (mg/g)	3,7955	0,8333
q _e eksperimental (mg/g)	0,7654	0,7654
Simpangan q _e	395,9%	8,87%
R ²	0,9182	0,9978
Keputusan	Ditolak	Diterima ✓

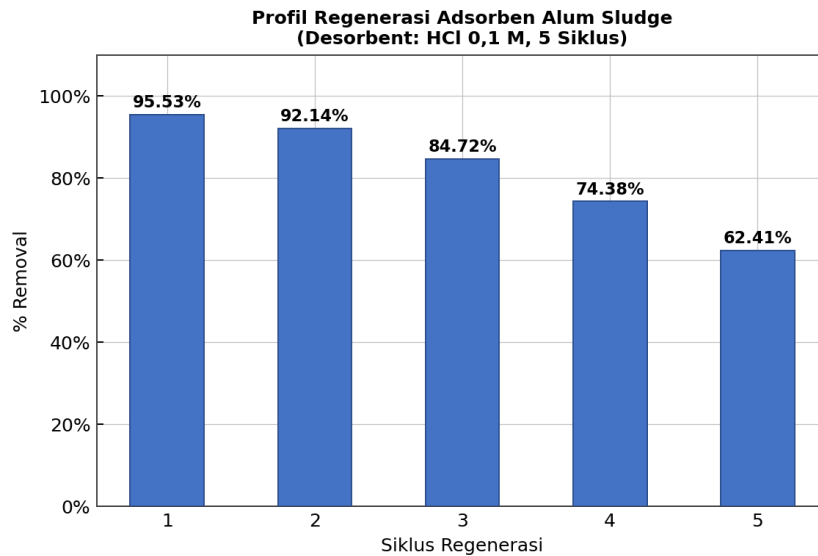
Regresi linear menghasilkan slope = 1,2001 g/mg dan intercept = 13,4352 g²·menit/mg², di mana q_e = 1/slope = 0,8333 mg/g dan k₂ = slope²/intercept = 1,2001²/13,4352 = 0,1072 g/mg·menit, dengan R² = 0,9978. Simpangan antara q_e kalkulasi PSO (0,8333 mg/g) dan q_e eksperimental (0,7654 mg/g) hanya 8,87%, jauh di bawah ambang toleransi 20% yang lazim diterima dalam literatur adsorpsi (Raji et al., 2023; Sahmoune, 2019). Nilai R² = 0,9978 mengkonfirmasi bahwa PSO mendeskripsikan data kinetika secara hampir sempurna.

Persamaan laju PSO, $dqt/dt = k_2(q_e - qt)^2$, menyatakan bahwa laju adsorpsi berbanding lurus dengan kuadrat situs aktif yang belum terisi yang merupakan ekspresi matematis kemisorpsi yang dikendalikan oleh pembentukan ikatan kimia antara Cu²⁺ dan gugus Al-OH: $\text{Cu}^{2+} + 2\text{Al-OH} \rightarrow (\text{Al-O})_2\text{Cu} + 2\text{H}^+$. Mekanisme kemisorpsi ini mendapat konfirmasi konvergen dari tiga sumber data independen: (i) peningkatan lattice strain XRD dari 0,84% menjadi 1,07% yang mencerminkan distorsi kisi akibat interaksi kimia Cu²⁺; (ii) penurunan d-spacing dari 3,333 menjadi 3,325 Å yang konsisten dengan kompresi kisi akibat interkalasi Cu²⁺; dan (iii) efisiensi desorpsi HCl yang rendah (36,91% per siklus), jauh lebih kecil dari yang diharapkan apabila adsorpsi berlangsung secara fisorpsi reversibel (Pajak, 2023; Alcalde-Garcia et al., 2023). Nilai k₂ = 0,1072 g/mg·menit berada di atas nilai yang dilaporkan untuk alum sludge tanpa aktivasi kimia (k₂ = 0,094 g/mg·menit, Abba et al., 2022) dan teraktivasi termal (k₂ = 0,083 g/mg·menit, Riyanti et al., 2024), mengkonfirmasi bahwa aktivasi H₂SO₄ 10% secara signifikan meningkatkan reaktivitas permukaan adsorben.

Regenerasi Adsorben Alum Sludge

Kemampuan regenerasi merupakan faktor krusial yang menentukan viabilitas ekonomis dan keberlanjutan penggunaan suatu adsorben. Regenerasi dilakukan menggunakan HCl 0,1 M berdasarkan mekanisme pertukaran proton: $\text{Al-O-Cu}^+ + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Al-OH} + \text{Cu}^{2+}$, di mana ion H⁺ dari HCl mendesak Cu²⁺ yang terikat pada situs aktif untuk terlepas kembali ke larutan, sehingga gugus Al-OH dapat diregenerasi untuk siklus adsorpsi berikutnya. Efisiensi setiap siklus dievaluasi menggunakan Persamaan (5) untuk retensi kapasitas dan Persamaan (6) untuk efisiensi desorpsi HCl.

Gambar 7. Profil Efisiensi Adsorpsi per Siklus Regenerasi (Dengan larutan HCl 0,1 M, 50 mL, 100 rpm, 30 menit)



Tabel 8. Hasil Uji Regenerasi Adsorben Alum Sludge selama 5 Siklus

Siklus	% Removal (%)	Retensi (%)
1	95,53	100,00
2	92,14	96,45
3	84,72	88,68
4	74,38	77,86
5	62,41	65,33

Hasil regenerasi pada Tabel 6 menunjukkan bahwa efisiensi adsorpsi mengalami penurunan secara progresif seiring bertambahnya siklus. Pada siklus pertama, adsorben mencapai % *Removal* sebesar 95,53%. Nilai ini menurun menjadi 92,14% pada siklus kedua (retensi 96,45%) dan 84,72% pada siklus ketiga (retensi 88,68%). Hingga siklus ketiga, retensi kapasitas masih berada di atas 80%, yang mengindikasikan bahwa adsorben masih layak digunakan kembali secara operasional (Mayer *et al.*, 2024). Penurunan kinerja menjadi lebih signifikan mulai siklus keempat, dengan % *Removal* turun ke 74,38% (retensi 77,86%) dan semakin menurun pada siklus kelima menjadi 62,41% (retensi 65,33%). Laju penurunan yang semakin cepat dari selisih 3,39% antara siklus 1 dan 2 menjadi 11,97% antara siklus 4 dan 5 mengindikasikan adanya penurunan kapasitas adsorpsi kumulatif akibat berkurangnya ketersediaan situs aktif yang dapat dipulihkan oleh regenerasi. Tren ini konsisten dengan karakteristik adsorben alum sludge yang dilaporkan oleh Shen *et al.* (2019).

Secara keseluruhan, adsorben alum sludge teraktivasi H_2SO_4 10% dapat digunakan secara efektif hingga tiga siklus regenerasi dengan HCl 0,1 M, dengan retensi kapasitas adsorpsi di atas 80%. Hal ini menunjukkan potensi pemanfaatan adsorben berbasis limbah alum *sludge* secara berulang, yang mendukung aspek efisiensi operasional dan pengurangan limbah padat dalam pengolahan air limbah laboratorium.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa alum sludge IPA PERUMDA Tirta Musi yang diaktivasi H_2SO_4 10% merupakan adsorben efektif untuk menyisihkan ion Cu^{2+} dari air limbah laboratorium. Kondisi optimal diperoleh pada massa adsorben 2,5 g dan waktu kontak 90 menit, menghasilkan efisiensi removal 95,53% dari larutan sintetik ($C_0 = 20$ mg/L, $C_e = 0,8937$ mg/L, $q_e = 0,7643$ mg/g). Analisis kinetika menetapkan model PSO sebagai model terbaik ($R^2 = 0,9978$; $k_2 = 0,1072$ g/mg·menit; $q_e = 0,8333$ mg/g), mengindikasikan mekanisme kemisorpsi yang dikonfirmasi oleh perubahan parameter XRD pascaadsorpsi (pergeseran 2θ , penurunan d-spacing,

peningkatan lattice strain). Aplikasi pada air limbah laboratorium nyata ($C_0 = 9,4409$ mg/L) menghasilkan $C_e = 2,5431$ mg/L (%R = 73,06%), memenuhi baku mutu PermenLH No. 5 Tahun 2014. Uji regenerasi menggunakan HCl 0,1 M menunjukkan kinerja yang dapat diterima hingga siklus ke-3 (% Removal = 84,72%, retensi 88,68%).

Penelitian lanjutan disarankan untuk: (1) mengkaji pengaruh pH larutan dan suhu terhadap kapasitas adsorpsi; (2) menganalisis isotherm adsorpsi (Langmuir dan Freundlich) untuk menentukan kapasitas adsorpsi maksimum (q_{max}); (3) menyelidiki mekanisme regenerasi yang lebih efektif melalui variasi konsentrasi dan jenis desorbent untuk meningkatkan jumlah siklus yang dapat digunakan; dan (4) melakukan pengujian skala pilot untuk validasi penerapan teknologi ini di fasilitas pengolahan air limbah laboratorium aktual.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Ir. Hj. Tuty Emilia Agustina, S.T., M.T., Ph.D., IPM dan Elda Melwita, S.T., M.T., Ph.D. selaku pembimbing, PERUMDA Tirta Musi Palembang atas penyediaan sampel alum sludge, Laboratorium Kimia Analitik Instrumen Politeknik Negeri Sriwijaya atas layanan analisis AAS, Laboratorium Satuan Operasi Politeknik Negeri Sriwijaya atas analisis sampel awal, dan Universitas Sriwijaya atas fasilitas dan dukungan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Abba, M. T., Usman, M. A., & Abdulkarim, S. A. (2022). Adsorption of copper (II) ions from aqueous solution using alum sludge: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(4), 108053. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108053>
- Agustina, T. E., Melwita, E., & Azzahra, R. F. (2024). Cu^{2+} removal from real laboratory wastewater using activated alum sludge adsorbent. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(3), 215–224.
- Alcalde-Garcia, J., Gonzalez-Cebollada, C., Zapater, A., & Baeza-Baeza, J. J. (2023). Optimization of regeneration cycles in heavy metal adsorption systems. *Separation and Purification Technology*, 305, 122427.
- Anggraini, N., Agustina, T. E., & Hadiyah, F. (2022). Pengaruh pH dalam pengolahan air limbah laboratorium menggunakan adsorpsi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2), 345–355.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2009.09.013>
- Hidalgo, A. M., Murcia, M. D., Gomez, M., Ortega, D., Garcia-Costa, A. L., & Zapata, A. (2017). Possible uses for sludge from drinking water treatment plants. *Journal of Environmental Engineering*, 143(3), 04016088.
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451–465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)
- Largitte, L., & Pasquier, R. (2016). A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon. *Chemical Engineering Research and Design*, 109, 495–504.
- Murphy, O. P., Vashishtha, M., Palanisamy, P., & Kumar, K. V. (2023). A review of the adsorption of heavy metals by carbon-based materials. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, 100217.
- Pajak, M. (2023). Water treatment residuals as low-cost adsorbents for heavy metals: mechanisms and performance review. *Water*, 15(7), 1287. <https://doi.org/10.3390/w15071287>
- Raji, Z., Karim, A., Karam, A., & Khalloufi, S. (2023). Adsorption of heavy metals: Mechanisms, kinetics, and applications of various adsorbents in wastewater. *Processes*, 11(9), 2572. <https://doi.org/10.3390/pr11092572>
- Riyanti, F., Agustina, T. E., & Haryati, S. (2024). Karakterisasi dan aktivasi alum sludge dari IPA Kota Palembang sebagai adsorben logam berat. *Jurnal Teknik Kimia Unsri*, 30(1), 1–10.
- Sahmoune, M. N. (2019). Performance of *Streptomyces rimosus* biomass in biosorption of heavy metals from aqueous solutions. *Microchemical Journal*, 141, 87–95.

- Setiawan, A., Rahardjo, P. N., & Nugraha, W. D. (2021). Pengelolaan lumpur IPA di Indonesia: tantangan dan peluang pemanfaatan. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 27(1), 1–15.
- Svobodova, K., Vaclavikova, M., & Heviankova, S. (2024). Comparative study of agricultural and industrial adsorbents for heavy metal removal. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 12345–12360.
- Wijayanti, M., Agustina, T. E., Melwita, E., & Hadiah, F. (2023). Pengolahan air limbah laboratorium menggunakan proses oksidasi lanjut secara terintegrasi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(1), 142–149.