

Pemanfaatan Adsorben *Fly ash* Batubara/ Fe_3O_4 untuk Adsorpsi Ion Logam Cr(VI) dengan Sistem *Batch* dan Kolom

Nurmaya Arofah¹, Lailatul Falakhiyyah², Nurhasni², Yulyani Nur Azizah², Siti Saadah², Syifa Nurrahman¹ dan A. Silvan Erusani¹

¹Department of Mining Engineering, Faculty of Science and Technology, State Islamic University Syarif Hidayatullah Jakarta, Banten, Indonesia: e-mail: nurmayaarofah@uinjkt.ac.id

²Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, State Islamic University Syarif Hidayatullah Jakarta, Banten, Indonesia

ABSTRAK

Fly ash batubara termasuk ke dalam limbah industri Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berpotensi dikembangkan sebagai adsorben. Pada penelitian ini dilakukan modifikasi *Fly ash* dengan magnetit (Fe_3O_4) pada rasio massa 3:1 menghasilkan adsorben yang efektif dalam mengadsorpsi ion Cr(VI) serta mempermudah pemisahan adsorben. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi performa adsorpsi komposit *fly ash*/ Fe_3O_4 terhadap ion Cr(VI) pada sistem *batch* dan kolom. Parameter uji sistem *batch* meliputi variasi pH (2, 4, 6, 8, dan 10), massa adsorben (0,5; 1,0; 1,5; dan 2,0 gram), konsentrasi adsorbat (2, 4, 6, 8, dan 10 mg/L), dan waktu kontak (20, 40, 60, dan 80 menit). Pada sistem kolom dilakukan dengan variasi laju alir (1, 2, dan 3 mL/menit). Hasil penelitian menunjukkan kondisi terbaik pada sistem *batch* dicapai pada pH 4, massa adsorben 1,5 g, konsentrasi awal 2 mg/L, dan waktu kontak 60 menit, menghasilkan efisiensi adsorpsi 91,70% dengan kapasitas adsorpsi (Q_e) sebesar 0,083 mg/g. Pada sistem kolom, efisiensi adsorpsi didapatkan pada laju alir 1 mL/menit sebesar 74,54% ($Q_e = 0,067$ mg/g). Pemodelan isoterm menunjukkan proses adsorpsi mengikuti model Freundlich ($R^2 = 0,9880$) dibandingkan Langmuir ($R^2 = 0,9247$). Hal ini mengindikasikan bahwa adsorpsi terjadi secara fisik pada permukaan multilayer melalui mekanisme interaksi elektrostatis. Komposit ini berpotensi besar untuk diaplikasikan dalam pengolahan air limbah industri secara kontinu.

Kata kunci: *Batch*, Fe_3O_4 , *Fly ash*, Kolom, Logam Cr(VI)

ABSTRACT

Coal fly ash is an industrial waste from Steam Power Plants (PLTU) which has the potential to be developed as an adsorbent. In this study, Fly ash was modified with magnetite (Fe_3O_4) at a 3:1 mass ratio to produce a magnetic adsorbent capable adsorbing Cr(VI) ions and facilitated adsorbent separation. This study aims to evaluate the adsorption performance of fly ash/ Fe_3O_4 composites against Cr(VI) ions in batch and column systems. The parameters evaluated in the batch system included pH variations (2, 4, 6, 8, and 10), adsorbent mass (0.5; 1.0; 1.5; and 2.0 grams), initial adsorbate concentration (2, 4, 6, 8, and 10 mg/L), and contact time (20, 40, 60, and 80 minutes). Meanwhile, the column system was operated at flow rates (1, 2, and 3 mL/minute). The results showed that the optimum conditions for the batch system were achieved at pH 4, an adsorbent mass of 1.5 g, an initial concentration of 2 mg/L, and a contact time of 60 minutes, resulting in an adsorption efficiency of 91.70% with an adsorption capacity (Q_e) of 0.083 mg/g. In the column system, the highest adsorption efficiency of 74.54% ($Q_e = 0.067$ mg/g) was obtained at a flow rate of 1 mL/min. Isotherm modeling indicated that the adsorption process fitted the Freundlich model ($R^2 = 0.9880$) compared to Langmuir ($R^2 = 0.9247$). This implies that the adsorption occurred physically on a multilayer surface through electrostatic interaction mechanism. This composite has great potential for application in continuous industrial wastewater treatment.

Keywords: *Batch*, Fe_3O_4 , *Fly ash*, Column, Cr(VI) metal

Citation: Arofah, N., Falakhiyyah, L., Nurhasni, Azizah, Y. N., Saadah, S., Nurrahman, S., dan Erusani, A. S. (2026). Pemanfaatan Adsorben *Fly ash* Batubara/ Fe_3O_4 untuk Adsorpsi Ion Logam Cr(VI) dengan Sistem *Batch* dan Kolom. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(3), 652-659, doi:10.14710/jil.24.3.652-659

1. PENDAHULUAN

Fly ash batubara merupakan mineral yang dihasilkan dari pembakaran batubara yang mengandung bahan anorganik. Limbah padat *fly ash* yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara di dalam tungku

pembakaran kemudian terbawa keluar bersama gas sisa pembakaran dan ditangkap menggunakan alat penangkap partikel (*elektrostatik presipitator*) (Wardani, 2008). *Fly ash* batubara sering dibuang di *ash lagoon* atau ditumpuk di area industri.

Pemanfaatan limbah *fly ash* batubara menjadi suatu produk adalah cara untuk mengatasi limbah yang dihasilkan. *Fly ash* termasuk limbah industri yang dapat dimanfaatkan sebagai adsorben karena kandungan alumina dan silikanya yang tinggi (Rohmah, 2023).

Fly ash batubara murni tanpa modifikasi biasanya memiliki luas permukaan relatif kecil, sehingga mengurangi kinerja adsorpsi. Oleh karena itu, dilakukan komposit dengan magnetit (Fe_3O_4) yang tidak hanya meningkatkan kemampuan adsorpsi tetapi juga untuk memudahkan pemisahan adsorben dari larutan setelah proses adsorpsi. Nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) memiliki karakteristik menguntungkan seperti kemampuan respon magnetik, gugus fungsi aktif, ukuran partikel kecil, biokompatibilitas, dan biodegradabilitas. Gugus fungsi dari struktur *fly ash* menjadi aktif setelah digabungkan dengan partikel Fe_3O_4 , menghasilkan kapasitas adsorpsi lebih tinggi dibandingkan dengan *fly ash* batubara yang tidak mengalami modifikasi (Harja et al. 2021).

Penelitian pemanfaatan *fly ash* batubara sebagai adsorben telah banyak dilakukan. (Harja et al. 2021) memodifikasi *fly ash* dengan Fe_3O_4 menggunakan *ball mill*, yang meningkatkan kapasitas adsorpsi ion Cu(II) sebesar 20% dibandingkan *fly ash* tanpa modifikasi. (Jahangiri et al. 2019) melaporkan efisiensi adsorpsi 97,69% untuk ion Cr(VI) dengan *fly ash* batubara yang dimodifikasi garam besi, aluminium, dan surfaktan. (Jiang et al. 2019) menggunakan *fly ash* batubara yang dimodifikasi dengan asam oksalat untuk adsorpsi ion Cr(VI) dengan efisiensi 97,48%. Selain itu, (Hamid and Kurniawati 2024) mengadsorpsi ion Pb(II) dengan metode kolom, menunjukkan kapasitas adsorpsi terbesar pada laju alir 1 mL/menit.

Penggunaan *fly ash* termodifikasi ini dapat menjadi solusi ramah lingkungan untuk memanfaatkan limbah industri sekaligus mengurangi pencemaran lingkungan. Temuan ini membuka peluang untuk mengembangkan *fly ash* termodifikasi sebagai adsorben untuk adsorpsi logam berat, seperti ion logam kromium yang banyak terkandung dalam air limbah industri.

Pengelolaan limbah yang mengandung Cr(VI) diatur berdasarkan peruntukan media lingkungan, dengan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup sebagai regulasi yang mengelola limbah B3 dan pengendalian kualitas badan air. Ambang batas Cr(VI) bervariasi sesuai sensitivitas media air terhadap kesehatan manusia. PerMenKes No. 2 Th.2023 menetapkan baku mutu untuk air minum sebesar 0,01 mg/L; PP No. 22 Th. 2021 menetapkan rentang 0,05–1,0 mg/L untuk air permukaan; PerMen LH No. 5 Th. 2014 menetapkan rentang 0,1–0,5 mg/L untuk air limbah. Kadar Cr(VI) dalam limbah industri penyamakan kulit yang dapat mencapai 49,575 mg/L (Asmadi et al., 2009), jauh melampaui baku mutu tersebut sehingga memerlukan pengolahan sebelum dibuang ke lingkungan.

Logam Cr(VI) memiliki tingkat keracunan lebih tinggi dibandingkan Cr(III) karena sifatnya yang lebih berbahaya. Sifat mudah larut Cr(VI) dalam media air memfasilitasi penyebaran cepat ke ekosistem dan

menimbulkan bioakumulasi pada berbagai organisme, termasuk transfer ke manusia melalui proses rantai makanan (Palar, 2008). Cr(VI) memiliki toksisitas yang tinggi, dimana paparan jangka panjangnya dapat menyebabkan gangguan kesehatan pada manusia. Cr(VI) juga lebih sulit untuk mengalami dekomposisi, sehingga dapat berpotensi mencemari lingkungan (Widowati, Sastion, and Jusuf 2008).

Upaya untuk mengurangi kandungan logam Cr(VI) dalam perairan, telah dilakukan berbagai metode seperti pengendapan (Hariani, Hidayati, and Oktaria 2009), elektrokimia (Mauna, Ma, and Nigrum 2015), presipitasi, dan adsorpsi (Costa, 2019). Adsorpsi adalah metode yang efektif dalam pemurnian dan pemisahan logam berat dalam pengelolaan limbah cair industri. Metode adsorpsi memiliki karakteristik prosedur yang sederhana, mampu bekerja pada konsentrasi rendah, dapat digunakan kembali, serta membutuhkan biaya yang ekonomis (Reynolds and Richards 1995).

Penelitian sebelumnya oleh Arofah et al. (2024) telah membuktikan efektivitas komposit *fly ash*/ Fe_3O_4 dengan rasio massa 3:1 (luas permukaan BET 4,878 m^2) sebagai adsorben ion logam kationik Pb^{2+} . Kebaharuan penelitian ini terletak pada evaluasi kemampuan komposit tersebut terhadap ion Cr(VI) yang memiliki karakteristik kimia berupa spesies anionik dalam air, dimana interaksi antara spesies anionik Cr(VI) dengan permukaan adsorben berbasis Fe_3O_4 sangat bergantung pada pH larutan dan muatan permukaan adsorben yang menghasilkan mekanisme adsorpsi yang berbeda secara fundamental dari ion kationik seperti Pb^{2+} . Selain itu penelitian ini juga mengkombinasikan studi adsorpsi pada sistem *batch* dan sistem kolom untuk memberikan pemahaman komprehensif mengenai performa adsorben.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan adsorben *fly ash* batubara/ Fe_3O_4 dalam menyerap ion logam Cr(VI) melalui sistem *batch* dan kolom. Pada sistem *batch*, parameter yang dioptimasi meliputi pH larutan, massa adsorben, konsentrasi awal adsorbat, dan waktu kontak, sedangkan pada sistem kolom optimasi dilakukan berdasarkan variasi laju alir. Sisa konsentrasi Cr(VI) setelah adsorpsi dianalisis dengan Spektrofotometer UV-Vis dengan kompleksasi 1,5-difenilkarbazida. Kemampuan adsorpsi dievaluasi melalui parameter efisiensi dan kapasitas adsorpsi serta pendekatan pemodelan isoterm menggunakan Langmuir dan Freundlich.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah peralatan gelas laboratorium, kertas saring, ayakan, neraca analitik, hotplate, shaker, pH meter, dan kolom adsorpsi. Peralatan

instrumentasi untuk analisis logam yaitu Spektrofotometer UV-Visible Perkin Elmer Lambda 25.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *fly ash* batubara yang berasal dari PLTU Cilacap, besi(III) klorida heksahidrat ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (Merck), besi(II) sulfat heptahidrat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (Merck), gas nitrogen (N_2), kalium dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) (Merck), asam nitrat 65% (HNO_3) (Merck), natrium hidroksida (NaOH) (Merck), asam fosfat (H_3PO_4) (Merck), asam sulfat (H_2SO_4) (Merck), difenilkarbazida ($(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH})_2\text{CO}$) (p.a), glass wool, dan akuades.

2.2. Prosedur Penelitian

Penelitian diawali dengan mempersiapkan *fly ash* batubara dari PLTU Cilacap melalui serangkaian tahap pra-perlakuan. *Fly ash* digerus dan diayak menggunakan ayakan 100 mesh untuk mendapatkan ukuran partikel yang seragam, kemudian dicuci dengan akuades untuk menghilangkan pengotor. Setelah itu, *fly ash* dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama 24 jam untuk menghilangkan kandungan air.

Sintesis Fe_3O_4 dilakukan melalui pencampuran larutan Fe^{3+} dari $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan Fe^{2+} dari $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dalam rasio molar 2:1, diaduk pada kecepatan 600 rpm. Selanjutnya, 100 mL larutan NaOH 10% ditambahkan secara bertahap sambil dipanaskan pada suhu 60°C selama 150 menit dalam kondisi refluks dan aliran gas nitrogen. Endapan Fe_3O_4 dipisahkan dengan magnet eksternal, dicuci hingga pH netral, dan dikeringkan pada suhu 60°C semalaman.

Pada sintesis *fly ash*/ Fe_3O_4 , *fly ash* batubara dicampurkan dengan Fe_3O_4 dalam rasio massa 3:1 dan diproses dengan ball mill pada 150 rpm selama 4 jam. Produk sintesis yang diperoleh kemudian dibersihkan menggunakan akuades dan dikeringkan pada temperatur 60°C selama 24 jam. Rasio komposit dipilih berdasarkan hasil optimasi yang dilaporkan oleh Arofah et al. (2024), yang menunjukkan bahwa rasio 3:1 menghasilkan luas permukaan BET terbesar ($4,878 \text{ m}^2/\text{g}$) dibandingkan rasio lainnya, sehingga memberikan hasil adsorpsi yang lebih tinggi.

2.3. Adsorpsi Batch

Percobaan adsorpsi *batch* dilakukan untuk menentukan kondisi terbaik adsorpsi Cr(VI) pada adsorben *fly ash*/ Fe_3O_4 . Pada tahap optimasi pH, 1,5 gram adsorben ditambahkan ke 50 mL larutan Cr(VI) berkonsentrasi 2 mg/L dengan pH yang diatur ke 2, 4, 6, 8, dan 10 menggunakan HNO_3 dan NaOH . Campuran diaduk pada 200 rpm dan suhu $\pm 30^\circ\text{C}$ selama 60 menit, lalu disaring. Konsentrasi Cr(VI) dalam filtrat diukur dengan spektrofotometer UV-Vis pada 540 nm menggunakan pereaksi 1,5-difenilkarbazida. Setelah hasil pH diperoleh, dilakukan optimasi massa adsorben (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 gram), konsentrasi Cr(VI) (2, 4, 6, 8, 10 mg/L), dan waktu kontak (20, 40, 60, 80 menit). Setiap percobaan dilakukan dalam dua kali pengulangan (duplo) untuk memastikan konsistensi hasil. Efisiensi dan kapasitas adsorpsi dapat dihitung dengan Persamaan 1 dan 2 berikut:

$$E(\%) = \left(\frac{C_o - C_e}{C_o} \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$Q = \left(\frac{C_o - C_e}{m} \right) \times V \quad (2)$$

Di mana E adalah efisiensi adsorpsi (%); C_o dan C_e adalah konsentrasi awal dan akhir larutan (mg/L); m adalah massa adsorben (g); V adalah volume larutan (L); dan Q adalah kapasitas adsorpsi (mg/g).

2.4. Adsorpsi Kolom

Uji metode kolom dilakukan menggunakan kolom adsorpsi kaca borosilikat. *Glass wool* dan adsorben *fly ash*/ Fe_3O_4 disusun dari dasar hingga atas kolom. Kondisi pH, massa adsorben, dan konsentrasi Cr(VI) mengacu pada kondisi terbaik dari metode *batch*. Larutan Cr(VI) dialirkan dari atas kolom dengan laju alir bervariasi (1, 2, dan 3 mL/menit) menggunakan katup untuk mengatur aliran. Efluen yang keluar diukur konsentrasi Cr(VI)-nya dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 540 nm menggunakan pereaksi 1,5-difenilkarbazida.

2.5. Isoterm Adsorpsi

Model isoterm adsorpsi Cr(VI) dianalisis menggunakan persamaan isoterm adsorpsi Langmuir dan Freundlich. Data yang digunakan dalam penentuan isoterm adsorpsi adalah data yang berasal dari hasil variasi konsentrasi adsorbat. Evaluasi kesesuaian model isoterm adsorpsi terhadap data hasil penelitian didasarkan pada persamaan garis linier dari model isoterm Langmuir dan Freundlich dengan melihat nilai koefisien korelasi (R^2).

Model isoterm Langmuir menggambarkan proses adsorpsi sebagai pembentukan lapisan tunggal (monolayer) molekul adsorbat pada permukaan adsorben, di mana setiap situs aktif hanya dapat berikatan dengan satu molekul adsorbat melalui ikatan kimia yang kuat. Permukaan adsorben homogen, dengan energi adsorpsi yang seragam, dan proses adsorpsi bersifat irreversibel, di mana molekul adsorbat terikat kuat pada situs aktif tertentu tanpa mempengaruhi situs lainnya (Schnoor, 1996). Persamaan model isoterm adsorpsi Langmuir:

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{K_L Q_m} + \frac{1}{Q_m} C_e \quad (3)$$

Di mana Q_e adalah kapasitas adsorpsi (mg/g); C_e adalah konsentrasi akhir larutan (mg/L); K_L adalah konstanta Langmuir (L/mg); Q_m adalah kapasitas adsorpsi maksimum (mg/g).

Model isoterm Freundlich menggambarkan proses adsorpsi sebagai pembentukan lebih dari satu lapisan (multilayer) molekul adsorbat pada permukaan adsorben, di mana ikatan pada lapisan pertama memungkinkan terbentuknya ikatan tambahan pada lapisan berikutnya. Mekanisme ini melibatkan ikatan fisika yang relatif lemah, seperti ikatan elektrostatis. Permukaan adsorben bersifat

heterogen dengan situs aktif yang memiliki energi adsorpsi berbeda, dan proses adsorpsi bersifat reversibel, memungkinkan molekul adsorbat berdesorpsi dan berpindah kembali ke fase larutan (Ruthven, 1984). Persamaan model isoterm adsorpsi Freundlich:

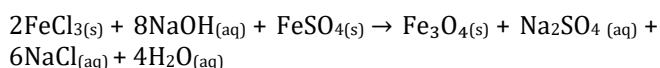
$$Q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots(4)$$

Di mana Q_e adalah kapasitas adsorpsi (mg/g); K_f adalah konstanta Freundlich (L/mg); C_e adalah konsentrasi akhir larutan (mg/L); dan $1/n$ adalah indeks Freundlich.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Adsorben *Fly ash*/ Fe_3O_4

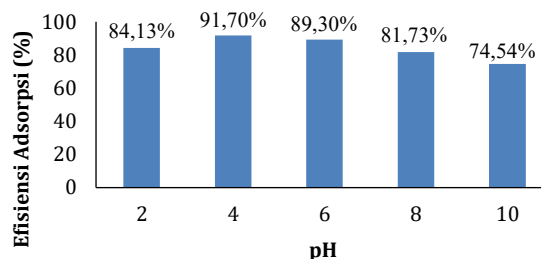
Hasil sintesis Fe_3O_4 menggunakan metode kopresipitasi menghasilkan magnetit yang stabil, dengan reaksi pembentukan melibatkan Fe^{2+} dan Fe^{3+} dalam larutan basa yang membentuk senyawa Fe_3O_4 . Reaksi kimia yang terjadi sebagai berikut.



Dalam sintesis adsorben *fly ash*/ Fe_3O_4 dengan rasio 3:1, tumbukan antar partikel selama proses *ball milling* menyebabkan distribusi merata Fe_3O_4 pada permukaan *fly ash* dan membuka pori-pori *fly ash*, yang meningkatkan luas permukaan serta jumlah situs aktif untuk adsorpsi. Berdasarkan penelitian (Arofah et al. 2024), rasio ini memberikan luas permukaan terbesar ($4,878 \text{ m}^2/\text{g}$), sehingga mampu meningkatkan efektivitas adsorpsi. Analisis XRF juga menunjukkan peningkatan unsur Si dan Al yang meningkatkan potensi adsorpsi.

3.2. pH

Pengaruh pH larutan terhadap efisiensi adsorpsi Cr(VI) dapat dilihat pada Gambar 1. Hasil menunjukkan bahwa dalam rentang variasi pH yang diuji (2–10), efisiensi adsorpsi tertinggi oleh *fly ash*/ Fe_3O_4 diperoleh pada pH 4, dengan efisiensi adsorpsi mencapai 91,70% dan kapasitas adsorpsi sebesar 0,083 mg/g. Pada pH asam (2–4), permukaan *fly ash* lebih terprotonasi, membentuk gugus bermuatan positif seperti silanol (Si-OH_2^+), yang meningkatkan interaksi elektrostatik dengan ion Cr(VI) bermuatan negatif (HCrO_4^- dan $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), sehingga memperkuat adsorpsi (Rajput, Jr, and Mohan 2016; Zhou, Yan, and Luo 2016). Penurunan efisiensi adsorpsi terjadi pada pH di atas 4, karena *fly ash* mengalami deprotonasi menjadi gugus negatif (SiO^-) yang menimbulkan gaya tolak dengan Cr(VI), mengurangi efisiensi adsorpsi (Thi, 2021).



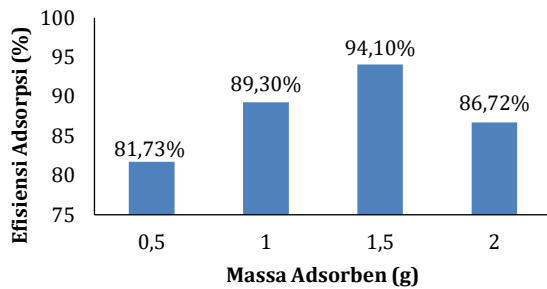
Gambar 1. Pengaruh pH terhadap Efisiensi Adsorpsi Ion Logam Cr(VI)

Komponen Fe_3O_4 juga berkontribusi pada adsorpsi ion Cr(VI). Pada $\text{pH} < \text{pHpzc}$ (sekitar 6,5), permukaan Fe_3O_4 bermuatan positif (FeOH_2^+), meningkatkan interaksi dengan ion Cr(VI) bermuatan negatif. Namun, pada $\text{pH} > \text{pHpzc}$, permukaan Fe_3O_4 mengalami deprotonasi menjadi FeO^- yang bermuatan negatif, mengurangi afinitasnya terhadap Cr(VI) akibat gaya tolak elektrostatik, sehingga menurunkan efisiensi adsorpsi (Zhang et al. 2020).

3.3. Massa Adsorben

Variasi massa adsorben *fly ash*/ Fe_3O_4 pada Gambar 2 menunjukkan bahwa massa adsorben yang memberikan efisiensi tertinggi dalam rentang yang diuji adalah 1,5 gram, sebesar 94,10% dan kapasitas adsorpsi 0,085 mg/g. Peningkatan efisiensi adsorpsi dari 0,5 hingga 1,5 gram terjadi karena semakin besarnya luas permukaan dan jumlah situs aktif yang tersedia, sehingga lebih banyak ion Cr(VI) dapat berikatan dengan adsorben (Huang et al. 2014). Namun, peningkatan massa hingga 2 gram menurunkan efisiensi adsorpsi karena kelebihan adsorben justru menyebabkan aglomerasi partikel yang mengurangi luas permukaan efektif (Mouni et al. 2018; Putra and Lee 2020).

Penggunaan massa adsorben yang relatif tinggi terhadap konsentrasi Cr(VI) yang rendah dilakukan sebagai pendekatan skala laboratorium untuk memastikan hasil adsorpsi dapat terukur dengan baik menggunakan Spektrofotometer UV-Vis, serta untuk mengkarakterisasi pengaruh massa adsorben secara terstruktur dan bertahap. Dalam aplikasi praktis pada air limbah industri dengan konsentrasi Cr(VI) yang jauh lebih tinggi, dosis adsorben yang lebih rendah dapat memberikan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi.

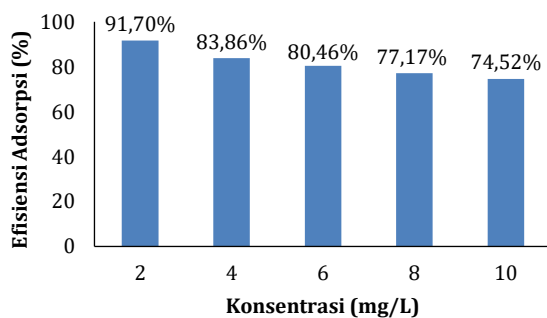


Gambar 2. Pengaruh Massa Adsorben terhadap Efisiensi Adsorpsi Ion Logam Cr(VI)

Penggunaan komposit *fly ash*/Fe₃O₄ meningkatkan kapasitas adsorpsi dibandingkan *fly ash* murni. Kondisi ini terjadi karena partikel berukuran lebih halus dengan distribusi yang lebih seragam hasil dari proses *milling*, yang memperluas area permukaan dan meningkatkan situs aktif untuk adsorpsi ion Cr(VI) (Harja et al. 2021).

3.4. Konsentrasi Ion Logam Cr(VI)

Penentuan konsentrasi Cr(VI) menunjukkan bahwa efisiensi adsorpsi tertinggi sebesar 91,70% dicapai pada konsentrasi awal 2 mg/L dengan kapasitas adsorpsi 0,083 mg/g yang dapat dilihat pada Gambar 3. Pada konsentrasi rendah, ion Cr(VI) dapat lebih mudah berinteraksi dengan situs aktif adsorben tanpa kompetisi, memungkinkan difusi yang lebih optimal dan efisiensi tinggi. Namun, peningkatan konsentrasi Cr(VI) hingga 10 mg/L menyebabkan penurunan efisiensi adsorpsi, karena situs aktif pada adsorben mulai jenuh, sehingga sebagian ion Cr(VI) tidak teradsorpsi (Vakili et al. 2019). Hasil ini diperkuat dengan temuan (Asl et al. 2013) pada adsorpsi Cr(VI) oleh Zeolit *Fly ash*, yang menunjukkan efisiensi menurun pada konsentrasi tinggi akibat kejenuhan adsorben.

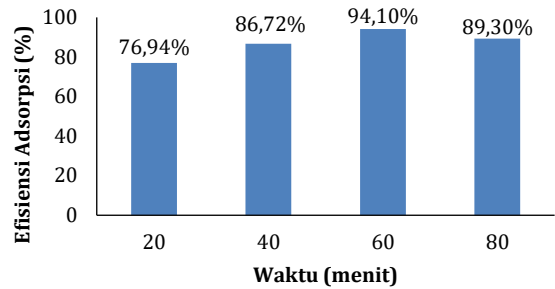


Gambar 3. Pengaruh Konsentrasi Terhadap Efisiensi Adsorpsi Ion Logam Cr(VI)

3.5. Waktu

Penentuan waktu adsorpsi optimal menghasilkan waktu kontak 60 menit sebagai kondisi terbaik yang dapat dilihat pada Gambar 4, dengan efisiensi adsorpsi ion logam Cr(VI) mencapai 94,10% dan kapasitas adsorpsi sebesar 0,085 mg/g. Peningkatan efisiensi dari waktu 20 hingga 60 menit disebabkan oleh adanya peningkatan tumbukan antara partikel adsorben *fly ash*/Fe₃O₄ dan ion Cr(VI) dalam larutan, yang memungkinkan interaksi lebih banyak dengan situs aktif

pada permukaan adsorben.

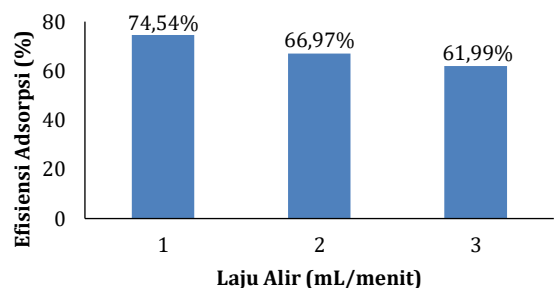


Gambar 4. Pengaruh Waktu Terhadap Efisiensi Adsorpsi Ion Logam Cr(VI)

Namun, pada waktu kontak yang diperpanjang hingga 80 menit, terjadi penurunan efisiensi adsorpsi. Hal ini kemungkinan akibat desorpsi sebagian ion Cr(VI) yang sudah teradsorpsi, akibat tumbukan berkelanjutan yang mengganggu ikatan antara ion Cr(VI) dengan situs aktif pada permukaan adsorben. Penurunan ini menunjukkan bahwa setelah mencapai titik keseimbangan pada 60 menit, sistem adsorpsi tidak mengalami peningkatan signifikan dalam mengikat ion Cr(VI) dan mulai melambat serta stabil (Manjunath, Singh Baghel, and Kumar 2020).

3.6. Hasil Adsorpsi Metode Kolom

Penentuan variasi laju alir dalam metode kolom pada Gambar 5 menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi dicapai pada laju alir 1 mL/menit dengan persentase adsorpsi ion Cr(VI) sebesar 74,54% dan kapasitas adsorpsi 0,067 mg/g. Pada laju alir ini, waktu kontak antara ion Cr(VI) dan adsorben *fly ash*/Fe₃O₄ berlangsung lebih lama, sehingga interaksi antara adsorbat dan situs aktif pada adsorben meningkat. Penelitian (Hamid and Kurniawati 2024) juga menunjukkan bahwa laju alir yang lebih rendah memberikan hasil serupa dalam adsorpsi ion logam Pb²⁺, dengan efisiensi dan kapasitas adsorpsi tertinggi pada laju 1 mL/menit.



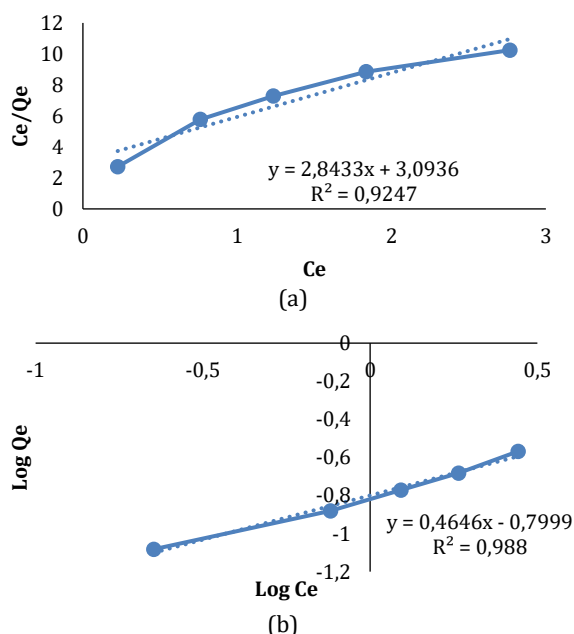
Gambar 5. Pengaruh Laju Alir Terhadap Efisiensi Adsorpsi Ion Logam Cr(VI)

Efisiensi adsorpsi menurun pada laju alir yang lebih tinggi, yaitu 2 dan 3 mL/menit. Hal ini terjadi karena durasi kontak yang semakin singkat ketika laju alir ditingkatkan, sehingga ion Cr(VI) memiliki

peluang lebih kecil untuk berinteraksi dengan situs aktif pada permukaan adsorben. Waktu kontak yang optimal sangat penting dalam metode kolom, sebab aliran yang terlalu cepat mengurangi jumlah ion logam yang dapat teradsorpsi dan menurunkan efisiensi total proses (Parameswari et al. 2020).

3.7. Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi menjelaskan hubungan antara jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada permukaan adsorben dan konsentrasi adsorbat dalam larutan hingga kesetimbangan tercapai. Penelitian ini menggunakan dua model isoterm, yaitu Langmuir dan Freundlich, untuk memahami mekanisme adsorpsi. Kesesuaian model ini dievaluasi melalui nilai koefisien korelasi (R^2) dari persamaan linear; nilai R^2 mendekati 1 menunjukkan kecocokan yang lebih baik antara model dan data penelitian (Fitriansyah, Amir, and Elvinawati 2021).



Gambar 6. Kurva Adsorpsi (a) Isoterm Langmuir (b) Isoterm Freundlich

Pada penelitian ini, isoterm Langmuir diplotkan dengan sumbu X sebagai C_e dan Y sebagai C_e/Q_e , sedangkan isoterm Freundlich menggunakan sumbu X sebagai $\text{Log } C_e$ dan Y sebagai $\text{Log } Q_e$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai R^2 untuk isoterm Langmuir adalah 0,9247, sedangkan isoterm Freundlich mencapai 0,9880, yang dapat dilihat pada Gambar 6. Berdasarkan hasil ini, adsorpsi Cr(VI) lebih sesuai dengan model Freundlich. Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi berlangsung pada permukaan adsorben yang heterogen dan mengikuti mekanisme fisik. Hasil ini diperkuat dengan penelitian (Arofah et al. 2024) yang juga menunjukkan bahwa adsorpsi ion logam Pb^{2+} pada *fly ash*/ Fe_3O_4 mengikuti model isoterm Freundlich. Nilai kapasitas maksimum (Q_{max}), koefisien Langmuir (K_L), koefisien Freundlich (K_F), dan nilai n dapat dilihat pada Tabel 1.

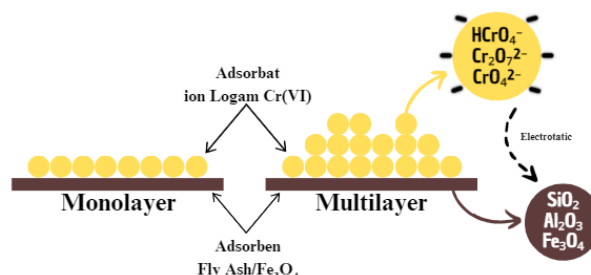
Tabel 1. Perbandingan Nilai Faktor Persamaan Langmuir dan Freundlich

Isoterm Langmuir		Isoterm Freundlich	
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
R^2	0,9247	R^2	0,9880
Q_{max}	0,3517	K_F	0,1585
K_L	0,9191	$1/n$ dan n	0,4646 dan 2,1523

Adsorpsi Cr(VI) oleh *fly ash*/ Fe_3O_4 berdasarkan isoterm Langmuir menunjukkan nilai kapasitas adsorpsi maksimum (Q_{max}) sebesar 0,3517 mg/g, yang lebih rendah dibandingkan dengan Q_{max} untuk Pb(II), yaitu 33,55 mg/g (Arofah et al. 2024), dan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-Al}_2\text{SiO}_5$ untuk Cr(VI) yang hanya 0,023 mg/g (Khan et al. 2023). Rendahnya Q_{max} dalam penelitian ini kemungkinan disebabkan oleh konsentrasi Cr(VI) yang sangat rendah (2–10 mg/L), rasio massa adsorben yang tinggi terhadap konsentrasi adsorbat, serta interaksi elektrostatik yang bersifat fisik dan relatif lemah antara Cr(VI) dan permukaan adsorben pada pH 4. Meskipun demikian, efisiensi adsorpsi yang tinggi (94,10%) mengindikasikan bahwa adsorben *fly ash*/ Fe_3O_4 efektif dalam mengurangi konsentrasi Cr(VI) pada kadar rendah.

Nilai konstanta Langmuir (K_L) 0,9191 L/mg mengindikasikan afinitas adsorben terhadap Cr(VI). Dalam model isoterm Freundlich, nilai K_F sebesar 0,1585 L/mg mengukur kemampuan adsorben, sementara nilai n sebesar 2,1523 menunjukkan ikatan fisik sebagai mekanisme adsorpsi. Selain itu, nilai $1/n$ sebesar 0,4646 menandakan adsorpsi yang menguntungkan, namun dengan interaksi yang relatif lemah, sehingga adsorben masih mampu mengikat ion Cr(VI), tetapi tidak terlalu kuat (Ragadhita and Nandiyanto 2021).

Proses adsorpsi ion logam Cr(VI) menggunakan adsorben *fly ash*/ Fe_3O_4 ketika mengikuti model isoterm Freundlich, mekanismenya diilustrasikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Mekanisme Adsorpsi Logam Cr(VI) Menggunakan *Fly Ash*/ Fe_3O_4

Adsorpsi ion Cr(VI) pada *fly ash*/ Fe_3O_4 dapat mengikuti model isoterm Freundlich, yang membentuk lapisan ganda (multilayer) melalui interaksi fisik lemah, seperti ikatan elektrostatik (Atkins, Paula, and Keeler 2018). Komponen aktif seperti SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_3O_4 pada *fly ash*/ Fe_3O_4 mempengaruhi adsorpsi, di mana kondisi asam

menyebabkan permukaan adsorben terprotonasi dan bermuatan positif, sehingga lebih mudah mengikat anion Cr(VI) seperti HCrO_4^- , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, atau CrO_4^{2-} . Sebaliknya, pada kondisi basa, permukaan bermuatan negatif, mengurangi interaksi dengan anion Cr(VI) dan menurunkan efisiensi adsorpsi (Zhou, Yan, and Luo 2016).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji efektivitas adsorben komposit *fly ash* batubara/ Fe_3O_4 dalam menyerap ion logam Cr(VI) dari larutan sintetis menggunakan sistem *batch* dan kolom. Pada sistem *batch*, dalam rentang variasi yang diuji, kondisi yang memberikan efisiensi adsorpsi tertinggi diperoleh pada pH 4, massa adsorben 1,5 gram, konsentrasi adsorbat 2 mg/L, dan waktu kontak 60 menit, dengan efisiensi adsorpsi sebesar 94,10% dan kapasitas adsorpsi 0,085 mg/g. Pada sistem kolom, laju alir terbukti mempengaruhi efisiensi adsorpsi, di mana laju alir 1 mL/menit memberikan efisiensi tertinggi sebesar 74,54% dan kapasitas adsorpsi 0,067 mg/g. Analisis isoterm adsorpsi menunjukkan bahwa adsorpsi Cr(VI) lebih sesuai dengan model Freundlich ($R^2 = 0,9880$) dibandingkan model Langmuir ($R^2 = 0,9247$), mengindikasikan mekanisme adsorpsi multilayer pada permukaan adsorben.

Hasil ini berlaku dalam batas kondisi laboratorium yang diuji dan menggunakan larutan Cr(VI) sintetis. Keterbatasan penelitian ini meliputi: penggunaan desain OFAT (*one factor at a time*) yang tidak memungkinkan optimasi interaksi antar faktor; tidak ada data kurva breakthrough untuk karakterisasi penuh performa kolom; dan tidak diujinya adsorben pada air limbah nyata. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mengevaluasi performa adsorben pada kondisi air limbah nyata, mengembangkan kurva breakthrough kolom, dan mengeksplorasi potensi regenerasi adsorben.

DAFTAR PUSTAKA

- Arofah, Nurmaya, Annisa Naila Izzati, Yusraini Dian Inayati Siregar, Yulyani Nur Azizah, and Agus Rimus Liandi. 2024. "Utilization of Magnetite-Supported Coal *Fly ash* as an Efficient Adsorbent for Pb Metal Removal in Aqueous Environments." *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 10: 100883.
- Asl, Seyed Mostafa Hosseini, Maral Ahmadi, Mohamad Ghiasvand, Ali Tardast, and Reza Katal. 2013. "Artificial Neural Network (ANN) Approach for Modeling of Cr(VI) Adsorption from Aqueous Solution by Zeolite Prepared from Raw *Fly ash* (ZFA)." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 19 (3): 1044–55.
- Asmadi, Endro S, and W Oktiawan. 2009. "Pengurangan Chrom (Cr) Dalam Limbah Cair Industri Kulit Pada Proses Tannery Menggunakan Senyawa Alkali $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH Dan NaHCO_3 (Studi Kasus PT. Trimulyo Kencana Mas Semarang)." *Jurnal Air Indonesia* 5 (1): 41–54.
- Atkins, Peter William, Julio De Paula, and James Keeler. 2018. *Physical Chemistry*. 11th ed. Oxford: Oxford University Press.
- Costa, Madalena Da. 2019. "Studi Penurunan Kadar Logam Kromium (Cr) Dalam Limbah Buatan Elektroplating Menggunakan Metode Presipitasi Dan Adsorpsi." Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Fitriansyah, Ahmad, Hermansyah Amir, and Elvinawati Elvinawati. 2021. "Karakterisasi Adsorben Karbon Aktif Dari Sabut Pinang (*Areca Catechu*) Terhadap Kapasitas Adsorpsi Zat Warna indigosol Blue 04-B." *Alotrop* 5 (1): 42–54.
- Hamid, Syafira Putri, and Desy Kurniawati. 2024. "Pengaruh Ukuran Partikel Dan Laju Alir Terhadap Penyerapan Ion Logam Pb^{2+} Pada Kulit Langsung (*Lansium Domesticum*)." *MASALIQ* 4 (1): 409–16.
- Hariani, Poedji Loekitowati, Nurlisa Hidayati, and Melly Oktaria. 2009. "Penurunan Konsentrasi Cr(VI) Dalam Air Dengan Koagulan FeSO_4 ." *Jurnal Penelitian Sains* 12 (C): 12208.
- Harja, Maria, Gabriela Buema, Nicoleta Lupu, Horia Chiriac, Dumitru Daniel Herea, and Gabriela Ciobanu. 2021. "*Fly ash* Coated with Magnetic Materials: Improved Adsorbent for Cu (II) Removal from Wastewater." *Materials* 14 (1): 1–18.
- Huang, Yang, Shunxing Li, Jianhua Chen, Xueliang Zhang, and Yiping Chen. 2014. "Adsorption of Pb(II) on Mesoporous Activated Carbons Fabricated from Water Hyacinth Using H_3PO_4 Activation: Adsorption Capacity, Kinetic and Isotherm Studies." *Applied Surface Science* 293: 160–68. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.12.123>.
- Jahangiri, Katayoun, Nader Yousefi, Seid Kamal Ghadiri, Rana Fekri, Amin Bagheri, and Seyedeh Solmaz Talebi. 2019. "Enhancement Adsorption of Hexavalent Chromium Onto Modified *Fly ash* from Aqueous Solution; Optimization; Isotherm, Kinetic and Thermodynamic Study." *Journal of Dispersion Science and Technology* 40 (8): 1147–58.
- Jiang, Xiaoling, Wenqiang Fan, Chunqing Li, Yong Wang, Junbin Bai, Hongjian Yang, and Xiaoli Liu. 2019. "Removal of Cr(VI) from Wastewater by a Two-Step Method of Oxalic Acid Reduction-Modified *Fly ash* Adsorption." *RSC Advances* 9 (58): 33949–56.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2023). Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (2014). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia.
- Khan, Mumtaz, Islamud Din, Fazli Aziz, Imdad Ullah Qureshi, Muhammad Zahid, Ghulam Mustafa, Aroosa Sher, and Said Hakim. 2023. "Chromium Adsorption from Water Using Mesoporous Magnetic Iron Oxide-Aluminum Silicate Adsorbent: An Investigation of Adsorption Isotherms and Kinetics." *Current Research in Green and Sustainable Chemistry* 7 (June): 100368. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2023.100368>.
- Manjunath, S. V., Ranu Singh Baghel, and Mathava Kumar. 2020. "Antagonistic and Synergistic Analysis of Antibiotic Adsorption on Prosopis Juliflora Activated Carbon in Multicomponent Systems." *Chemical Engineering Journal* 381 (June 2019).

- Arofah, N., Falakhiyyah, L., Nurhasni, Azizah, Y. N., Saadah, S., Nurrahman, S., dan Erusani, A. S. (2026). Pemanfaatan Adsorben *Fly ash* Batubara/ Fe_3O_4 untuk Adsorpsi Ion Logam Cr(VI) dengan Sistem *Batch* dan Kolom. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(3), 652-659, doi:10.14710/jil.24.3.652-659
- Mauna, Rosyeni Berti, Isa Ma, and Prehatin Trirahayu Nigrum. 2015. "Kandungan Kromium (Cr) Pada Limbah Cair Dan Air Sungai Serta Keluhan Kesehatan Masyarakat Di Sekitar Industri Elektroplating." *Artikel Ilmiah Hasil Penelitian Mahasiswa*, 0-5.
- Mouni, Lotfi, Lazhar Belkhiri, Jean Claude Bollinger, Abdelkrim Bouzaza, Aymen Assadi, Amar Tirri, Farid Dahmoune, Khodir Madani, and Houcine Remini. 2018. "Removal of Methylene Blue from Aqueous Solutions by Adsorption on Kaolin: Kinetic and Equilibrium Studies." *Applied Clay Science* 153 (March 2017): 38-45.
- Palar, Heryando. 2008. *Pencemaran Dan Toksikologi Logam Berat*. Jakarta: Rineka Cipta. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:132156452>.
- Parameswari, E., R. P. Premalatha, V. Davamani, P. Kalaiselvi, and S. P. Paul Sebastian. 2020. "Efficiency of Water Hyacinth Biomass on Removal and Recovery of Chromium from Aqueous Solution through Column Study." *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 9 (1): 1093-1101.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Jakarta: Sekretariat Negara Republik Indonesia.
- Putra, Rio Nugraha, and Young Haeng Lee. 2020. "Entrapment of Micro-Sized Zeolites in Porous Hydrogels: Strategy to Overcome Drawbacks of Zeolite Particles and Beads for Adsorption of Ammonium Ions." *Separation and Purification Technology* 237 (June): 116351.
- Ragadhita, Risti, and Asep Bayu Dani Nandiyanto. 2021. "How to Calculate Adsorption Isotherms of Particles Using Two-Parameter Monolayer Adsorption Models and Equations." *Indonesian Journal of Science and Technology* 6 (1): 205-34.
- Rajput, Shalini, Charles U Pittman Jr, and Dinesh Mohan. 2016. "Magnetic Magnetite (Fe_3O_4) Nanoparticle Synthesis and Applications for Lead (Pb^{2+}) and Chromium (Cr^{6+}) Removal from Water." *Journal of Colloid and Interface Science* 468: 334-46.
- Reynolds, Tom David, and Paul Arnold Richards. 1995. *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*. 2nd ed. Boston: PWS Publishing Company. <https://api.semanticscholar.org>.
- Rohmah, Dini Nadiatu. 2023. "Sintesis Dan Karakterisasi Zeolit Dari *Fly ash* Batubara Dengan Metode Hidrotermal Sebagai Adsorben Ion Logam Besi (Fe^{3+})." Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta.
- Ruthven, Douglas Malcolm. 1984. *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. Wiley-Interscience Publication. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Schnoor, Jerald Lynn. 1996. *Environmental Modeling: Fate and Transport of Pollutants in Water, Air, and Soil*. Environmental Science and Technology: A Wiley-Interscience Series of Texts and Monographs. New York: Wiley.
- Thi, Nga Dinh. 2021. "Evaluating the Removal of Hexavalent Chromium (Cr -VI) in Wastewater by Low-Cost Adsorbent Modified from Waste *Fly ash*." *Chemical Engineering Transactions* 89: 547-52.
- Vakili, Mohammadtaghi, Shubo Deng, Giovanni Cagnetta, Wei Wang, Pingping Meng, Dengchao Liu, and Gang Yu. 2019. "Regeneration of Chitosan-Based Adsorbents Used in Heavy Metal Adsorption: A Review." *Separation and Purification Technology* 224 (February): 373-87.
- Wardani, Sri Prabandiyani Retno. 2008. "Pemanfaatan Limbah Batubara (*Fly ash*) Untuk Stabilisasi Tanah Maupun Keperluan Teknik Sipil Lainnya Dalam Mengurangi Pencemaran Lingkungan." Universitas Diponegoro.
- Widowati, W., A. Sastion, and R. Jusuf. 2008. *Efek Toksik Logam: Pencegahan Dan Penanggulangan Pencemaran*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Zhang, Jin, Shuang Lin, Meiling Han, Qing Su, Lianqiu Xia, and Zhaocong Hui. 2020. "Adsorption Properties of Magnetic Magnetite Nanoparticle for Coexistent Cr(VI) and Cu(II) in Mixed Solution." *Water (Switzerland)* 12 (2): 1-13.
- Zhou, Qi, Chunjie Yan, and Wenjun Luo. 2016. "Polypyrrole Coated Secondary *Fly ash*-Iron Composites: Novel Floatable Magnetic Adsorbents for the Removal of Chromium (VI) from Wastewater." *Materials and Design* 92: 701-9.