

PEMANFAATAN BATU APUNG SEBAGAI ADSORBEN DALAM APLIKASI KOLOM ADSORPSI UNTUK PENYISIHAN LOGAM KROMIUM DARI AIR TANAH

Utilization of Pumice as Adsorbent in the Application of Adsorption Column for Removal of Chromium from Groundwater

SHINTA INDAH*, DENNY HELARD** dan FEBBI HERDIANI**

Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Andalas,
Kampus Unand Limau Manis, Padang 25163

Korespondensi e-mail: shintaindah@eng.unand.ac.id

*Kontributor Utama **Kontributor Anggota

ABSTRAK

Pemanfaatan batu apung sebagai adsorben telah diuji dalam aplikasi kolom adsorpsi dalam menyisihkan logam kromium (Cr) dari air tanah. Batu apung diambil dari pinggiran Sungai Pasak, Pariaman, Sumatra Barat. Kolom yang digunakan terbuat dari kaca dengan tinggi 130 cm dan diameter 2,6 cm. Percobaan dilakukan dengan bervariasi ketinggian *bed* yaitu 65, 75 dan 85 cm dan kecepatan alir influen yaitu 2, 3 dan 4 gpm/ft², sementara konsentrasi influen yang digunakan sesuai kondisi sampel air tanah. Konsentrasi logam Cr dianalisis menggunakan *inductively coupled plasma emission* (ICPE). Kinerja kolom adsorpsi dapat dilihat dari kurva *breakthrough* yang merupakan plot antara rasio C_t/C_0 terhadap waktu pengambilan sampel. Hasil percobaan menunjukkan bahwa kondisi optimum dengan efisiensi penyisihan tertinggi yaitu 65,15% dan kapasitas adsorpsi sebesar 0,0031 mg/g diperoleh pada ketinggian *bed* 85 cm dan kecepatan alir influen 2 gpm/ft². Berdasarkan hasil percobaan disimpulkan bahwa semakin kecil kecepatan alir influen dan semakin tinggi *bed* adsorben maka efisiensi penyisihan logam terlarut meningkat. Kolom adsorpsi dengan batu apung Sungai Pasak Pariaman sebagai adsorben berpotensi untuk diaplikasikan dalam penyisihan logam Cr dari air tanah.

Kata kunci: adsorpsi, air tanah, batu apung, kolom, kromium.

ABSTRACT

The utilization of pumice as an adsorbent has been tested in adsorption column applications in removing chromium (Cr) from groundwater. The pumice was taken from the banks of the Pasak River, Pariaman, West Sumatra. The column used is made of glass with 130 cm in height and 2,6 cm in diameter. The experiment was carried out by varying the bed height (65, 75, and 85 cm) and the influent flow rate (2, 3, and 4 gpm/ft²), while the influent concentration used was according to the groundwater sample conditions. The concentration of Cr was analyzed using *inductively coupled plasma emission* (ICPE). The performance of the adsorption column can be evaluated from the breakthrough curve, which is a plot between the C_t/C_0 ratio and the sampling time. The experimental results showed that the optimum condition with the highest removal efficiency of 65.15% and an adsorption capacity of 0.0031 mg/g were obtained at a bed height of 85 cm and an influent flow rate of 2 gpm/ft². Based on the experimental results, it was concluded that Cr removal efficiency increased as the influent flow rate decreased and as the bed height of adsorbent increased. The adsorption column with Sungai Pasak Pariaman pumice as an adsorbent has potential to be applied in removing Cr metal from groundwater.

Keywords: adsorption, groundwater, pumice, column, chromium.

PENDAHULUAN

Salah satu sumber air bersih yang banyak digunakan di Indonesia berasal dari air tanah. Air tanah tersebut dapat berasal dari air tanah dangkal dan air tanah dalam. Namun, aktivitas manusia seperti kegiatan rumah tangga, pertanian, perbengkelan dan industri dapat menyebabkan pencemaran air tanah. Salah satu faktor penyebab yang dapat mencemari air tanah yaitu adanya pencemar anorganik seperti unsur logam terlarut dalam air. Hal ini dibuktikan dari hasil *grab sampling* di delapan titik lokasi tersebar di Kota Padang yang dilakukan sebagai survei pendahuluan pada penelitian ini. Hasil sampling menunjukkan bahwa air tanah tersebut mengandung unsur logam arsen (As), nikel (Ni), kromium (Cr), besi (Fe), kadmium (Cd), aluminium (Al), raksa (Hg), boron (B), selenium (Se) yang melebihi baku mutu menurut Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 Tentang Kesehatan Lingkungan (Hudawaty, 2017).

Berdasarkan hal tersebut, upaya pengolahan air tanah diperlukan untuk menyisihkan unsur logam terlarut pada air tanah. Salah satu metode pengolahan air yang sering digunakan adalah adsorpsi. Metode ini mempunyai keunggulan karena biaya yang diperlukan relatif rendah, namun menghasilkan efisiensi tinggi dan tidak memberikan hasil samping berupa zat beracun. Dalam proses adsorpsi dibutuhkan adsorben sebagai media penjerap. Saat ini, penggunaan mineral alami sebagai adsorben dalam menyisihkan logam dari air tanah mendapat perhatian ekstra karena mempunyai efisiensi yang relatif tinggi. Adsorben yang berasal dari mineral alami dapat berupa zeolit dan batu apung (Kumar dan Bandyopadhyay, 2006; Bhattacharya *dkk.*, 2013; Indah *dkk.*, 2017).

Salah satu mineral alami yaitu batu apung. Batu apung merupakan batuan gelas vulkanik silikat yang memiliki struktur berpori dan mengandung sangat banyak kapiler halus. Batu apung merupakan salah satu alternatif adsorben biaya rendah, tetapi mempunyai efektifitas yang baik. Kemampuan batu apung sebagai adsorben telah diuji dalam beberapa penelitian, di antaranya dalam penyisihan As dari sumber air minum dengan efisiensi

penyisihan sebesar 98% (Heidari *dkk.*, 2011) dan dalam penyisihan unsur logam Cu dan Cr dari air buangan dengan efisiensi penyisihan sebesar 80% (Yavuz *dkk.*, 2008).

Salah satu sumber batu apung di Sumatera Barat adalah batu apung yang berasal dari sisa aktivitas penambangan pasir di Sungai Pasak, Pariaman. Batu apung banyak ditemukan di wilayah tersebut dan tidak dimanfaatkan oleh masyarakat sekitar. Kemampuan batu apung Sungai Pasak sebagai adsorben telah teruji kemampuannya dalam penyisihan logam pada proses adsorpsi secara *batch* dan kontinu dalam beberapa penelitian, diantaranya untuk menyisihkan logam Fe, Mn, Cr dan Al dari air tanah dengan efisiensi penyisihan berkisar 10-80% (Indah *dkk.*, 2017, 2018; Indah, Helard dan Binuwara, 2018; Indah, Helard dan Hudawaty, 2019).

Logam Cr merupakan logam berat yang menimbulkan efek negatif terhadap manusia jika terakumulasi dalam tubuh dan menjadi parameter wajib air minum pada Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023. Dalam artikelnya tentang proses remediasi logam Cr dari air tanah, Acharyya, Das dan Thaker (2023) mengkaji beberapa metode penyisihan termasuk elektrokoagulasi dan adsorpsi menggunakan adsorben dari mineral alami dan biosorben. Dari kajian tersebut dilaporkan efisiensi penyisihan logam Cr yang relatif tinggi, mencapai 90%. Penelitian lanjutan dapat difokuskan pada penerapan metode yang efisien di lapangan untuk skala besar pengolahan air dengan minimalisasi biaya dan menggunakan air tanah aktual sebagai sampel untuk mempelajari laju penyisihan Cr dalam larutan multikomponen dengan keberadaan unsur-unsur lain (Acharyya, Das dan Thaker, 2023).

Dalam upaya pendekatan untuk penerapan di lapangan, pada penelitian ini dilakukan penerapan kolom adsorpsi untuk menyisihkan unsur logam Cr dari air tanah. Kolom adsorpsi digunakan karena aplikasinya di lapangan lebih praktis dan ekonomis (Asere *dkk.*, 2017). Sebagai adsorben digunakan batu apung Sungai Pasak Pariaman sebagai adsorben. Penelitian dengan kolom adsorpsi ini belum pernah dilakukan dan berbeda dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan secara *batch* (Indah *dkk.*, 2018). Penentuan kondisi optimum meliputi kecepatan alir influen dan

ketinggian *bed* dilakukan untuk mendapatkan efisiensi penyisihan tertinggi. Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat untuk peningkatan kualitas air tanah yang lebih baik dan bisa diaplikasikan di lapangan.

METODE

Pengambilan Bahan Baku Adsorben

Bahan baku adsorben yang digunakan adalah batu apung yang berasal dari sisa penambangan pasir di Sungai Pasak, Pariaman, Sumatera Barat, Indonesia yang terletak pada titik koordinat 00°36'04,9" Lintang Selatan dan 100°08'55,1" Bujur Timur. Batu apung dicuci dengan aquades terlebih dahulu untuk menghilangkan kotoran yang menempel dan dikering dengan angin. Kemudian batu apung dihaluskan menggunakan lumpang dan alu, lalu diayak menggunakan ayakan dengan diameter 1 mm dan mesin ayakan HS 200. *Energy dispersive x-ray* (EDX) *spectroscopy* digunakan untuk memperoleh informasi tentang kandungan oksida batu apung alami. Morfologi permukaan batu apung diamati dengan *scanning electron microscopy* (SEM) model S-3400N, Hitachi, Japan.

Sampling Air Tanah

Sampel air tanah diambil dari salah satu sumur masyarakat di daerah Purus, Kota Padang. Kondisi eksisting di sekitar lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 1, terdapat aktivitas perbengkelan dengan jarak ± 3 m dari lokasi pengambilan sampel. Konsentrasi logam Cr dalam air tanah tersebut adalah 0,0518

mg/L, dengan nilai pH 6,2; suhu 7,8°C dan DO 8,20 mg/L.

Pemasangan Instalasi Penelitian

Instalasi penelitian terdiri dari bak penampung larutan dan kolom adsorpsi. Bak penampung berfungsi untuk menampung sampel air yang akan dialirkan ke kolom adsorpsi. Kolom adsorpsi terbuat dari kaca dengan ketebalan 0,5 cm, tinggi total kolom 130 cm dan diameter kolom 2,6 cm. Desain kolom adsorpsi ini dibuat berdasarkan kriteria desain Reynolds dan Richards (1996), yaitu diameter kolom minimum 1 inci (2,5 cm) dan ketinggian kolom minimum 24 inci (60 cm).

Kolom adsorpsi diisi dengan batu apung. Pengisian adsorben batu apung pada kolom adsorpsi harus benar-benar padat sehingga ketika dialiri oleh sampel air adsorbatnya tidak ikut terbawa. Kolom dilengkapi dengan pipa *overflow* dan kran outlet. Sebelum outlet, dipasang *glass wool* untuk mencegah keluarnya adsorben bersama dengan larutan yang keluar dari outlet. Skema kolom adsorpsi dapat dilihat pada Gambar 2.

Percobaan aplikasi kolom adsorpsi dilakukan selama 6 jam dengan waktu pengambilan sampel setiap 1 jam. Percobaan ini menggunakan 2 parameter percobaan yaitu ketinggian *bed* dalam kolom adalah 65, 75, dan 85 cm dan kecepatan alir influen yaitu 2, 3 dan 4 gpm/ft² yang setara dengan 43, 65 dan 87 mL/menit. Konsentrasi logam Cr dianalisis dengan menggunakan *inductively coupled plasma emission* Shimadzu tipe ICPE-9000.



Gambar 1. Kondisi eksisting lokasi pengambilan sampel air tanah



Sumber: Indah, Helard dan Hudawaty (2019)

Gambar 2. Skema kolom adsorpsi

Analisis dan pembahasan percobaan optimasi meliputi efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi pada masing-masing variasi kecepatan alir influen dan ketinggian *bed*. Efisiensi penyisihan merupakan penurunan konsentrasi logam Cr oleh adsorben batu apung. Kapasitas adsorpsi merupakan besarnya kemampuan adsorben dalam mengadsorpsi logam Cr. Kapasitas adsorpsi dinyatakan dalam mg/g adsorben. Besarnya efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut (Aksu, Gönen dan Demircan, 2002):

$$q_{\text{total}} = \frac{Q}{1000} \int_{t_0}^{t_{\text{tot}}} (C_0 - C_t) dt \quad (1)$$

$$m_{\text{total}} = \frac{C_0 \cdot Q \cdot t_{\text{total}}}{1000} \quad (2)$$

$$\%R = \frac{\sum q_{\text{total}}}{\sum m_{\text{total}}} \times 100 \quad (3)$$

$$q_{\text{eq}} = \frac{\sum q_{\text{total}}}{X} \quad (4)$$

Keterangan:

q_{total} = jumlah total massa adsorbat yang terjerap dalam kolom adsorpsi (mg);

m_{total} = jumlah total konsentrasi adsorbat yang melewati kolom adsorpsi (mg);

Q = laju alir influen (mL/menit);

C_0 = konsentrasi adsorbat awal (mg/l);

C_t = konsentrasi adsorbat pada waktu t (mg/L);

t_{total} = total waktu operasi kolom adsorpsi (menit);

t = waktu (menit);

$\%R$ = persentase penyisihan adsorbat (%);

q_{eq} = kapasitas adsorpsi (mg/g);

X = massa adsorben dalam kolom (g).

HASIL DAN PEMBAHASAN

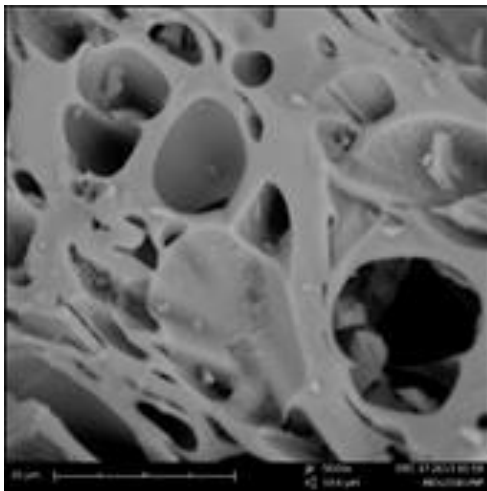
Karakteristik Batu Apung Sungai Pasak

Hasil analisis EDX ditampilkan pada Tabel 1. Dari tabel tersebut terlihat Si, Al dan K adalah unsur utama dalam batu apung dari Sungai Pasak. Unsur lain terdapat dalam jumlah yang relatif lebih kecil (kurang dari 3%). Komposisi unsur batu apung juga menunjukkan tidak adanya zat berbahaya atau karsinogenik, sehingga batu apung dianggap cocok sebagai adsorben untuk mengolah air yang tercemar.

Hasil analisis SEM yang menunjukkan morfologi permukaan batu apung alami dari Sungai Pasak, Sumatera Barat dapat dilihat pada Gambar 3. Gambar tersebut menunjukkan bahwa batu apung memiliki tekstur yang tidak teratur, seluler, permukaan halus, dan sangat berpori dengan rongga besar, yang berfungsi sebagai situs yang cocok untuk adsorpsi.

Tabel 1. Komposisi kimia batu apung dari Sungai Pasak, Sumatra Barat

Komposisi	Persentase (%)
SiO ₂	76,586
Al ₂ O ₃	13,913
K ₂ O	3,604
CaO	2,11
Fe ₂ O ₃	1,485
MgO	0,876
P ₂ O ₅	0,822
TiO ₂	0,197
Ag ₂ O	0,143
MnO	0,044
Lain-lain	0,22



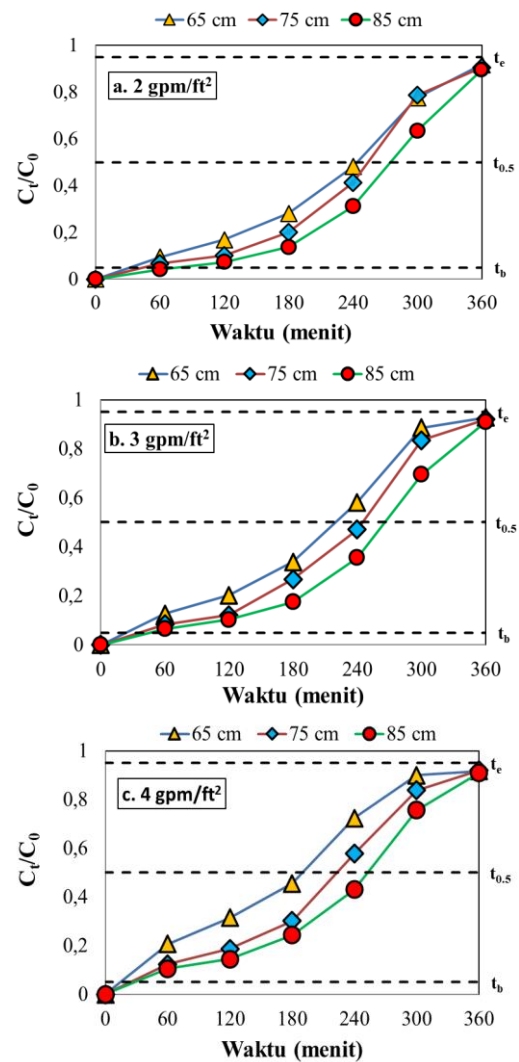
Gambar 3. Hasil analisis SEM batu apung dari Sungai Pasak, Sumatra Barat, Indonesia (perbesaran 5000x).

Percobaan Kolom Adsorpsi

Kinerja kolom adsorpsi dalam menyisihkan logam-logam terlarut dalam air dapat dilihat dari kurva *breakthrough* yang dihasilkan. Waktu *breakthrough point* (t_b) dapat ditentukan jika rasio C_t/C_0 bernilai 0,05, sedangkan waktu setengah jenuh ($t_{0,5}$) dapat dilihat jika rasio C_t/C_0 bernilai 0,5. Jika rasio C_t/C_0 bernilai 0,95, maka adsorben telah mencapai titik jenuh (t_e). Kondisi jenuh merupakan kondisi kesetimbangan yaitu konsentrasi efluen (C_t) mendekati konsentrasi influen (C_0) (Reynolds dan Richards, 1996).

Pengaruh ketinggian *bed* 65, 75 dan 85 cm pada kurva *breakthrough* pada berbagai kecepatan alir influen 2, 3 dan 4 gpm/ft^2 (masing-masing setara dengan 43, 65 dan 87

mL/menit) ditampilkan pada Gambar 4. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan variasi ketinggian *bed*, bentuk dan gradien kurva *breakthrough* sedikit berbeda. Pada awal percobaan diperoleh adsorpsi logam Cr yang lebih tinggi, namun konsentrasi logam Cr dalam efluen meningkat dengan cepat setelah waktu *breakthrough*. Ketinggian *bed* yang lebih rendah mencapai jenuh lebih awal dari ketinggian *bed* yang lebih tinggi.

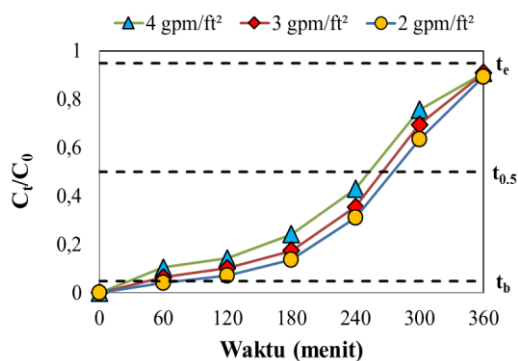


Gambar 4. Pengaruh variasi ketinggian *bed* terhadap kurva *breakthrough* adsorpsi logam Cr oleh batu apung pada berbagai kecepatan alir influen (t_b = waktu *breakthrough*; $t_{0,5}$ = waktu setengah jenuh; t_e = waktu jenuh; gpm/ft^2 = gallons per minute per square foot).

Dari Gambar 4, pada berbagai laju aliran, terlihat bahwa waktu *breakthrough* (t_b) dan

waktu *exhausted*/ jenuh (t_e) meningkat seiring bertambahnya ketinggian *bed*. Waktu *breakthrough* kolom dan kinerja lapisan adsorben sangat dipengaruhi oleh ketinggian *bed* (Suksabye, Thiravetyan dan Nakbanpote, 2008; Lim dan Aris, 2014). Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa adsorpsi logam Cr dalam kolom meningkat seiring dengan bertambahnya ketinggian *bed* yang mengakibatkan bertambahnya waktu kontak untuk adsorpsi logam Cr. Pada ketinggian *bed* terendah tidak ada waktu yang cukup bagi ion Cr untuk masuk ke dalam pori-pori batu apung. *Bed* yang lebih panjang juga dapat memperpanjang tercapainya waktu jenuh dari adsorben, sehingga waktu proses adsorpsi dapat berjalan lebih lama, tanpa pergantian atau regenerasi adsorben. Namun, waktu jenuh dicapai lebih cepat pada ketinggian *bed* yang lebih rendah, mencerminkan kinerja yang kurang baik (Xu dkk., 2013).

Pengaruh kecepatan alir influen terhadap adsorpsi logam Cr juga dapat dilihat dari kurva *breakthrough*. Kurva *breakthrough* dengan variasi kecepatan alir influen pada ketinggian *bed* 85 cm dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil menunjukkan bahwa penurunan kecepatan alir influen di semua ketinggian *bed* dapat meningkatkan waktu *breakthrough* (t_b). Hasil juga menunjukkan bahwa pada kecepatan alir influen yang lebih besar, waktu jenuh (t_e) tercapai lebih cepat karena bagian depan zona adsorpsi dengan cepat mencapai bagian atas kolom.



Gambar 5. Pengaruh variasi kecepatan alir pada ketinggian *bed* 85 cm terhadap kurva *breakthrough* adsorpsi logam Cr oleh batu apung.

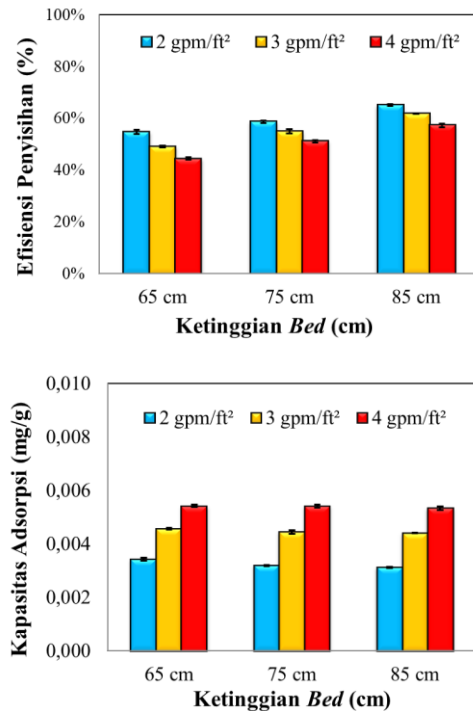
(t_b = waktu *breakthrough*; $t_{0.5}$ = waktu setengah jenuh; t_e = waktu jenuh)

Sebaliknya, zona adsorpsi yang dangkal diperoleh pada kecepatan alir influen yang lebih kecil dan waktu kontak yang lebih lama. Selain itu, kecepatan alir influen yang meningkat mengakibatkan waktu kontak antara adsorbat dan adsorben relatif singkat. Akibatnya, adsorpsi tidak sempurna dan pada awal operasi, menghasilkan kurva *breakthrough* yang curam (Vijayaraghavan dkk., 2004; Xu dkk., 2013). Dari studi pengaruh kecepatan alir influen, diindikasikan bahwa kecepatan alir influen yang lebih kecil atau waktu kontak yang lebih lama diperlukan untuk adsorpsi logam Cr dalam kolom batu apung.

Pengaruh kecepatan alir influen dan ketinggian *bed* terhadap efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi logam Cr dapat dilihat pada Gambar 6. Efisiensi penyisihan logam Cr yang tertinggi yaitu 65,15% dengan kapasitas adsorpsi 0,00313 mg/g pada kecepatan alir influen 2 gpm/ft² dan ketinggian *bed* 85 cm. Efisiensi penyisihan logam Cr yang terendah didapatkan pada kecepatan alir influen 4 gpm/ft² dan ketinggian *bed* 65 cm sebesar 44,45% dengan kapasitas adsorpsi 0,0054 mg/g. Berdasarkan data hasil percobaan yang didapatkan, semakin besar kecepatan alir influen maka semakin rendah efisiensi penyisihan logam Cr. Semakin rendah ketinggian *bed* maka semakin rendah juga efisiensi penyisihan logam Cr yang didapatkan. Efisiensi penyisihan yang tertinggi diperoleh pada ketinggian *bed* yang lebih tinggi dan kecepatan alir influen yang lebih kecil. Hal ini disebabkan karena pada kondisi tersebut zona perpindahan massa lebih panjang sehingga waktu kontak antara adsorben dengan adsorbat semakin lama.

Berdasarkan Gambar 6, didapatkan bahwa nilai efisiensi penyisihan berbanding terbalik dengan kapasitas adsorpsi. Terjadinya penurunan kecepatan alir influen dan peningkatan ketinggian *bed* menghasilkan efisiensi penyisihan yang tinggi namun kapasitas adsorpsi kecil. Kecepatan alir influen yang kecil dan ketinggian *bed* yang tinggi menyebabkan waktu kontak antara adsorbat dan adsorben relatif lama sehingga waktu yang dibutuhkan adsorben untuk mencapai kondisi jenuh juga relatif lama. Adsorbat akan berikatan dengan baik pada permukaan adsorben karena waktu kontak antara adsorbat dan adsorben menjadi lebih lama. Hal ini

menghasilkan efisiensi penyisihan logam Cr relatif tinggi.



Gambar 6. Efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi total logam Cr pada kolom dengan adsorben batu apung di berbagai ketinggian *bed* dan kecepatan alir influen.

Pada ketinggian *bed* yang tinggi dan kecepatan alir influen yang kecil dihasilkan kapasitas adsorpsi relatif kecil. Hal ini dipengaruhi oleh banyaknya massa adsorben yang digunakan (X). Nilai X berbanding terbalik dengan kapasitas adsorpsi sesuai persamaan (4) sehingga pada kecepatan alir influen yang sama dengan bertambahnya massa adsorben menyebabkan nilai kapasitas adsorpsi yang dihasilkan menurun.

Hal ini didukung oleh hasil penelitian Simate dan Ndlovu (2015) dalam menyisihkan logam Cr, Co dan V menggunakan kolom adsorpsi. Hasil penelitian menyatakan bahwa peningkatan ketinggian *bed* akan meningkatkan pula efisiensi penyisihan, sedangkan pada kecepatan alir influen yang besar akan menurunkan nilai efisiensi penyisihan.

Berdasarkan hasil percobaan ini diperoleh kondisi optimum untuk penyisihan logam Cr

yaitu pada kecepatan alir influen 2 gpm/ft² dan ketinggian *bed* 85 cm yang menghasilkan efisiensi penyisihan 65,15% dan kapasitas adsorpsi sebesar 0,0031 mg/g. Pemakaian adsorben batu apung dapat lebih optimal dan waktu kontak juga lebih lama sehingga jumlah logam Cr yang teradsorpsi juga lebih banyak pada kondisi optimum ini.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil percobaan pemanfaatan batu apung sebagai adsorben pada kolom adsorpsi untuk menyisihkan logam Cr dari air tanah dapat disimpulkan bahwa kondisi optimum penyisihan logam Cr pada kolom adsorpsi yaitu pada kecepatan alir influen 2 gpm/ft² dan ketinggian *bed* 85 cm. Efisiensi penyisihan logam Cr adalah 65.15% dengan kapasitas adsorpsi sebesar 0.0031 mg/g. Hasil penelitian secara keseluruhan menunjukkan batu apung berpotensi dimanfaatkan sebagai adsorben dalam menyisihkan logam Cr dari air tanah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Andalas atas bantuan finansial (No. 59/UN16.09.D/PT.01.03/2023) untuk terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Acharyya, S., Das, A. dan Thaker, T.P. (2023) "Remediation processes of hexavalent chromium from groundwater: a short review," *AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(5), hal. 648–662. Tersedia pada: <https://doi.org/10.2166/aqua.2023.123>.
- Aksu, Z., Gönen, F. dan Demircan, Z. (2002) "Biosorption of chromium(VI) ions by Mowital®B30H resin immobilized activated sludge in a packed bed: comparison with granular activated carbon," *Process Biochemistry*, 38(2), hal. 175–186. Tersedia pada: [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(02\)00053-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00053-5).
- Asere, T.G., De Clercq, J., Verbeken, K., Tessema, D.A.T., Fufa, F., Stevens, C. V. dan Du Laing, G. (2017) "Uptake of arsenate by aluminum (hydr)oxide coated red scoria and pumice,"

- Applied Geochemistry*, 78, hal. 83–95. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.12.013>.
- Bhattacharya, P., Banerjee, P., Mallick, K., Ghosh, S., Majumdar, S., Mukhopadhyay, A. dan Bandyopadhyay, S. (2013) "Potential of biosorbent developed from fruit peel of *Trewia nudiflora* for removal of hexavalent chromium from synthetic and industrial effluent: Analyzing phytotoxicity in germinating *Vigna* seeds," *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 48(7), hal. 706–719. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1080/10934529.2013.744609>.
- Heidari, M., Moattar, F., Naseri, S., Samadi, M.T. dan Khorasani, N. (2011) "Evaluation of aluminum-coated pumice as a potential arsenic(V) adsorbent from water resources," *International Journal of Environmental Research*, 5(2), hal. 447–456.
- Hudawaty, F. (2017) *Aplikasi kolom adsorpsi menggunakan batu apung Sungai Pasak Pariaman sebagai adsorben untuk menyisihkan logam aluminium (Al), merkuri (Hg) dan seng (Zn) dari air tanah*. Universitas Andalas.
- Indah, S., Helard, D. dan Binuwara, A. (2018) "Studies on desorption and regeneration of natural pumice for iron removal from aqueous solution," *Water Science and Technology*, 2017(2), hal. 509–515. Tersedia pada: <https://doi.org/10.2166/wst.2018.177>.
- Indah, S., Helard, D., Edwin, T. dan Pratiwi, R. (2017) "Utilization of pumice from Sungai Pasak, West Sumatera, Indonesia as low-cost adsorbent in removal of manganese from aqueous solution," in *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, hal. 020072. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1063/1.4978145>.
- Indah, S., Helard, D. dan Hudawaty, F. (2019) "Column study of aluminum adsorption from groundwater by natural pumice," *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 9(5), hal. 1600. Tersedia pada: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.9.5.9455>.
- Indah, S., Helard, D., Marchelly, F. dan Putri, D.E. (2018) "Adsorption and regeneration of Indonesian natural pumice for total chromium removal from aqueous solution," *Indonesian Journal of Environmental Management and Sustainability*, 2, hal. 30–37.
- Kumar, U. dan Bandyopadhyay, M. (2006) "Sorption of cadmium from aqueous solution using pretreated rice husk," *Bioresource Technology*, 97(1), hal. 104–109. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.027>.
- Lim, A.P. dan Aris, A.Z. (2014) "Continuous fixed-bed column study and adsorption modeling: Removal of cadmium (II) and lead (II) ions in aqueous solution by dead calcareous skeletons," *Biochemical Engineering Journal*, 87, hal. 50–61. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2014.03.019>.
- Reynolds, T.D. dan Richards, P.A. (1996) *Unit operations and processes in environmental engineering*. 2nd Editio. California: PWS Publishing Company.
- Simate, G.S. dan Ndlovu, S. (2015) "The removal of heavy metals in a packed bed column using immobilized cassava peel waste biomass," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, hal. 635–643. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.03.031>.
- Suksabye, P., Thiravetyan, P. dan Nakbanpote, W. (2008) "Column study of chromium(VI) adsorption from electroplating industry by coconut coir pith," *Journal of Hazardous Materials*, 160(1), hal. 56–62. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.083>.
- Vijayaraghavan, K., Jegan, J., Palanivelu, K. dan Velan, M. (2004) "Removal of nickel(II) ions from aqueous solution using crab shell particles in a packed bed up-flow column," *Journal of Hazardous Materials*, 113(1–3), hal. 223–230. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.06.014>.
- Xu, X., Gao, B., Tan, X., Zhang, X., Yue, Q., Wang, Y. dan Li, Q. (2013) "Nitrate adsorption by stratified wheat straw resin in lab-scale columns," *Chemical Engineering Journal*, 226, hal. 1–6. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.04.033>.
- Yavuz, M., Gode, F., Pehlivan, E., Ozmert, S. dan Sharma, Y.C. (2008) "An economic removal of Cu²⁺ and Cr³⁺ on the new adsorbents: Pumice and polyacrylonitrile/pumice composite," *Chemical Engineering Journal*, 137(3), hal. 453–461. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.04.030>.